

Influence of curing regime on physical and mechanical properties of alkali-activated natural fibre fly ash mortars

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

DIPLOMARBEIT

Der Einfluss der Nachbehandlungstemperatur auf die physischen und mechanischen Eigenschaften der naturfaserverstärkten alkalisch-aktivierten Flugasche-Mörteln

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

von

Gergely Németh

Matr.Nr.: 01327717

unter der Anleitung von

Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. **Elemér Bölcskey**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ildikó Merta**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E207-01, A-1040 Wien

Ein Dank an meine Helfer, mit Liebe an meine Familie

Kurzfassung

Der Einfluss der Nachbehandlungstemperatur auf die physischen und mechanischen Eigenschaften der naturfaserverstärkten alkalisch-aktivierten Flugasche-Mörteln

Heutzutage wird ein großer Akzent auf die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes bei der Herstellung der Baustoffe gelegt. Um den CO₂-Ausstoß zu vermindern, suchen Forscher weltweit nach Rezepten für einen umweltverträglicheren Beton. Das aktuelle Forschungsprojekt zeigt Möglichkeiten im Bereich der Betontechnologie auf, wie der Portlandzement durch alternative Bindemittel zu ersetzen wäre. Um jedoch ein alternatives Bindemittel in – somit einem alternativen – Beton verwenden zu können, sind detaillierte und tiefgehende Untersuchungen notwendig. Bei diesem Forschungsprojekt wurde der Einfluss der Hanffaser und der Nachbehandlungstemperatur auf die Eigenschaften des alkalisch-aktivierten Mörtels aus Flugasche durch verschiedene Prüfverfahren ausgewertet. Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass die faserverstärkten Geopolymere immer eine größere Porosität, eine größere kapillare und vollständige Wasseraufnahme und eine größere Bruchenergie haben, als die Geopolymere ohne Faserverstärkung. Die Messergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung und der Druckfestigkeitsprüfung zeigten, dass der positive Einfluss der Faserverstärkung nicht eindeutig ist. In Bezug auf die Nachbehandlungstemperatur kann die folgende Aussage getroffen werden: wenn die Nachbehandlungstemperatur steigt, erhöhen sich die vollständige Wasseraufnahme, die Porosität, die Druckfestigkeit, die Bruchenergie und die Biegezugfestigkeit aber es vermindert sich die kapillare Wasseraufnahme.

Abstract

Influence of curing regime on physical and mechanical properties of alkali-activated natural fibre fly ash mortars

Nowadays, the reducing of CO₂-emissions in the manufacture of building materials are strongly emphasized. To reduce CO₂-emissions, scientist research for recipes of more environmentally friendly concrete around the world. The current research project shows possibilities in the field of concrete technology to replace Portland cement with alternative binders. However, detailed and in-depth researches are necessary to use an alternative binder. In this research project the influence of curing regime on physical and mechanical properties of alkali-activated natural fiber fly ash mortars was evaluated. In general, it has been found that the fiber reinforced geopolymers always have higher porosity, higher capillary and total water absorption, and greater fracture energy than the non-fiber reinforced geopolymers. The results of the bending flexural- and compressive tests showed that the positive influence of the fibre reinforcement of these is not obvious. About the curing temperature the following statements can be made: if the curing temperature increases, the porosity the total water uptake, the compressive strength, the fracture energy and the flexural tensile strength increases too.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
1.1.	Hintergrund und Motivation	5
1.2.	Zielsetzung.....	8
2.	Stand der Forschung.....	9
2.1.	Alkalisch-aktivierte Bindemittel und ihr Reaktionsmechanismus	9
2.1.1.	Flugasche	13
2.1.2.	Alkalisch-aktivierte Systeme auf Basis von Flugasche, Geopolymerisation	15
2.1.3.	Physikalische und mechanische Eigenschaften der AAB-Mörtel/Betone	17
2.2.	Zweck und Mechanismus der Faserverstärkung in AAB-Mörteln/Betonen.....	28
2.2.1.	Mechanische Eigenschaften der faserverstärkten AAB-Betone.....	31
3.	Experimenteller Teil.....	38
3.1.	Materialien und Versuchskörper	38
3.2.	Prüfungsarten – Prüfungsmatrix.....	40
3.3.	Herstellung der Versuchskörper, Mischvorgang	42
3.4.	Prüfverfahren - Allgemeine Beschreibung, grundlegende Informationen	46
4.	Resultate und Diskussion.....	55
4.1.	Porosität.....	55
4.2.	Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung	58
4.3.	Kapillare Wasseraufnahme.....	60
4.4.	Trockenrohddichte, Porosität und vollständige Wasseraufnahme	62
4.5.	Trockenrohddichte.....	63
4.6.	PH-Wert	65
4.7.	Druckfestigkeit.....	67
4.8.	Biegezugfestigkeit.....	70
4.9.	Bruchenergie.....	74
5.	Zusammenfassende Schlussfolgerungen.....	76
6.	Beilagen	79
7.	Abbildungsverzeichnis	123
8.	Quellenverzeichnis.....	126

1. Einleitung

1.1. Hintergrund und Motivation

Eine sichere Zukunft kann man nur auf Basis der Nachhaltigkeit bauen, infolgedessen setzen sich immer mehr Projekte das „klimaneutrale Bauen“ zum Ziel. Heutzutage wird ein großer Akzent auf die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes bei der Herstellung der Baustoffe gelegt. Um den klima- und energiepolitischen Zielen der Europäischen Union zu entsprechen, ist die Forschung der Herstellung der Baustoffe mit reduzierter CO₂-Emission unerlässlich.

Die Herstellung des Portlandzementes, des in der Bauindustrie am häufigsten verwendeten Bindemittels, ist nämlich sehr energieintensiv und mit hoher CO₂-Emission verbunden. Um den CO₂-Ausstoß zu vermindern, suchen Forscher weltweit nach Rezepten für einen umweltverträglicheren Beton. Das aktuelle Forschungsprojekt zeigt Möglichkeiten im Bereich der Betontechnologie auf, wie der Portlandzement durch alternative Bindemittel zu ersetzen wäre. Um jedoch ein alternatives Bindemittel in – somit einem alternativen – Beton verwenden zu können, sind detaillierte und tiefgehende Untersuchungen notwendig. Diese Arbeit führt in diesem Sinne Experimente durch. Sie nimmt konkret die naturfaserverstärkten alkalisch-aktivierten Mörtelprismen auf Basis von Flugasche unter die Lupe in Bezug auf ihre Verwendbarkeit. Bei diesem Forschungsprojekt wird also ausgewertet, wie die Nachbehandlungstemperatur die physischen und mechanischen Eigenschaften der erwähnten naturfaserverstärkten, alternativen Mörtelprismen auf Basis von Flugasche beeinflusst. Die Ergebnisse dieses Projektes sollen in weiterer Folge einen Beitrag zu den Forschungen leisten, die sich damit befassen, wie der Energieverbrauch und so letztendlich der ökologische Fußabdruck bei der Herstellung des Betons vermindert werden kann.

Aus Sicht der Nachhaltigkeit hat der traditionelle Portlandzement bedeutende Nachteile. Einerseits zählt zu seinen Nachteilen die Tatsache, dass bei der Produktion von 1 Tonne Zement etwa 1 Tonne CO₂ in die Luft gelangt und dass der steigende Verbrauch

dieses Zements signifikant zum Treibhauseffekt beiträgt, welcher eine der Hauptursachen der Klimaveränderung ist. Andererseits braucht jede Tonne dieses Kalk-Zementes ungefähr 1,5 Tonnen Rohstoff bei der Herstellung.(1) Des Weiteren muss noch der früher erwähnte Umstand in Betracht gezogen werden, nämlich dass der Kalkstein der Hauptbestandteil des am häufigsten verwendeten Bindemittels, des Portlandzementes ist und aus diesem Grund kann dessen chronischer Mangel schon in 25-50 Jahren eintreten. Zusätzlich zu den oben angemerkten Nachteilen weist die Produktion des Zementes einen hohen Energieverbrauch auf. Nicht zuletzt führt der Bergbau der Kalksteinberge zur Vernichtung des unschätzbaren kulturhistorischen, natürlichen und ökologischen Wertes. Aus den oben skizzierten Nachteilen folgt, dass die Ersetzung des Portlandzementes auf umweltfreundliches und kostengünstiges Bindemittel eine wesentliche Forschungsaufgabe unserer Zeit ist. (2) Unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit wird die Erforschung von alternativen Bindemitteln und Zementersatzstoffen mit ausgeprägten reaktiven Eigenschaften verstärkt vorangetrieben.

Zu den alternativen Bindemitteln zählen die seit längerem bekannten Betonzusatzstoffe wie zum Beispiel Flugasche, Silikastaub, Hüttensand und auch weitere aufbereitete Sekundärrohstoffe bzw. Reststoffe, die eine zunehmend wichtige und dem Gedanken des Stoffkreislaufs entsprechende Rolle für den Betonbau spielen. In diesem Zusammenhang werden in den vergangenen Jahren immer wieder alkalisch-aktivierte Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel genannt. „Alternative Bindemittel, wie alkalisch-aktivierte Bindemittel (AAB) und Geopolymer-Bindemittel (GP), verzichten vollständig auf Portlandzementklinker, da ein Abbinden der Sekundärrohstoffe durch die Zugabe einer hochalkalischen Lösung direkt aktiviert werden kann.“(3) „Für die alkalische Aktivierung eignet sich eine Vielzahl von mineralischen Ausgangsstoffen. Als Hauptbestandteile werden neben calcinierten Kaolinen (Metakaoline) vorwiegend Sekundärrohstoffe aus der Kohleverbrennung (Flugaschen) oder der Stahlherstellung (Hüttensande) eingesetzt, da diese hauptsächlich aus amorphem SiO_2 und Al_2O_3 bestehen. Andere Reststoffe, die beispielsweise bei der Verbrennung von Reishülsen (Reishülsenasche), in der Siliziummetall- oder Siliziummetalllegierungs-Produktion (Silikastaub) oder bei der

Aluminiumgewinnung (Rotschlämme) anfallen, bestehen zum Großteil aus nur einem der benötigten Hauptoxide und werden deshalb häufig in Kombination mit einem der erstgenannten Ausgangsstoffe kombiniert.“(4) Alternative Bindemittel weisen eine andere Struktur und einen anderen Reaktionsmechanismus als der Portlandzement auf, dank dieser Eigenschaften verfügen Betone auf Basis von AAB und GP über folgende hervorzuhobende technische Eigenschaften: Hochtemperaturbeständigkeit, Raumbeständigkeit, eine geringere Permeabilität, höhere Festigkeiten und verbesserte Dauerhaftigkeitseigenschaften, vor allem einen erhöhten Widerstand gegen aggressive Medien, beispielsweise gegen organische Säuren oder Sulfate. (5)

Jedoch, wie oben angemerkt wurde, zeichnet sich der AAB-Beton durch seine hervorragende Druckfestigkeit aus, dennoch weist er eine niedrige Zugfestigkeit und eine geringe Dehnfähigkeit auf. (6) Der AAB-Beton wird aus diesem Grund mit zugfesteren Baustoffen kombiniert, um diese Nachteile zu kompensieren. Als eine alternative, weniger aufwendigere Lösung bieten sich natürliche Fasern, damit die Umweltfreundlichkeit des in dieser Arbeit diskutierten AAB-Mörtels/Betons nicht nur durch die schon erwähnten Sekundärrohstoffe gesteigert wird. Die Produktionsenergie dieser Fasern kann 50-mal niedriger sein, als die Produktionsenergie der synthetischen Fasern.(7) Die Anwendung von diesen Fasern hat noch weitere Vorteile, nämlich neben der Erhöhung der Zugfestigkeit und der Dehnfähigkeit des Betons, reduzieren sie dessen Rissbildung und erhöhen die Energieabsorption. Somit kann die Dauerhaftigkeit des Betons verbessert werden.

Das Verhalten der Naturfasern in alkalischer Umgebung (Portlandzementbeton) wurde bereits in mehreren Experimenten (siehe: (8),(9),(10),(11)) tiefgehend erforscht. Aus diesen Untersuchungen stellte sich heraus, dass die im PZ-Beton präsente alkalische Umgebung die Struktur der Naturfasern beeinträchtigt. Diesem schädlichen Einfluss kann vor allem durch Matrixmodifikation oder Faserbehandlung vorgebeugt werden.(12) Matrixmodifikation bedeutet die Verminderung des im Beton anwesenden Calciumhydroxid-Gehalts, die zum Beispiel durch Verwendung der Flugasche erreicht werden kann. Aus dieser positiven Eigenschaft der Flugasche wird beim AAB-Beton Nutzen gezogen. Des Weiteren gibt es mehrere Forschungen (siehe: (13),(14),(15),(16),(17),(18)),

wo der AAB-Beton mit natürlicher und künstlicher Faserverstärkung (Baumwolle, Kohlenstofffasern, Stahlfasern, Polyvinylalkohol usw.) untersucht wird. Der Funktionsmechanismus bezüglich der Festigkeit/Dauerhaftigkeit einer bestimmten Naturfaser, nämlich der Hanffaser im Beton auf Basis von alkalisch-aktivierter Flugasche wurde aber bisher nicht detailliert erforscht, deshalb wird in dieser Arbeit eben auf das Verhalten der Hanffaser näher eingegangen.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des hanffaserverstärkten alkalisch-aktivierten Mörtels/Betons aufzudecken und bezüglich ihrer Verwendbarkeit auszuwerten und somit in dem bei diesem Beton verwendeten alkalisch-aktivierten Bindemittel ein mögliches, umweltfreundliches Ersatzmittel für den Portlandzement zu finden. Alkalisch-aktivierte Bindemittel weisen gegenüber zementbasierten Bindemitteln zahlreiche materialtechnische Vorteile auf. Trotzdem kommen Mörtel und Betone mit alkalisch-aktivierten Bindemitteln in der Praxis derzeit nur als Nischenprodukte für spezielle Anwendungen zum Einsatz.

Um das volle Potential von alkalisch-aktivierten Bindemitteln ausschöpfen zu können, ist die umfassende Kenntnis ihrer Eigenschaften notwendig. Zur Realisierung der Zielsetzung wird der Einfluss der Hanffaser und der Nachbehandlungstemperatur auf die Eigenschaften des alkalisch-aktivierten Mörtels aus Flugasche durch verschiedene Prüfverfahren ausgewertet. Aufgrund dieser Experimente werden die mechanischen und physikalischen Eigenschaften dieses alternativen Betons aufgedeckt.

2. Stand der Forschung

Aufgrund der Komplexität der alkalisch-aktivierten Bindemittel werden zunächst die wesentlichen theoretischen Grundlagen der alkalisch-aktivierten Bindemittel und des in dieser Arbeit verwendeten Ausgangsstoffes, der Flugasche erläutert. Danach wird auf den Reaktionsmechanismus, auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Mörtels/Betons auf Basis von Flugasche eingegangen. In dem zweiten Teil dieses Hauptkapitels werden das Verhalten des AAB-Mörtels/Betons mit unterschiedlicher Faserverstärkung und dessen physikalische und mechanische Eigenschaften diskutiert.

2.1. Alkalisch-aktivierte Bindemittel und ihr Reaktionsmechanismus

Die Forschung der alkalisch-aktivierten Bindemitteln kam in den letzten 30 Jahren in Schwung aber ihre Herkunft kann auf frühere Zeit, ganz bis zur Zeit der ehemaligen Sowjetunion (1950-er Jahre) zurückgeführt werden. V.D. Gluchovski untersuchte (unter dem Begriff „Soil Cements“), wie thermisch aktivierte Tone, Aschen, natürliche Puzzolane und auch Schlacken als latenthyaulische Bindemittel verwendet werden könnten. Hierbei wird allgemein von einer alkalischen Aktivierung als Verfestigungsreaktion gesprochen.(19) Danach stand 25 Jahre lang die alkalische Aktivierung von Bindemitteln aber deutlich im Schatten der zementgebundenen Baustoffe. Im Jahre 1975 benutzte der französische Forscher, Joseph Davidovits die Geopolymere (Synonym für AAB-Betone) als Naturbeton. Zu dieser Zeit wurde dieser Begriff für die Reaktion von Metakaolinen in alkalischen Medien unter Bildung alumosilikatischer Polymere verwendet. Durch den Zusatz „Geo“ sollte die Nähe zu geologischen Materialien, also natürlichen Gesteinen und Mineralien, verdeutlicht werden.(20)

Aufgrund der Vielzahl an mineralischen Ausgangsstoffen für die alkalische Aktivierung beeinflusst deren Wahl und die des Aktivators maßgeblich den Phasenbestand der Reaktionsprodukte und damit auch die finalen Betoneigenschaften so, dass es zwingend notwendig war, klare Definitionen und Abgrenzungen der Stoffsysteme untereinander zu treffen. Die Forschergruppe Prof. Frank Dehn, Annemarie Herrmann, Andreas König und

Jianxin Ma schlagen daher folgende Klassifizierung im Vergleich zu konventionellen Bindemitteln vor:

- Normalzement (CEM I bis CEM V),
- Ca-arme alkalisch-aktivierte Bindemittel und Geopolymere sowie
- Ca-reiche alkalisch-aktivierte Bindemittel. (21)

In der Abbildung 1 wird eine Klassifizierung hydraulischer Bindemittel (Normalzement), alkalisch-aktivierte Bindemittel (AAB) sowie Geopolymere (GP) in Abhängigkeit der festigkeitsbildenden Reaktionsprodukte vorgestellt.

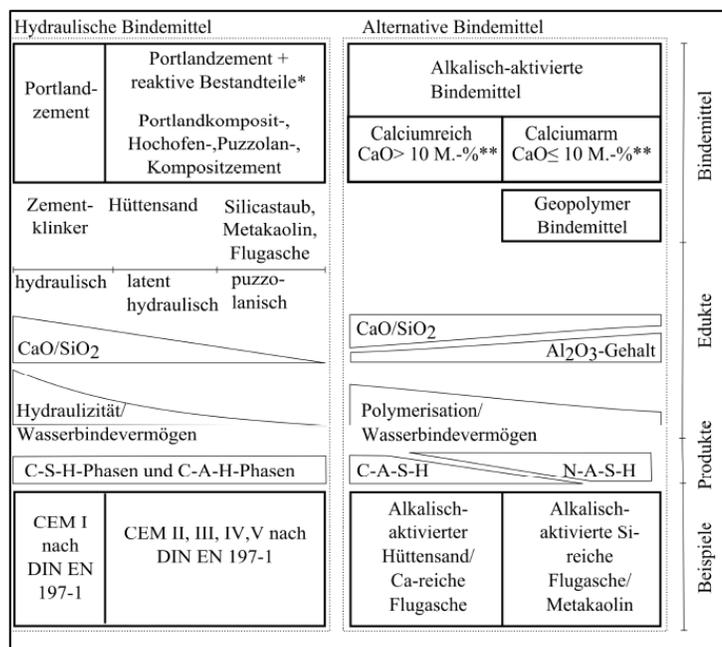


Abbildung 1: Klassifikation alkalisch-aktivierter Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel sowie Abgrenzung zu hydraulischen Bindemitteln auf Grundlage des Reaktionsmechanismus (nach (22))

Hydraulische Bindemittel (Normalzement)

Hydraulische Bindemittel und alternative Bindemittel weisen unterschiedlichen Reaktionsmechanismus auf. „Ein hydraulisches Bindemittel ist ein anorganischer, nicht metallischer, fein gemahlener Stoff, der nach dem Anmachen mit Wasser infolge chemischer Reaktionen mit dem Anmachwasser selbständig erstarrt und erhärtet und nach

dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.“(23) „Die Zemente werden in Abhängigkeit der Hauptbestandteile gemäß ÖNORM EN 197-1 kategorisiert. In reinen Portlandzementen (CEM I) wird als Hauptbestandteil ausschließlich Portlandzementklinker und in allen anderen Zementen (CEM II -V) eine Mischung aus Portlandzementklinker und weiteren reaktiven und/oder inaktiven Hauptbestandteilen eingesetzt.“ Eine detaillierte Beschreibung des Reaktionsmechanismus vom hydraulischen Bindemittel wurde von den Herrmann et al. in der Zeitschrift (siehe: (24)) veröffentlicht.

Ca-arme alkalisch -aktivierte Bindemittel und Geopolymere

Im Gegensatz zum hydraulischen Bindemittel ist für die alkalische Aktivierung die beim hydraulischen Bindemittel genannte Klassifizierung nicht zielführend, da für den Reaktionsmechanismus vorwiegend der durch hochalkalische Lösungen initiierte komplexe Lösungsprozess relevant ist. Der Lösungsprozess wird dabei vornehmlich vom Phasenbestand, der chemischen Zusammensetzung und der Granulometrie der Ausgangsstoffe beeinflusst. (25) Die Chemie der Geopolymerverbindungen funktioniert ohne gebundenes Wasser.

Im Zusammenhang mit den festigkeitsbildenden Reaktionsprodukten ist es wichtig zu betonen, dass der Ca-Gehalt des Ausgangsstoffes eine wesentliche Rolle spielt. Im Gegensatz zum hydraulischen Erstarren von Zementen sind bei Ca-armen alkalisch-aktivierten Bindemitteln (also mit niedrigem Ca- Gehalt) Si- und Al-reiche, leicht lösliche Ausgangskomponente erforderlich. Die konkrete chemische Zusammensetzung eines solchen Ca-armen alkalisch-aktivierten Bindemittels wird durch das in unserem Forschungsprojekt wichtiges Beispiel, nämlich durch die kieselsäurereiche Flugasche dargestellt, die in dem Unterkapitel 2.1.1. detaillierter diskutiert wird.

Die Abbindereaktion der Ca-armen alkalisch -aktivierten Bindemittel und Geopolymere teilt sich in drei Hauptphasen:

- (1) Auflösungsprozess
- (2) Reorganisation
- (3) Entstehen eines dreidimensionalen alumosilikatischen Polymernetzwerkes, also Geopolymer (26)

Diese Abbindereaktion wird in dem Kapitel 2.1.2. detaillierter erläutert.

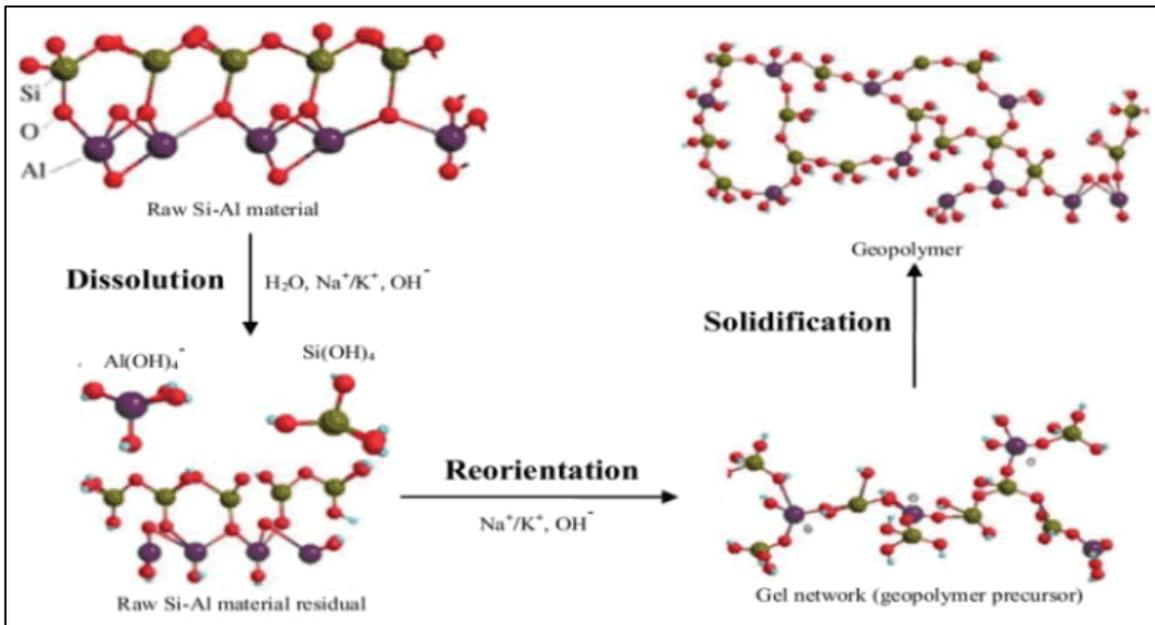
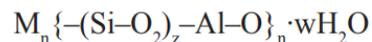


Abbildung 2: Abbindereaktion von alkalisch-aktivierten Ca-armen Bindemitteln (27)

Aufgrund des nicht hydraulischen Reaktionsmechanismus wird für derartige AAB auch der von Davidovits, geprägte Begriff des Geopolymers (GP) häufig als Synonym verwendet. Gemäß Davidovits kann die Zusammensetzung des Geopolymers durch folgende Formel charakterisiert werden:



„M“ bezeichnet die Kationen (K^+ , Na^+ oder Ca^{2+}), das Symbol „-“ bedeutet die „Verbindungen“, „n“ ist der Polymerisationsgrad, „w“ zeigt die Anzahl der verbindenden Wassermoleküle, und „z“ kann 1, 2 oder 3 sein. (28)

Ca-reiche alkalisch-aktivierte Bindemittel

Wie es früher erwähnt wurde, erhöht sich der Ca-Gehalt des Ausgangsstoffes in alkalisch-aktivierten Bindemitteln, so hat dies Einfluss auf die festigkeitsbildenden Reaktionsprodukte. In diesen Bindemitteln „werden die Ausgangsstoffe bei Kontakt mit der alkalischen Lösung zunächst partiell gelöst, wobei die Auflösungsrate u.a. vom Ordnungszustand (kristallin, mikrokristallin, amorph), der spez. Oberfläche, der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur und dem Sättigungsgrad der Lösung abhängig ist“. (29) In Ca-reichen alkalisch-aktivierten Bindemitteln liegen CSH-Phasen und aluminosilicatische Polymernetzwerke parallel vor. Ein konkretes Beispiel für Ca-reiches alkalisch-aktiviertes Bindemittel wird durch die kalkreiche Flugasche dargestellt, die in dem Unterkapitel 2.1.1. detaillierter behandelt wird.

2.1.1. Flugasche

Flugasche ist ein Sekundärrohstoff, der in großen Mengen in Wärmekraftwerken und Müllverbrennungsanlagen entsteht. (Abbildung 3) In einer Publikation der Europäischen Kommission von 2015 wurde veröffentlicht, dass die Flugasche, die durch die Kohleverbrennung in Wärmekraftwerken entsteht, wird auf der Mülldeponie gelagert. Davon produziert die EU zwei Millionen Tonnen pro Jahr. (30) Aus diesem Grunde befassen sich immer mehr Forschungen mit weiteren Möglichkeiten der Ausnutzung von Kraftwerk-Abfallaschen und mit der Entwicklung neuer Stoffe auf Basis alkalisch-aktivierter Aschen.

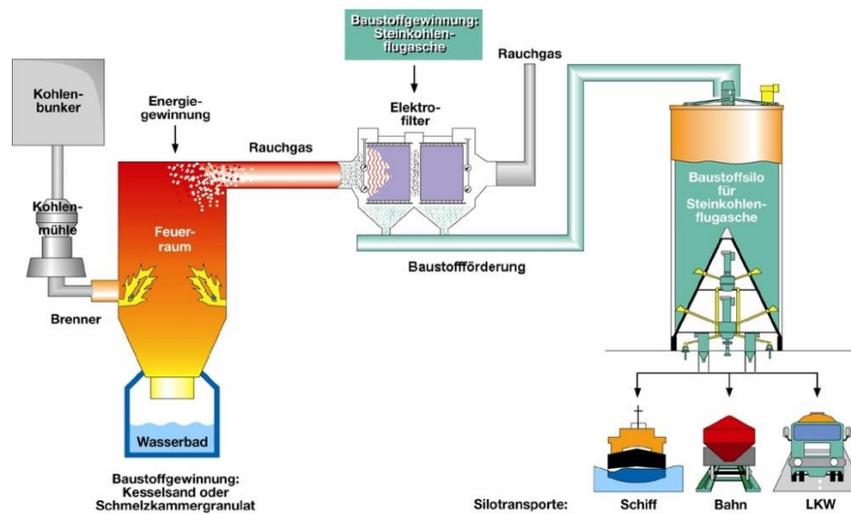


Abbildung 3: Entstehung von Flugasche in Kraftwerken

Bei der Energieerzeugung wird feingemahlener Kohlenstaub in Heizkraftwerken verbrannt. „Nicht brennbare mineralische Bestandteile, die als natürliches Begleitgestein in der Steinkohle enthalten sind, schmelzen daraufhin je nach Feuerungstemperatur mehr oder weniger vollständig auf.“ Diese sogenannte Flugasche wird auf Grund seiner hohen Dispersität mit den Rauchgasen ausgetragen und sie wird in Elektrofiltern zur Abgasreinigung von Kraftwerken abgeschieden. „Dabei kühlen sie sehr schnell ab und erstarren als kleine glasige Kügelchen“ (Abbildung 4). (31)

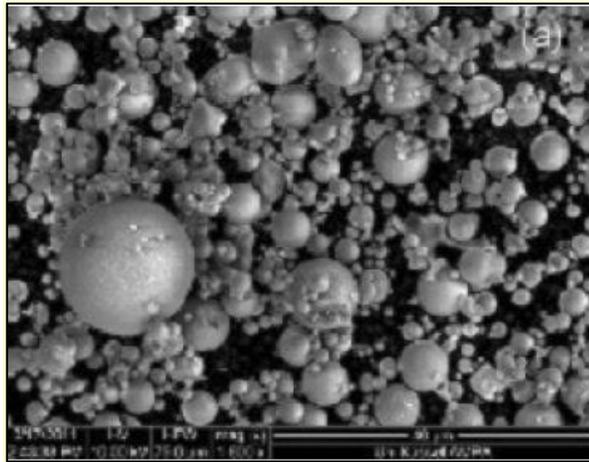


Abbildung 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: kugelige Flugasche (32)

Die Art der Flugasche hängt stark von der im Kohlekraftwerk verwendeten Kohle und dem Brennprozess ab. In der europäischen Norm ÖNORM EN 197-1 (33) werden die Flugaschen in zwei Gruppen geteilt: kieselsäurereiche Flugaschen und kalkreiche Flugaschen. „Erstere weist puzzolanische Eigenschaften auf; letztere kann zusätzlich hydraulische Eigenschaften aufweisen.“ (34)

- Kieselsäurereiche Flugasche (V)

Kieselsäurereiche Flugaschen entstehen beispielsweise meist bei der Verfeuerung von Stein- oder Kokskohle. Diese Flugasche ist „ein feinkörniger Staub, hauptsächlich aus kugeligen Partikeln mit puzzolanischen Eigenschaften. Sie besteht im Wesentlichen aus reaktionsfähigem Siliciumdioxid (SiO_2) und Aluminiumoxid (Al_2O_3). Der Rest enthält Eisenoxid (Fe_2O_3) und andere Verbindungen.“ (35)

- Kalkreiche Flugasche (W)

Kalkreiche Flugasche ist meist ein Produkt der Braunkohleverfeuerung. Diese Flugasche ist „ein feinkörniger Staub mit hydraulischen und/oder puzzolanischen Eigenschaften. Sie besteht im Wesentlichen aus reaktionsfähigem Calciumoxid (CaO), reaktionsfähigem Siliciumdioxid (SiO₂) und Aluminiumoxid (Al₂O₃). Der Rest enthält Eisenoxid (Fe₂O₃) und andere Verbindungen.“ (36)

Das Dreistoffdiagramm (Abbildung 5) stellt eine Übersicht der oben genannten Hauptoxidzusammensetzungen (SiO₂, CaO und Al₂O₃+ Fe₂O₃) verschiedener Ausgangsstoffe für die Herstellung von Zementen, AAB oder GP dar. Die eingetragenen Datenpunkte zeigen die chemischen Zusammensetzungen der kieselsäure- und kalkreichen Flugaschen exemplarisch.

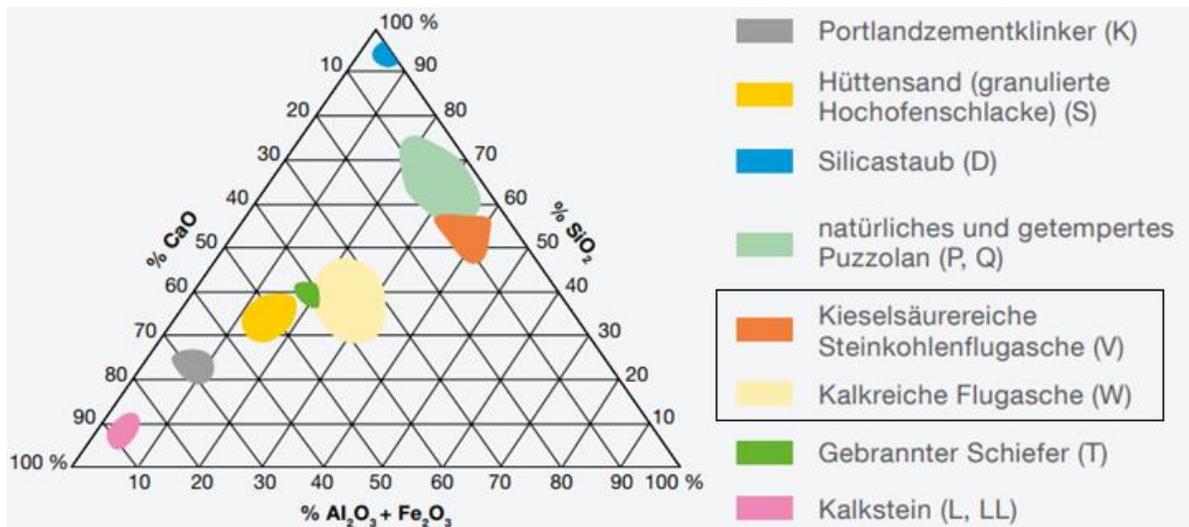


Abbildung 5: Hauptoxidzusammensetzungen verschiedener Ausgangsstoffe – Chemische Zusammensetzungen der kieselsäure- und kalkreichen Flugaschen (37)

2.1.2. Alkalischem-aktivierte Systeme auf Basis von Flugasche, Geopolymerisation

Alkalischem-aktivierte Systeme setzen sich aus zwei Komponenten zusammen: aus einem reaktiven pulverförmigen Feststoff (zum Beispiel Flugasche), der im Idealfall hauptsächlich aus amorphem SiO₂ und Al₂O₃ besteht und aus einer alkalischen Aktivatorlösung. Für alkalischem-aktivierte Systeme wird heutzutage die Flugasche, als reaktiver Feststoff häufig verwendet, weil dieses Bindemittel leicht erreichbar und gut

einarbeitbar ist. Ein weiterer großer Vorteil der Flugaschenpartikel ist ihre Kugelform, „da sie die Konsistenz von Bindemittelleim, der aus den reaktiven Feststoffen und der alkalischen Lösung besteht, verbessert und deshalb weniger Aktivatorlösung, als andere Bindemittel benötigt wird“. (38) Die Festigkeitsbildung der alkalisch-aktivierten Systeme werden mit dem Begriff „Geopolymerisation“ beschrieben. Geopolymerisation ist ein komplexer Prozess, der von einer exothermen Produktion begleitet wird. Wie im Kapitel 2.1. angemerkt wurde, hat die Geopolymerisation 3 Hauptphasen, die im Folgenden dargestellt werden.

Um die Flugasche alkalisch zu aktivieren, benötigt sie eine intensive Anregung, sodass eine höhere Konzentration von Alkalihydroxid- oder Alkalisilikatlösungen (Na_2SiO_3 , NaOH , KOH , K_2SiO_3) verwendet werden muss. Während der ersten Phase werden die amorphen Bestandteile des reaktiven Feststoffs durch die Zugabe der oben genannten Lösung gelöst. Während dieses Löseprozess werden die Kieselsäure, das Aluminiumoxid oder die Alumosilikate in der Flugasche hydrolysiert, so werden deren $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ oder $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-$ Bindungen abgebrochen und damit entstehen aktive Al^{3+} - und Si^{4+} - Spezies. (39)

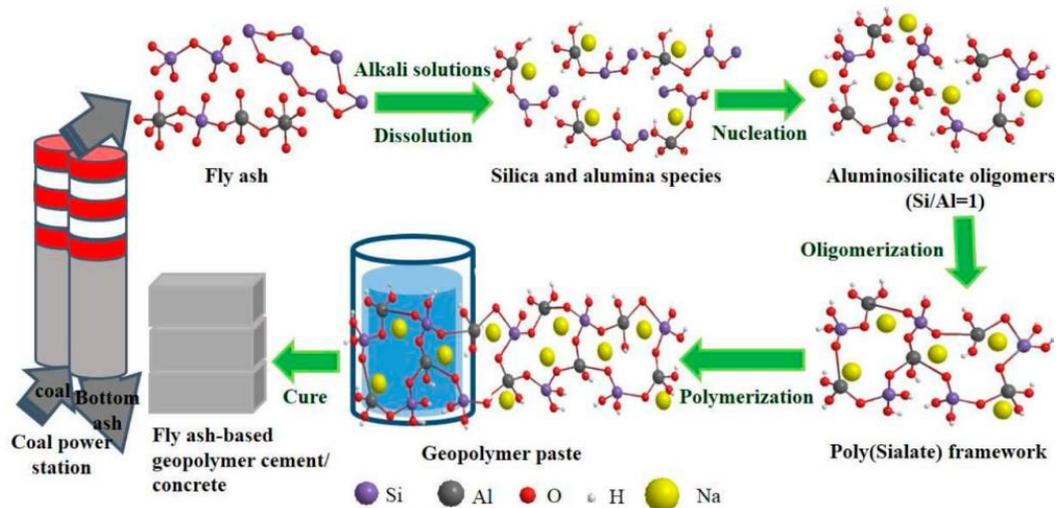


Abbildung 6: Geopolymerisation von alkalisch-aktivierten Flugasche (40)

Dann folgt die zweite Phase, die Reorganisation, da diese Spezies in Oligomere diffundieren. Danach bilden die Oligomere durch Kondensation viele Netzwerke während der Oligomerisation in wässriger Phase. (41) Das so entstehende erhärtete Alumosilikatnetzwerk setzt sich aus den SiO_4^{4-} - und AlO_4^{5-} - Tetraedern zusammen, die über

Sauerstoffatome miteinander verknüpft sind. Während der dritten Phase gleichen die Kationen K^+ oder Na^+ die negative Ladung der Tetraeder aus und werden daher ins dreidimensionale Netzwerk eingebunden. Im Vergleich zu der Hydratation des Zementes wird bei der Geopolymerisation nur ein geringer Teil des Wassers aus der Aktivatorlösung chemisch in das Netzwerk eingebunden. (42)

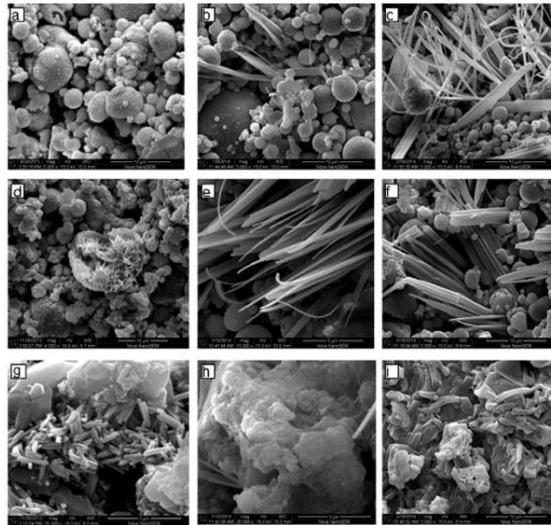


Abbildung 7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Geopolymer auf Basis von Flugasche (43)

2.1.3. Physikalische und mechanische Eigenschaften der AAB-Mörtel/Betone

Die Alumosilicat-Quelle, die Alkali-Quelle, die Herstellungs- und Nachbehandlungsbedingungen sind von entscheidender Rolle für die Nano- bzw. Mikrostruktur der Reaktionsprodukte von alkalisch-aktivierten Bindemitteln. Das Zusammenspiel dieser verschiedenen Einflussfaktoren hat eine große Bedeutung bezüglich der physikalischen und mechanischen Eigenschaften der AAB-Mörtel/Betone. Zu den besonderen Materialeigenschaften des erhärteten Geopolymers (AAB-Mörtel/Beton) gehören der hohe chemische Widerstand – insbesondere gegenüber Säuren – die stark ausgeprägte Hitze- und Brandbeständigkeit, die fein verteilten Mikroporen und wenige Kapillarporen, sowie die schnelle Festigkeitsentwicklung.

Chemischer Widerstand (XA)

Aus Sicht der Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Betons ist sein Widerstand gegen chemisch aggressive Umgebung eine wesentliche Frage. Die häufigsten chemischen Angriffe sind die Säuren (zum Beispiel Salzsäure, Schwefelsäure, Salpetersäure), die im Wasser gelegentlich vorkommende austauschfähige Salze, weiches Wasser sowie organische Fette, Öle und eindringende Sulfate. (44) Die Versuche zur chemischen Beständigkeit von Mörtelprismen ergaben, dass Geopolymermörtel einen wesentlich höheren Widerstand gegenüber Säuren als Zementmörtel aufweisen. Ähnlich wie bei normalzementgebundenen (PZ-) Betonen (als auch Mörteln) wird bei AAB-Betonen der Widerstand gegen chemische Agenzien von der chemischen Interaktion mit den Festphasen, sowie von der Porenlösung und vor der Porosität beeinflusst. (45) Aber diese Interaktion unterscheidet sich grundlegend voneinander bei den oben genannten zwei Arten von Betonen.

Bei PZ-Betonen (mit hohem Calciumhydroxid-Gehalt, siehe: Abbildung 5) können verschiedene chemische Verbindungen mit den Bestandteilen des Zementsteins reagieren. (Abbildung 8). In einem zementbasierten Werkstoff löst sich bei einem Säureangriff die Zementsteinmatrix, da das Material decalciniert. Decalcination ist der Zerfall oder die Verschlechterung des hydratisierten Zements durch das Lösen und Auslaugen der Calciumionen aus $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und den Calciumsilikathydratphasen. Infolgedessen lässt sich ein sehr hoher Widerstand gegen Sulfate und Säure bei den Ca-armen AAB-Betonen mit den geringen Ca-Anteilen (GP) erklären. (46)

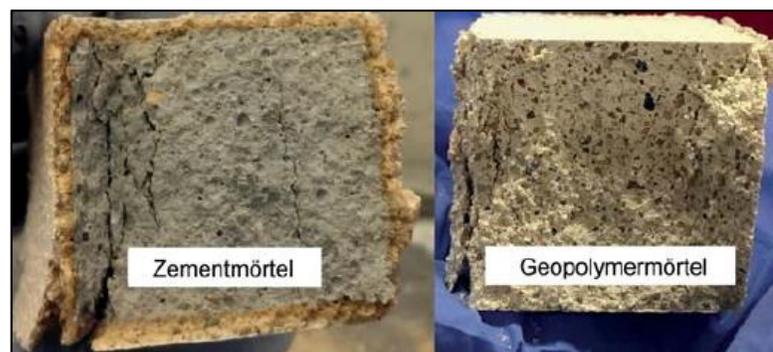


Abbildung 8: Probekörper nach Säurelagerung und Druckfestigkeitsermittlung (47)

E-Modul

Der Elastizitätsmodul ist ein Materialkennwert aus der Werkstofftechnik, der bei linear-elastischem Verhalten den proportionalen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers beschreibt. Der Elastizitätsmodul von alkalisch-aktivierten Betonen ist bei identischer Nachbehandlung generell geringer als bei normalzementgebundenen Betonen mit vergleichbaren Druckfestigkeiten. Aufgrund der Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit sind die aktuelle Vorhersagemodelle (z.B. DIN EN 1992-1-1) auf AAB-Betone prinzipiell übertragbar. Das Versagensverhalten Ca-reicher AAB-Betone unter Druckbeanspruchung zeichnet sich durch ein anfängliches linear-elastisches Verhalten aus, was in Folge der Laststeigerung durch ein duktileres Materialverhalten bis zum Bruch abgelöst wird. Für Ca-armere AAB-Betone ist das spröde Verhalten, ähnlich wie bei hochfesten Betonen bezeichnend. Die Arbeitslinie folgt bis zum Bruch einem linear-elastischen Pfad. Im Gegensatz zu hochfesten Betonen ist dieser Bruch bei den Ca-armen AAB-Betonen bei geringen Festigkeiten erkennbar. (48)

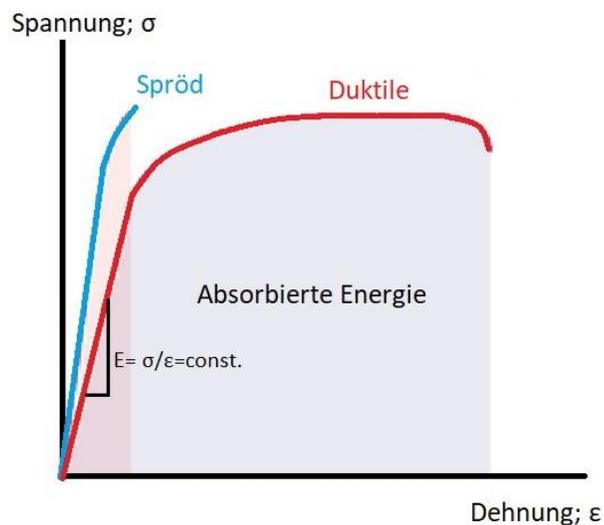


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die Forschungsarbeit von den König et al. (49) kann die obigen Aussagen für Ca-armen AAB-Betonen unterstützen. In dieser Forschung wurde der E-Modul von alkalisch-aktivierten Betonen mit Flugasche unter verschiedenen Bedingungen im Vergleich zu Normalbetonen im 28 Tage-Alter untersucht (siehe: Abbildung 10.). Es wurden die Schlussfolgerungen bezüglich des E-Moduls gezogen, dass die untersuchten alkalisch-aktivierten Betonen generell einen geringeren E-Modul als Normalbetone mit vergleichbaren Druckfestigkeiten haben. (Abbildung 10). Der Austausch von Flugasche durch Hüttensand oder die thermische Nachbehandlung führten zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit und des E-Moduls. (50)

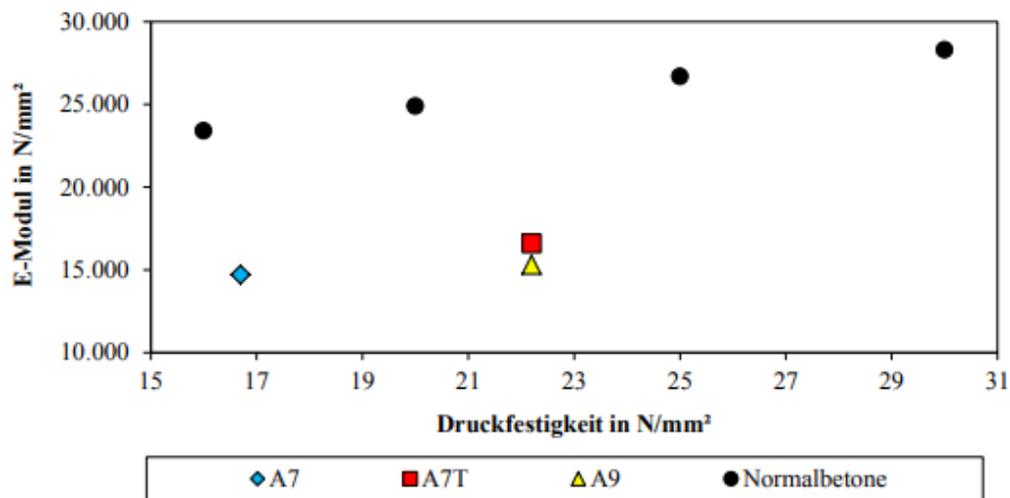


Abbildung 10: E-Modul von alkalisch-aktivierten Betonen (A7 = 100 % SFA, A7T = 100 % SFA, 60 °C, A9 = 90 % SFA / 10 % HÜS) im Vergleich zu Normalbetonen nach DIN 1045-2:2008-08 im 28 Tage-Alter (51)

Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Analog zu aktuell gültigen Materialmodellen können die mechanischen Eigenschaften von Betonen auf Basis alkalisch-aktivierter Bindemittel über empirische Modelle zum Beispiel als Funktion der Druckfestigkeit beschrieben werden. AAB-Betone haben gemäß der aktuellen Fachliteratur eine verbreitende Verwendung. Diese Betone eignen für den minderfesten, normalfesten sowie für hochfesten Betonanwendungen (52)

Die bisherigen Versuche zur Druckfestigkeit von Betonen ergaben, dass AAB-Betone eine wesentlich höhere Druckfestigkeit als PZ-Betone haben. In der Forschungsarbeit von den Fernández-Jiménez *et al.* (53) wurde unter Berücksichtigung der Druckfestigkeit der AAB-Betone und PZ-Betone vergleichend gegenübergestellt. In dieser Untersuchung wurde bei den alkalisch-aktivierten Betonen ein Ca-armes Bindemittel, nämlich Ca-arme Flugasche und verschiedene Aktivatoren (N, W) verwendet. Die Ergebnisse der Druckversuche stellten eindeutig dar, dass die Druckfestigkeit der AAB-Betone bei allen Altern höher sind, als die Druckfestigkeit der PZ-Betone (Abbildung 11).

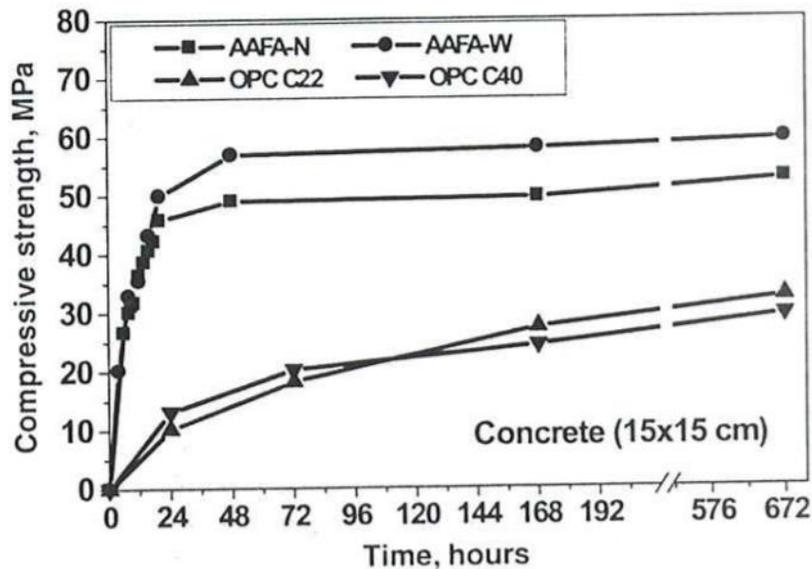


Abbildung 11: Druckfestigkeit von AAB-Betonen und PZ-Betonen (54)

Im Falle der Biegezug-und/oder Zugfestigkeit zeigt die Studie *Alkalisch-aktivierte Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel als Alternative zu Zement* (55) auf, dass die 28-

Tage Zugfestigkeit von AAB-Betonen die Vorhersagen von DIN EN 1992-1-1 überschreitet. Bezüglich faserverstärkter Mörtel wurde in dem Forschungsprojekt von den Ullmann et al. (56) durch das Beispiel der Glasfaserverstärkung dokumentiert, dass die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit der glasfaserverstärkten AAB-Mörtel doppelt so viel sind, als die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit der AAB-Mörtel ohne Faserverstärkung. Zur genaueren Beurteilung der Faserwirkung wurden die Kraft-Verformungs-Linien der Mörtel mit und denen der Mörtel ohne Glasfaserverstärkung (im 7 Tage- und 28 Tage-Alter) in dieser Forschung in den Biegezugsversuchen gegenübergestellt. Es wurde festgestellt, dass die Versuchskörper mit Faserverstärkung höhere Duktilität haben, als die AAB-Mörtel ohne Faser. (57) Auf die Wirkungsweise der unterschiedlichen Faserverstärkungen in AAB-Mörteln/Betonen wird später im Kapitel 2.2.1. tiefergehend eingegangen.

Früh und Endfestigkeit

Die Festigkeit von AAB-Betonen nimmt mit der Zeit zu, ebenso wie bei Portlandzement-Betonen. Diese Festigkeitsentwicklung der PZ-Betone lässt sich so erklären, dass die Hydratation ein verzögernder Effekt ist. Die Hydratation beginnt an der Oberfläche des Zementkorns. Während der Hydratation des Zementes entsteht das Zementgel aus dem Zementleim. Das Zementgel umgibt das Zementkorn zunächst nur in einer dünnen Schicht, so dass das Wasser zu dem noch nicht hydratisierten Kern des Zementkorn diffundieren kann und dort zur weiteren Hydratation zur Verfügung steht. (58) Daher entwickelt der Zementstein seine endgültige Festigkeit erst nach einiger Zeit. Angegeben wird daher für die Festigkeit des Betons nie ein endgültiger Wert, sondern der Wert, der nach 28 Tagen erreicht ist.

Im Gegensatz zu PZ-Betonen erreichen die AAB-Betone (je nach Rohstoffen, Nachbehandlung) ihre endgültige Festigkeit nach einigen Stunden. Bei AAB-Betonen lösen sich die Oxide des pulverförmigen Feststoffs (abhängig von der Reaktivität der Rohstoffe und von der Nachbehandlung) insgesamt relativ schnell und nach der Reorganisation entsteht das dreidimensionale Polymernetzwerk. In Bezug auf die Festigkeitsentwicklung

der AAB-Betone ist der Mischvorgang auch bedeutend. Die Dauer und die Intensität des Mischverfahrens haben einen positiven Einfluss auf den Reaktionsvorgang. (59)

Die Festigkeitsentwicklung der Früh- und Endfestigkeit bei AAB-Betonen hängt des Weiteren von dem Ca-Gehalt der Bindemittel ab. Ca-reiche AAB-Betone mit hohem CaO-Gehalt führen zu einer festigkeitsbildenden Struktur, die von CSH-Phasen dominiert werden. Alkalisch-aktivierte Ca-reiche Flugaschen resultieren verbesserte mechanische Eigenschaften, also erhöhte Früh- und Endfestigkeiten. (60) Bei Ca-armen AAB-Betonen wurde demgegenüber eine geringe Frühfestigkeit in Kombination mit einer signifikanten Festigkeitssteigerung über die Zeit festgestellt. (Siehe: Abbildung 12.) (61)

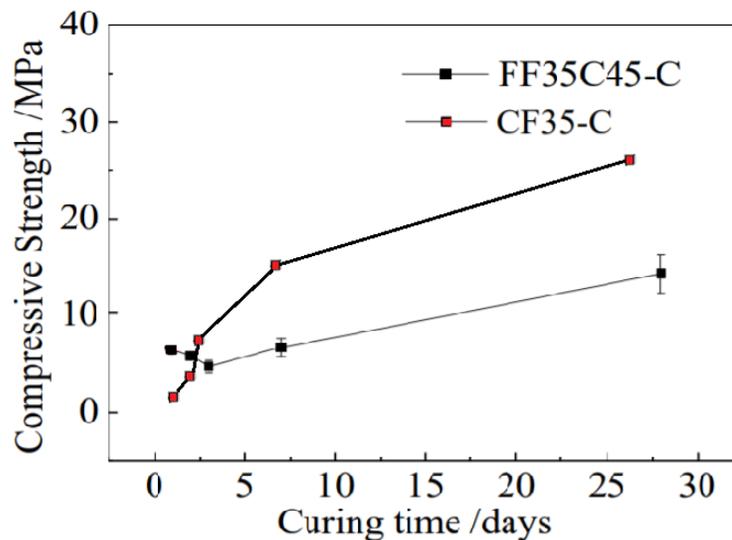


Abbildung 12: Druckfestigkeiten von Flugasche Geopolymer-Mörtel („CF35-C“ Ca-reiche Flugasche, „FF35C45-C“ Ca-arme Flugasche) (62)

Permeabilität, Dichtigkeit, Porosität

Unter Permeabilität von Festkörpern ist der durch einen Druck erfolgende Transport von Flüssigkeiten und Gasen im Beton zu verstehen. (63) Dichtigkeit und Porosität werden hauptsächlich zur Charakterisierung des Verhältnisses von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen von Festkörpern verwendet. Neben der Festigkeit ist die Porosität des Betons ein wichtiges Qualitätskriterium. Die verschiedenen Arten von Poren unterscheiden sich voneinander teilweise stark in Entstehung und Auswirkung. Grundsätzlich sinkt die Festigkeit mit steigender Kapillar-, Luft- und Verdichtungsporosität proportional. Auch eine Verringerung des Elastizitätsmoduls ist nachweisbar. (64) Permeabilität und Porengrößenverteilung sind auch wichtige Materialeigenschaften des Geopolymers. Wenn der alkalische Aktivator entsprechend dosiert wird, ergibt sich ein Feststoffgefüge mit fein verteilten Mikroporen (Abbildung 13). Infolgedessen werden wenige Kapillarporen vorhanden sein und damit wird die Permeabilität der Matrix beeinflusst. (65)

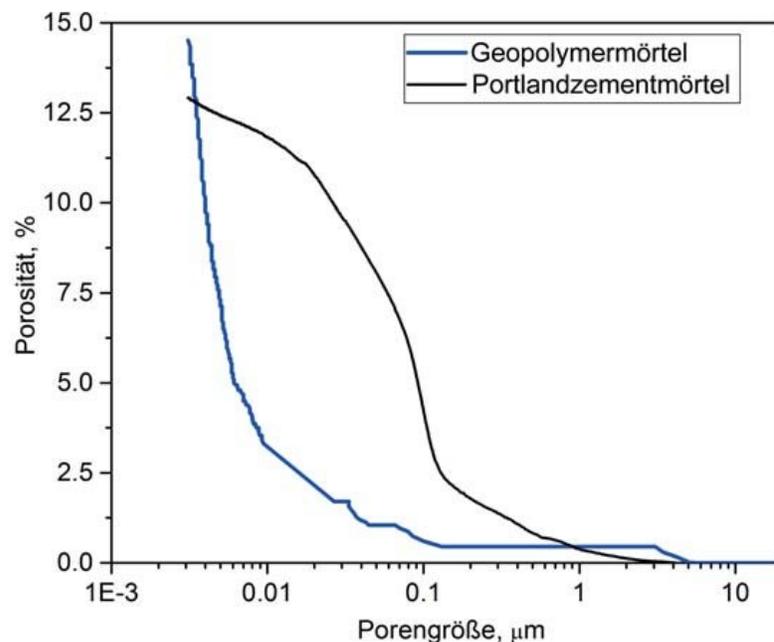


Abbildung 13: Porengrößenverteilung von Geopolymer- und Zementmörteln (66)

Brandbeständigkeit

Im Gegensatz zur Geopolymerisation baut der Portland-Zement während seiner Hydratation eine wesentliche Menge des Wassers in die Kristallstruktur ein. Infolgedessen verhalten sich diese Materialien im Brandfall anders. Bei den Produkten aus Portlandzement entweicht das Wasser in einem Brandfall, aber der Wasserdampf kann nicht schnell genug über das Porensystem der Matrix diffundieren und durch den entstehenden Dampfdruck kann es zu Rissen und Abplatzungen führen. Da beim Geopolymer nur so wenige Wassermoleküle eingebunden sind, besteht im Brandfall keine Gefahr, dass die Matrix zerstört werden kann. (67)

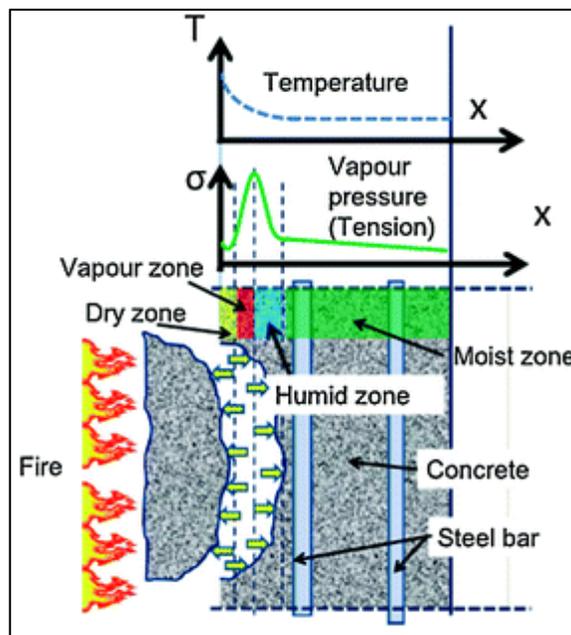


Abbildung 14: Protlandzement-Beton im Brandfall (68)

Nachbehandlungstemperatur

Wie schon im Kapitel 2.1.3. angemerkt wurde, sind die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der AAB-Mörtel von mehreren Faktoren abhängig. Einer von den wesentlichen Einflüssen ist die Nachbehandlungstemperatur. Mit zunehmender Nachbehandlungstemperatur kann die Frühfestigkeit deutlich gesteigert werden (69), aber Forschungen haben entdeckt, dass sich die Erhöhung der Temperatur ab einer bestimmten Temperatur nicht linear zum Festigkeitszuwachs verhält. In der Forschung von den Yahya *et al.* (70) wurden alkalisch-aktivierte Flugasche-Geopolymere bei einem Alter von 7 Tagen unter verschiedenen Nachbehandlungstemperaturen (die Nachbehandlung dauerte 24 Stunden lang) einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Die Forschung ergab, wenn die Erhärtungstemperatur größer als 80°C ist, ist die Druckfestigkeit eindeutig weniger (Abbildung 15).

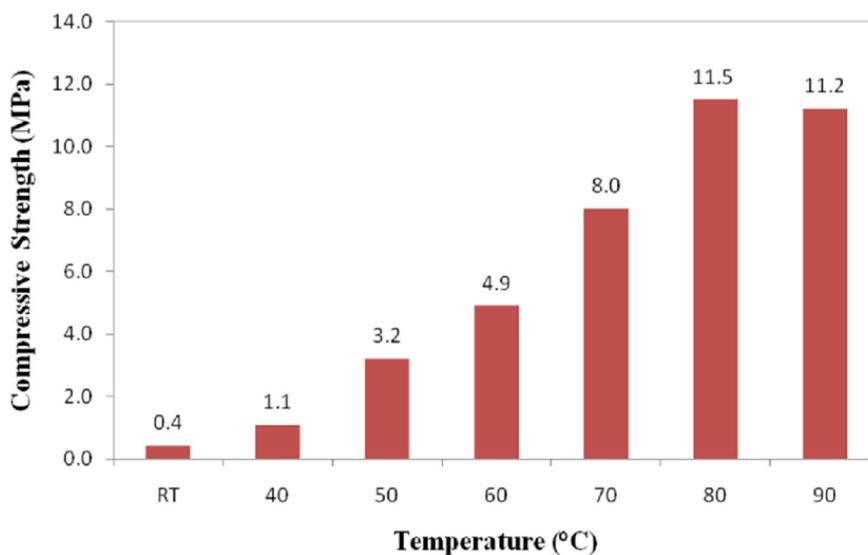


Abbildung 15: Auswirkung der Nachbehandlungstemperatur auf die Druckfestigkeit der Geopolymere (Flugasche) (71)

Dank der besonderen Eigenschaften der Geopolymere eignen sie sich als Leim, Mörtel oder Beton für verschiedene Anwendungen:

- ausgezeichnetes isolierendes Material,
- Straßenbeläge, Pflasterung,
- Fliesen, Fassadendekorationen, feine Keramikprodukte,
- geopolymerischer Zement (ohne Kalk),
- Schnellreparaturmörtel,
- Abdichtungsschichten,
- Brandschutz-Systeme,
- Baumaterialien zur Verwendung in Sonnenkollektoren,
- Bauchemie (Kitte, Kamin-Systeme),
- Fixation der Schwermetalle und radioaktiver Abfälle,
- Restaurierung,
- Imitation natürlicher Materialien.

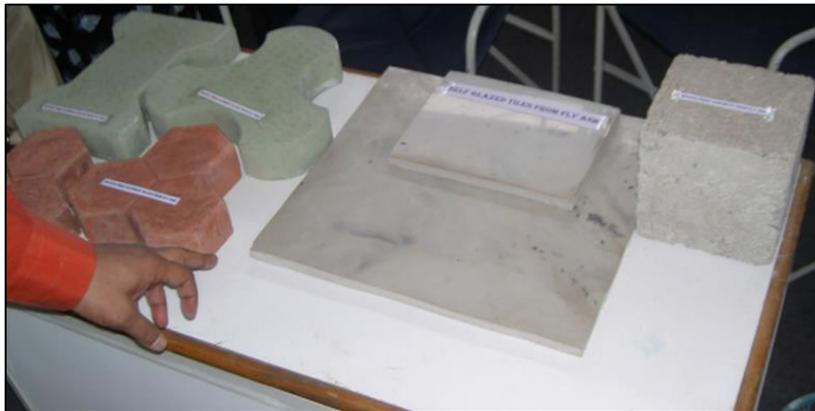


Abbildung 16: Geopolymer-Endprodukte (Pflasterung, Fliesen, Betonwürfel) (72)

2.2. Zweck und Mechanismus der Faserverstärkung in AAB-Mörteln/Betonen

Um die Zähigkeit der Geopolymere erhöhen zu können, wird das Geopolymer mit Fasern verstärkt. Die Abbildung 17. stellt die Wirkungsweise der Faserverstärkung dar. Bei einer unverstärkten Probe gibt es eine charakteristische „spitze“ Lastverteilung, die zu einem spröden Bruch führt. Im Gegensatz dazu besitzt eine faserverstärkte Probe ein pseudoplastisches Bruchverhalten. Durch die Faserverstärkung entstehen während der Belastung viele Mikrorisse, die durch Fasern abgefangen werden und dieser Vorgang führt zu einer gleichmäßigeren Lastverteilung. (73)

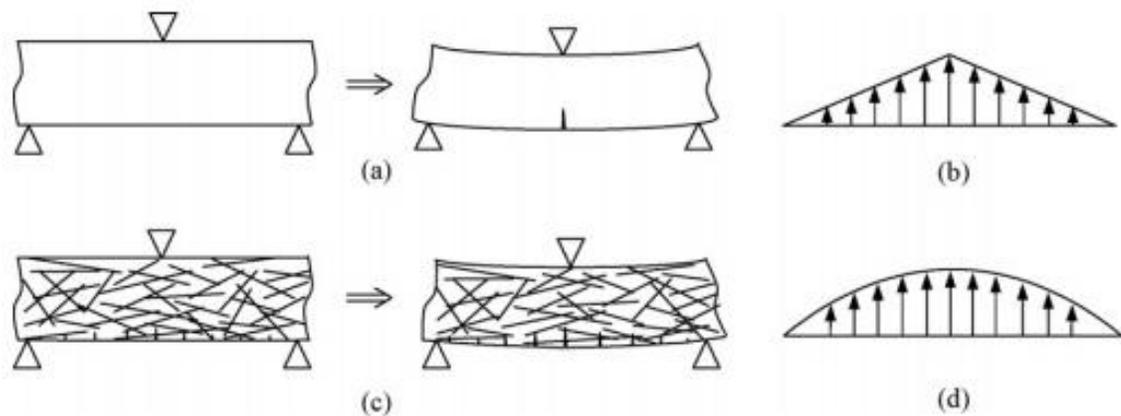


Abbildung 17: Vergleich Lastverteilung (74)

Die Anforderungen an Fasern mit Verstärkungswirkung sind folgende:

- E-Modul
- Bruchfestigkeit
- Bruchdehnung höher als die der Matrix
- ausreichende Zugfestigkeit
- Fasern müssen bei der Verwendung einer Geopolymermatrix ausreichende Alkaliresistenz aufweisen (75)

Folgende Faserarten sind in der Bauindustrie gängig: Stahlfaser (Abbildung 18); Glasfaser (Abbildung 19); Polypropylenfaser (PP-Faser) (Abbildung 20); Polyesterfaser (Abbildung 21); Naturfaser (Abbildung 22); Kohlenstofffaser (Abbildung 23)



Abbildung 18: Stahlfaser



Abbildung 19: Glasfaser



Abbildung 20: Polypropylenfaser



Abbildung 21: Polyesterfaser



Abbildung 22: Naturfaser



Abbildung 23: Kohlenstofffaser

Für die Faserverstärkung sind folgende Mechanismen verantwortlich.
(Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Beilage 1)

- „Rissüberbrückung: Entlastung der Rissspitze durch Überbrückung,
- Pullout: Entlastung der Rissspitze durch Lösen der Faser aus der Matrix,
- Rissablenkung: Verzögerung des Hauptrisses durch Herausdrehen der Rissfront durch die Faser.“ (76)

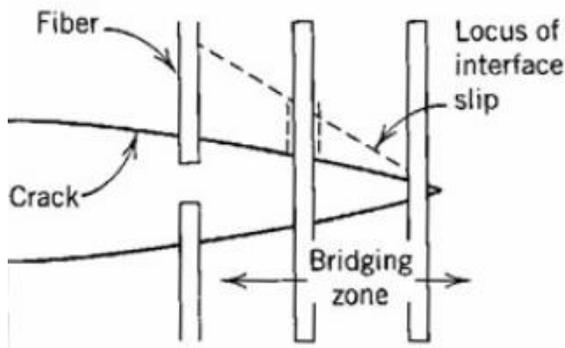


Abbildung 24: Rissüberbrückung (77)

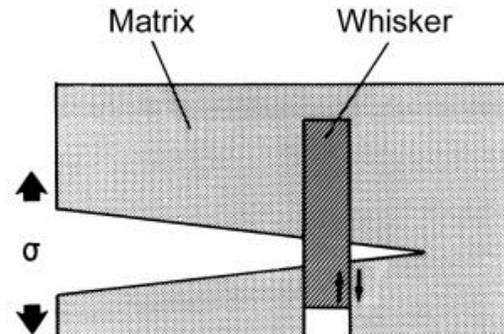


Abbildung 25: Pullout (78)

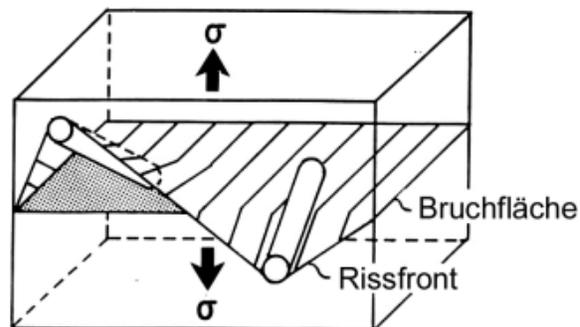


Abbildung 26: Rissablenkung (79)

Für den Verbund der Fasern in Geopolymeren können die einzelnen möglichen Einflüsse aufgeteilt werden, die den Kraft- bzw. Spannungsverlauf innerhalb des Bauteils beeinflussen: Riss darf Fasern nicht durchtrennen, räumliche Verteilung der Fasern im Geopolymer, optimale Dispersion, optimale Orientierung, optimale Form, geometrische Größen der Fasern, Material der Fasern (Abbildung 27). (80)

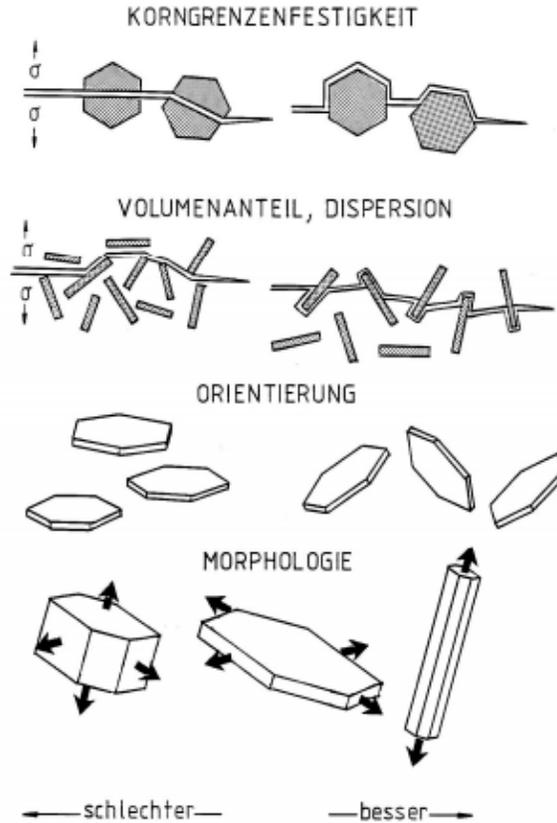


Abbildung 27: Einflüsse für den Verbund der Fasern in Geopolymeren (81)

2.2.1. Mechanische Eigenschaften der faserverstärkten AAB-Betone

Im Folgenden werden die Ergebnisse der faserverstärkten Geopolymere aus Sicht der mechanischen Eigenschaften diskutiert. Für die Faserverstärkung werden am häufigsten 3 Arten der Fasern (Stahl, Kunststoff, Naturfasern) verwendet. Um im Kapitel 5 demonstrierte Prüfungsergebnisse bezüglich der Hanffasern interpretieren zu können, werden die mechanischen Eigenschaften der synthetischen und organischen Fasern als Grundlage genommen und im Folgenden dargestellt.

Stahlfaser: Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit

In der Studie von den Nabeel *et al.* (82) wurden alkalisch-aktivierte Betone mit und ohne Stahlfaserverstärkung auf Basis von Flugasche aufgrund der Druck- und Biegezugfestigkeit verglichen. In dieser Untersuchung wurden verschiedene Arten und verschiedene Dosierungen der Stahlfasern verwendet. Die Druck- und Biegezugfestigkeiten verschiedener Mischungen wurden nach 7 und 28 Tagen getestet. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 1 (siehe unten) zusammengefasst. Die Druckfestigkeit von alkalisch-aktivierten Betonen wurden durch den Zusatz von Stahlfasern signifikant nicht beeinflusst. Im Gegensatz dazu, die Biegezugfestigkeit der Betone wurde durch Zugabe von Stahlfasern maßgeblich beeinflusst.

Alkali-activated concrete mix	Slump (mm)	Compressive strength (MPa)				Splitting tensile strength (MPa)		Flexural strength (MPa)		Direct tensile strength (MPa)	
		7 days		28 days		Average	SD	Average	SD	Average	SD
		Average	SD	Average	SD						
REF	118	40.1	1.11	44.1	1.12	3.5	0.20	4.4	0.26	2.4	0.15
ACMS1	105	41.7	1.12	46.5	1.20	3.9	0.26	4.6	0.17	2.6	0.14
ACMS2	85	44.1	1.06	47.9	1.20	5.3	0.22	5.4	0.13	2.9	0.16
ACMS3	76	40.7	0.79	45.6	0.93	4.8	0.15	5.0	0.32	2.8	0.10
ACDS1	102	40.8	1.07	44.3	0.86	4.4	0.16	4.7	0.18	2.6	0.14
ACDS1.5	95	41.6	0.90	44.8	1.56	4.5	0.25	4.9	0.25	2.7	0.12
ACDS2	82	42.7	1.50	45.9	0.80	5.5	0.24	6.1	0.15	2.9	0.14
ACHS2a	75	42.2	1.26	46.1	1.39	5.2	0.19	5.6	0.24	2.9	0.15
ACHS2b	80	45.0	1.02	48.9	1.47	6.3	0.17	6.7	0.21	3.3	0.15
ACHS2c	82	42.7	1.59	46.6	0.98	5.6	0.16	5.9	0.21	3.0	0.18

Note: SD = standard deviation.

Tabelle 1: Ergebnisse der alkalisch-aktivierten Betone mit und ohne Stahlfaserverstärkung auf Basis von Flugasche aus Sicht der Druck- und Biegezugfestigkeit (83)

Kunststofffaser: Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Die Kunststofffasern sind wegen ihrer Kostengünstigkeit oft verwendet. In Bezug auf Kunststofffasern wurde in der Forschung von den Ranjbar *et al.* (84) publiziert, dass die Frühfestigkeit (7 Tage) bei den kunststofffaserverstärkten Geopolymeren mit verschiedener Dosierung die gleichen Ergebnisse zeigten wie die Geopolymere ohne Fasern. Es gab aber einen deutlichen Unterschied zwischen den Festigkeiten bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung nach 7 und 56 Tagen. Die Versuchskörper ohne Faserverstärkung zeigte fast doppelt so viel Druckfestigkeitsentwicklung als die Versuchskörper mit Fasern. Die faserverstärkten Geopolymere folgten nicht demselben

Trend, also es waren vernachlässigbare Unterschiede zwischen den Ergebnissen bei unterschiedlichen Altern. Der Grund dafür ist die sich entlang der Fasern bildenden Mikrorisse, die in faserverstärkten Geopolymeren entstehen.

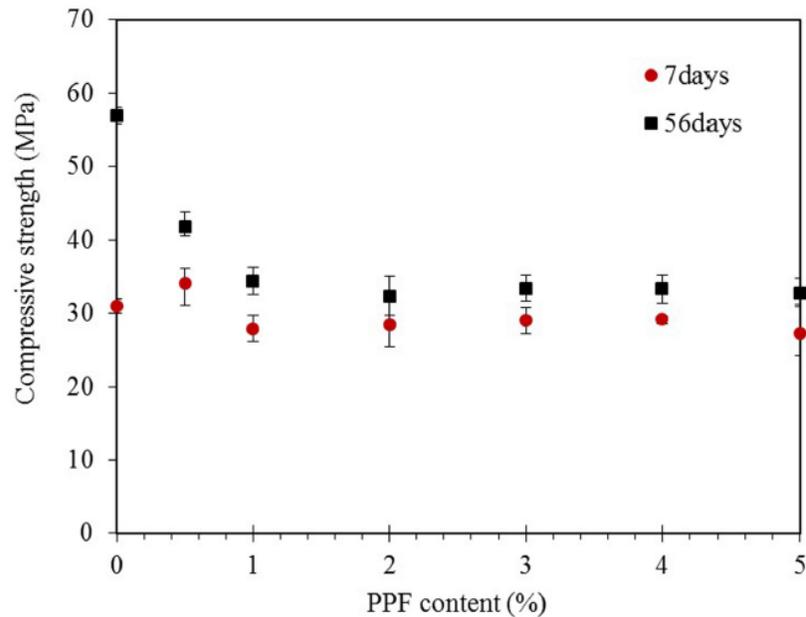


Abbildung 28: Druckfestigkeitsentwicklung der Geopolymere mit und ohne Kunststoffaserverstärkung bei verschiedenen Altern (85)

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung stellten dar, dass die Frühfestigkeit ab Kunststoffaserverstärkung von 1 Vol.-% schon erhöhen kann (Abbildung 29). Die Abbildung 30. zeigt, dass mit der Erhöhung der Faserdosierung die absorbierte Energie erhöht werden kann. Das kann damit erklärt werden, dass die Fasern mit der Matrix gut zusammenarbeiten.

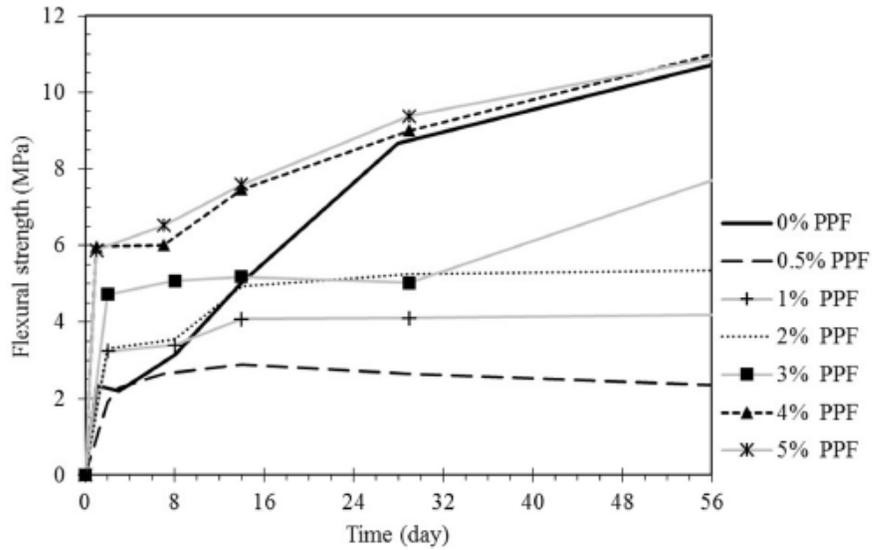


Abbildung 29: Biegezugfestigkeiten bei Geopolymeren mit und ohne Kunststoffaserverstärkung bei verschiedenen Altern (86)

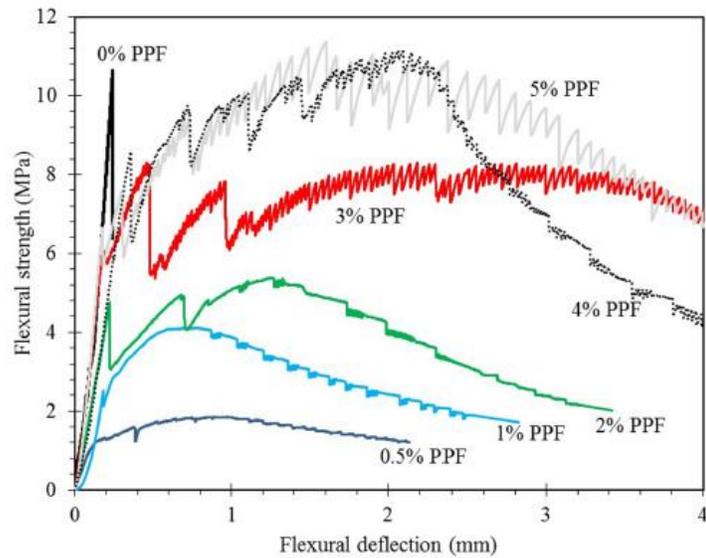


Abbildung 30: Absorbierte Energie bei Geopolymeren mit und ohne Kunststoffaserverstärkung (87)

Naturfaser: Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Naturfasern werden heute eher selten als Faserverstärkung verwendet, da ihre technischen und mechanischen Eigenschaften stark variieren. Diese variierende Natur der Naturfasern wurde auch in der Forschung von den Korniejenko et al. (88) unterstützt. Die Prüfungsergebnisse in Bezug auf die verschiedenen faserverstärkten Geopolymere zeigten, dass die Druckfestigkeiten grundsätzlich von den Faserarten abhängen (Tabelle 2).

Sample	MPa	Standard deviation of recorded values of strengths
Geopolymer (matrix)	24.78	1.89
Geopolymer with coir fibers (1%)	31.36	10.10
Geopolymer with cotton fibers (1%)	28.42	5.30
Geopolymer with raffia fibers (1%)	13.66	1.71
Geopolymer with sisal fibers (1%)	25.16	3.43

Tabelle 2: Druckfestigkeiten (28 Tage) bei Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung mit unterschiedlichen Naturfasern (89)

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen der erwähnten Forschung zeigten, dass der Zusatz von Baumwolle -, Sisal - und Kokosfasern die Druckfestigkeit der Probekörper erhöhen. Jedoch die Zugabe der Raffia-Fasern verringert die Druckfestigkeit. Diese Abnahme kann auf die mangelnde Kohäsion zwischen den Fasern und der Geopolymermatrix zurückgeführt werden. (90)

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen der diskutierten Forschungsarbeit zeigten, dass die mechanischen Eigenschaften der Probekörper mit und ohne Kokosfasern, Baumwolle oder Sisalfasern einander ähnlich sind. Die Zugabe der Raffia-Fasern beeinträchtigte die mechanischen Eigenschaften der Versuchskörper in den Druckfestigkeitsprüfungen. Im Gegensatz zu den oben angemerkten künstlichen Fasern beeinflusste die Zugabe von Naturfasern die Biegezugfestigkeit der Geopolymere wesentlich nicht (Tabelle 3).(91)

Sample	MPa	Standard deviation of recorded values of strengths
Geopolymer (matrix)	5.55	0.72
Geopolymer with coir fibers (1%)	5.25	0.57
Geopolymer with cotton fibers (1%)	5.85	0.78
Geopolymer with raffia fibers (1%)	3.05	0.35
Geopolymer with sisal fibers (1%)	5.90	0.14

Tabelle 3: Biegezugfestigkeiten (28 Tage) bei Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung mit unterschiedlichen Naturfasern (92)

Wasseraufnahme, kapillare Saugfähigkeit, Dichtigkeit, Porosität

Die Wasseraufnahme bzw. die kapillare Saugfähigkeit bilden den Haupttransportmechanismus von Feuchtigkeit. Die Begriffe der Dichtigkeit und der Porosität wurden bereits im Kapitel 2.1.2. behandelt. Die Dichtigkeit, die Porosität und die Wasseraufnahme bei Geopolymeren wurden unter anderen in dem Experiment von den Assaedi *et al.* (93) untersucht. Die Ergebnisse bezüglich dieser Kenngrößen der Geopolymere mit Naturfaserverstärkung (GPFNC) und ohne Naturfaserverstärkung (GP, GPNC) sind in Abbildung 31. zusammengefasst. Es wurde festgestellt, dass die Geopolymere, die Fasern enthalten, eine höhere Porosität und Wasserabsorption und eine geringere Dichtigkeit aufweisen als die Geopolymere ohne Fasern.

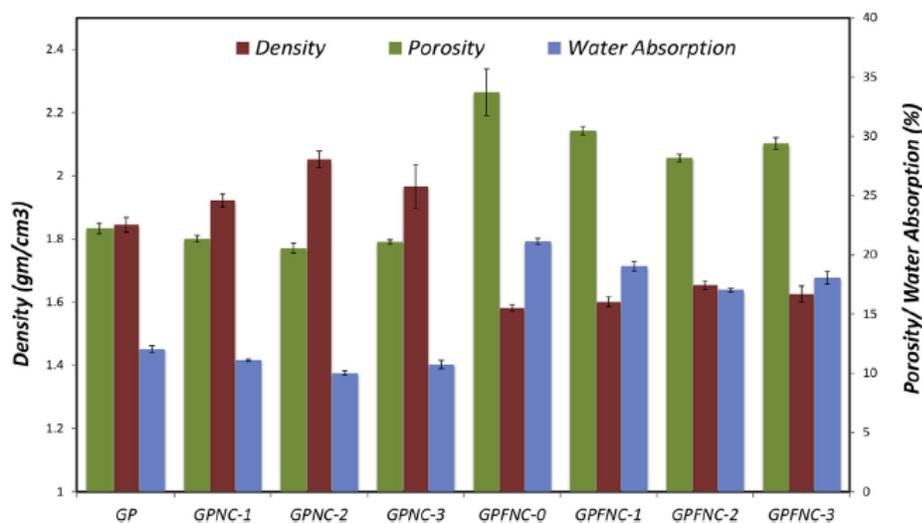


Abbildung 31: Dichtigkeit, Porosität, Wasseraufnahme (94)

Im Zusammenhang mit den Naturfasern ist es wichtig zu betonen, dass diese Fasern bei Geopolymeren als Verstärkungselemente einige Nachteile haben. Sie weisen zum Beispiel eine höhere Feuchtigkeitsabsorption auf, die Dimensionsänderungen des Materials bewirken kann, was zur Bildung von Mikrorissen und zu einer geringen thermischen Stabilität führt und damit wird sein Langzeitverhalten beeinflusst. Des Weiteren kann die Wasserabsorption zur Quellung der Fasern führen. Infolgedessen entstehen Hohlräume und Mikrorisse im Faser-Matrix-Grenzflächenbereich, was zu einer Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften und der Dimensionsstabilität der Zusammensetzungen verursachen kann. (95) Diese Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften aus Sicht der Biegezugfestigkeit „vor und nach“ der Wasserabsorption der Geopolymere wurde auch von der oben genannten Forschung nachgewiesen (siehe: Abbildung 32).

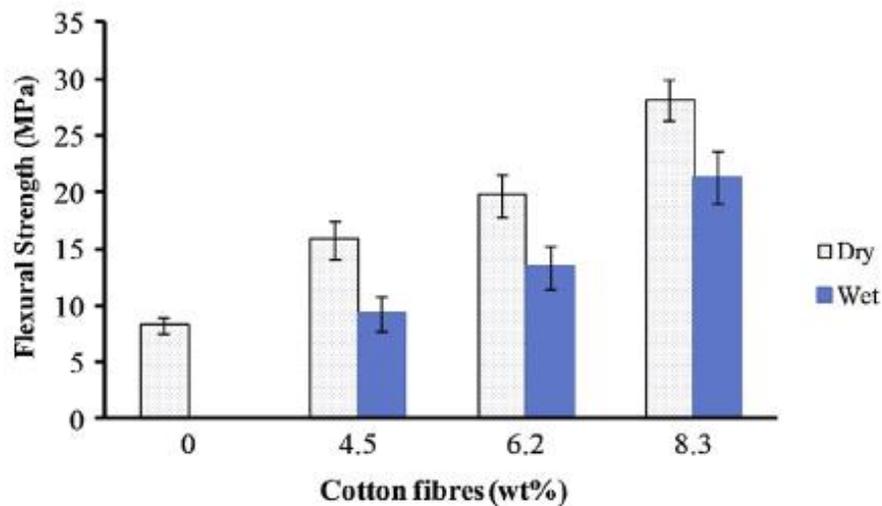


Abbildung 32: Biegezugfestigkeit der Geopolymere „vor und nach“ der Wasserabsorption (96)

3. Experimenteller Teil

Dieses Projekt erzielt, die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des hanffaserverstärkten alkalisch-aktivierten Geopolymer-Mörtels aus Flugasche kennenzulernen, um die Effizienz einer möglichen Verwendung in der Bauindustrie aufzudecken. Es wurden deshalb verschiedene Untersuchungen mithilfe von Versuchskörpern durchgeführt. In den folgenden Unterkapiteln werden die verwendeten Materialien, den Mischvorgang des AAB-Mörtels und die angewendeten Prüfverfahren vorgestellt.

3.1. Materialien und Versuchskörper

Für die Herstellung der Versuchskörper wurden folgende Materialien verwendet:

- Filtersand: 0,4-0,8 mm
- Naturfaser: Hanf (Länge 10 mm);
- Wasser
- Flugasche: Kieselsäurereiche Flugasche (Detailliertes Datenblatt: Beilage 2)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
52	25	7	5

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der Flugasche (wt%)

- Wasserglas (Konzentration: SiO₂/Na₂O = 1,5)

Na ₂ O	Si ₂ O	H ₂ O
16,72	25,08	58,2

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des Wasserglases (wt%)

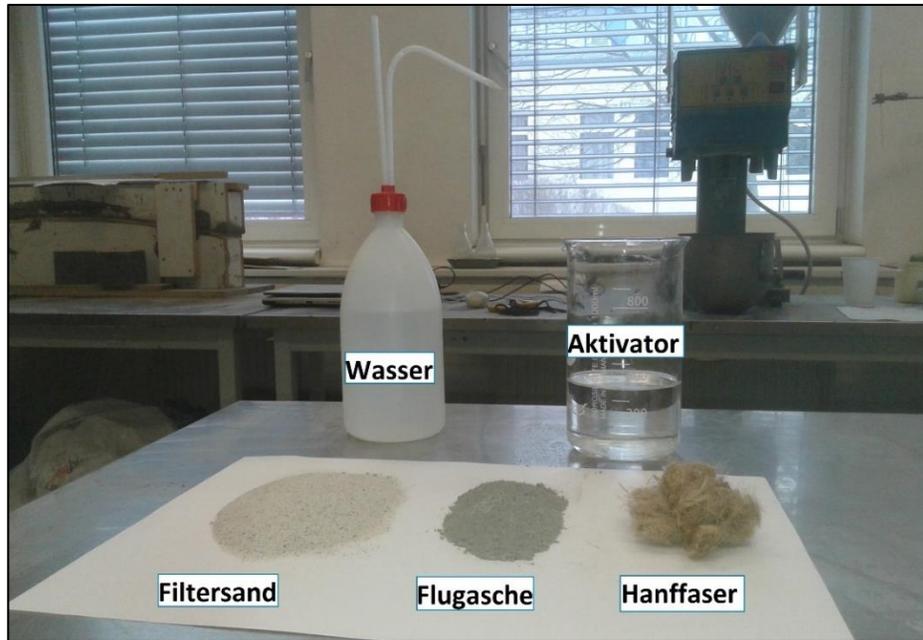


Abbildung 33: Verwendete Materialien

Die untenstehende Tabelle zeigt die verwendeten Baustoffmengen:

3 Prismen/Serien* [g]	
Wasser	36,54
Aktivator	235
Filtersand	1086
Flugasche	362
Hanffaser	15,84

Tabelle 6: Verwendete Baustoffmenge

*1 Serie bedeutet 3 Stück Mörtelprismen, 40*40*160 [mm]

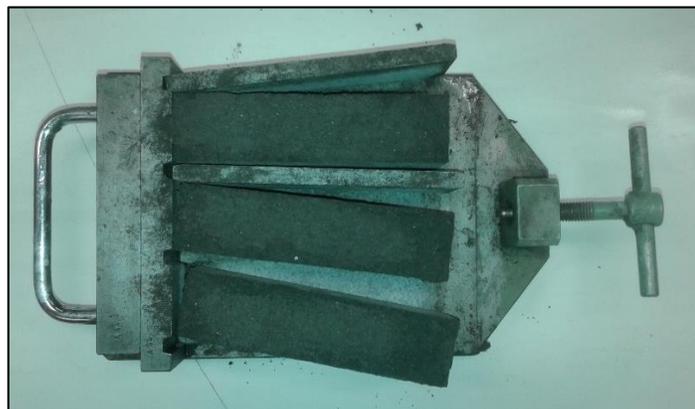


Abbildung 34: 1 Mörtelprisma-Serie

3.2. Prüfungsarten – Prüfungsmatrix

Für die Prüfungen wurden Mörtelprismen mit und ohne Faserverstärkung erstellt. Während des Herstellungsvorgangs der faserverstärkten Versuchskörper wurden 10 mm langen Hanffasern hineingemischt. Die erstellten Arten der Versuchskörper sind folgende:

Versuchskörper	Dimension	Faser
Mörtelprisma	40 mm*40mm*160mm	-
Mörtelprisma	40 mm*40mm*160mm	Hanf

Tabelle 7: Arten der Versuchskörper

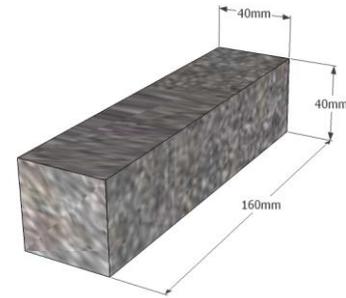


Abbildung 35: Mörtelprisma
40mm*40mm*160mm

Die Tabelle 8 stellt die Prüfungsmatrix der Mörtelprismen (40mm*40mm*160mm) dar. Die untersuchten Versuchskörper waren 7, 14 und 28 Tage alt. Die erstellten Versuchskörper wurden verschiedenen Nachbehandlungen unterzogen. Aufgrund der Nachbehandlungstemperatur (80 °C, 60 °C, 20 °C), der Faserverstärkung (mit oder ohne Hanffaserverstärkung-„MF“/“OF“) und des Alters der Versuchskörper gab es 18 Versuchsgruppen. Die Versuchsgruppen mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C wurden einer „normalen“ Behandlung unterzogen. Diese Versuchskörper wurden also in einer Lagerkammer bei einer konstanten Raumtemperatur von 20 °C bis zu dem Tag der Prüfung an der Luft gelagert. Die anderen Versuchsgruppen wurden 24 Stunden lang in einem Umlufttrockenschrank bei 60 °C oder bei 80 °C nachbehandelt und danach wurden sie in der schon erwähnten Lagerkammer (20 °C) bis zu dem Tag der Prüfung an der Luft gelagert.

Für die Mörtelprismen ohne Faserverstärkung wurde eine Versuchskörperserie und für die Geopolymere mit Faserverstärkung zwei Versuchskörperserie erstellt. Der Grund dafür war eine hohe erwartete Standardabweichung der Prüfungsergebnisse voneinander innerhalb je einer faserverstärkten Versuchsgruppe. Die unteren Beschriftungen der Versuchsgruppen werden im Kapitel 4 detailliert erklärt und verwendet.

Versuchsgruppe	Nachbehandlungstemperatur	Alter	Hanffaserdosierung
20-7-OF	20°C	7 Tag	0-V%
20-7-MF			1-V%
20-14-OF		14 Tag	0-V%
20-14-MF			1-V%
20-28-OF		28 Tag	0-V%
20-28-MF			1-V%
60-7-OF	60°C	7 Tag	0-V%
60-7-MF			1-V%
60-14-OF		14 Tag	0-V%
60-14-MF			1-V%
60-28-OF		28 Tag	0-V%
60-28-MF			1-V%
80-7-OF	80°C	7 Tag	0-V%
80-7-MF			1-V%
80-14-OF		14 Tag	0-V%
80-14-MF			1-V%
80-28-OF		28 Tag	0-V%
80-28-MF			1-V%

Tabelle 8: Prüfungsmatrix

3.3. Herstellung der Versuchskörper, Mischvorgang

Für den Ablauf und die Dauer des Mischvorgangs diente die ÖNORM B 4710-1 als Orientierung. Bei der Herstellung der Versuchskörper war die Labortemperatur: 21 °C. Für den Mischvorgang wurde ein Hobart-Mörtelmischer verwendet. Im Folgenden werden die Schritte des Mischvorgangs bei den Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung erläutert:

1. Die Flugasche und der Sand wurden in den Mörtelmischer gegeben und 2 Minuten lang trocken durchgemischt.



Abbildung 36: Mörtelmischer

2. Danach wurden die Hanffasern zu der oben genannten Mischung gegeben und noch 1 Minute lang trocken durchgemischt (diesen Schritt gab es nur bei den faserverstärkten Mörtelprismen).

- Der Aktivator und das Zugabewasser (Wasser wurde nur bei den faserverstärkten Mörtelprismen zugegeben) wurden zu der Mischung gegeben und mit einer „slow“-Einstellung des Mörtelmischers 2 Minuten lang langsam und danach mit der Einstellung „fast“ 2 Minuten lang schnell durchgemischt. Durch diesen Vorgang wurde eine homogene Geopolymermasse gewonnen.



Abbildung 37: Einstellungen des Mörtelmischers

- Die Schalungen wurden mit Leinöl ausgestrichen.



Abbildung 38: Vorbehandlung der Schalungen

- Nach dem Entleeren des Mixers wurde die Geopolymermasse in die vorbereiteten Schalungen eingefüllt.
- Diese Masse wurde mithilfe eines Stahlstabes manuell gründlich verdichtet.

7. Die Geopolymermassen wurden den oben genannten Nachbehandlungen in einem Umlufttrockenschrank unterzogen.
8. Um den Wasserverlust zu minimieren, wurden die gefüllten Schalungen, die in dem Umlufttrockenschrank (bei 60 °C und bei 80 °C) nachbehandelt wurden, mit Plastikfolie eingewickelt. Nach 24 Stunden wurde diese Folie entfernt und die ausgehärteten Mörtelprismen wurden ausgeschalt.



Abbildung 39: Gefüllte Schalung in der Plastikfolie und Umlufttrockenschrank

9. Bis zum Tag der Prüfung wurden alle Versuchskörper in der Lagerkammer (20 °C und 65% relative Luftfeuchtigkeit) an der Luft gelagert.

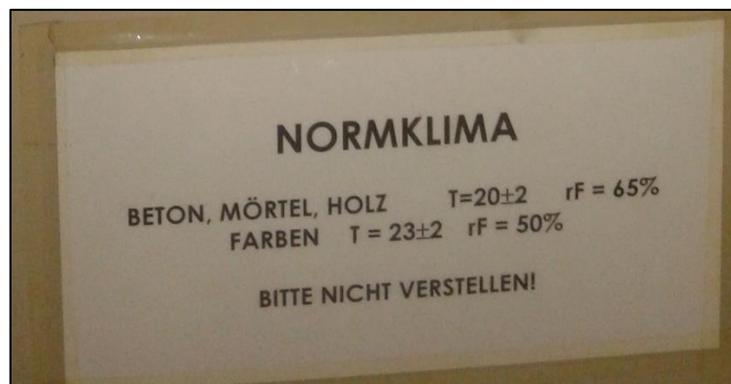


Abbildung 40: Klima der Lagerkammer

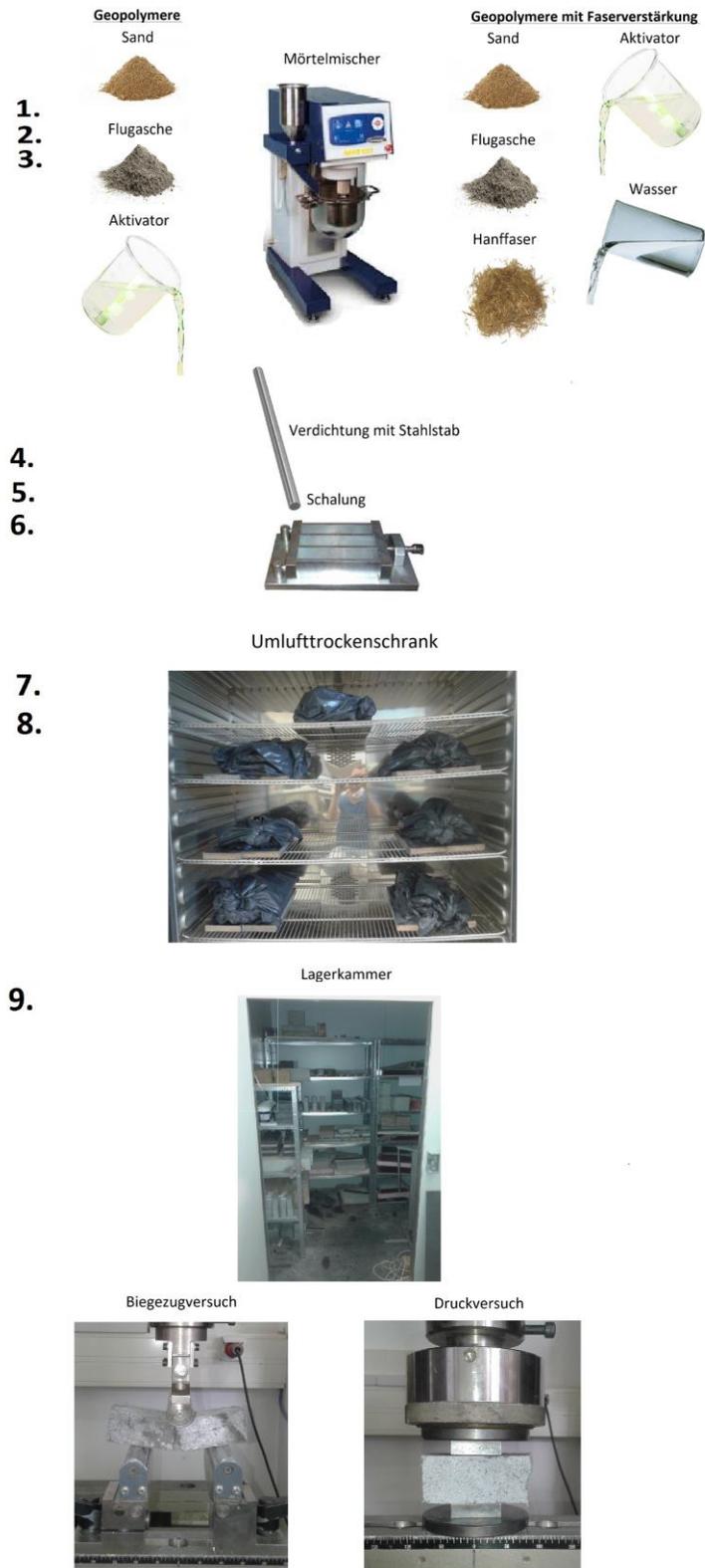


Abbildung 41: Mischvorgang von Mörtelprismen

3.4. Prüfverfahren - Allgemeine Beschreibung, grundlegende Informationen

Biegezug- und Druckfestigkeit, Bruchenergie

Die Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen von Mörtelprismen wurden in Anlehnung an ÖNORM EN 1015-11 durchgeführt (Abbildung 42). Bei den Versuchsgruppen ohne Faserverstärkung wurden 3 Versuchskörper pro Versuchsgruppe und bei den Versuchsgruppen mit Faserverstärkung 6 Versuchskörper pro Versuchsgruppe geprüft. Die Biegezugfestigkeit wurde bei jeder Art der Mörtelprismen festgestellt, so dass die Mörtelprismen durch Dreipunktbelastung bis zum Bruch beansprucht wurden. Die Biegezugfestigkeit [in N/mm²] ist wie folgt bestimmt:(97)

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2} \quad (1)$$

wobei

- F auf den Prüfkörper aufgebrachte Höchstlast in N
- l Abstand zwischen den Achsen der Auflagerrollen in mm
- b Breite des Prüfkörpers in mm
- d Höhe des Prüfkörpers in mm

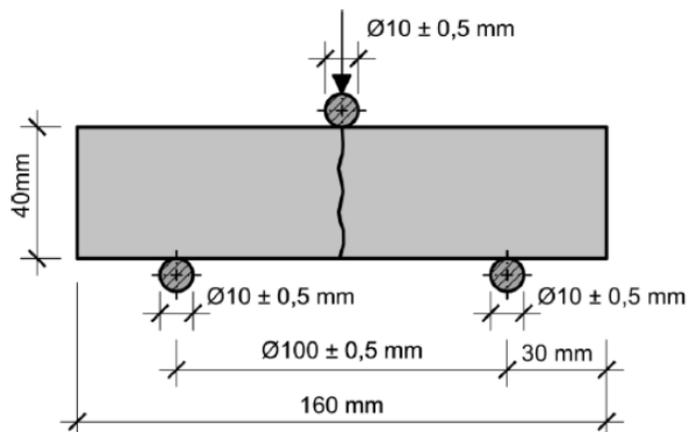


Abbildung 42: Biegezugfestigkeit von Mörtelprismen nach ÖNORM EN 1015-11

Der Prüfungsvorgang wurde bei allen Versuchskörpern solange durchgeführt, bis die Durchbiegung des Mörtelprismas 6 mm oder bis die Last auf dem Versuchskörper 0 N erreichte. Aufgrund der Messergebnisse dieses Prüfungsvorgangs konnte die Bruchenergie festgestellt werden. Die Bruchenergie (G_F) ist als die Fläche unter dem

Lastdurchbiegungsdiagramm definiert. (98) Durch die Bruchenergie kann auch das grundlegende Materialkennwert „Zähigkeit“ bestimmt werden, die ein Maß für den Widerstand ist, welchen ein Werkstoff einem sich ausbreitenden Riss entgegensetzt. Der Kehrwert der Zähigkeit wird Sprödigkeit genannt.

Die Druckfestigkeitsprüfung wurde bezüglich der Mörtelprismenstücke, die während der Biegezugfestigkeitsprüfung in zwei Teile zerbrochen sind, durchgeführt (siehe: Abbildung 43). Bei jeder Serie (3 Versuchskörper/Serie) entstanden 6 Versuchskörper. Aus jeder Versuchsgruppe wurden 3 bestimmte Versuchskörper gewählt. Je ein Mörtelprismenstück bei den Versuchsgruppen ohne Faserverstärkung „OF“ wurde einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Aus den Versuchsgruppen mit Faserverstärkung „MF“ wurde jene Stücke zur Druckfestigkeitsprüfung (insgesamt 3 Stücke) gewählt, deren Ergebnisse bei der Biegezugfestigkeitsprüfung am höchsten, am niedrigsten und mittelmäßig waren.

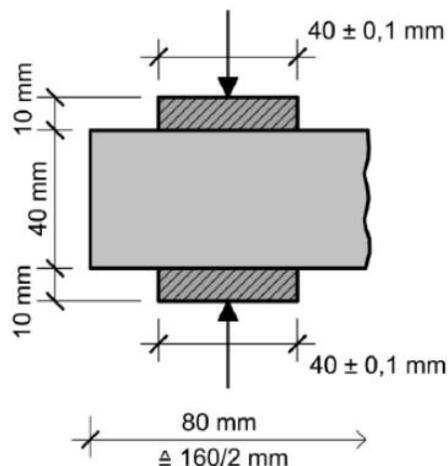


Abbildung 43: Druckfestigkeit von Mörtelprismen nach ÖNORM EN 1015-11

Die Druckfestigkeit [in N/mm²] wird als die vom Prüfkörper aufnehmbare Höchstlast, dividiert durch die belastete Fläche des Prüfkörpers, berechnet.

$$\sigma = F/A \quad (2)$$

F auf den Prüfkörper aufgebrachte Höchstlast in N

A belastete Fläche des Prüfkörpers in mm²

Für die einaxialen Druckversuche und Biegezugversuche wurde die institutseigene Prüfmaschine „Zwick Z 250“ verwendet. Sämtliche Druckversuche erfolgten kraftgesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von $0,5 \text{ N/mm}^2\text{s}$ und die Biegezugversuche mit einer Prüfgeschwindigkeit von $400 \text{ }\mu\text{m}/\text{min}$. Mithilfe des Programmes „TestXpert V6.01“ wurde die Prüfdaten geliefert.



Abbildung 44: Prüfmaschine: Zwick Z 250

Kapillare Wasseraufnahme

Der Wasseraufnahmekoeffizient bezeichnet die durch kapillare oder absorptive Kräfte bedingte flächenbezogene Wasseraufnahme von Baustoffen innerhalb einer bestimmten Zeit. (99) Die Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgte bezüglich der während des Biegezugfestigkeitsversuches entstehenden Probestücken nach den Vorgaben der ÖNORM EN 1015-18. Aus jeder Versuchsgruppe wurden 3 Probestücke gewählt (siehe: Tabelle 8). Vor dem Beginn der Prüfungen zum Saugverhalten erfolgte die Konditionierung der Versuchskörper durch eine Trocknung bei 65 °C (gemäß ÖNORM EN 1015-10 beträgt die Trocknungstemperatur bei Proben, die organische Bestandteile enthalten, $60 \pm 5^\circ\text{C}$) im Umlufttrockenschrank bis zum Erreichen der Massekonstanz (max. 1‰ Abweichung zwischen zwei im Abstand von 24 Stunden durchgeführten Wägungen). Danach wurden die Versuchskörper für eine bestimmte Zeit (10 und 90 Minuten) in einen teilweise mit Wasser gefüllten Behälter gestellt. Während der Einlagerung wurde der Wasserspiegel konstant in einem Abstand von ca. 5 mm über der Boden des Behälters gehalten (siehe: Abbildung 45).



Abbildung 45: Abstand zwischen dem Wasserspiegel und dem Behälterboden

Das Saugverhalten wurde bei den Versuchen nach 10 und 90 Minuten mit Hilfe von Wägungen ermittelt. Der Koeffizient der kapillaren Wasseraufnahme (C) ist nach folgender Gleichung zu ermitteln (100):

$$C = 0,1(M2 - M1) \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}) \quad (3)$$

wobei

M2 Masse des Prüfkörpers nach der Wassertränkung bei einer Eintauchzeit von 90 Minuten, in g

M1 Masse des Prüfkörpers nach der Wassertränkung bei einer Eintauchzeit von 10 Minuten, in g

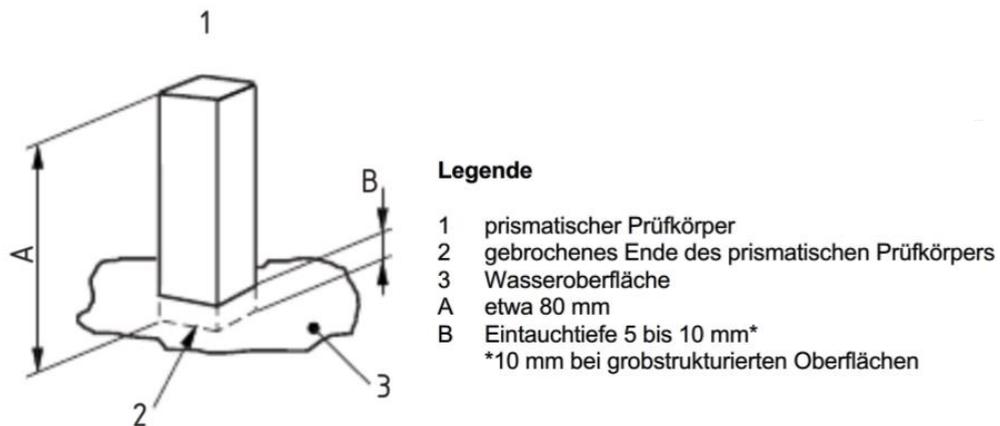


Abbildung 46: Prüfverfahren der kapillaren Wasseraufnahme nach ÖNORM EN 1015-18

Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung

Die Versuche zur vollständigen Wasseraufnahme wurden im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Porosität durchgeführt. Es wurden hier dieselben Versuchskörper wie bei der kapillaren Wasseraufnahme-Prüfung benutzt. Diese Versuchskörper wurden vollständig mit luftfreiem Wasser überdeckt. Die Lagerung der Versuchskörper im Wasser dauerte bis zum Erreichen der Massekonstanz.



Abbildung 47: Prüfverfahren: Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung

Die Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung (WB) wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$WB = \frac{m_a - m_e}{m_e} * 100 \text{ in \%} \quad (4)$$

wobei

m_a Masse der wassergesättigten Versuchskörper, in g

m_e Masse der getrockneten Versuchskörper, in g

Trockenrohddichte

Die Bestimmung der Trockenrohddichte des Betons erfolgte in Anlehnung an die Vorgaben der ÖNORM EN 1015-10. Die Trockenrohddichte jedes Mörtelprüfkörpers wurde aus dem Verhältnis der ermittelten Trockenmasse zum Volumen berechnet. Die Trockenmasse der Geopolymere wurde schon bei der kapillaren Wasseraufnahme-Prüfung festgestellt. Das Versuchskörpervolumen wurde durch eine Unterwasserwägung bestimmt. Hierbei wurde das archimedische Prinzip gehandhabt. Die Bestimmung des Volumens nach diesem Prinzip erforderte zwei unterschiedliche Wägungen. Zunächst wurden die Versuchskörper mit Wasser (bis zum Erreichen der Massekonstanz) gesättigt. Danach wurde eine Tauchwägung durchgeführt, die Versuchskörper wurden also in einen mit Wasser gefüllten Behälter hineingehängt und gewogen. Diese Masse wird mit m_w bezeichnet. Als zweite Wägung wurde die Masse der Versuchskörper in gesättigtem Zustand (m_a) ermittelt.



Abbildung 48: Unterwasserwägung mit der Hilfe des archimedischen Prinzips

Das Volumen (in m³) durch Wasserverdrängung wird mit folgender Gleichung bestimmt:

$$V = \frac{m_a - m_w}{\rho_w} \quad (5)$$

wobei

m_a scheinbare Masse des wassergesättigten Versuchskörpers an der Luft, in kg

m_w scheinbare Masse des eingetauchten Versuchskörpers, in kg

ρ_w Dichte des Wassers bei der entsprechenden Lufttemperatur, in kg/m³

Porosität

Der Begriff Porosität wurde bereits im Kapitel 2.1.3. definiert. Um die Porosität einer Versuchsgruppe festzustellen, sind drei unterschiedliche Wägungen erforderlich:

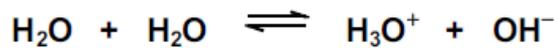
- Trockenmasse (m_e)
- Masse des wassergesättigten Versuchskörpers an der Luft (m_a) und
- Masse des eingetauchten (wassergesättigten) Versuchskörpers (m_w)

Die Trockenmasse wurde schon bei der Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme festgestellt. Das Versuchskörpervolumen wurde mithilfe des archimedischen Prinzips zur Trockenrohndichte bestimmt. Die Porosität kann wie folgt bestimmt werden:

$$Pa = \frac{m_a - m_e}{m_a - m_w} * 100 \text{ in \%} \quad (6)$$

PH-Wert

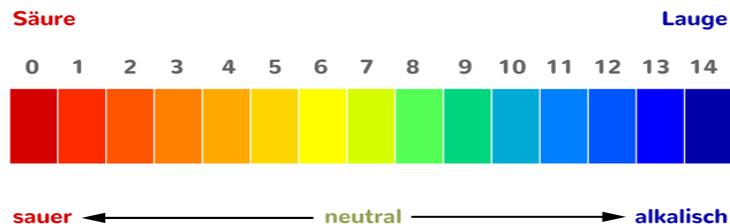
Um den pH-Wert erläutern zu können, sind die Definitionen des „Ampholytes“ und der „Autoprotolyse“ notwendig. Ein Stoff, der sich sowohl wie eine Säure als auch wie eine Base verhalten kann, wurde als Ampholyt benannt. Der bekannteste Ampholyt ist das Wasser, das mit sich selbst reagieren kann. Im Resultat eines Protonenübergangs zwischen zwei H₂O-Molekülen geht es in seine korrespondierende Base OH⁻ und in seine korrespondierende Säure H₃O⁺ über. Diese Reaktion wird als Autoprotolyse des Wassers bezeichnet. (101)



„Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus des Zahlenwertes der H₃O⁺-Konzentration, die in mol/l anzugeben ist. In der Praxis wird anstelle des pH-Wertes mitunter vom Säuregrad einer Lösung gesprochen.

$$\text{pH} = -\lg \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+)}{\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}} \quad (7)$$

Lösungen mit pH = 7 bezeichnet man als neutral, Lösungen mit pH < 7 als sauer und Lösungen mit pH > 7 als basisch bzw. alkalisch.“ (102)



Bei der Bestimmung des pH-Wertes wurden alle Probestücke der Versuchsgruppen einer pH-Prüfung unterzogen. Aus jedem Probekörper wurde ein kleines Muster gezogen. Diese Musterstückchen wurden in einem Keramik-Mörser komplett bis in eine Korngröße kleiner als 0,1 mm pulverfein gemahlen. Danach wurde dieses Material durch ein Analysensieb mit einer Nennmaschenweite von 0,1 mm gesiebt. 4 g aus diesem Material wurde mit 50 ml destilliertem Wasser in einem Becherglas mit Magnetprüfer verrührt. Anschließend wurde der pH-Wert dieser Lösung mit einem pH- Messgerät festgestellt. Die Messung wurde bis zum Erreichen eines konstanten pH-Wertes durchgeführt.

4. Resultate und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Es ist wichtig festzulegen, dass in der Beschreibung der Diagramme die Zahlen „20“, „60“ und „80“ die Nachbehandlungstemperaturen von 20°C, 60°C und 80°C bedeuten, die Zahlen „7“, „14“ und „28“ das Alter der Versuchskörper beschreiben (zum Beispiel: „7“ bedeutet, dass die Prüfung an dem 7. Tag durchgeführt wurde) und die Buchstaben „OF“, „MF“ die Faserverstärkung der jeweiligen Versuchsgruppe kennzeichnen (zum Beispiel: „OF“ bedeutet Geopolymere ohne Faserverstärkung und „MF“ bedeutet Geopolymere mit Hanffaserverstärkung). Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Prüfungsergebnisse je einer Versuchsgruppe werden in den Diagrammen veranschaulicht.

4.1. Porosität

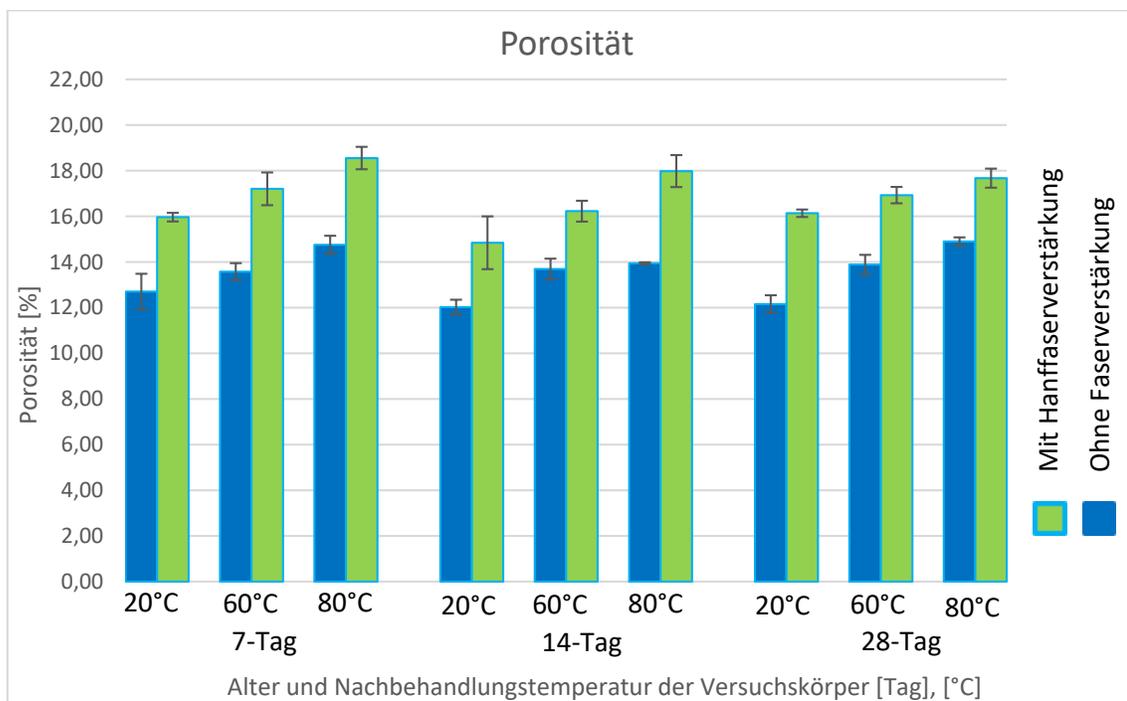


Abbildung 49: Porosität der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Das Diagramm verdeutlicht die Ergebnisse für die Porosität der Geopolymere mit und ohne Hanffaserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen. In der Beilage 42 befindet sich die Tabelle mit den konkreten Ergebnissen zu diesen Versuchen. Die Berechnung der Gesamtporosität erfolgte nach der Formel 6 (siehe: Kapitel 3.4)

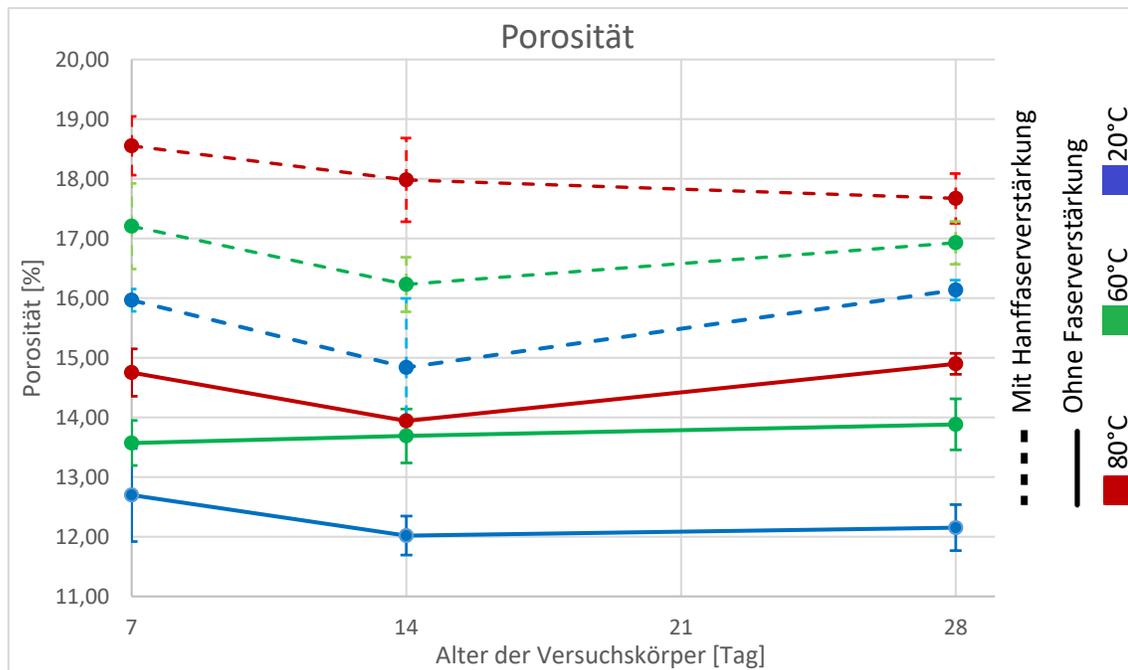


Abbildung 50: Porosität der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die faserverstärkten Geopolymere immer eine größere Porosität haben (Siehe Abbildung 50), als die Geopolymere ohne Faserverstärkung. Die ermittelten Werte der Porosität in Geopolymeren ohne Faserverstärkung liegen zwischen 12,0 % und 14,9 % und mit Faserverstärkung zwischen 14,8 % und 18,6 %. Der Mittelwert der Porosität in Geopolymeren ohne Faserverstärkung beträgt 13,51% und mit Faserverstärkung 16,83%. Die Erhöhung der Porosität von Geopolymer Matrix lässt sich damit erklären, dass die poröse Struktur der Fasern und die eingeführten Luftporen während der Mischungsvorgang zum erhöhten Anteil der Hohlräume im Matrix führen.

Tendenziell lässt sich die Aussage treffen, wenn die Nachbehandlungstemperatur erhöht wird, nimmt die Porosität sowohl bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung als auch bei faserverstärkten Versuchskörpern zu. In der Forschung von den Kubba et al. (103) gibt es ähnliche Beobachtungen. Als Beispiel kann das Verhältnis der Gruppen 20-14-MF und 80-14-MF in der Abbildung 49 genannt werden, wo der Unterschied der Porositätswerte 3,14 % ist. Im Vergleich zu Geopolymeren mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C steigt die Porosität der Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C um ca. 16% bei Geopolymeren mit Faserverstärkung und um ca. 18% bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung. Die Erhöhung der Porosität von Geopolymer Matrix lässt sich damit erklären, dass die Matrix wegen der höheren Temperatur beschädigt wird und Mikrorisse entstehen.

4.2. Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung

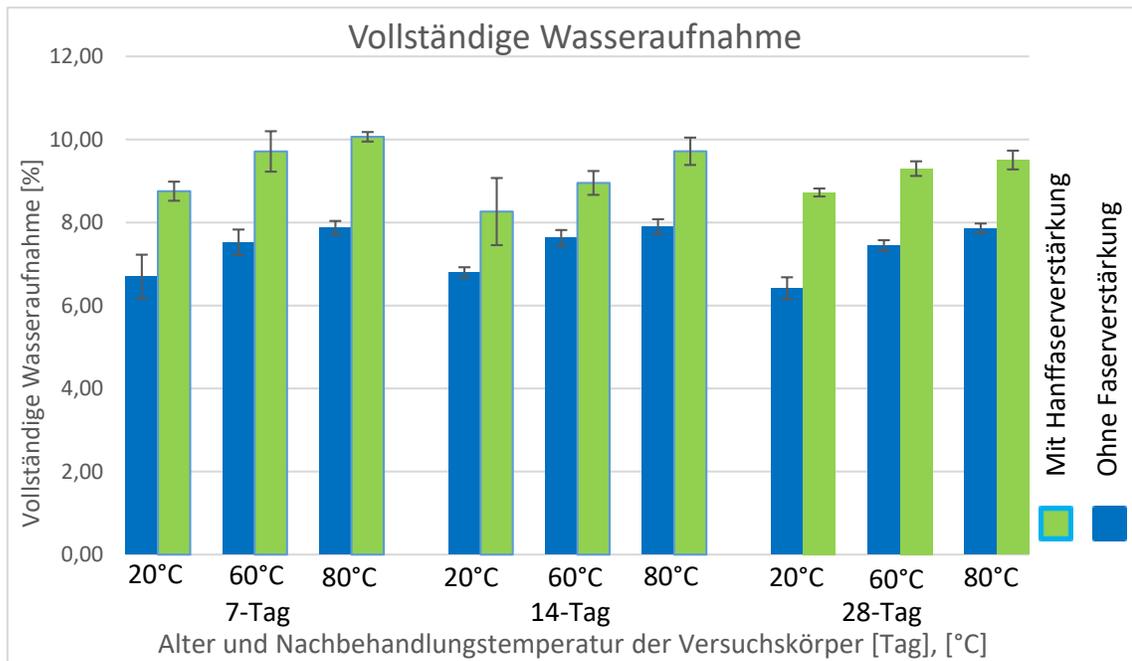


Abbildung 51: Vollständige Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Die Abbildung 51 veranschaulicht die Ergebnisse für die vollständige Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Hanffaserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen. Das Prüfzeugnis zu diesen Messungen befindet sich in der Beilage 41. Die vollständige Wasseraufnahme wurde anhand der schon angegebenen Gleichung (siehe: Kapitel 3.4 Formel 4) ermittelt.

Allgemein kann noch festgehalten werden, dass die Versuchskörper mit Faserverstärkung immer eine größere vollständige Wasseraufnahme aufweisen. Die Unterschiede der Ergebnisse bezüglich der vollständigen Wasseraufnahme zwischen den Geopolymeren ohne Faserverstärkung und den faserverstärkten Versuchskörpern liegen zwischen 1,3 % und 2,2 %. Dieser Unterschied liegt an der hydrophilen Natur der Cellulose-Fasern (wie zum Beispiel der Hanffaser).(104)

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass eine höhere Nachbehandlungstemperatur zu einer höheren vollständigen Wasseraufnahme führt. Die größte Wasseraufnahme wurde sowohl bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung als auch bei faserverstärkten Versuchskörpern bei der Nachbehandlungstemperatur von 80 °C ermittelt (siehe: Abbildung 51). Die Erhöhung der Wasseraufnahme von Geopolymer Matrix lässt sich damit erklären, dass die Matrix wegen der höheren Temperatur beschädigt wird und Mikrorisse entstehen, die dann die Wasseraufnahme fördern.

Im Vergleich zu Geopolymeren mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C ist die vollständige Wasseraufnahme der Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C um etwa 14 % größer bei Geopolymeren mit Faserverstärkung und um etwa 19 % größer bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung.

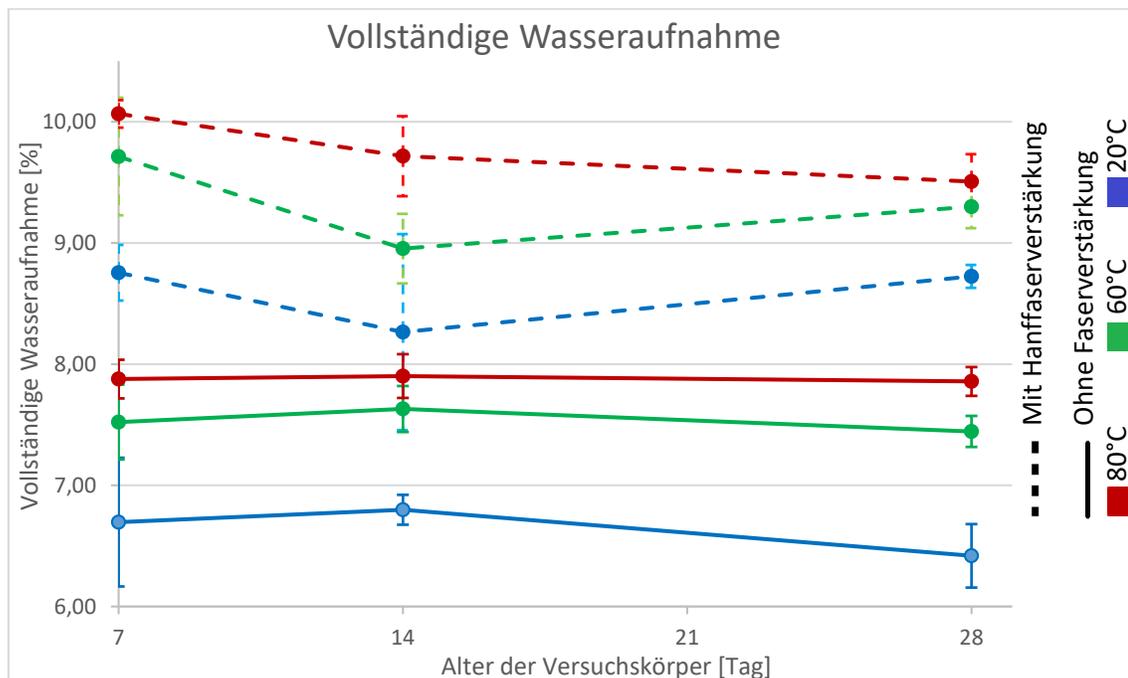


Abbildung 52: Vollständige Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

4.3. Kapillare Wasseraufnahme

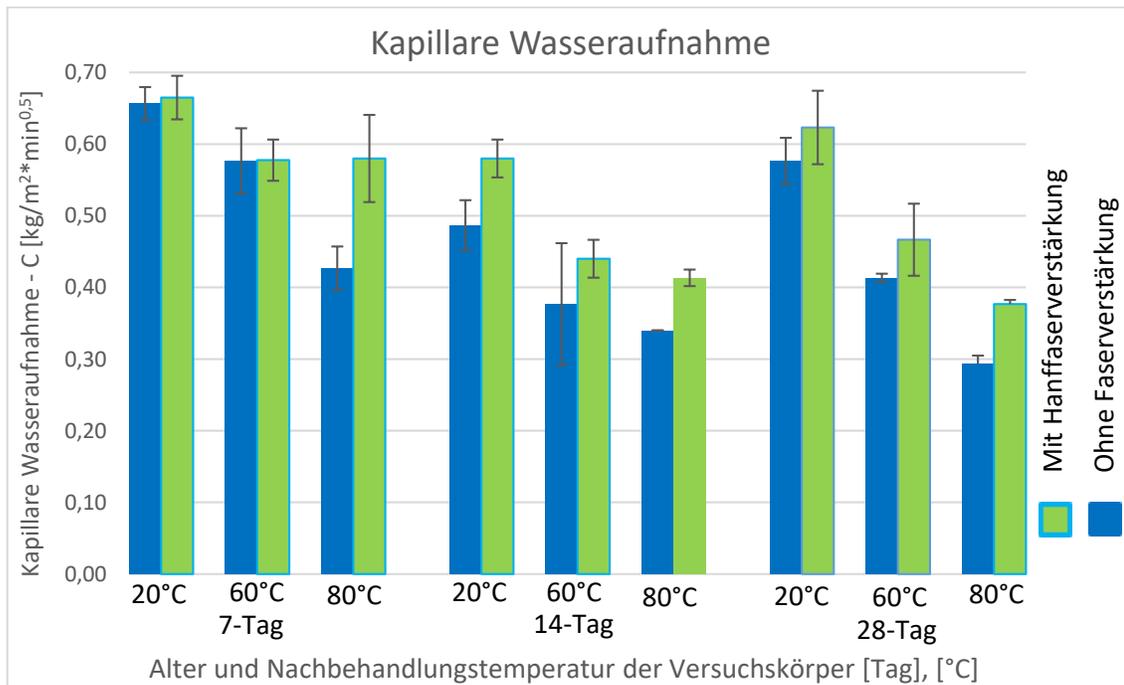


Abbildung 53: Kapillare Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Die Abbildung 53 stellt die Ergebnisse für die kapillare Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Hanffaserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen dar, die nach der schon erwähnten Formel berechnet wurden (siehe: Kapitel 3.4 Formel 3). In der Beilage 40 ist eine Zusammenfassung der Messwerte enthalten.

Die faserverstärkten Geopolymer haben immer eine größere kapillare Wasseraufnahme, als die Geopolymer ohne Faserverstärkung. Im Vergleich zu Geopolymeren ohne Faserverstärkung ist die kapillare Wasseraufnahme der Versuchskörper mit Faserverstärkung um etwa 16 % (durchschnittlicher Wert) größer. Eine Ausnahme bilden die 7 Tage alten Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung mit einer Nachbehandlungstemperatur von 60 °C: die kapillare Wasseraufnahme ist bei diesen Versuchsgruppen gleich.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, ist die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung von der Nachbehandlungstemperatur stark

abhängig. Wenn die Nachbehandlungstemperatur steigt, vermindert sich die kapillare Wasseraufnahme. Diese Folgerung über die kapillare Wasseraufnahme bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung lässt sich am auffälligsten bei den 28 Tage alten Geopolymeren ablesen. Im Vergleich zu Geopolymeren mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C ist die kapillare Wasseraufnahme der Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C um ca. 27 % (durchschnittlicher Wert) niedriger bei Geopolymeren mit Faserverstärkung und um etwa 38 % niedriger bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung.

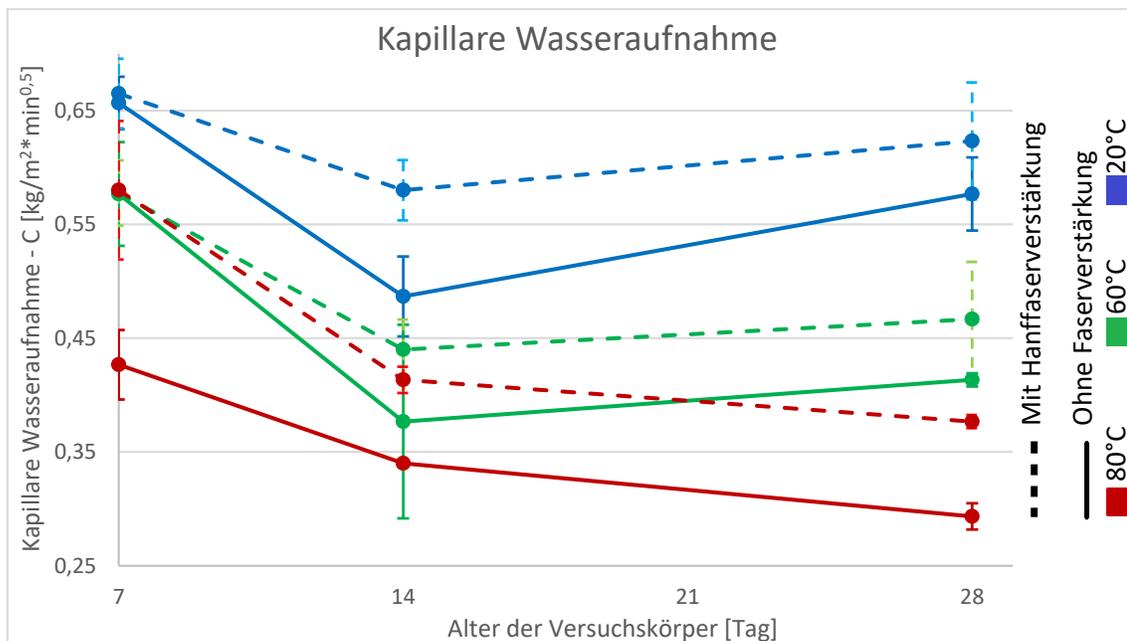


Abbildung 54: Kapillare Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Die Abbildung 54 zeigt, dass die kapillare Wasseraufnahme des 7-Tage Versuchskörpers am höchstens ist. Tendenziell lässt sich die Aussage treffen, dass sich die kapillare Wasseraufnahme bei allen Versuchskörpern bis zum Alter von 14 Tagen verringert. Danach ist eine Zunahme dieser Werte erkennbar. Eine Ausnahme bilden die 28 Tage alten Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C, wobei kapillare Wasseraufnahme der 28-Tage-Versuchskörper mit ca. 8 % weniger war, wie die kapillare Wasseraufnahme der 14-Tage-Versuchskörper.

4.4. Trockenrohddichte, Porosität und vollständige Wasseraufnahme

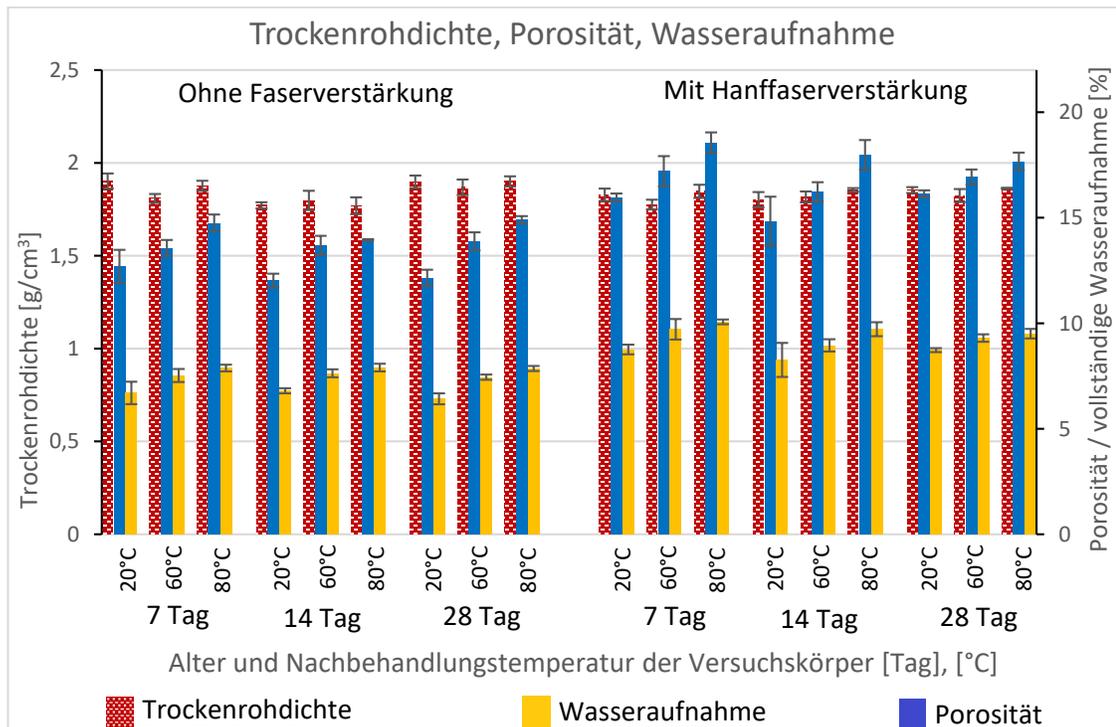


Abbildung 55: Porosität und Vollständige Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Abbildung 55 enthält eine Zusammenfassung der Werte der Trockenrohddichte, der Porosität und der vollständigen Wasseraufnahme. Tendenziell lässt sich eine Übereinstimmung des Verlaufes der Ergebnisse zwischen Porosität und Wasseraufnahme erkennen aber bei der Trockenrohddichte kann diese Aussage nicht getroffen werden. Die faserverstärkten Geopolymere haben eine höhere Porosität (durchschnittlich um 3,3% mehr) als die Geopolymere ohne Faserverstärkung. Auch beim Vergleich mit den Werten für die Wasseraufnahme bei vollständiger Sättigung lässt sich eine ähnliche Tendenz ablesen.

4.5. Trockenrohddichte

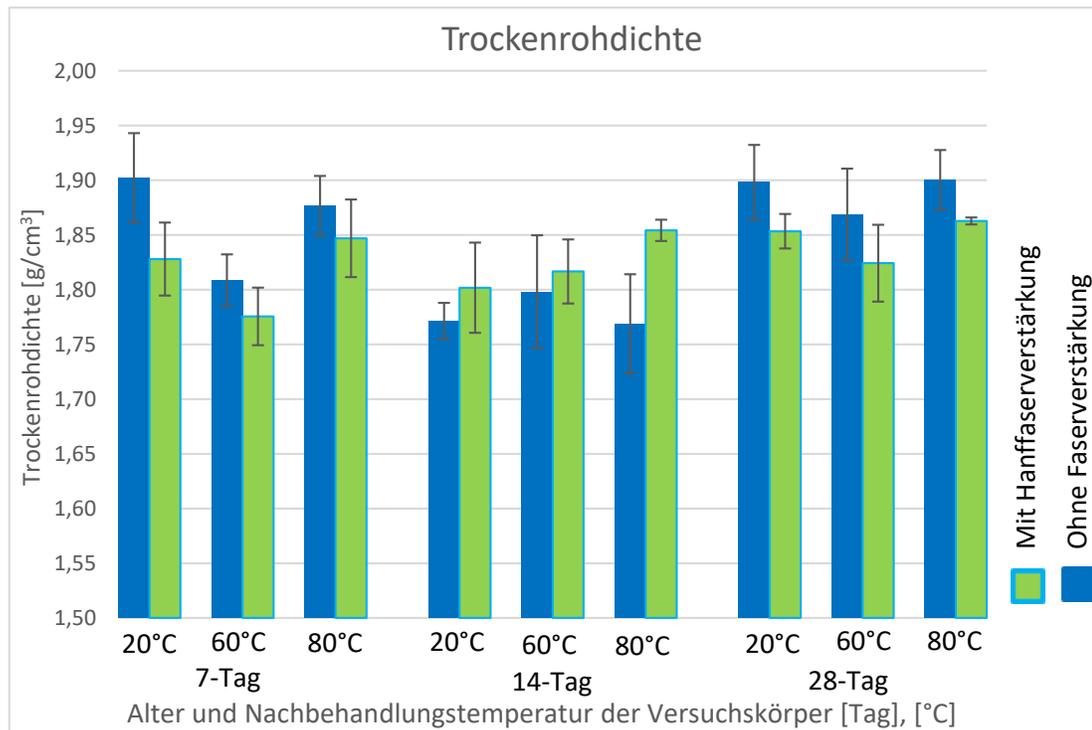


Abbildung 56: Trockenrohddichte der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Abbildung 56 veranschaulicht die Ergebnisse für die Trockenrohddichte der Geopolymere mit und ohne Hanffaserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen. (siehe: Formel 5 im Unterkapitel 3.4). Die detaillierten Messdaten sind in Beilage 43 auffindbar.

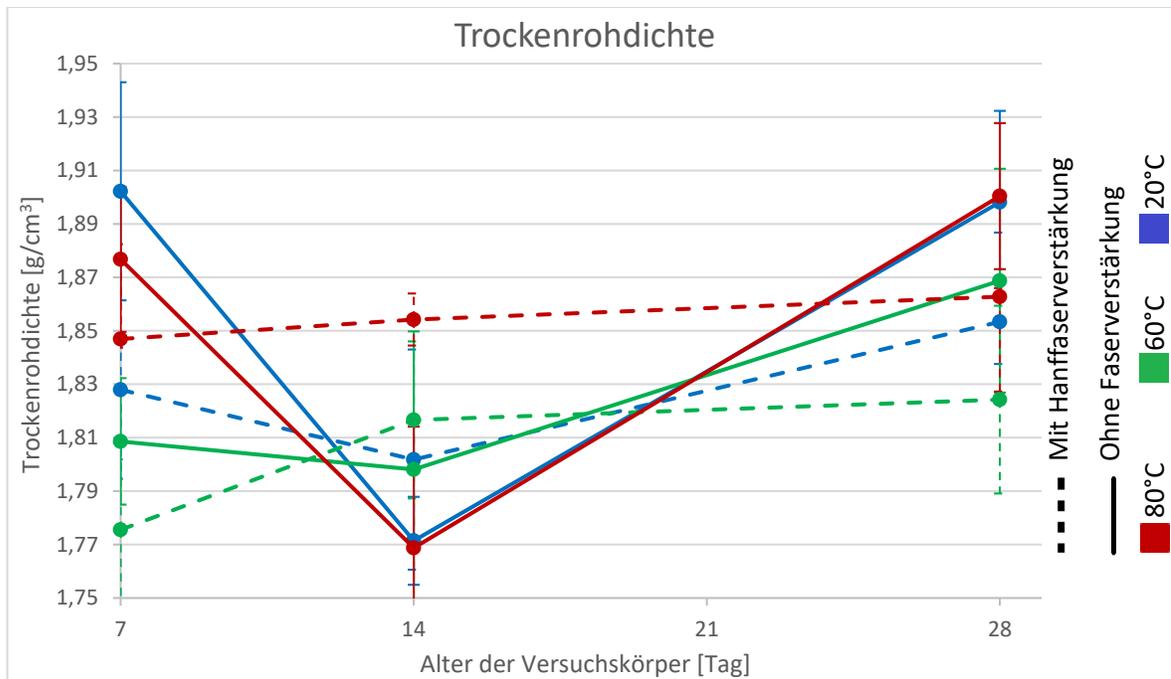


Abbildung 57: Trockenrohddichte der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Es gibt bei den Trockendichte-Ergebnissen der faserverstärkten Versuchskörper kleinere Abweichungen, als bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung. Der Mittelwert der Trockenrohddichte bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung beträgt $1,84 \text{ g/cm}^3$ und die Standardabweichung 5%. Der Mittelwert der Trockenrohddichte bei Geopolymeren mit Faserverstärkung beträgt $1,83 \text{ g/cm}^3$ und die Standardabweichung 2%.

Der Abbildung 56 zeigt, dass die Werte der Trockenrohddichte annähernd konstant sind. Die Messergebnisse der Trockenrohddichte liegen zwischen $1,77 \text{ g/cm}^3$ und $1,90 \text{ g/cm}^3$.

4.6. PH-Wert

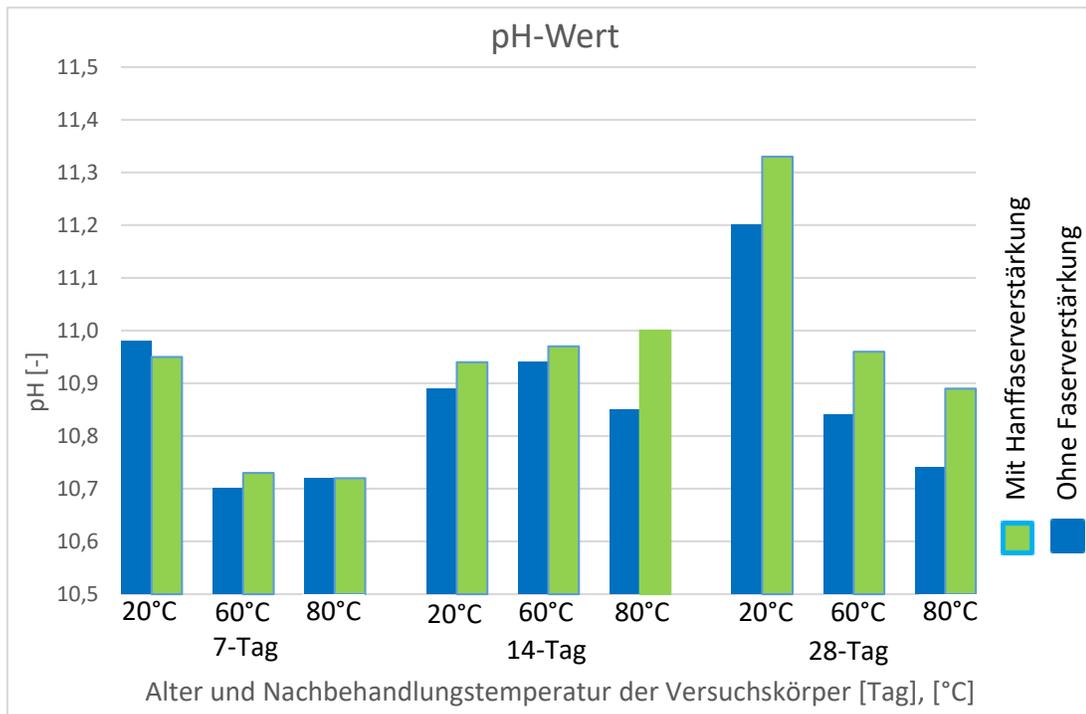


Abbildung 58: PH-Werte der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Das Diagramm stellt die Ergebnisse für die pH-Werte der Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen dar. Das Prüfzeugnis zu diesen Messungen befindet sich in der Beilage 39. Die pH-Werte wurden anhand der schon angeführten Methode (siehe: Kapitel 3.4) ermittelt.

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Geopolymere über einen basischen pH-Wert verfügen, also ihr pH-Wert ist größer als 7. Der pH-Mittelwert ergab den Wert von 10,91. Die Standardabweichung ist 0,17.

In dem Forschungsprojekt von den Romildo et al. (105) wurde festgestellt, dass die Naturfasern, die in einem karbonisierten Beton mit einem pH-Wert von 9 waren, ihre Flexibilität und ihre Festigkeit bewahren. Im Gegensatz dazu haben die Sisal und Kokosnussfasern, die in einer Calciumhydroxidlösung mit einem pH-Wert von 12 gehalten wurden, ihre Festigkeit nach 300 Tagen vollständig verloren. Daraus ist darauf zu schließen, dass diese alkalische Umgebung die Struktur der Naturfasern beeinträchtigen kann. Wie

oben erwähnt wurde, tritt diese negative Wirkung nach längerer Zeit auf. Da die Versuchskörper höchstens 28 Tage alt waren, konnte anhand der vorliegenden Ergebnisse die Wirkung des pH-Wertes nicht eindeutig belegt werden.

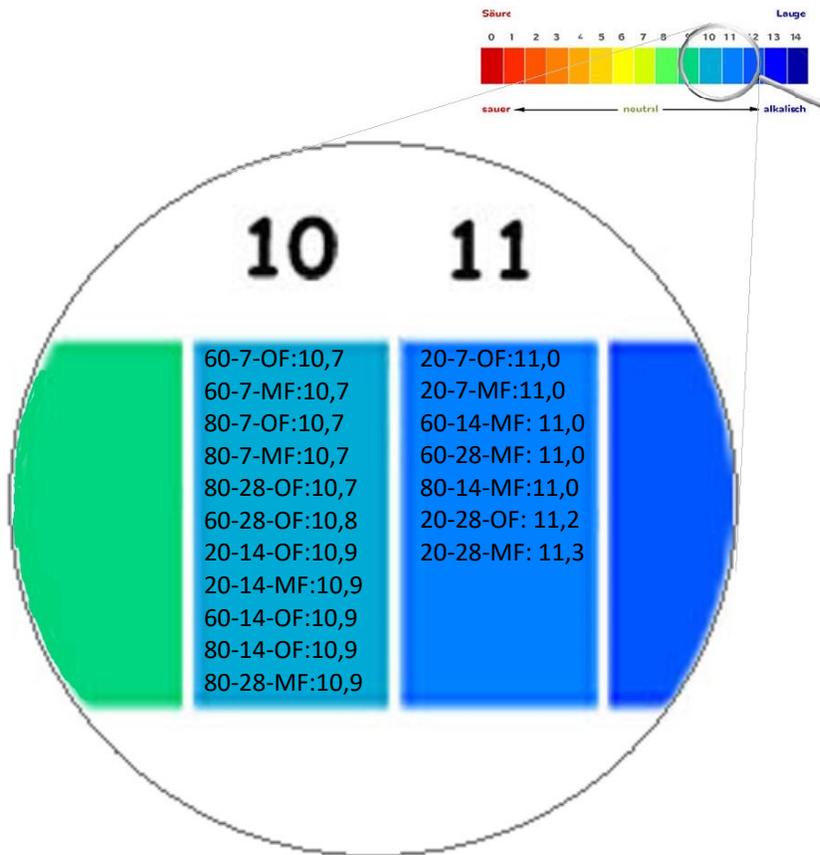


Abbildung 59: PH-Werte der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

4.7. Druckfestigkeit

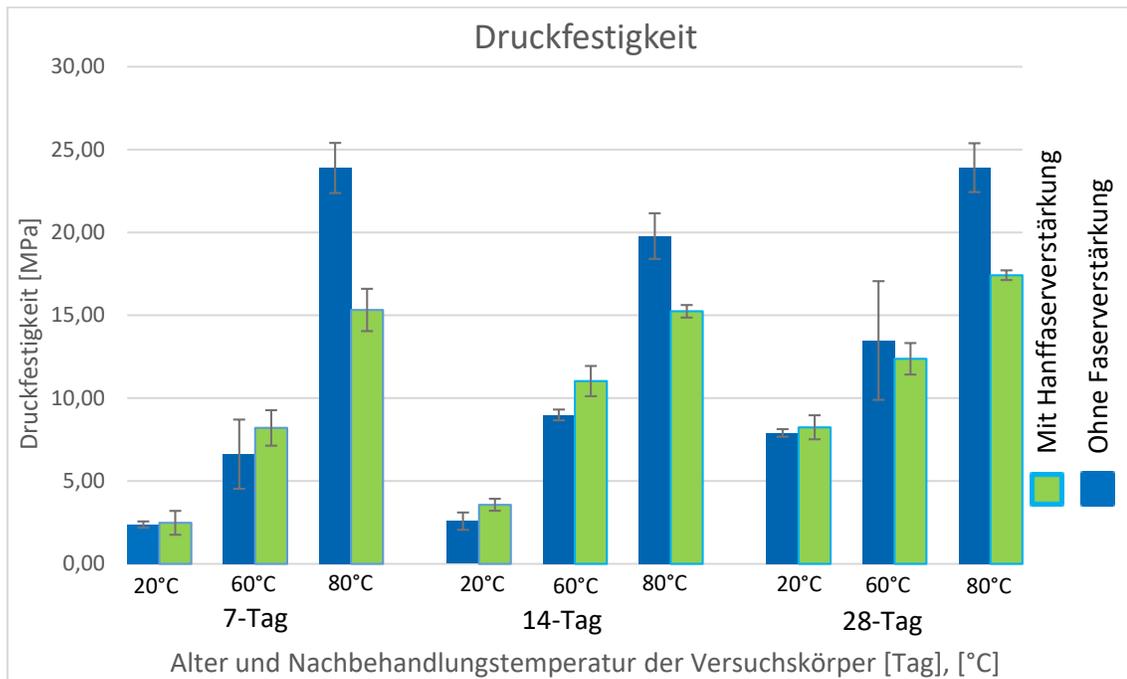


Abbildung 60: Die Druckfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Das Diagramm stellt die Druckfestigkeiten der Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen dar. Der Verlauf aller Messergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung befindet sich in den Beilagen 3-38. Die Druckfestigkeit wurde anhand der schon gegebenen Gleichung (siehe: Kapitel 3.4 Formel 2) ermittelt.

Der Abbildung 60 zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Druckfestigkeiten bei den Geopolymeren mit und ohne Faserverstärkung bei den Nachbehandlungstemperaturen von 80 °C gibt. Der größte Unterschied ist bei den 7-Tage-Geopolymeren. Bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung beträgt die maximale Druckfestigkeit 23,91 MPa und mit Faserverstärkung 17,42 MPa.

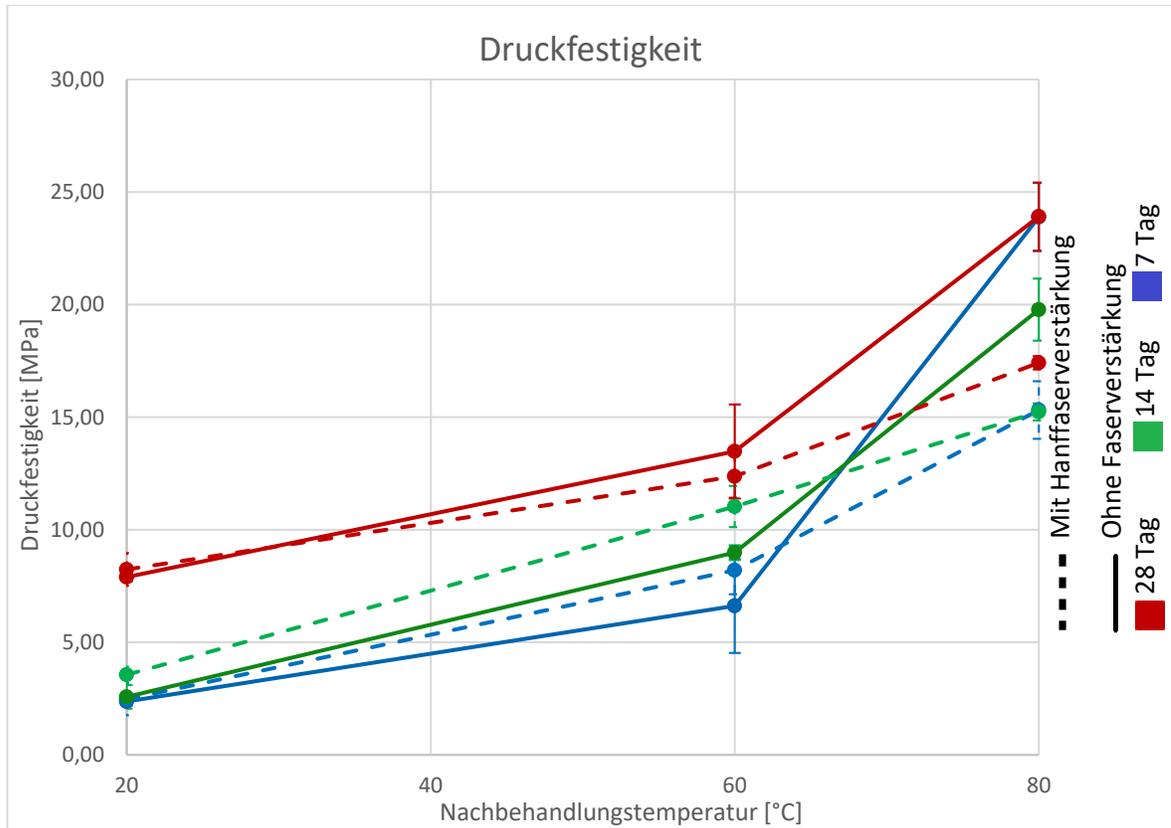


Abbildung 61: Die Druckfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Aus dem Diagramm geht hervor, dass sich die Druckfestigkeit generell mit zunehmender Nachbehandlungstemperatur erhöht. Diese Tendenz erscheint nachdrücklicher bei den 7 Tage alten Versuchskörpern, als bei den 14 und 28 Tage alten Versuchskörpern (siehe: Abbildung 60 und Abbildung 61).

Die Druckfestigkeit der faserverstärkten Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C ist durchschnittlich 4,2-mal größer, als die derselben Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C. Bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung ist dieser Multiplikator 7. Der durchschnittliche Wert der Druckfestigkeit der hanffaserverstärkten alkalisch-aktivierten Geopolymeren mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C ist durchschnittlich 16 MPa. Dieser Wert beträgt bei einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C durchschnittlich 4,8 MPa.

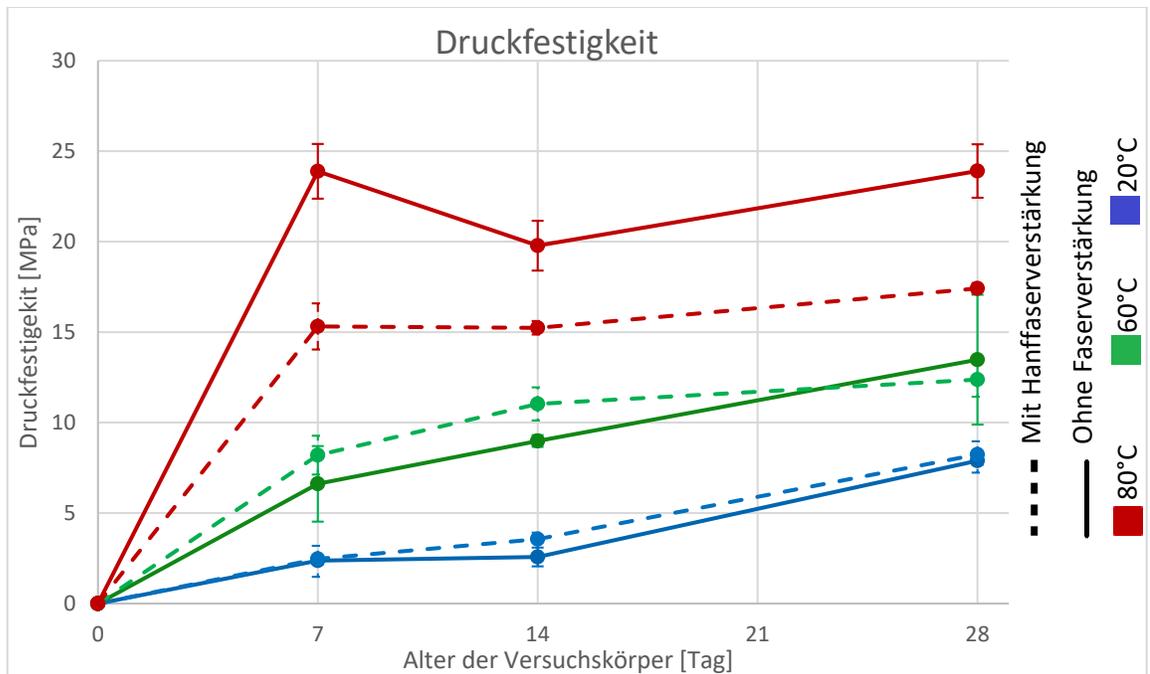


Abbildung 62: Die Druckfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Tendenziell lässt sich die Aussage treffen, dass sich die Druckfestigkeit mit zunehmendem Alter der Geopolymere erhöht. Diese Tendenz lässt sich auch aus Abbildung 62 deutlich ablesen. Das vorher erwähnte Verhalten ist nur bei den 14 Tage alten Versuchskörpern ohne Faserverstärkung bei einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C nicht gültig. (Siehe: 80-14-OF). Unter Berücksichtigung des Verlaufes aller Messergebnisse (siehe Abbildung 62) kann festgestellt werden, dass der Wert von 80-14-OF unrealistisch ist.

Die Erhöhung der Druckfestigkeit der Geopolymere (mit und ohne Faserverstärkung) war am signifikantesten bei einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C, wobei die Druckfestigkeit der 28-Tage-Versuchskörper 3,3-mal so hoch war, wie die Druckfestigkeit der 7-Tage-Versuchskörper. Im Gegensatz dazu besitzen die Versuchskörper bei einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C eine relativ hohe Frühfestigkeit: bei den faserverstärkten Versuchskörpern 15,32 MPa und bei den Versuchskörpern ohne Faserverstärkung 23,89 MPa. Diese Werte ändern sich mit zunehmendem Alter nicht bedeutend.

4.8. Biegezugfestigkeit

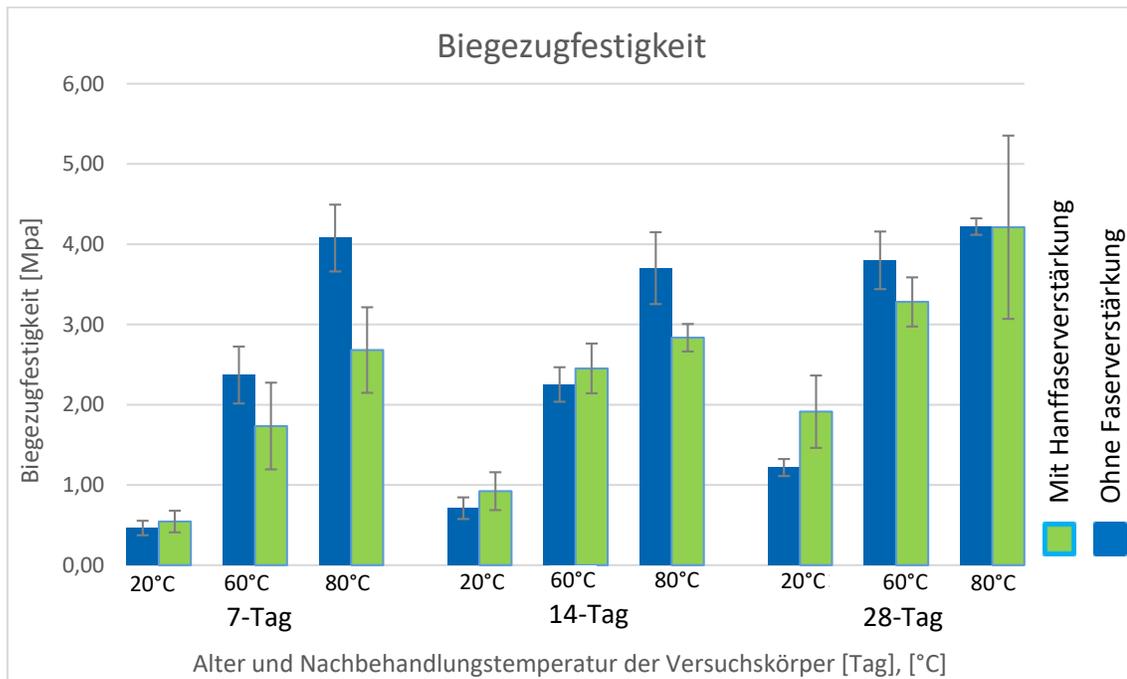


Abbildung 63: Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Die Abbildung 63 verdeutlicht die Ergebnisse für die Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Hanffaserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen. In den Beilagen 3-38 befindet sich der Verlauf aller Messergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung. Die Berechnung der Biegezugfestigkeit erfolgte nach der bereits erwähnten Formel (siehe: Kapitel 3.4 Formel 1). Es muss angemerkt werden, dass der Mittelwert der Biegezugfestigkeit aus zwei statt drei Versuchskörpern bei der Gruppe 60-14-OF berechnet wurde, weil ein Versuchskörper nicht ordentlich versagte. Siehe den Verlauf des Lastdurchbiegungsdiagrammes in Beilage 19.

Das Diagramm zeigt, dass die Faserverstärkung keinen deutlichen, positiven Einfluss auf die Biegezugfestigkeit der Versuchskörper hat. Es gab aber einen signifikanten Unterschied zwischen der Biegezugfestigkeit von 80-7-OF und 80-7-MF, von 80-14-OF und 80-14-MF.

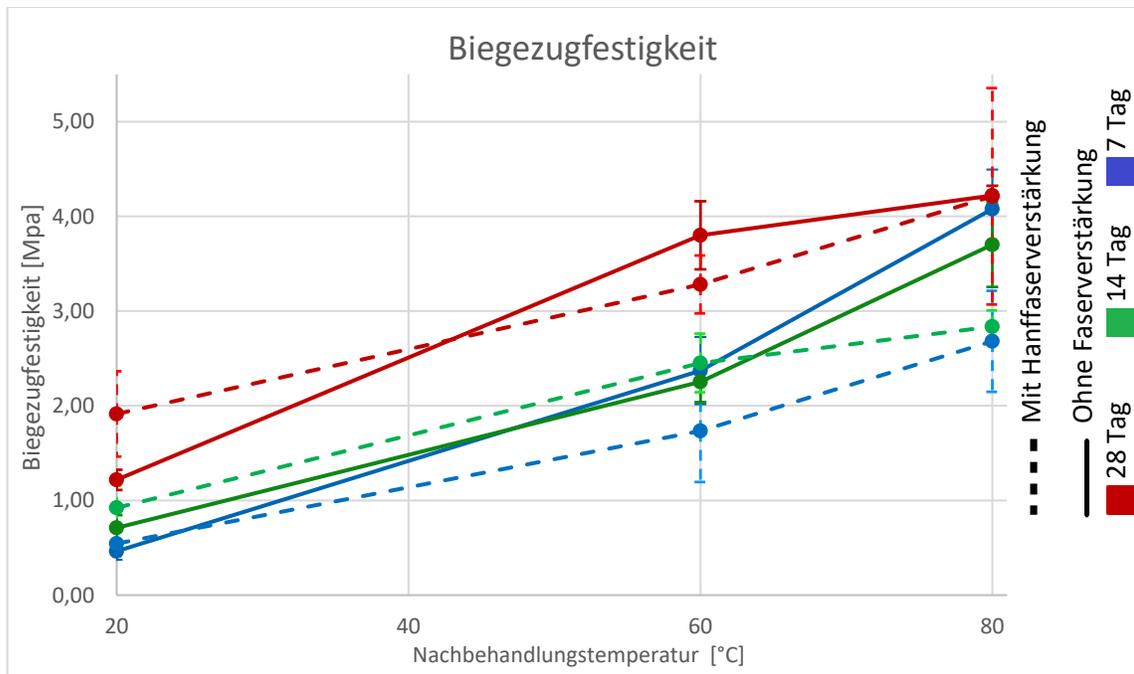


Abbildung 64: Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, ist die Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung von der Nachbehandlungstemperatur abhängig. In Bezug auf diese Festigkeit kann die allgemeine Aussage getroffen werden: wenn die Nachbehandlungstemperatur steigt, erhöht sich die Biegezugfestigkeit. Interessant ist, dass die Biegezugfestigkeit der 7-Tage-Versuchskörper ohne Fasern mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C (80-7-OF) ca. 8,9-mal so hoch ist, als die Biegezugfestigkeit derselben Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C (20-7-OF). Im Vergleich zu Geopolymeren mit Faserverstärkung ist der Unterschied der 7-Tage-Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C (80-7-MF) 5-mal so hoch, als die Biegezugfestigkeit derselben Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C (20-7-MF).

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C und mit Faserverstärkung durchschnittlich 3,4-mal größer ist, als dieselben Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C. Bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung ist dieser Multiplikator 5,8. Der

durchschnittliche Wert der Biegezugfestigkeit der hanffaserverstärkten alkalisch-aktivierten Versuchskörpern mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C ist durchschnittlich 3,24 MPa. Dieser Wert beträgt bei einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C durchschnittlich 1,13 MPa.

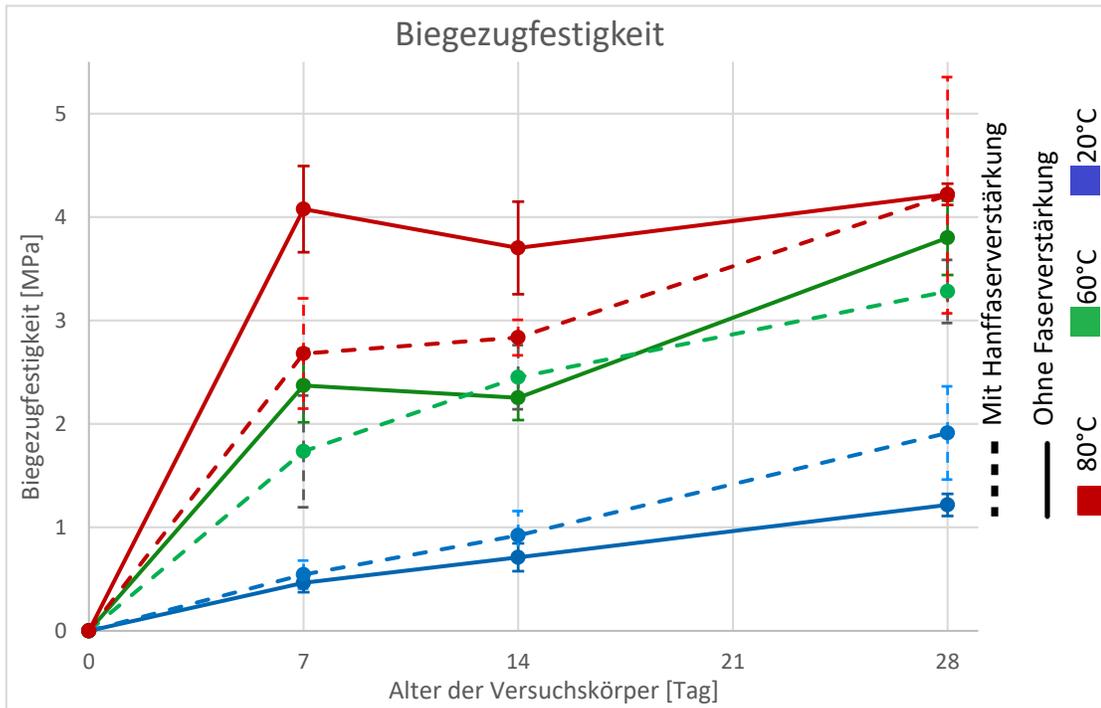


Abbildung 65: Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Hinsichtlich des Alters der Geopolymere kann festgestellt werden, dass tendenziell eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit erkennbar ist, wenn sich nur das Alter des Versuchskörpers verändert. Je älter der Versuchskörper ist, desto größer ist die Biegezugfestigkeit. Eine Ausnahme bilden 80-7-OF und 80-14-OF und 60-7-OF und 60-14-OF: die Biegezugfestigkeit ist bei den Gruppen 80-14-OF und OF-60-14-OF kleiner, als bei den Gruppen 80-7-OF und 60-7-OF. Diese Tendenz lässt sich auch aus Abbildung 65 deutlich ablesen.

Die Erhöhung der Biegezugfestigkeit der faserverstärkten Geopolymere war am signifikantesten bei einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C, wobei die Biegezugfestigkeit der 28-Tage-Versuchskörper 3,5-mal so hoch war, wie die Biegezugfestigkeit der 7-Tage-Versuchskörper. Bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung ist dieser Multiplikator 2,7. Eine relativ hohe Frühfestigkeit bezüglich der Biegezugfestigkeit ist charakteristisch für die Versuchskörper bei einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C: bei den faserverstärkten Versuchskörpern 2,68 MPa und bei den Versuchskörpern ohne Faserverstärkung 4,08 MPa.

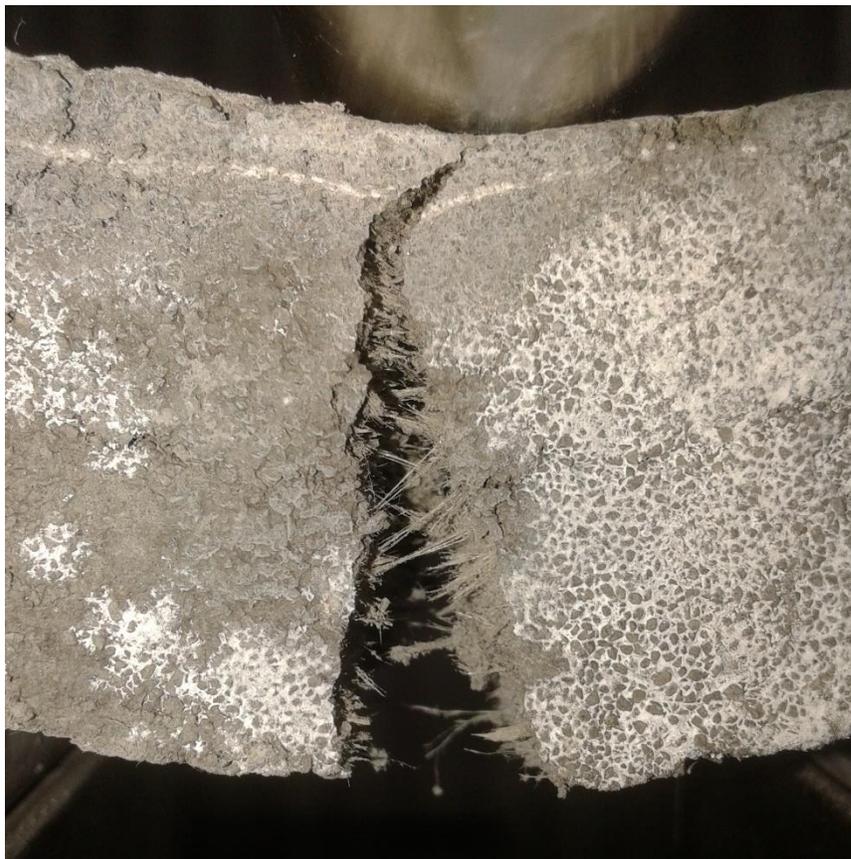


Abbildung 66: Versuchskörper unter Biegezugfestigkeitsprüfung

4.9. Bruchenergie

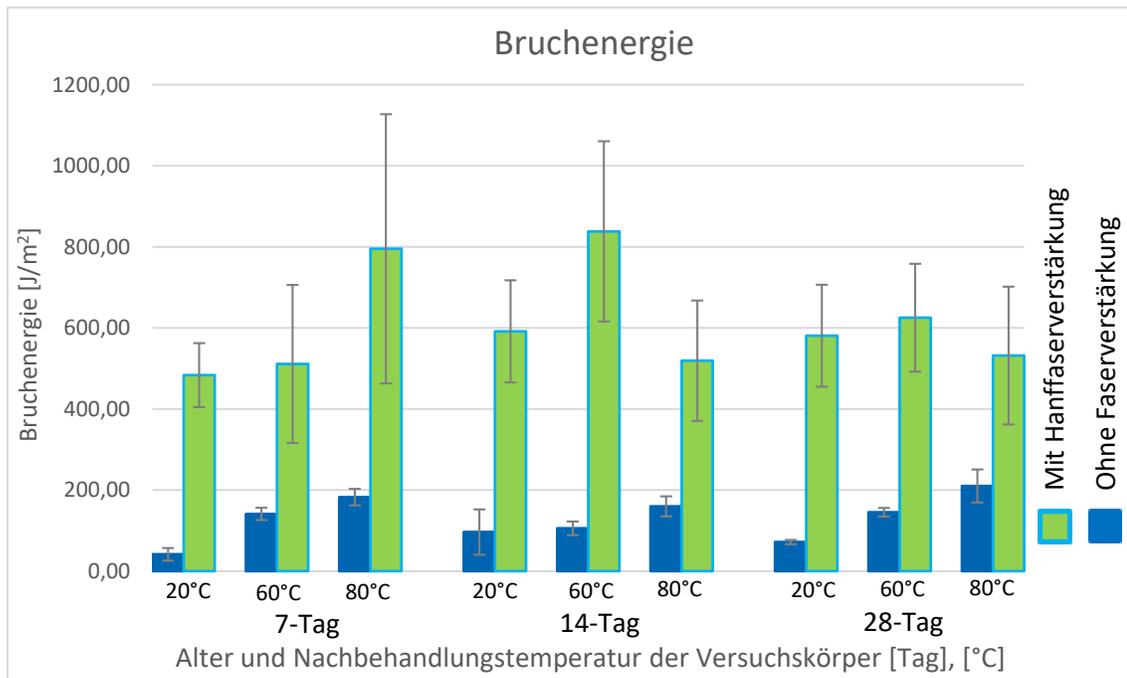


Abbildung 67: Bruchenergie der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Die Abbildung 67 veranschaulicht die Ergebnisse für die Bruchenergie der Geopolymere mit und ohne Hanffaserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen. Die Bruchenergie wurde anhand der schon gegebenen Methode (siehe: Kapitel 3.4) ermittelt.

In der Abbildung 67 zeigt sich der positive Einfluss der Faserverstärkung auf die Bruchenergie der Geopolymere deutlich. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Faserverstärkung zu einer höheren Bruchenergie führt. Die größte Bruchenergie wurde bei der faserverstärkten Gruppe 60-14-MF ermittelt. Die Bruchenergie dieser Gruppe ist ca. 11,1-mal so hoch, als die Bruchenergie derselben Versuchskörper ohne Faserverstärkung (60-14-OF). Die Bruchenergie der Geopolymere mit Faserverstärkung ist durchschnittlich etwa 5,8-mal größer als die der Geopolymere ohne Faserverstärkung.

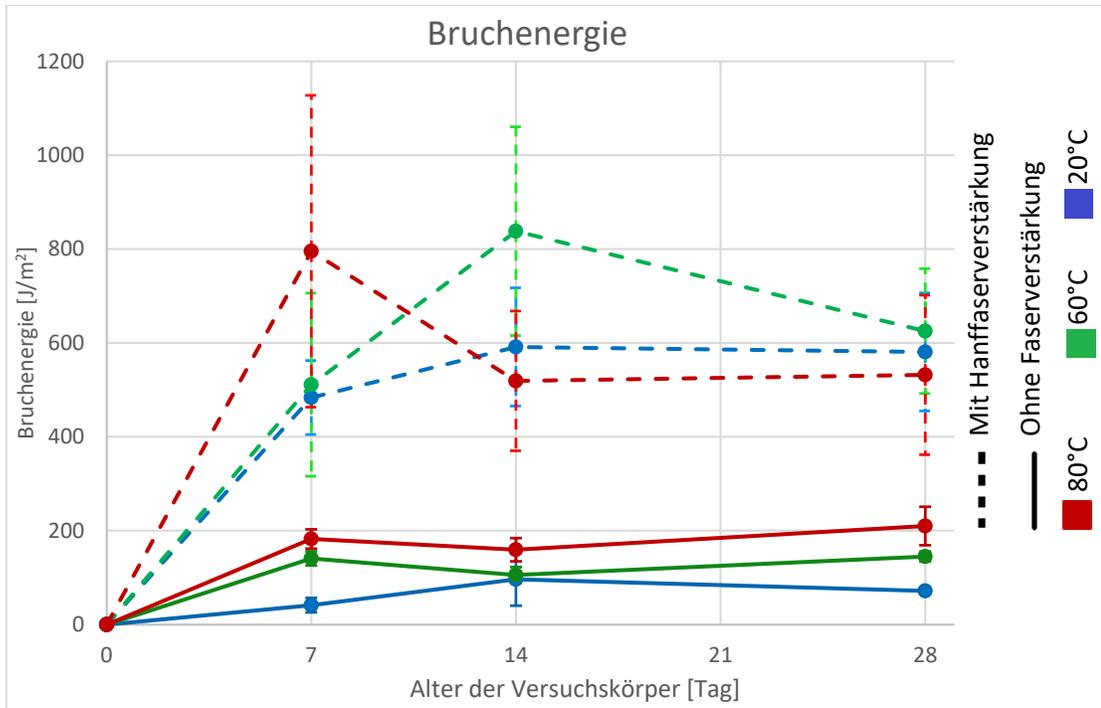


Abbildung 68: Bruchenergie der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen

Interessant erscheint die Betrachtung der Bruchenergie, wenn sich nur die Nachbehandlungstemperatur verändert. Es kann festgestellt werden, dass die Bruchenergie mit zunehmender Nachbehandlungstemperatur steigt. Eine Ausnahme bilden 80-14-MF und 80-28-MF. Zum Beispiel ist die Bruchenergie bei der Gruppe 80-14-MF (40%) kleiner, als bei der Gruppe 60-14-MF.

Im Vergleich von Abbildung 65 und Abbildung 68 kann folgendes festgestellt werden: Obwohl sich die Biegezugfestigkeiten bei den Geopolymeren mit Faserverstärkung mit zunehmendem Alter erhöht, ist die Bruchenergie ab 14 Tagen konstant oder degressiv. Dies lässt sich damit erklären, dass die Fasern die hohe Biegezugfestigkeit nicht mehr aufnehmen können und das zum Verlust der Funktion der Faserverstärkung führt.

5. Zusammenfassende Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurden die hanffaserverstärkten alkalisch-aktivierten Geopolymeren untersucht, um die technische Leistungsfähigkeit dieser Materialien in potentiellen Massenanwendungen wie PZ-Beton zu demonstrieren. Um ein alternatives Bindemittel in – somit einem alternativen – Beton verwenden zu können, ist die umfassende Kenntnis ihrer Eigenschaften notwendig. Bei diesem Forschungsprojekt wurde der Einfluss der Hanffaser und der Nachbehandlungstemperatur auf die Eigenschaften des alkalisch-aktivierten Mörtels aus Flugasche durch verschiedene Prüfverfahren ausgewertet.

Um den Einfluss der Faserverstärkung überprüfen zu können, wurden Versuchskörper ohne Fasern als Kontrollgruppe erstellt. Aus den Untersuchungsergebnissen stellte sich heraus, dass die Faserverstärkung die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Geopolymers beeinflusst. Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass die faserverstärkten Geopolymere immer eine größere Porosität, eine größere kapillare und vollständige Wasseraufnahme haben, als die Geopolymere ohne Faserverstärkung.

Hinsichtlich der Faserverstärkung wurde bestimmt, dass tendenziell eine Erhöhung der Bruchenergie erkennbar ist. Die Bruchenergie der Geopolymere mit Faserverstärkung ist durchschnittlich etwa 5,8-mal größer als bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung. Die Messergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung und der Druckfestigkeitsprüfung zeigten, dass der positive Einfluss der Faserverstärkung nicht eindeutig ist.

Andererseits wurde geprüft, wie die Nachbehandlungstemperatur die physischen und mechanischen Eigenschaften der Geopolymere beeinflusst. In Bezug auf die vollständige Wasseraufnahme und die Porosität kann die allgemeine Aussage getroffen werden: Wenn die Nachbehandlungstemperatur steigt, erhöhen sich deren Werte. Im Vergleich zu Geopolymeren mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C ist die vollständige Wasseraufnahme der Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C um etwa 14 % größer bei Geopolymeren mit Faserverstärkung und um etwa 19 % größer bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung. Unter denselben Konditionen steigt die Porosität

bei Geopolymeren mit Faserverstärkung um ca. 16% und bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung um ca. 18%. Anhand der Messergebnisse der kapillaren Wasseraufnahme wurde tendenziell festgestellt, dass die obige Aussage auf diese Kenngröße umgekehrt gilt: wenn die Nachbehandlungstemperatur steigt, vermindert sich die kapillare Wasseraufnahme. Im Vergleich zu Geopolymeren mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20 °C ist die kapillare Wasseraufnahme der Versuchskörper mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °C um ca. 27 % (durchschnittlicher Wert) niedriger bei Geopolymeren mit Faserverstärkung und um etwa 38 % niedriger bei Geopolymeren ohne Faserverstärkung.

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften der alkalisch-aktivierten Versuchskörpern wurde im Allgemeinen festgestellt: Wenn die Nachbehandlungstemperatur zunimmt, erhöht sich die Druckfestigkeit, die Bruchenergie (Ausnahme: 14 und 28 Tage alten Geopolymeren mit Faserverstärkung mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80 °) und die Biegezugfestigkeit. Die Druckfestigkeit der faserverstärkten Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C war durchschnittlich 4,2-mal größer, als die derselben Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C. Bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung war dieser Multiplikator 7. Die Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C bei Geopolymeren mit Faserverstärkung ist durchschnittlich 3,4-mal größer, als die derselben Geopolymere mit einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C. Bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung ist dieser Multiplikator 5,8.

In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften wurde die allgemeine Aussage getroffen, dass die Druck- und Biegezugfestigkeit mit zunehmendem Alter zunimmt. Die Erhöhung der Druckfestigkeit der Geopolymere (mit und ohne Faserverstärkung) war am signifikantesten bei einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C, wobei die Druckfestigkeit der 28-Tage-Versuchskörper 3,3-mal so hoch war, wie die Druckfestigkeit der 7-Tage-Versuchskörper. Im Gegensatz dazu besitzen die Versuchskörper bei einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C eine relativ hohe Frühfestigkeit. Diese Werte ändern sich mit zunehmendem Alter nicht bedeutend. Die Erhöhung der Biegezugfestigkeit

der faserverstärkten Versuchskörper war am signifikantesten auch bei einer Nachbehandlungstemperatur von 20°C, wobei die Biegezugfestigkeit der 28-Tage-Versuchskörper 3,5-mal so hoch war, wie die Biegezugfestigkeit der 7-Tage-Versuchskörper. Bei den Geopolymeren ohne Faserverstärkung ist dieser Multiplikator 2,7. Eine relativ hohe Frühfestigkeit bezüglich der Biegezugfestigkeit ist charakteristisch für die Versuchskörper auch bei einer Nachbehandlungstemperatur von 80°C.

Bezüglich der Bruchenergie zeigten die Messergebnisse eindeutig, dass die Faserverstärkung zu einer höheren Bruchenergie führt. Die Bruchenergie der faserverstärkten Geopolymere war 5,8-mal so hoch, wie die Bruchenergie des Versuchskörpers ohne Faserverstärkung. Bezüglich der Bruchenergie wurde noch festgestellt, dass, obwohl sich die Biegezugfestigkeiten bei den Geopolymeren mit Faserverstärkung mit zunehmendem Alter erhöht, die Bruchenergie ab 14 Tagen konstant oder degressiv ist. Dies lässt sich damit erklären, dass die Fasern die hohe Biegezugfestigkeit nicht mehr aufnehmen können und dass das zum Verlust der Funktion der Faserverstärkung führt.

Es wurde bezüglich des pH-Wertes festgestellt, dass die Geopolymere über einen basischen pH-Wert verfügen, also ihr pH-Wert ist größer als 7. Der pH-Mittelwert ergab den Wert von 10,91. Die Standardabweichung ist 0,17. Anhand der vorliegenden Ergebnisse konnte die Wirkung des pH-Wertes nicht eindeutig belegt werden.

Dank der physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Geopolymere mit- und ohne Faserverstärkung könnten sie potenziell in bestimmten Anwendungen eingesetzt werden. Dadurch kann die Abhängigkeit von dem Portlandzement und so der ökologische Fußabdruck bei der Herstellung des Betons vermindert werden. Obwohl die Resultate dieser Arbeit befriedigend sind, sind noch weitere Forschungen notwendig. Besonders interessant ist die Dauerhaftigkeit des Materials unter verschiedenen Umgebungsvarianten (Alterungszyklen, alkalische Umgebung) zu untersuchen. Um die Dauerhaftigkeit der Geopolymer entdecken zu können, ist eine umfassende und beständige Untersuchung empfehlenswert.

6. Beilagen

Beilage 1

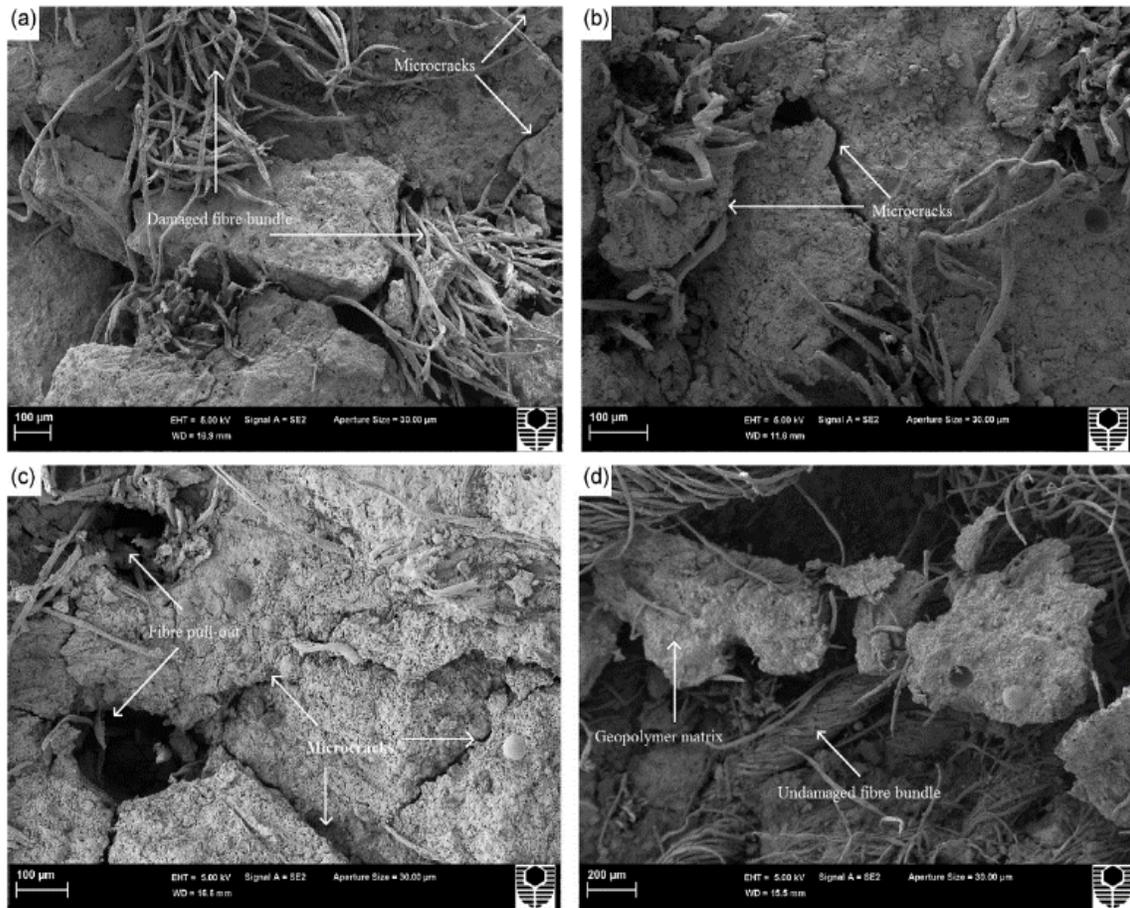


Bild 1: Einflüsse für den Verbund der Faser im Geopolymer ¹



Technikai adatlap

Microsit® 20

**Puccolán hatású cementkiegészítő anyag -
A valóban minőségi cement alapú építőanyagokhoz.**

Termék leírása

A Microsit® 20 egy kitűnő, új, II. típusú latens hidraulikus (puccolán) cementkiegészítő anyag, amelynek segítségével magas minőségi követelményeknek megfelelő habarcsot és betont lehet előállítani. A Microsit® 20 túlnyomórészt SiO₂-ből és Al₂O₃-ből áll, így az alumínium-szilikátok közé tartozik.

Kémiai összetevők (kb.)

SiO ₂	52 %
Al ₂ O ₃	25 %
Fe ₂ O ₃	7 %
CaO	5 %

Fizikai tulajdonságok (kb.)

Izzítási veszteség		3,4 %	(EN 196, 2 rész)
Részecskeforma		gömbölyű	
Blaine-érték		6000 cm ² /g	
Tömör anyag fajsúlya		2.50 g/cm ³	(EN 196, 6 rész)
Fajsúly (por)	lazán	0.74 g/cm ³	
	tömörítve	0.90 g/cm ³	
Szín		szürke	
Vízigény (Kat. B)		92,5 Tömeg%	(DIN EN 450-1, App. B)
Részecske eloszlás	d ₁₀	= 3 µm	(Lézer granulométer)
	d ₅₀	= 6 µm	
	d ₉₀	= 20 µm	

Hatásmechanizmus

A Microsit® 20 a részecskék eloszlásának és gömbölyű formájának köszönhetően jelentősen javítja a reológiai tulajdonságokat. A túlnyomórészt üvegszerű részecskék a puccolán reakciónak köszönhetően javítják a mechanikai tulajdonságokat.

rel. terülés		105 %	(DIN 18555, 2 rész) (CEM I 42,5 cementhabarccsal összehasonlítva)
Aktiválás index	28 nap:	88 %	(EN 196, 1 rész)
	90 nap:	100 %	(EN 196, 1 rész)



Felsenstrasse 12, CH-8808 Pfäffikon, Switzerland – www.newchem.info

Előnyök

A Microsit® 20-at a rendkívüli finom és meghatározott részecse eloszlás jellemzi. Ezen görbék állandóak és a részecskeforma szinte tökéletesen gömbölyű.

Ezen tulajdonságai miatt a Microsit® 20 segítségével célzottan a habarcs vagy beton részecskéinek eloszlását lehet optimalizálni, ezáltal nagyobb tömörség és erősebb cementkötés érhető el.

A Microsit® 20 alkalmazása csökkenti a vízigényt és javítja az anyag reológiai tulajdonságait.

Alkalmazás

A Microsit® 20 rendkívül jó feldolgozhatóságának és nagyfokú reaktivitásának köszönhetően alkalmassá válik olyan egyedülálló tulajdonságokkal rendelkező építési anyagok előállítására, mint:

- Erősen önterülő és öntömörödő anyagok
- Nagy szilárdságú és szélsőséges időjárási viszonyokkal szemben ellenálló habarcs és beton
- Kémiai és fizikai behatásokkal szemben ellenálló habarcs és beton
- Befecskendezendő és finom szerkezetű kötőanyagok

A gyártás közbeni folyamatos minőségellenőrzés garantálja a Microsit® 20 optimális tulajdonságait és folyamatos minőségét. A Microsit® 20 megfelel az adalékanyagokra vonatkozó DIN 1045-2 tanúsítványnak.

Adagolás

Az adagolás a kívánt végtermék tulajdonságaitól függ. Általában a kötőanyag súlyának 8-15 %-a az optimális mennyiség.

Kompatibilitás

A Microsit® 20 kompatibilis a cementtel és hidraulikus kötőanyagokkal, beleértve a kohósalakot és a mészhidrárt.

Biztonság

A biztonsággal kapcsolatos további tudnivalók a mellékelt biztonsági adatlapon találhatóak.

Csomagolás

25 kg-os zsákokban ill. 1.000 kg-os Big Bag-ben, vagy silóban.

Tárolás

Az anyag stabilitásának és hatékonyságának megőrzése érdekében a következő tárolási szabályok betartása elengedhetetlenül fontos:

- tárolás száraz helyen
- a zsákokat és konténereket zárva kell tartani
- a megnyitott zsákokat 3 napon belül fel kell használni

Az említett szabályok betartása mellett az anyag a szállítástól számított 6 hónapig megőrzi a minőségét. A régebbi anyagoknál az esetlegesen előforduló csomósodást a felhasználás előtt célszerű ellenőrizni.

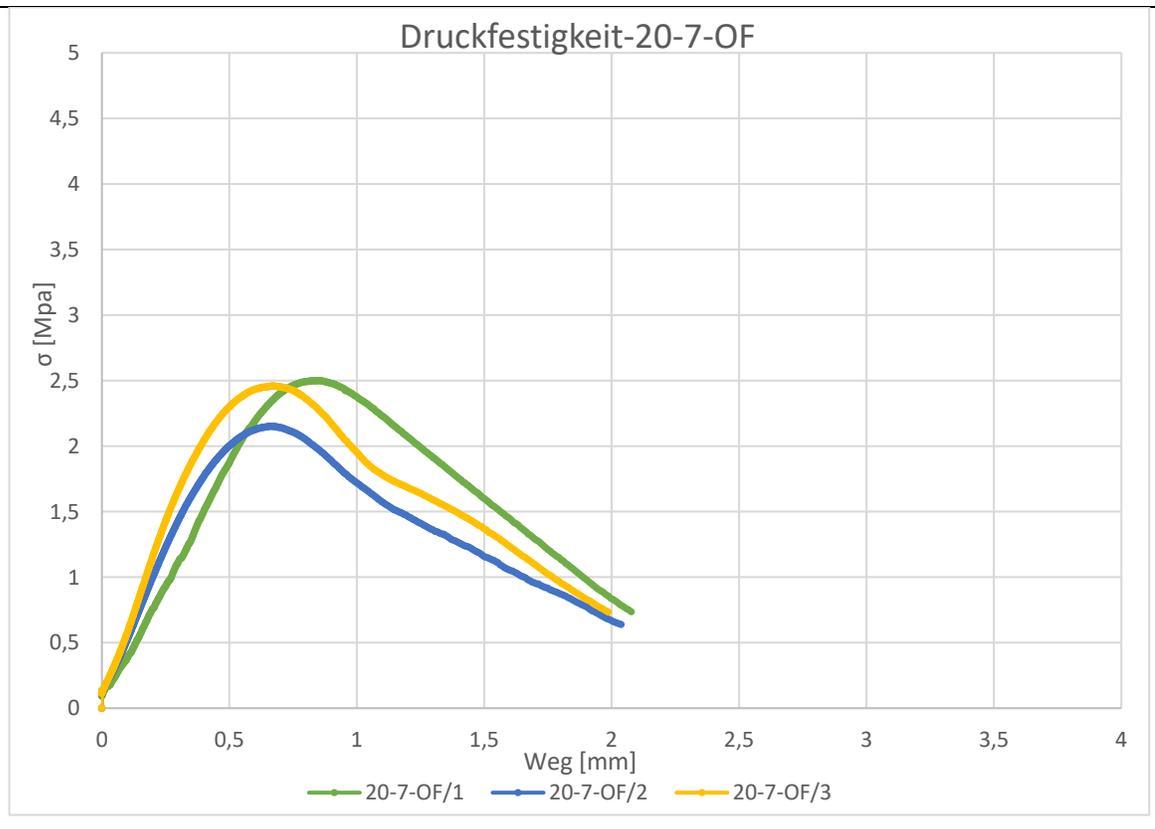
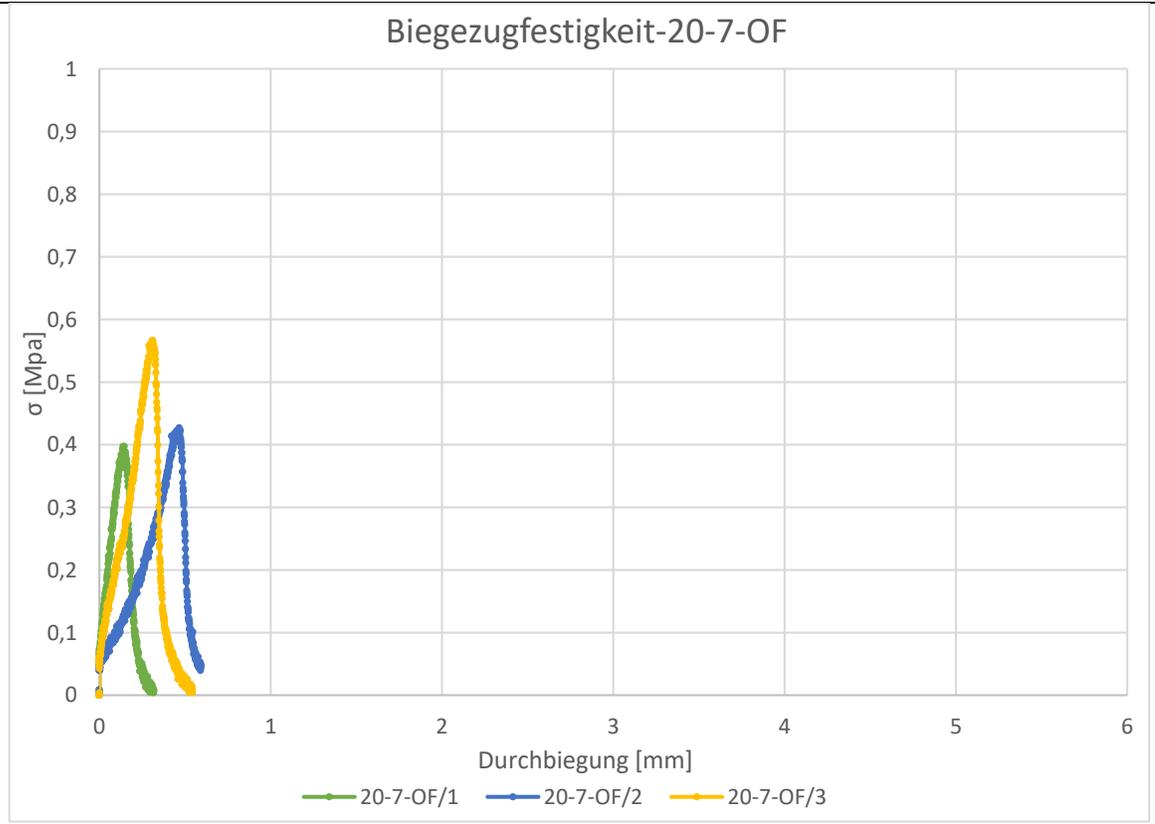
A műszaki alkalmazásokra vonatkozó akár szóbeli, írásbeli, vagy tesztelésen keresztül ajánlásaink a legjobb tudásunk szerinti, azonban ezek csak irányelveknek tekinthetők ham adik fél jogainak vonatkozásában is. Ez az ajánlás nem mentesíti a felhasználót a termékünk adott szándékolt alkalmazásnak való megfelelés ellenőrzésének felelőssége elől. A termék alkalmazása, felhasználása és feldolgozása kívül esik az ellenőrzési lehetőségünkön, ennek következtében felelősségi kötelezettségünkön. Bármely esetben a felelősségünk az általunk szállított és Önök által felhasznált termék értékére korlátozódik. Természetesen mi garantáljuk a termék jó minőségét.

PInfo Microsit 20 2016-hu

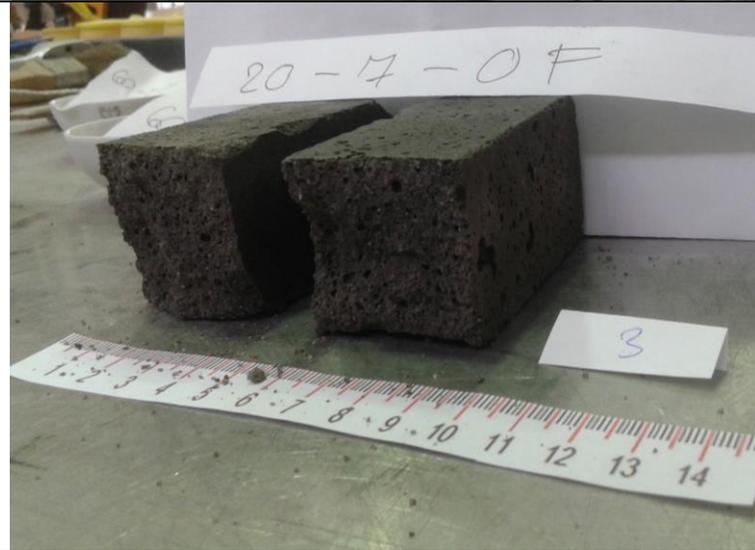


Felsenstrasse 12, CH-8808 Pfäffikon, Switzerland – www.newchem.info

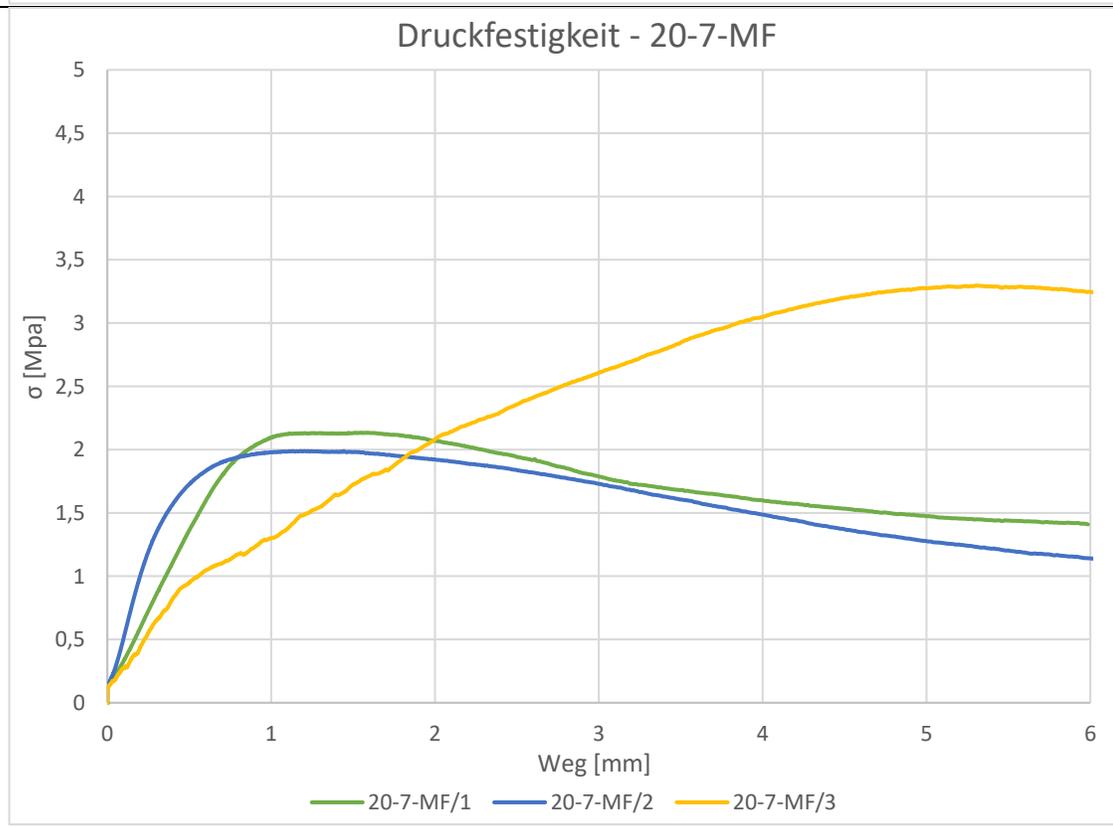
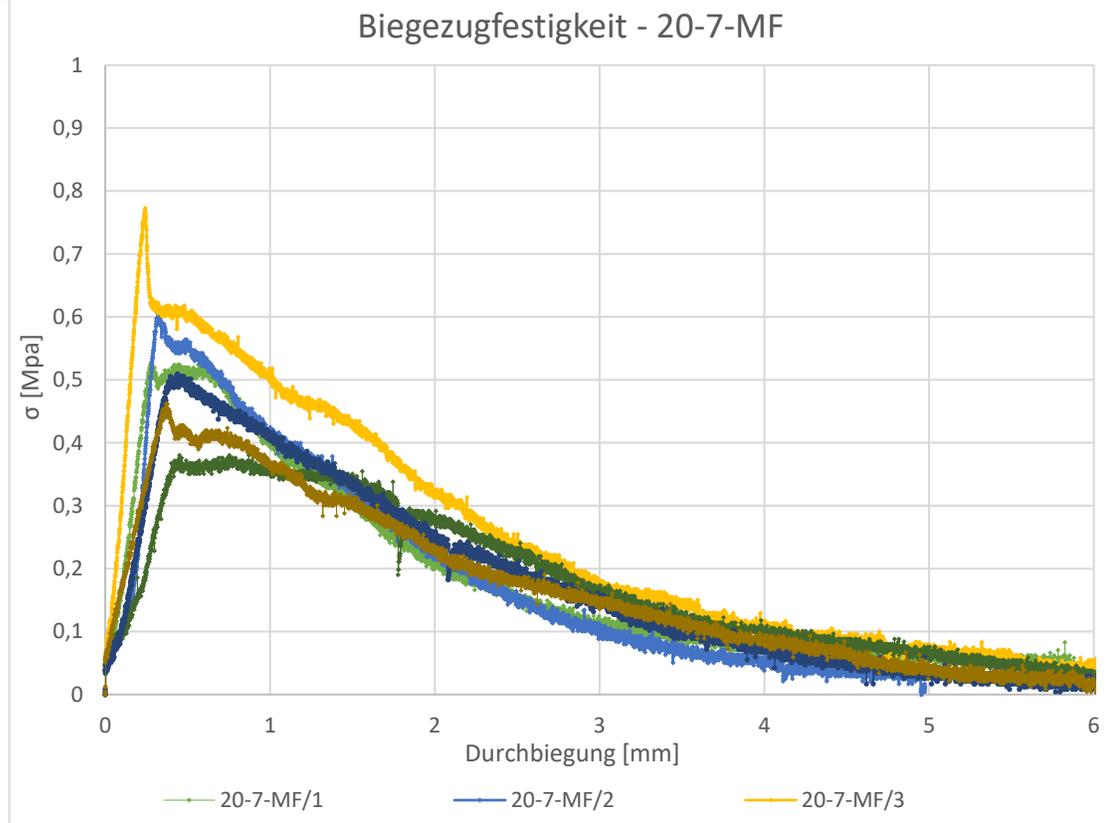
Beilage 3 – 20-7-OF



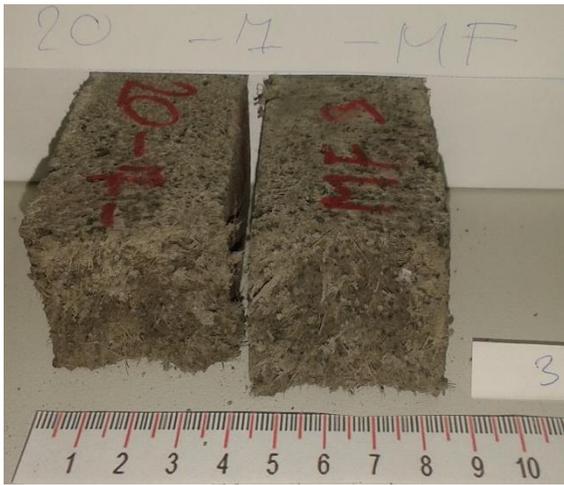
Beilage 4 - 20-7-OF



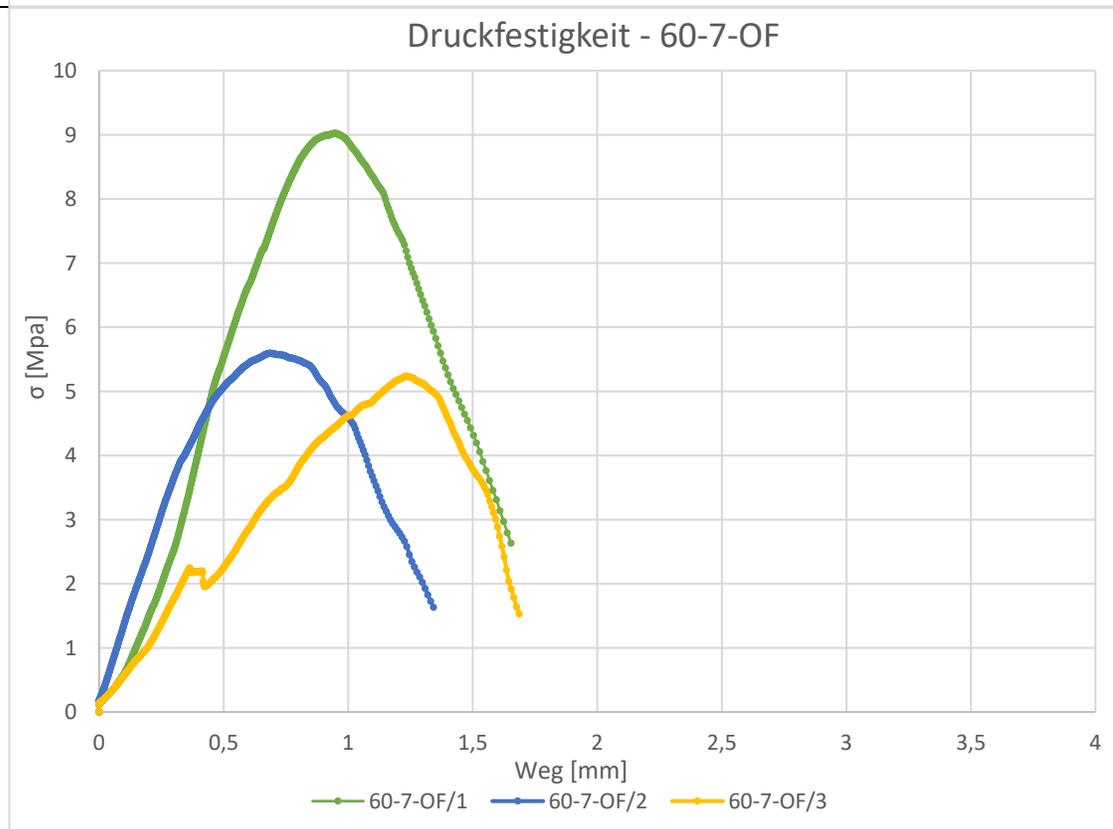
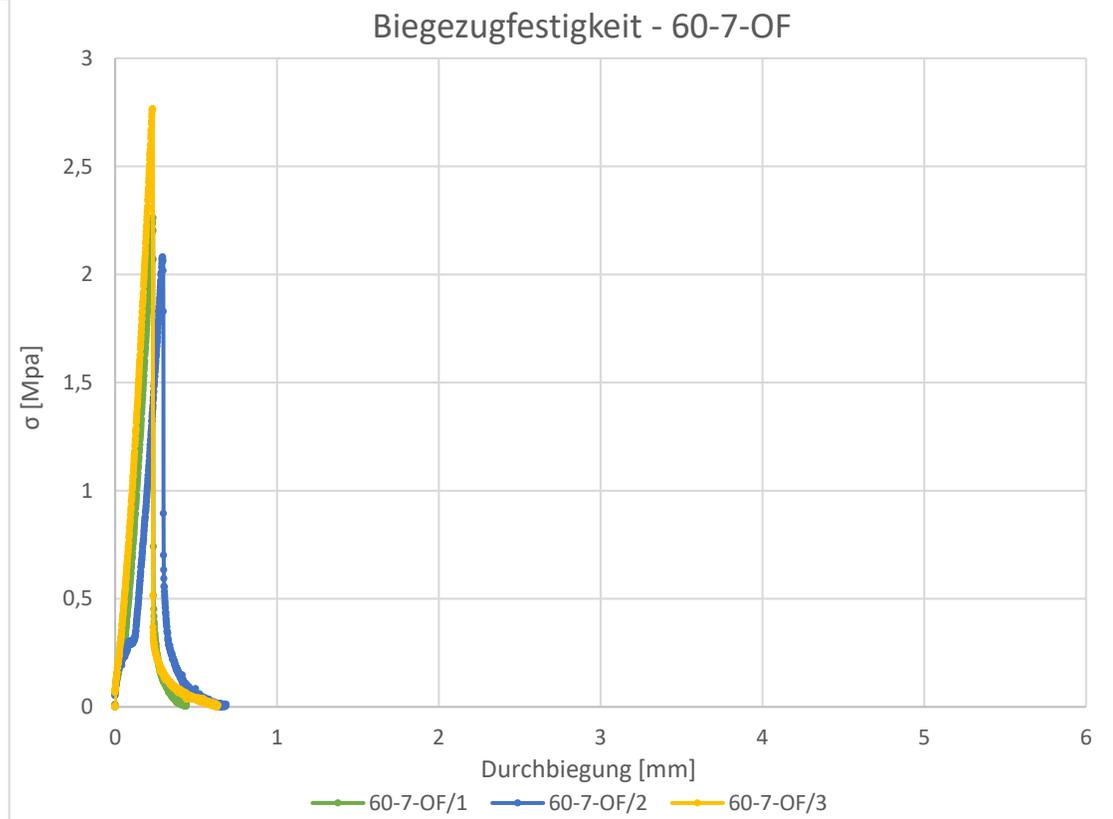
Beilage 5 – 20-7-MF



Beilage 6 - 20-7-MF

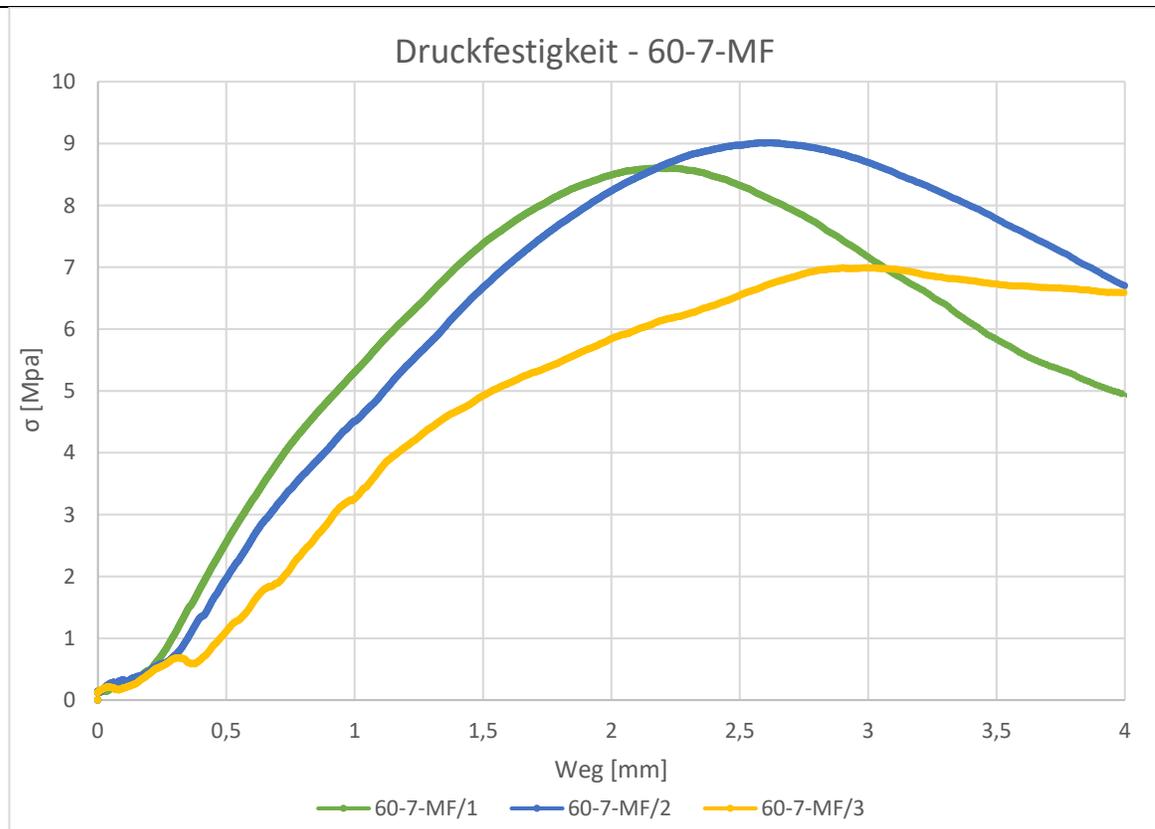
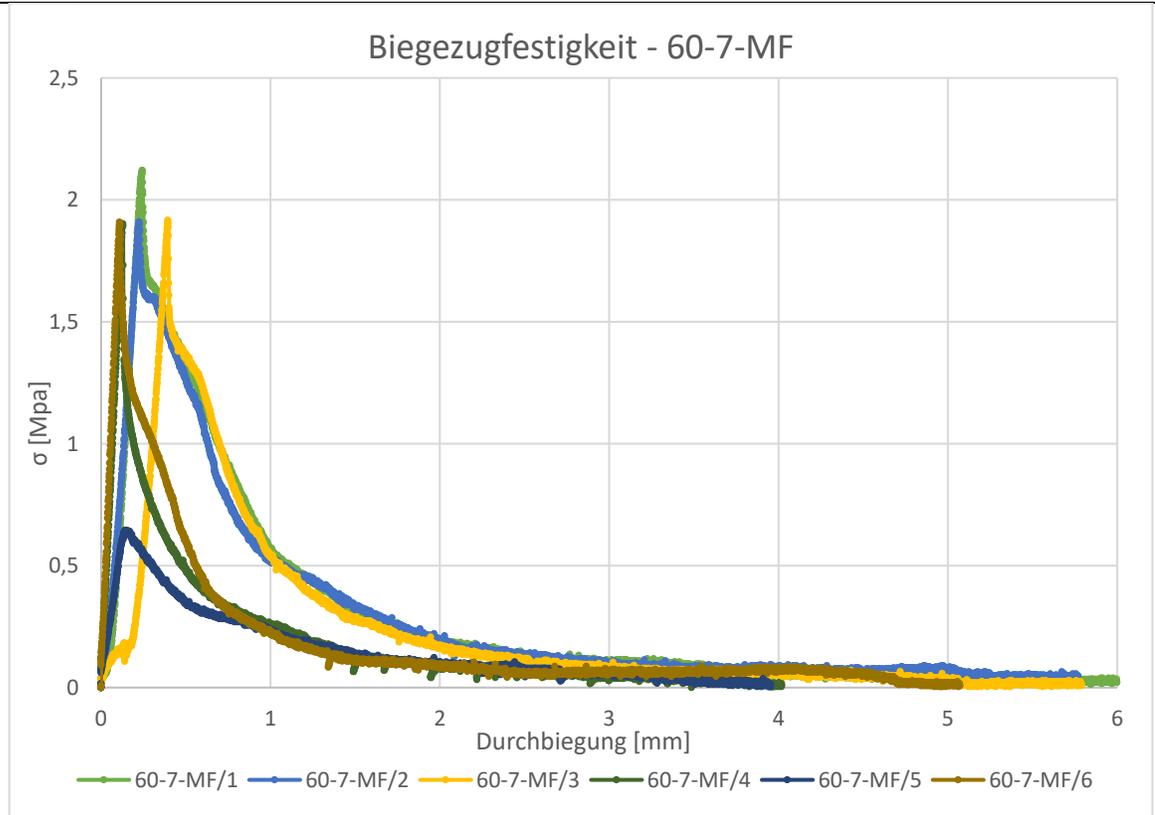


Beilage 7 – 60-7-OF





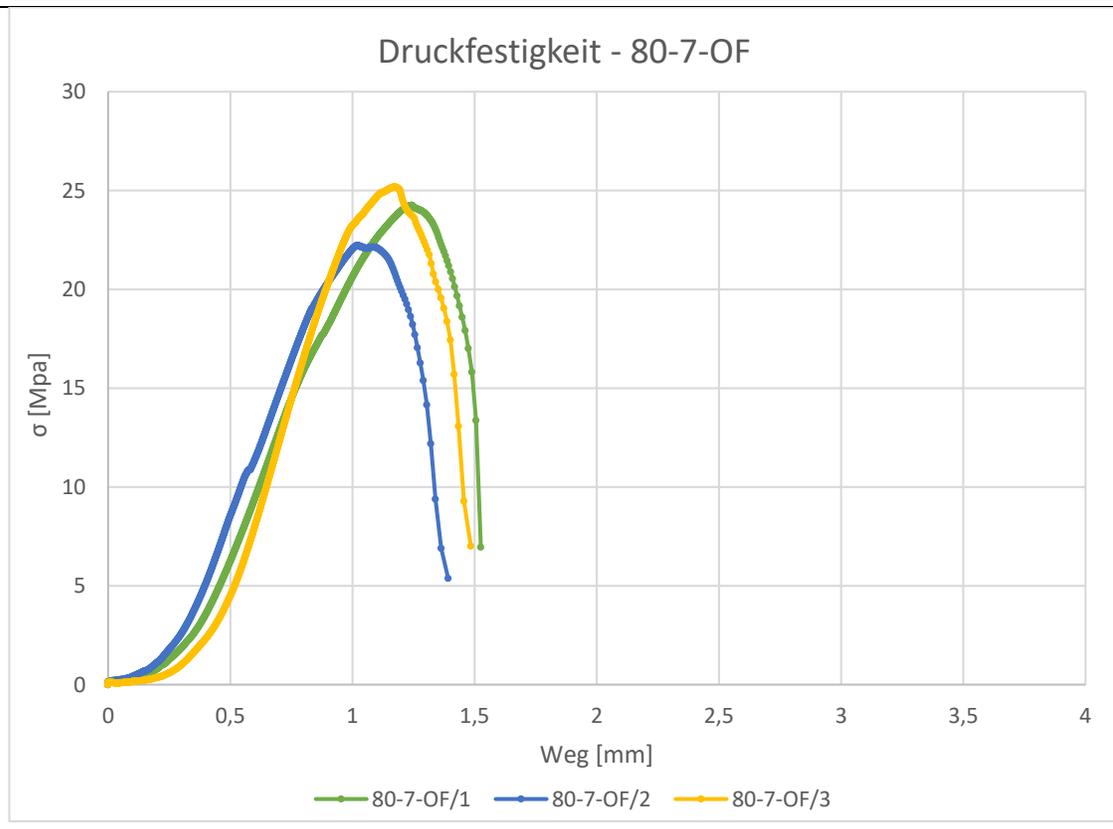
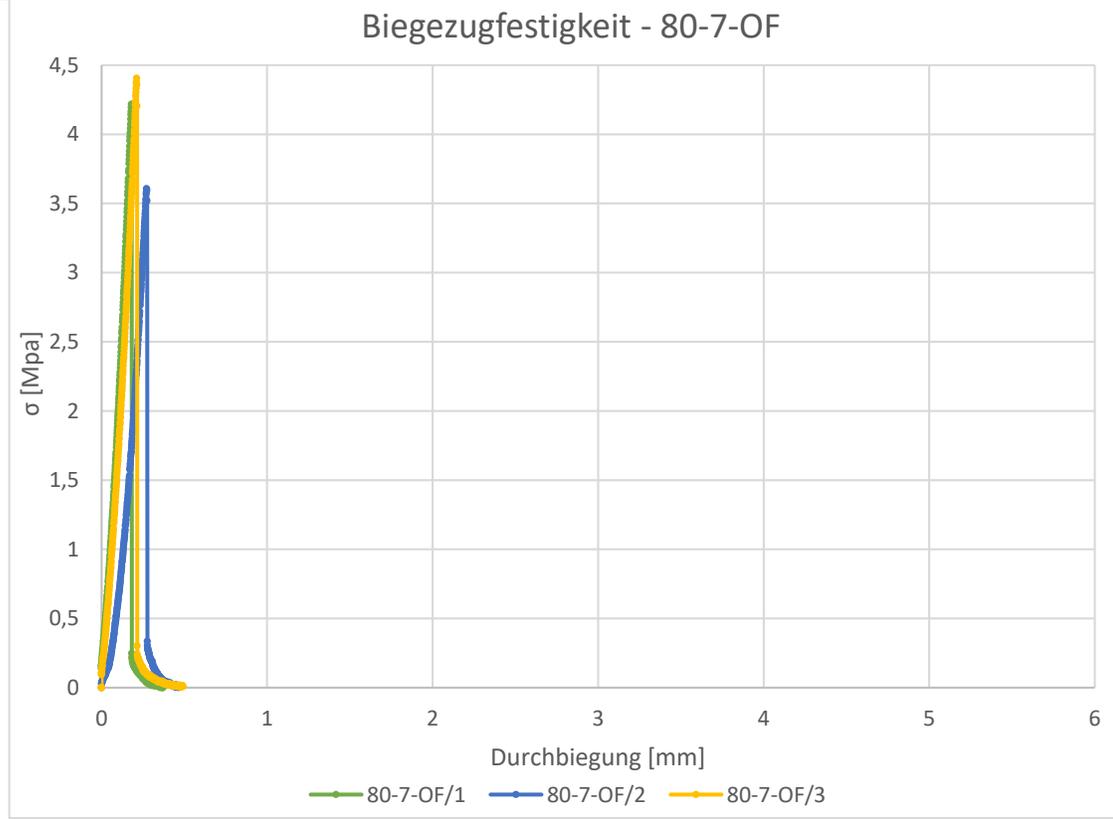
Beilage 9 – 60-7-MF



Beilage 10 – 60-7-MF

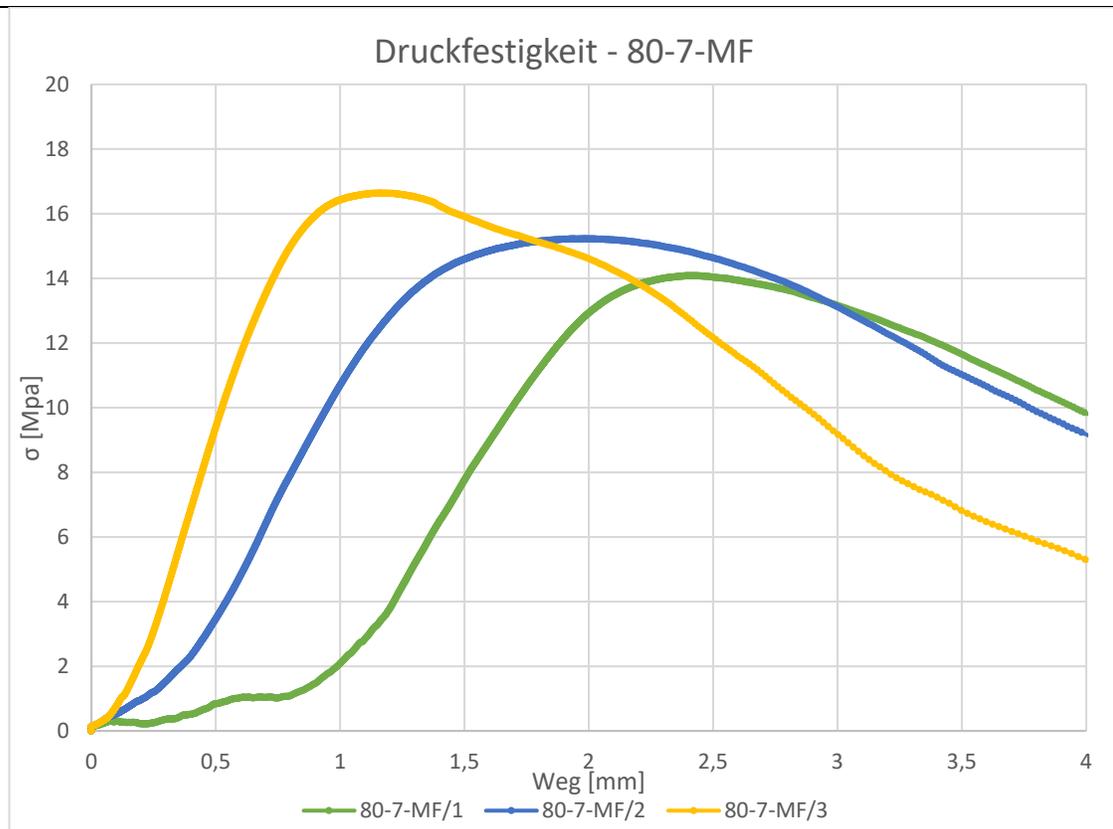
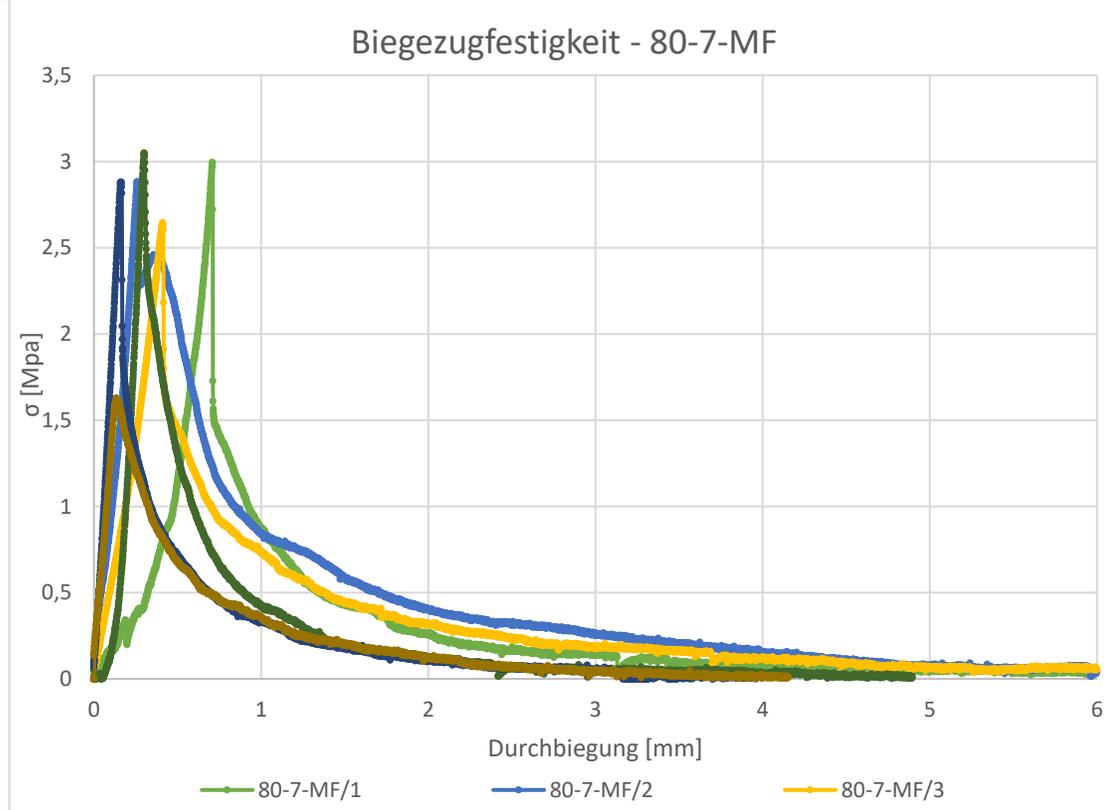


Beilage 11 – 80-7-OF

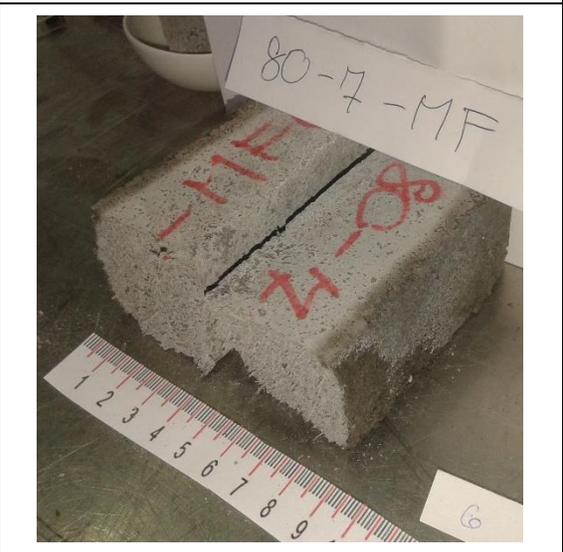
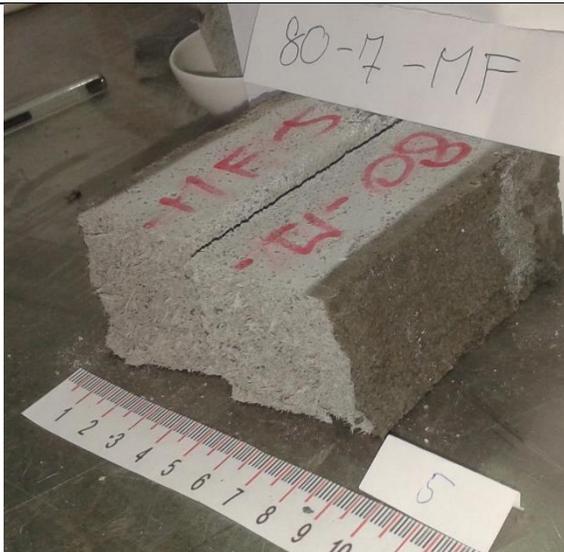
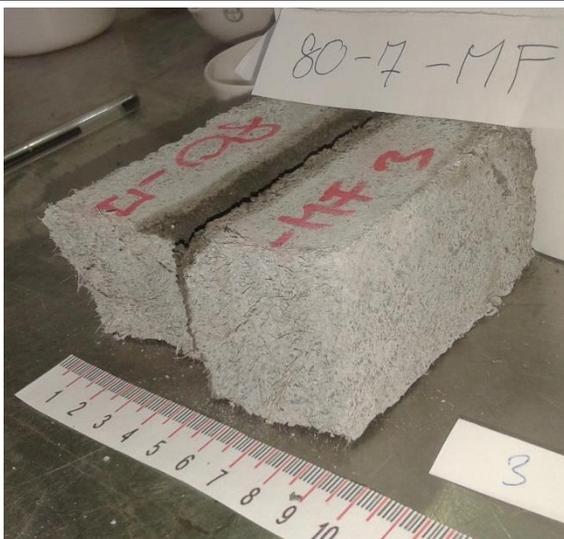


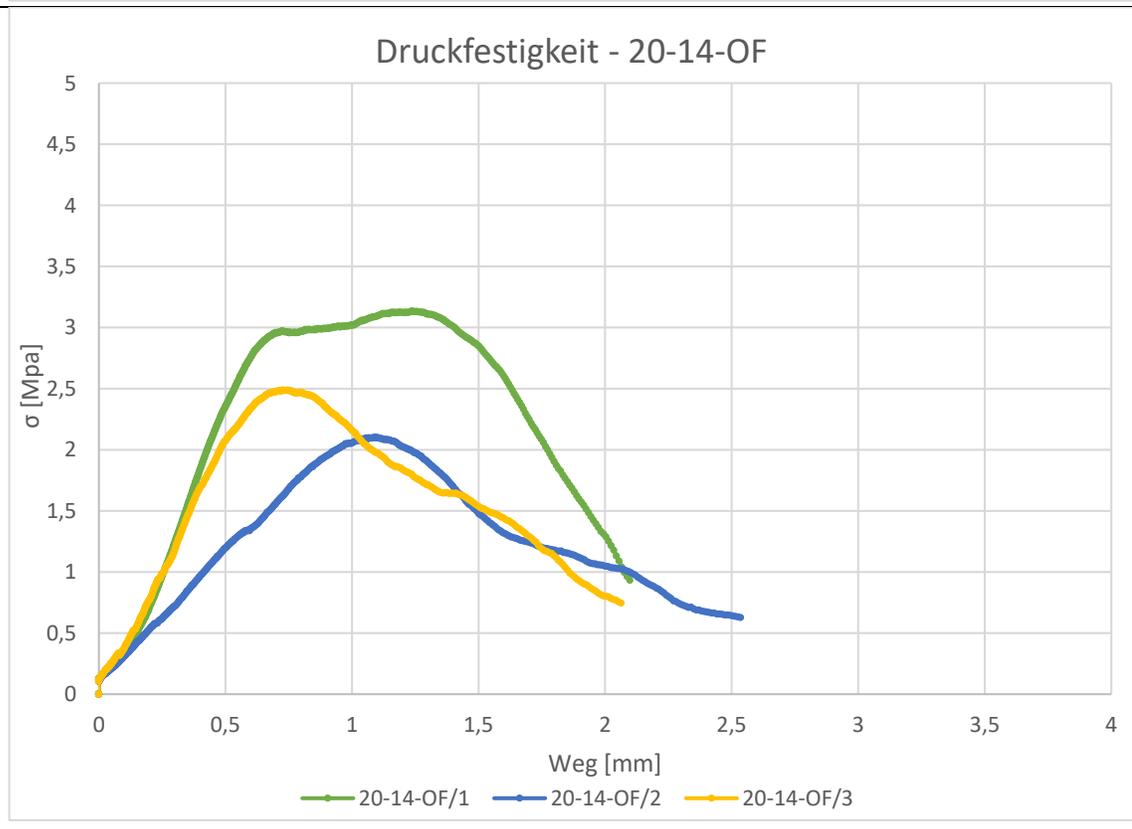
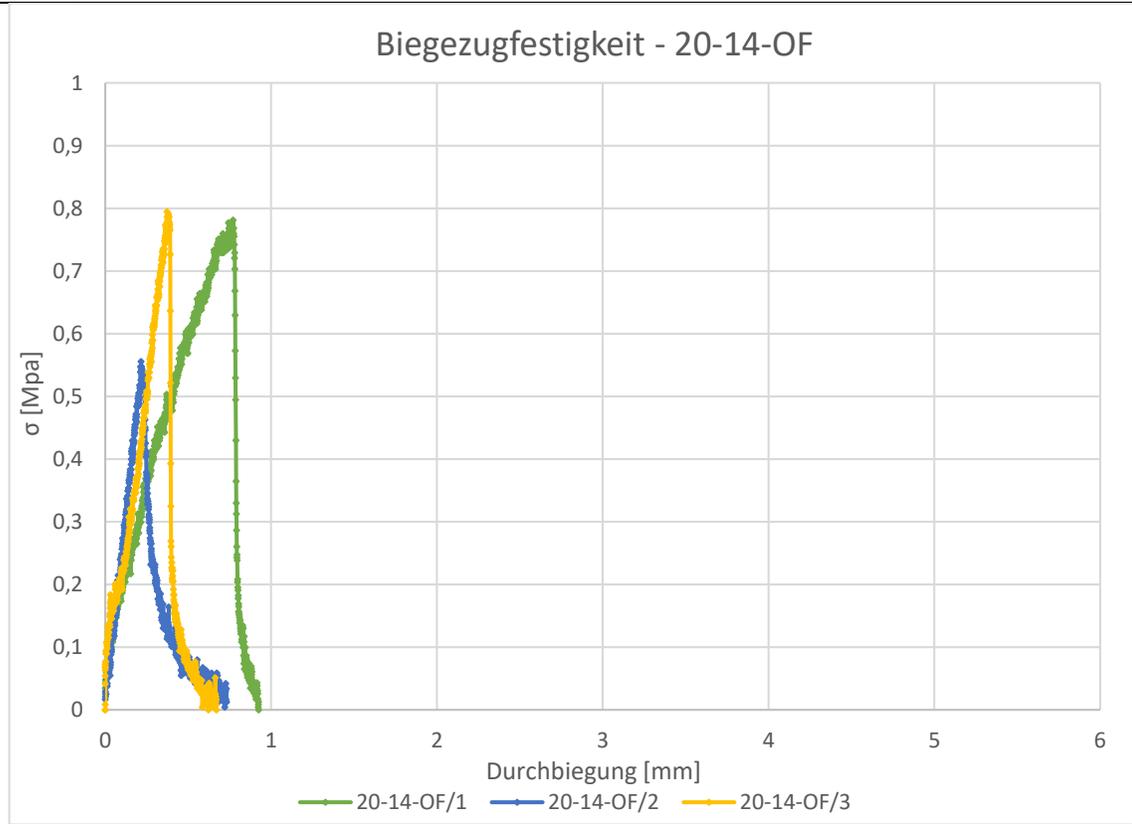
Beilage 12 – 80-7-OF



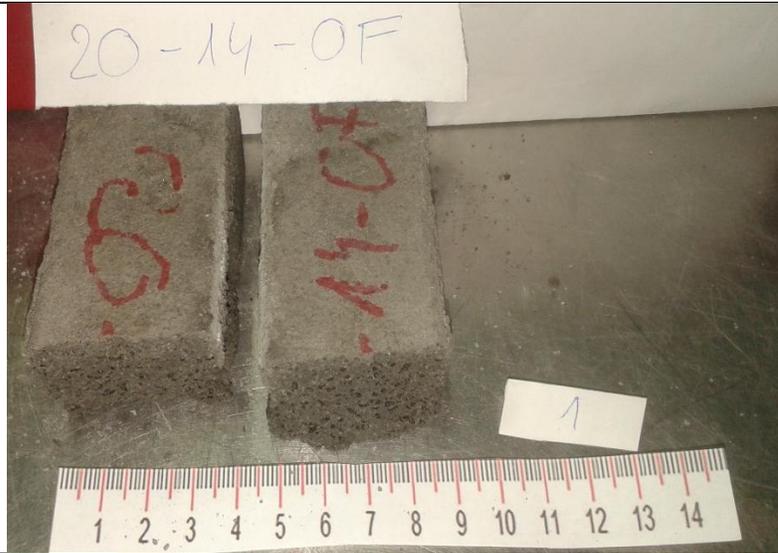


Beilage 14 – 80-7-MF

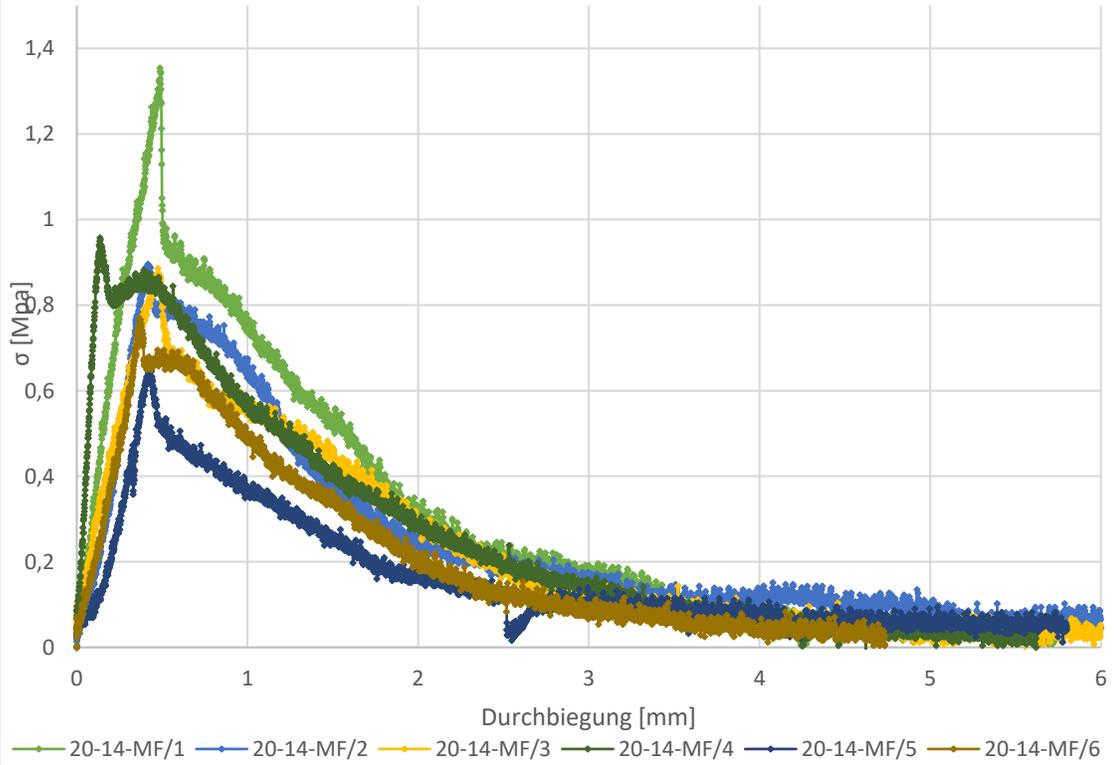




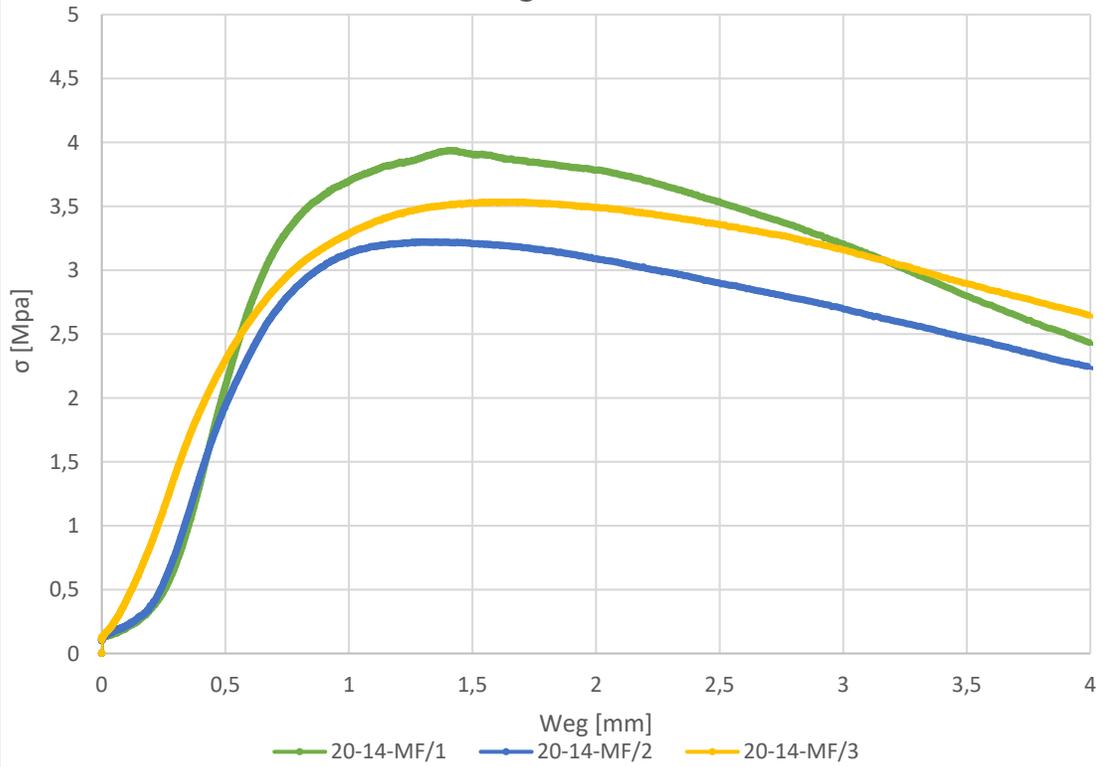
Beilage 16 – 20-14-OF



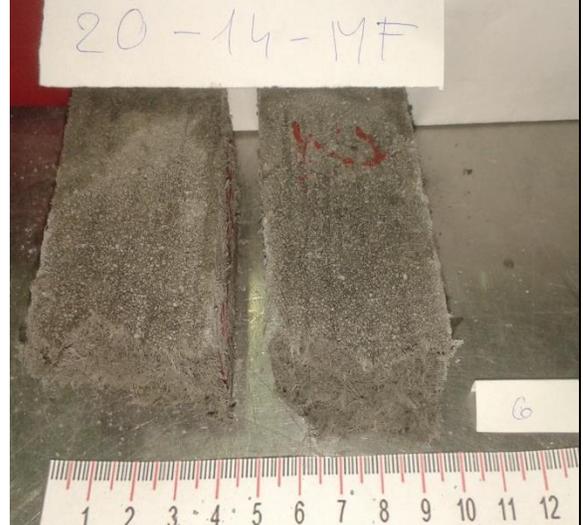
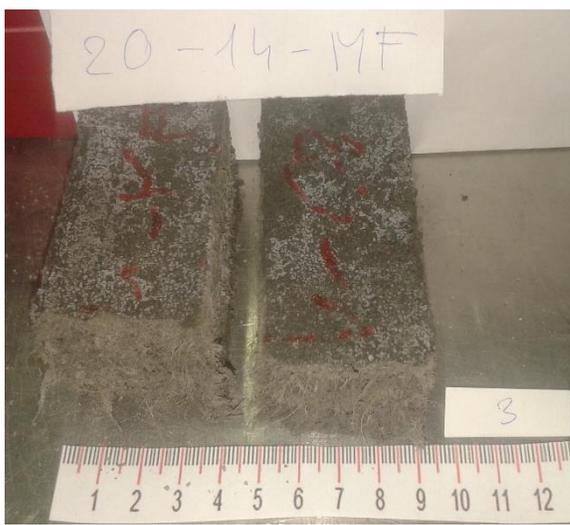
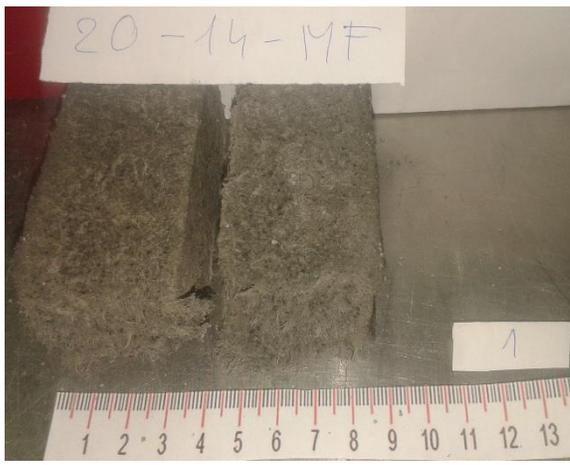
Biegezugfestigkeit - 20-14-MF

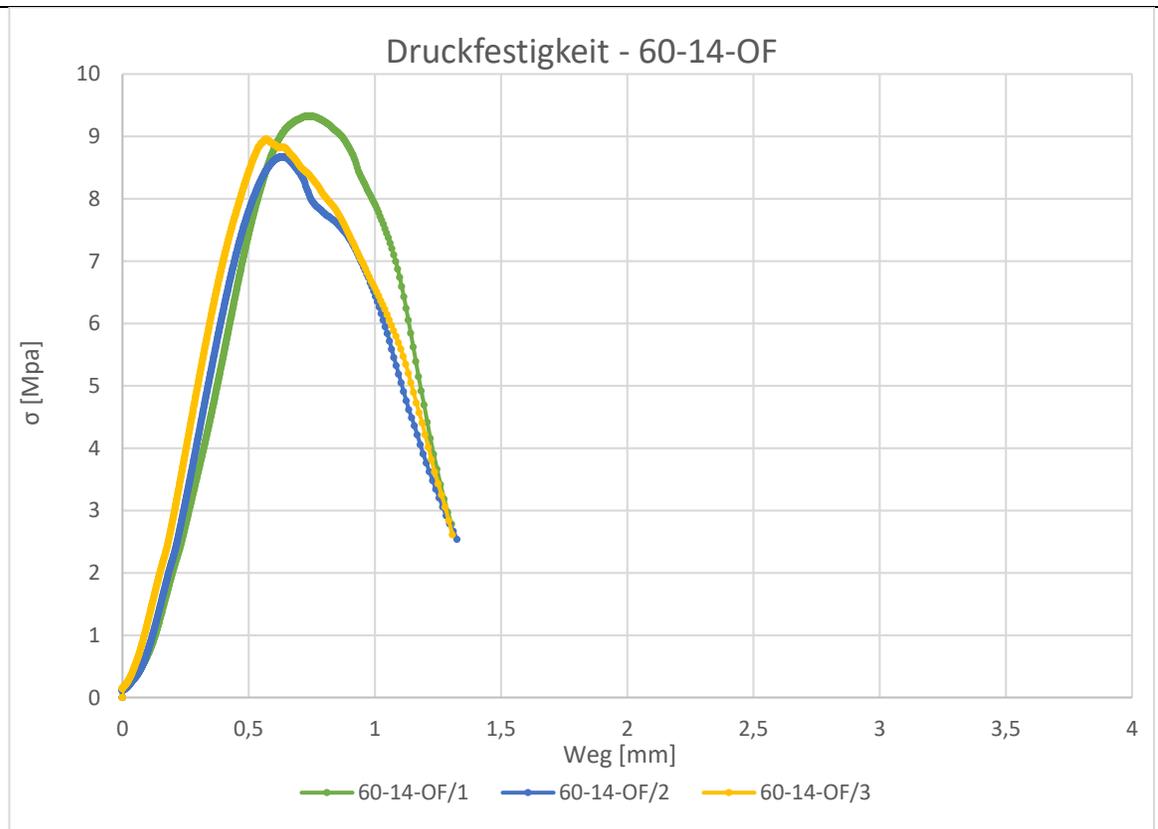
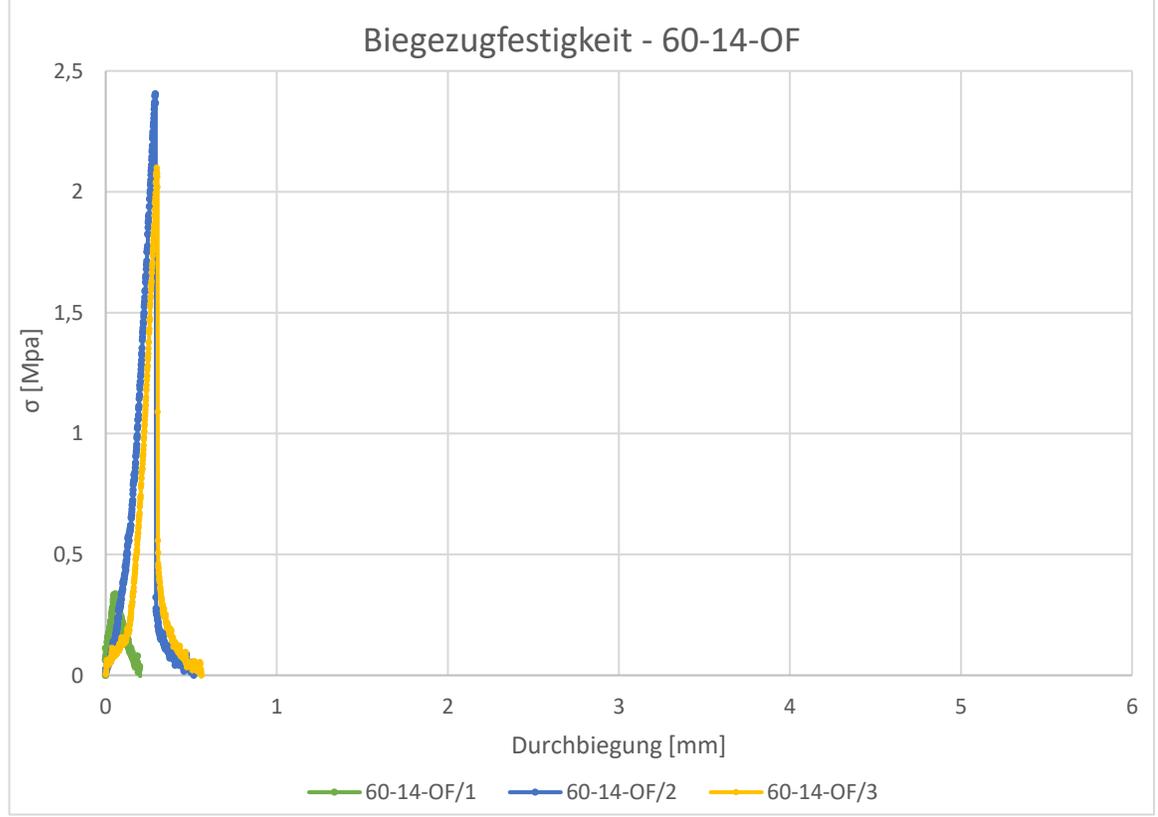


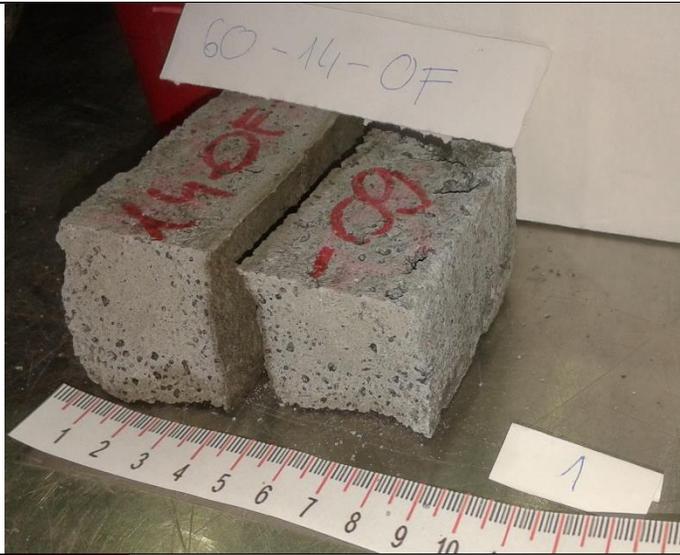
Druckfestigkeit - 20-14-MF



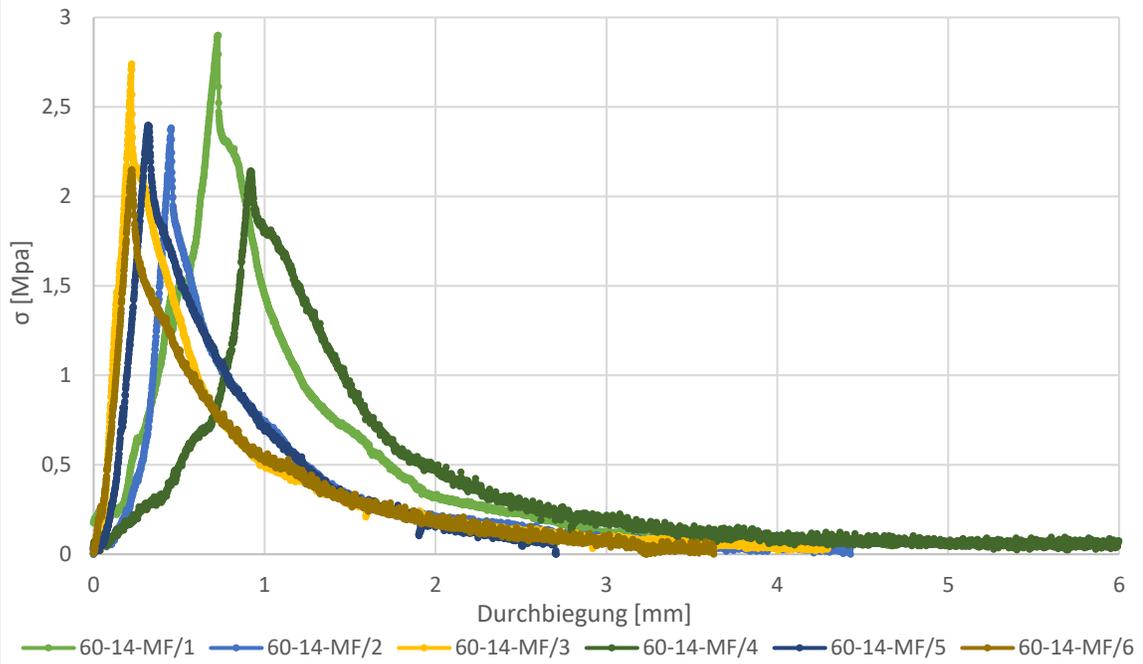
Beilage 18 – 20-14-MF



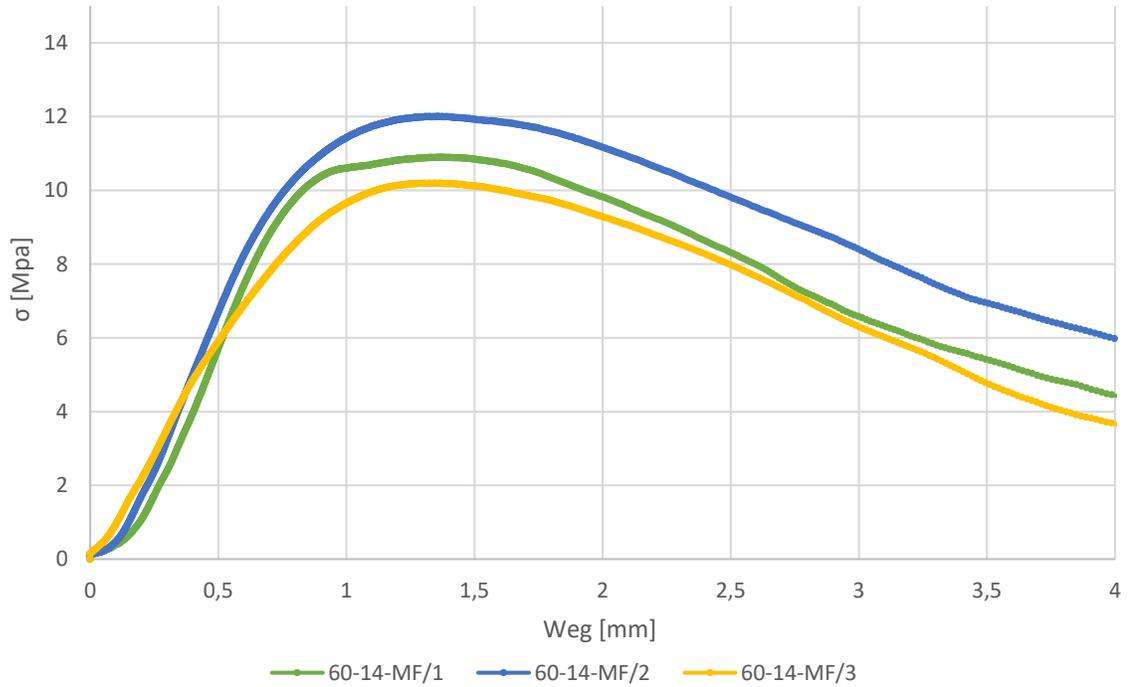




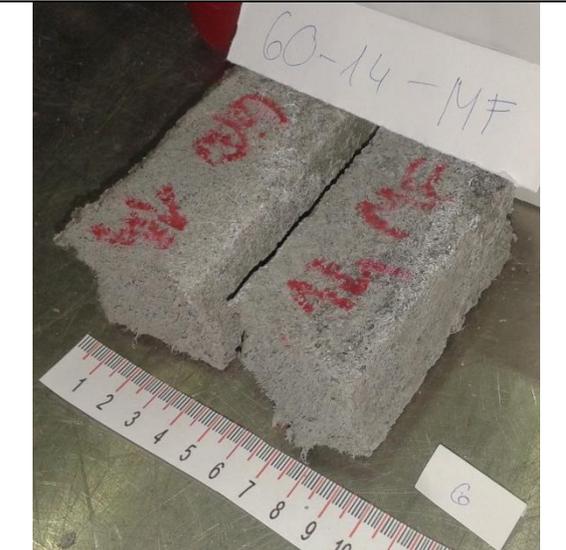
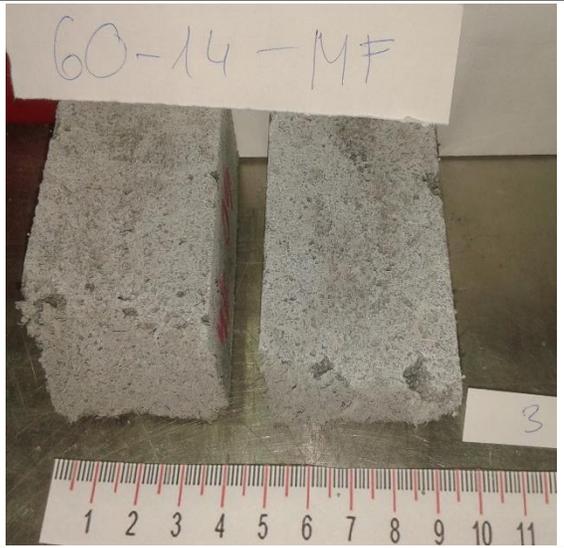
Biegezugfestigkeit - 60-14-MF

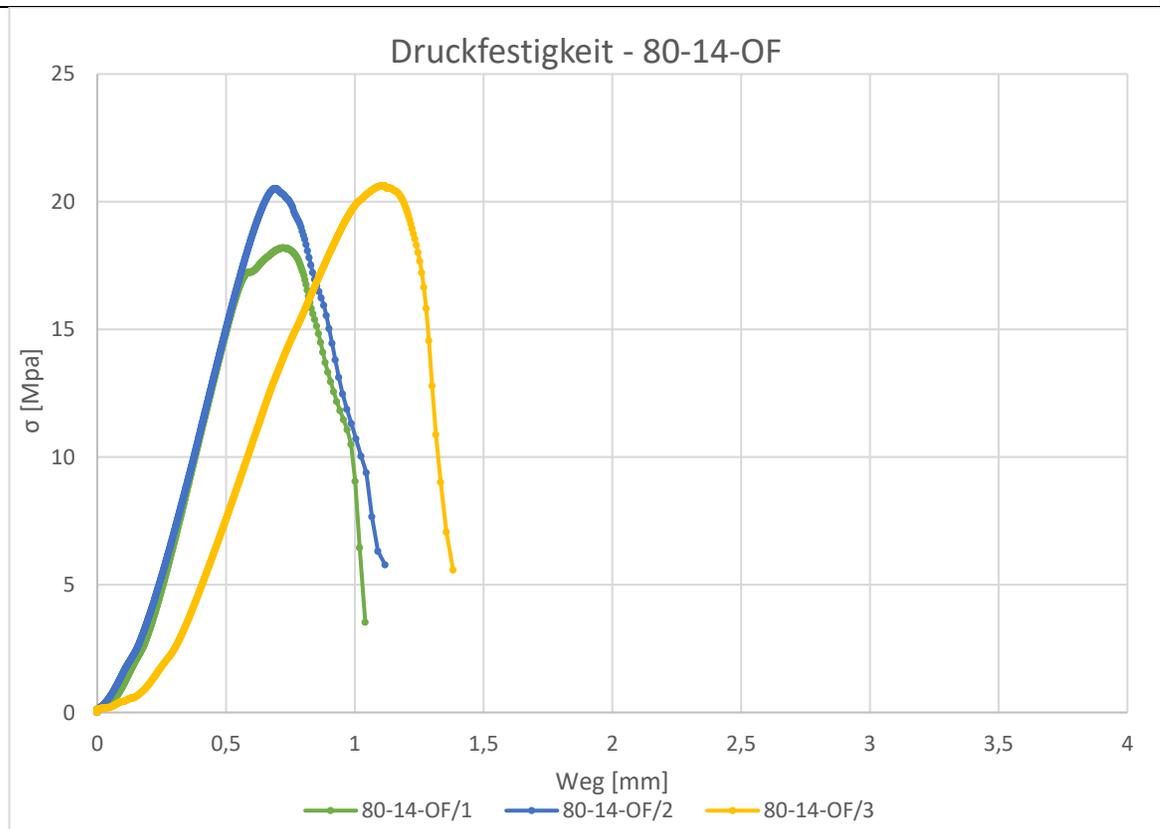
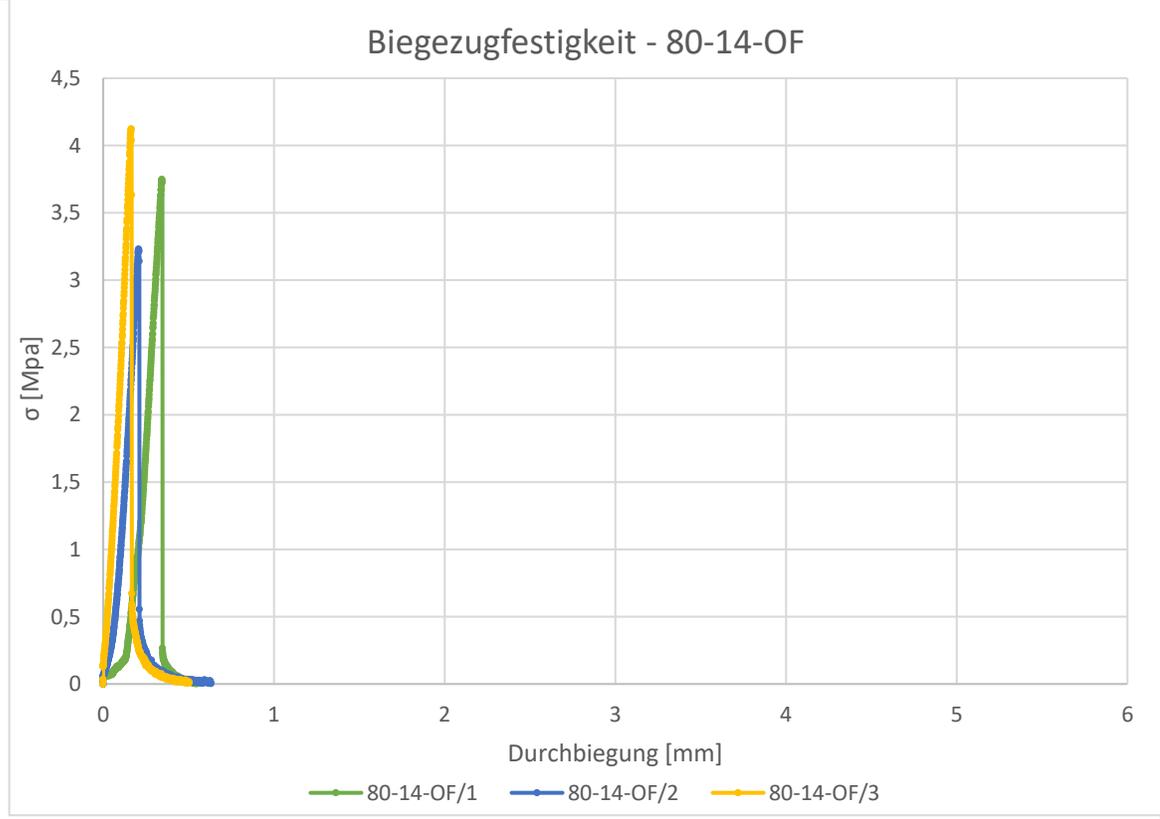


Druckfestigkeit - 60-14-MF



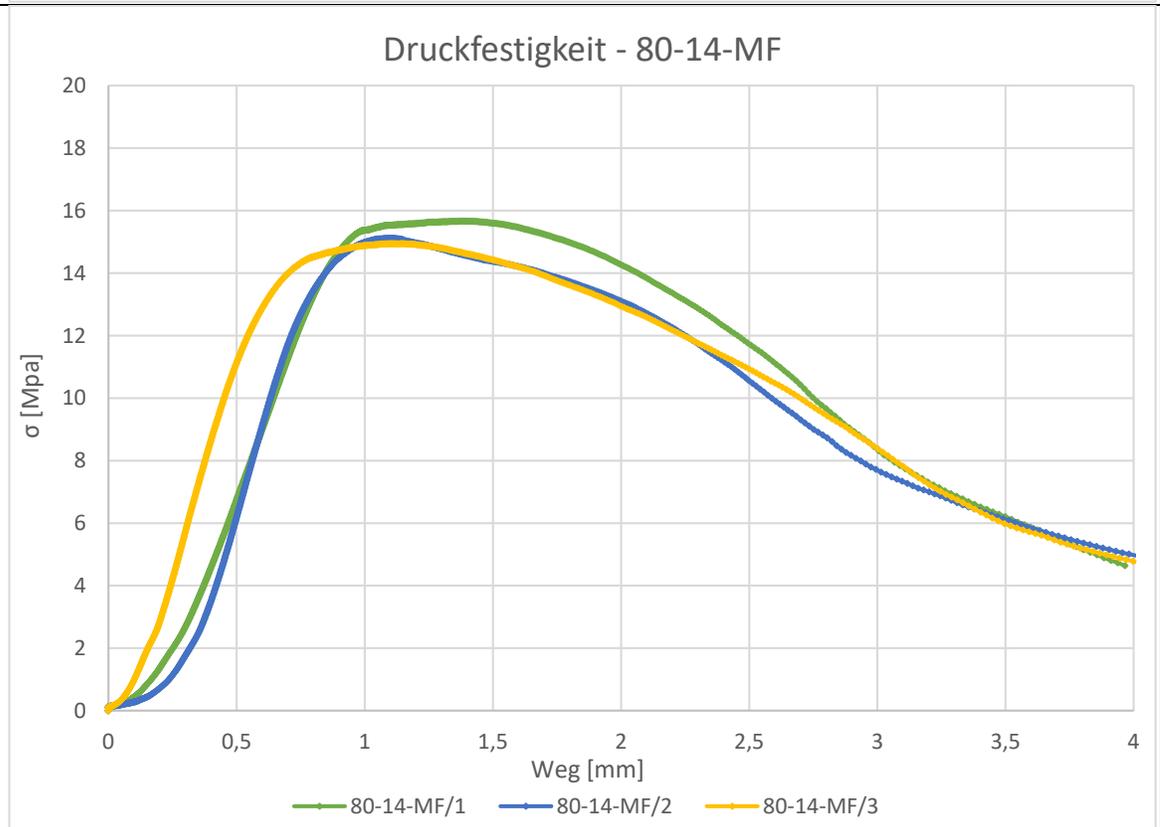
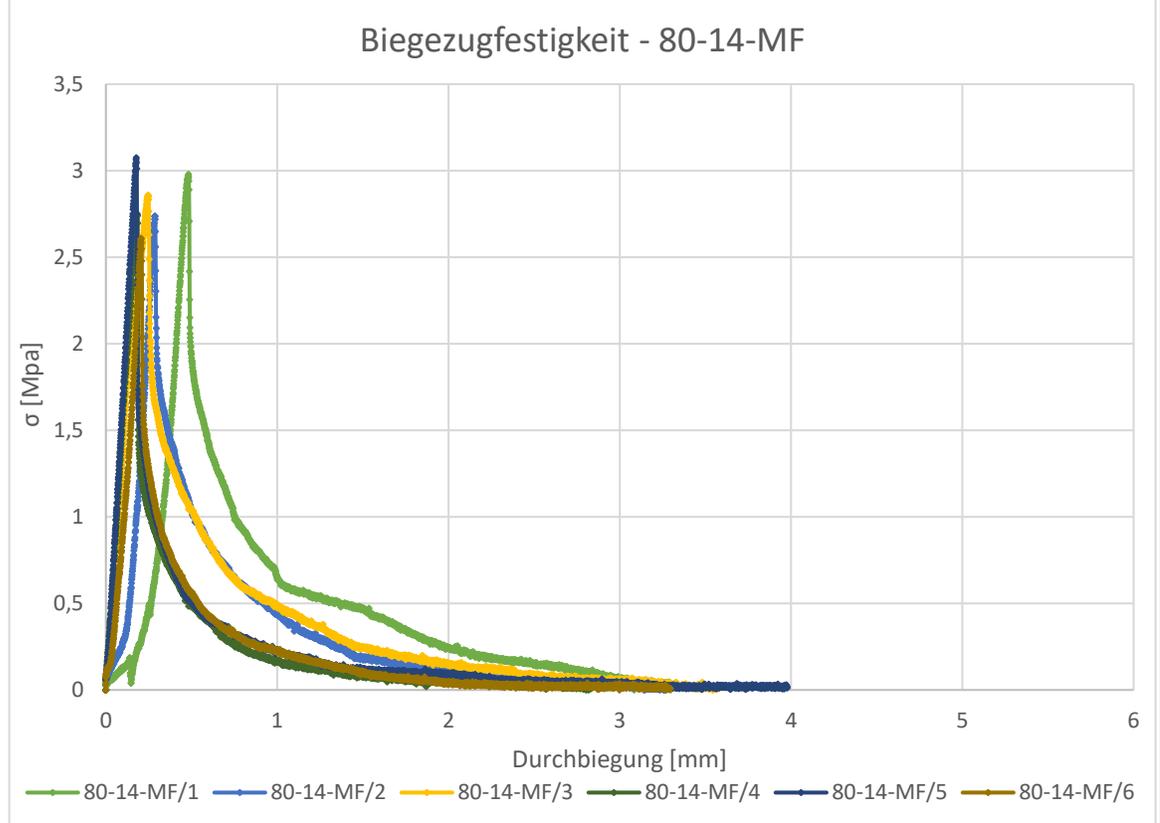
Beilage 22 – 60-14-MF



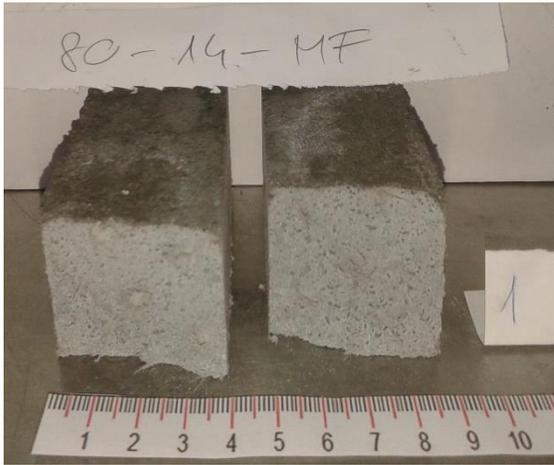


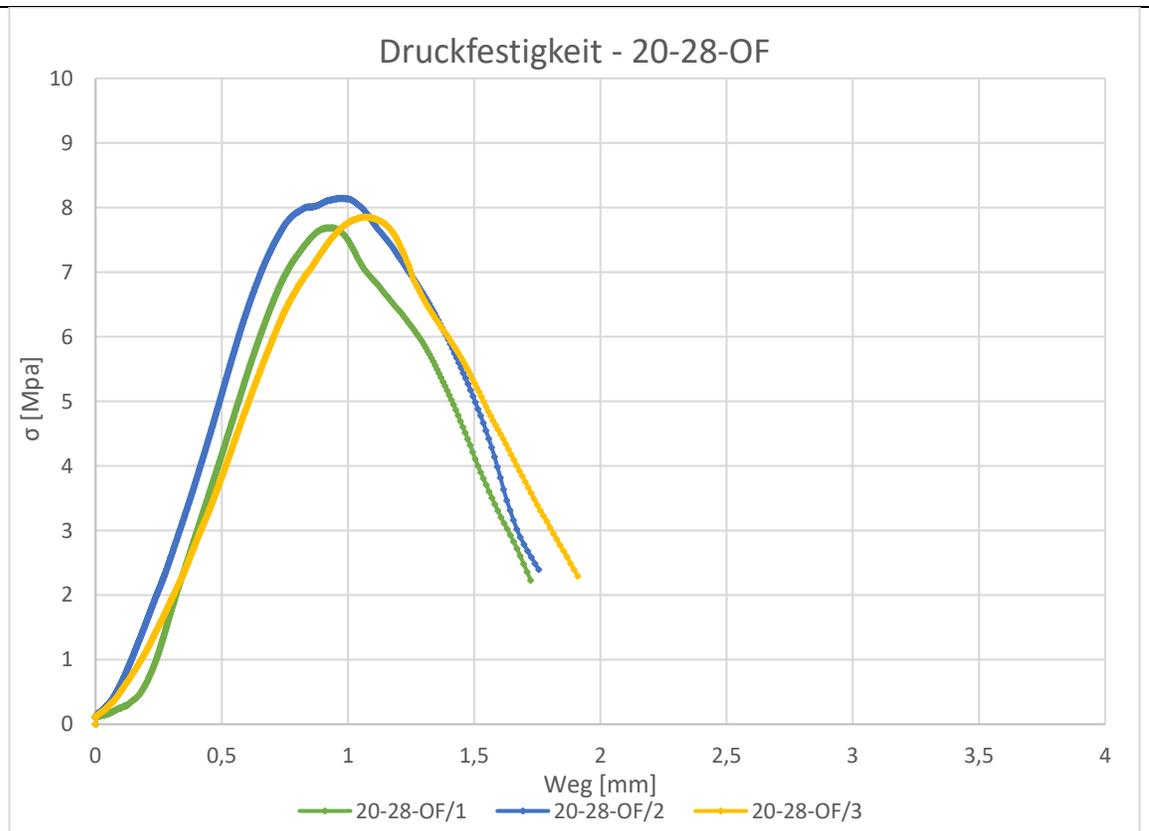
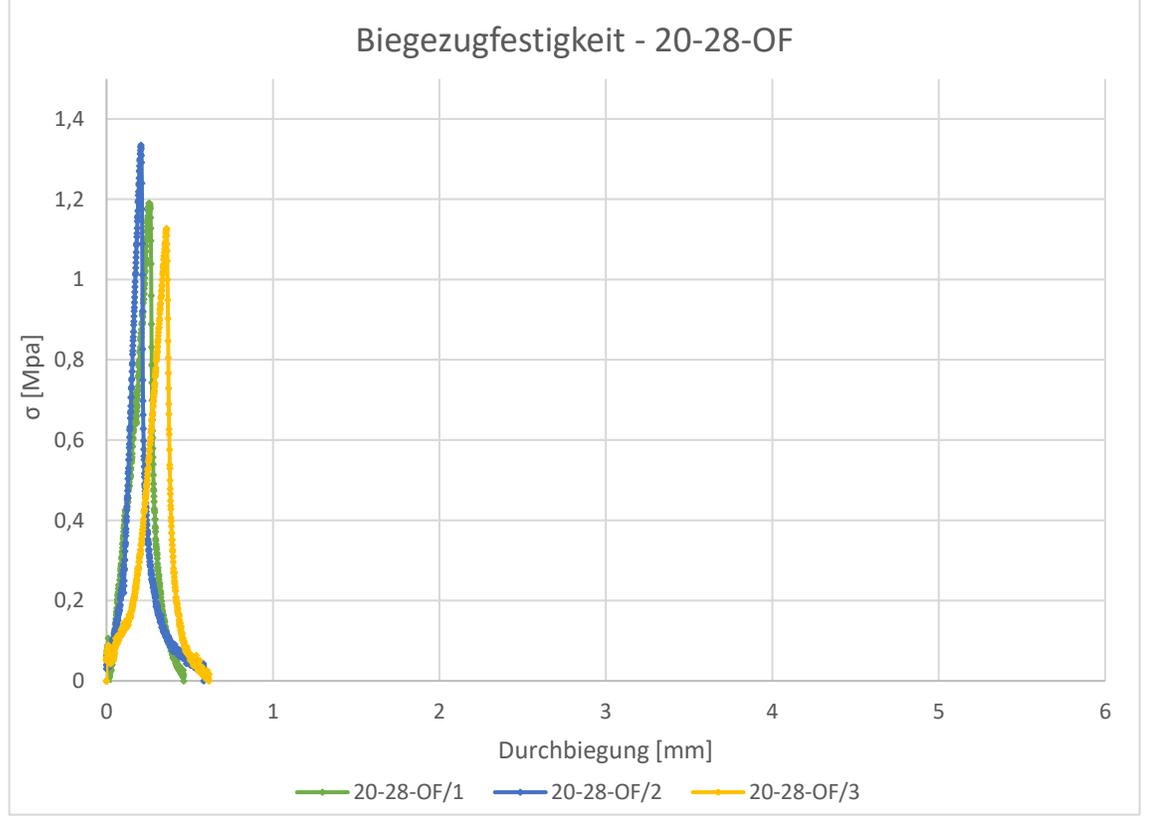


N.A.

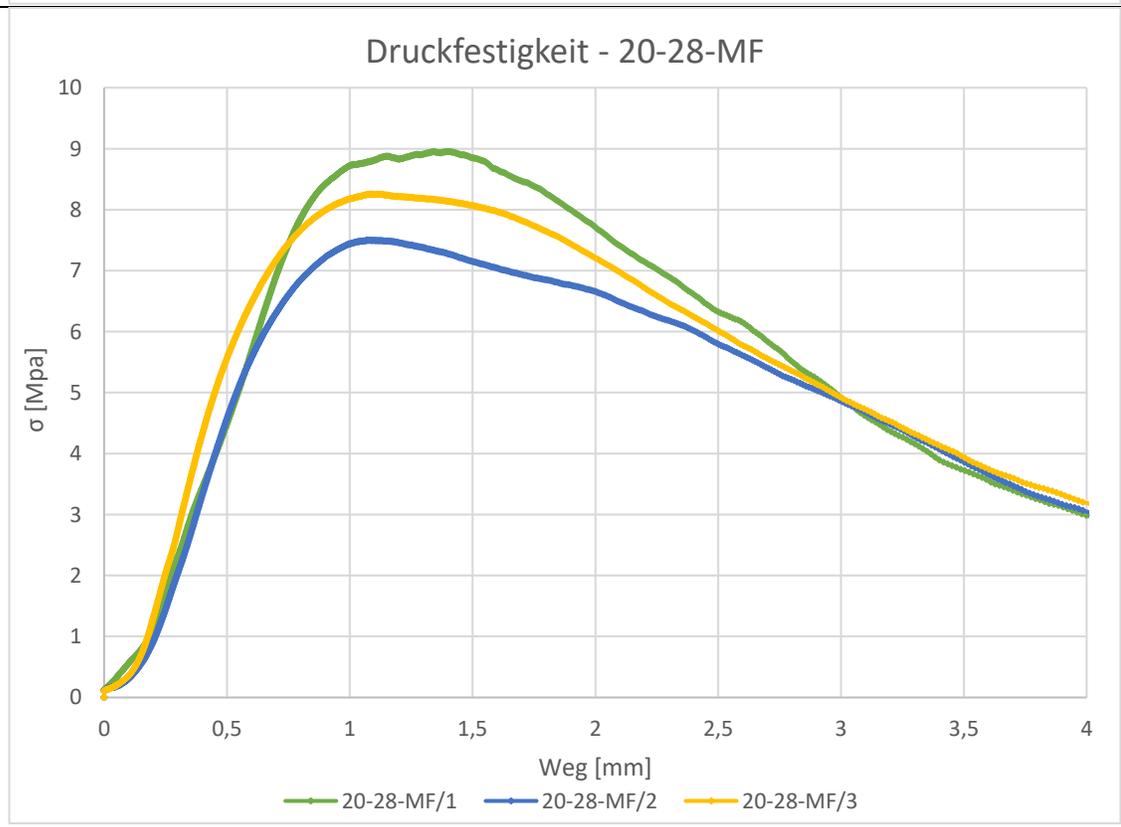
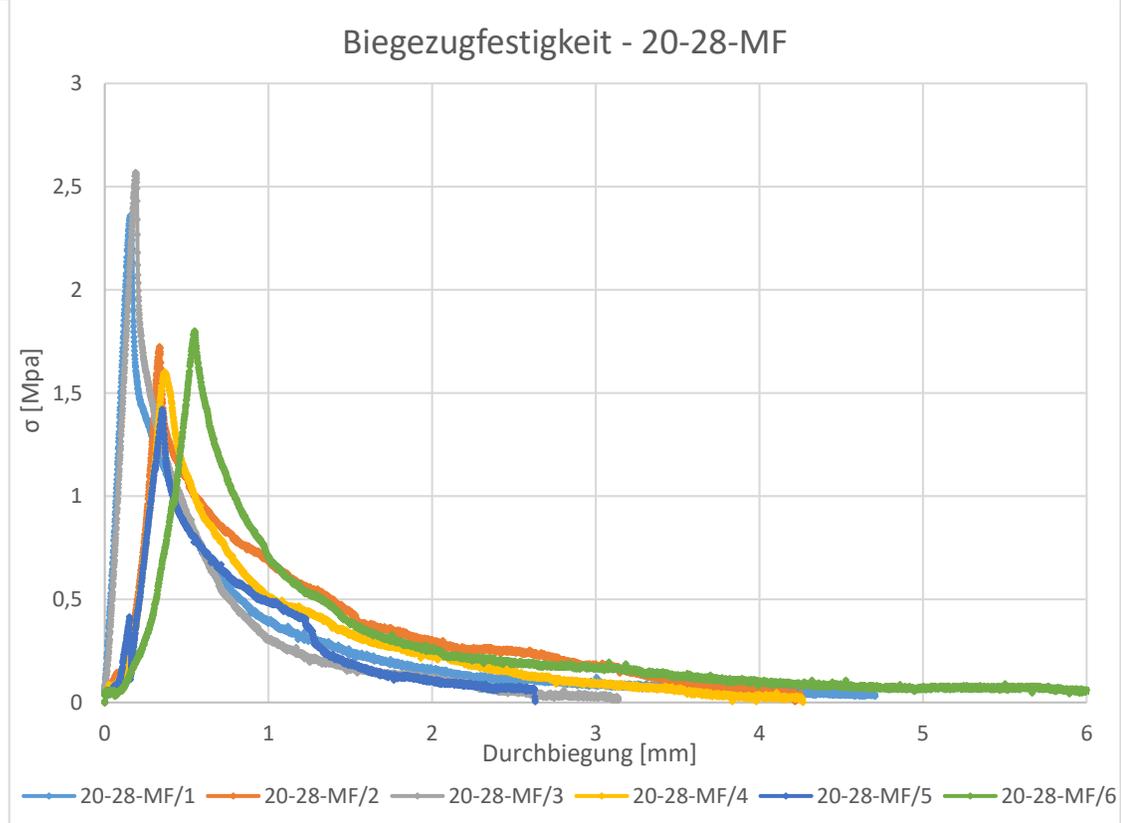


Beilage 26 – 80-14-MF



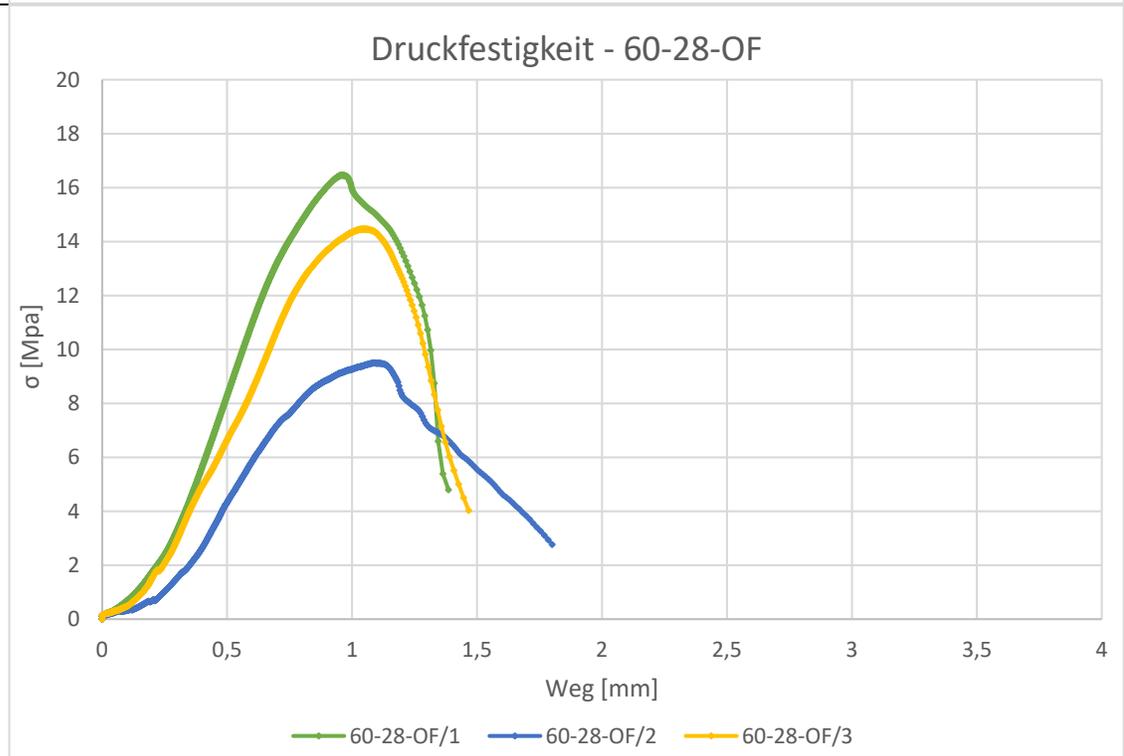
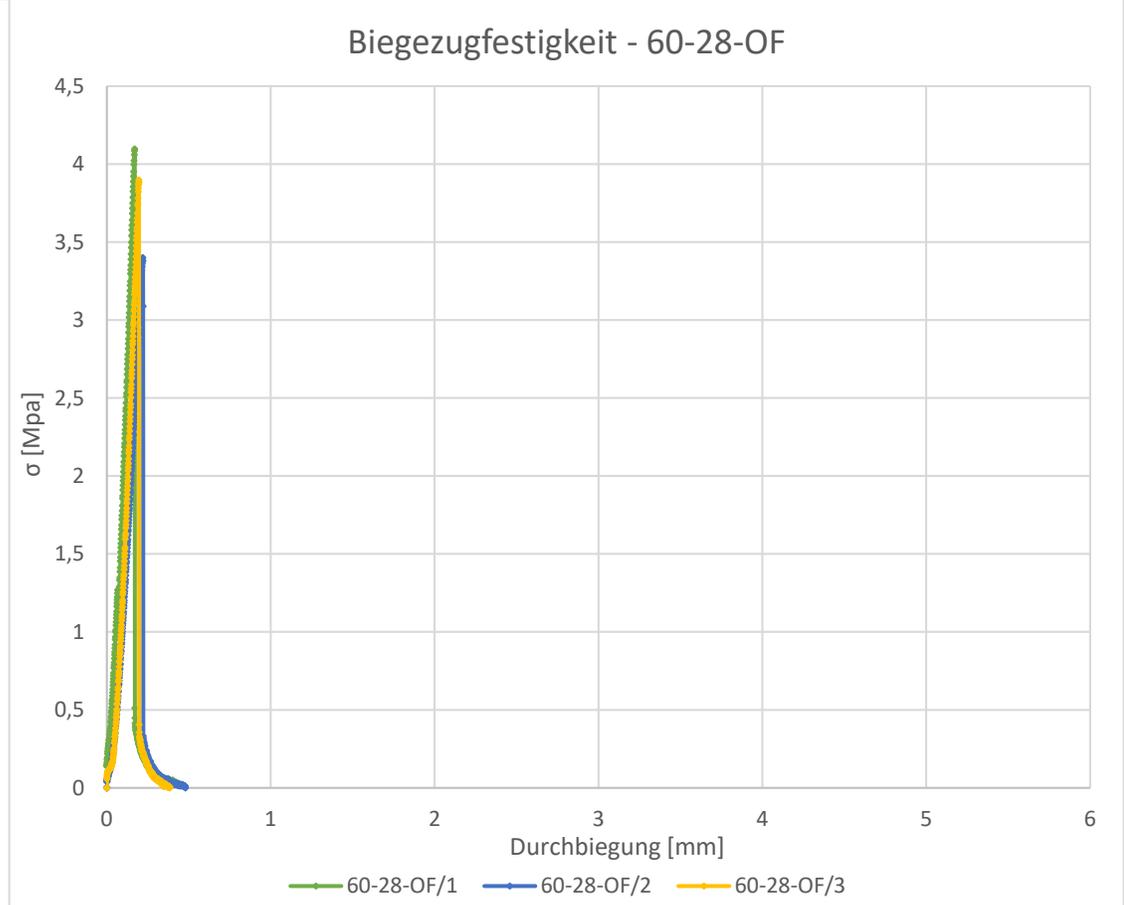


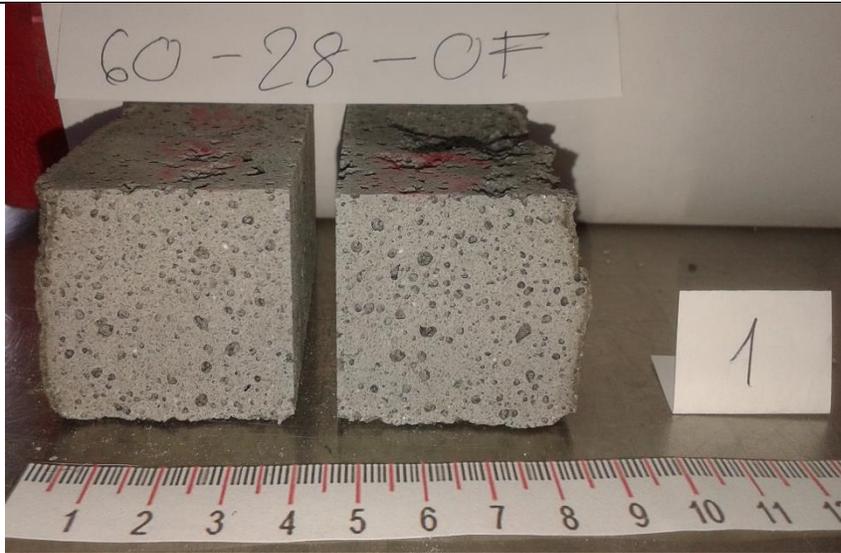




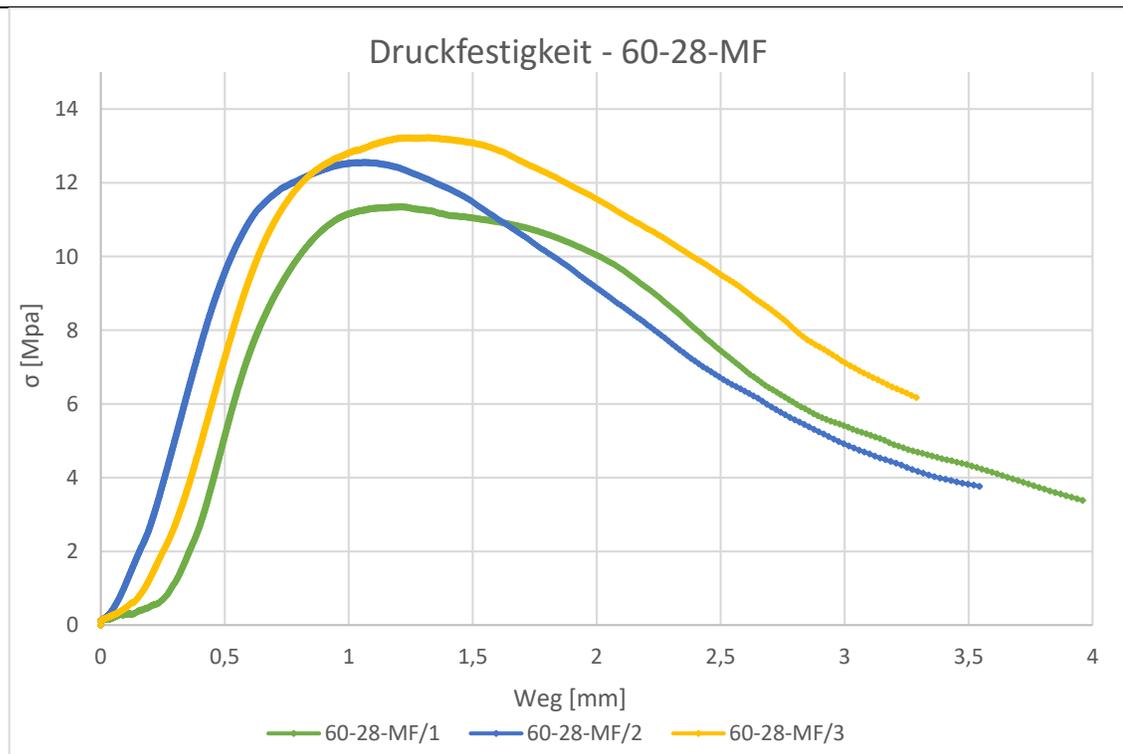
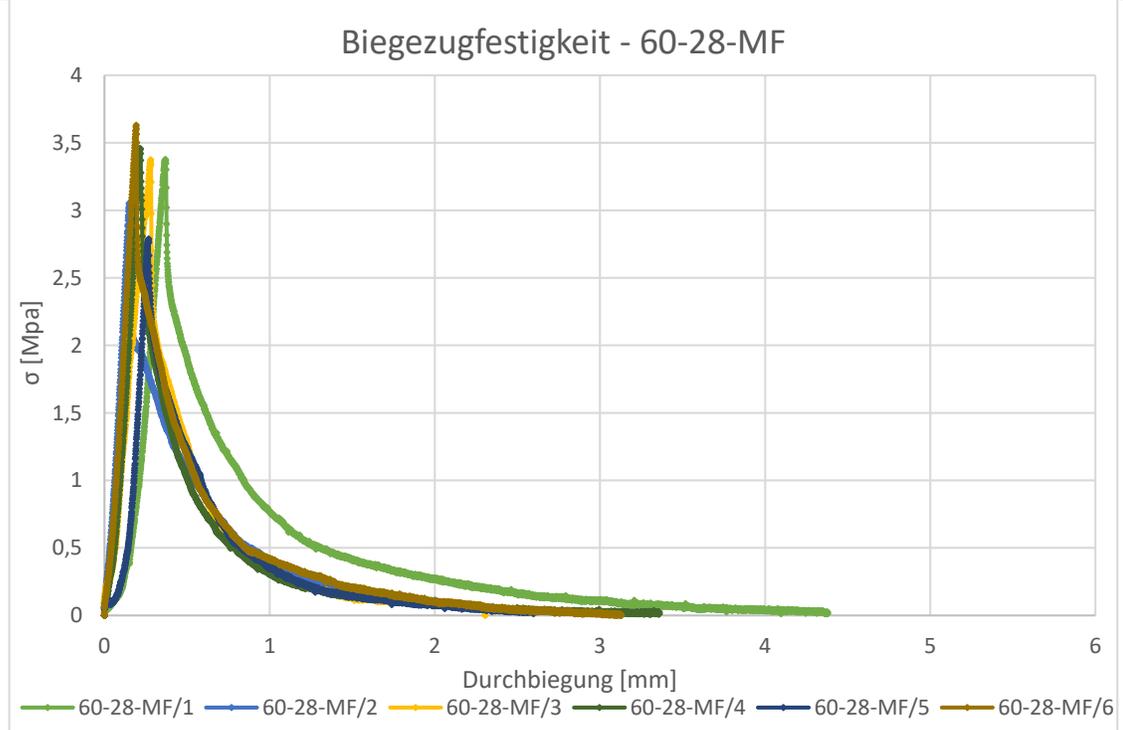
Beilage 30 – 20-28-MF



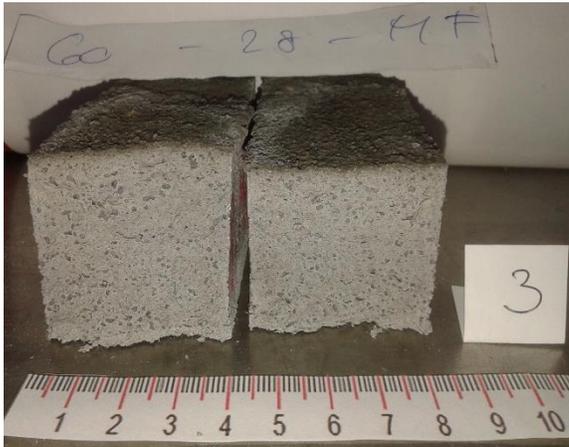




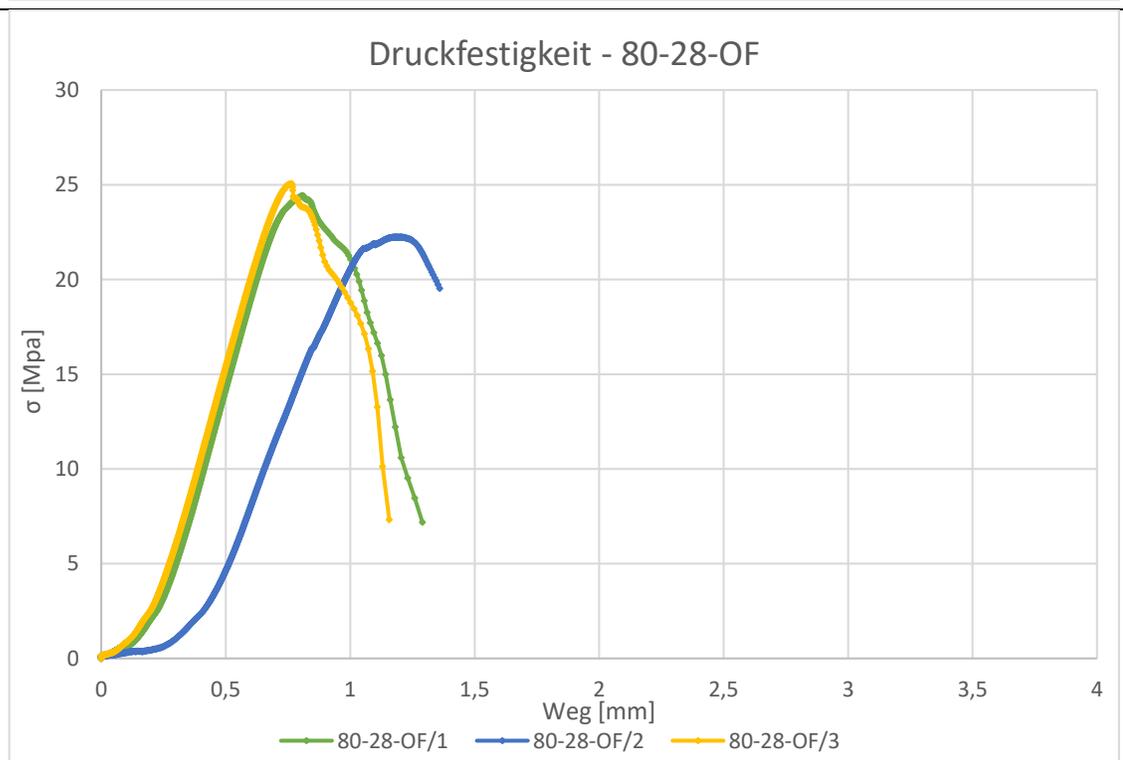
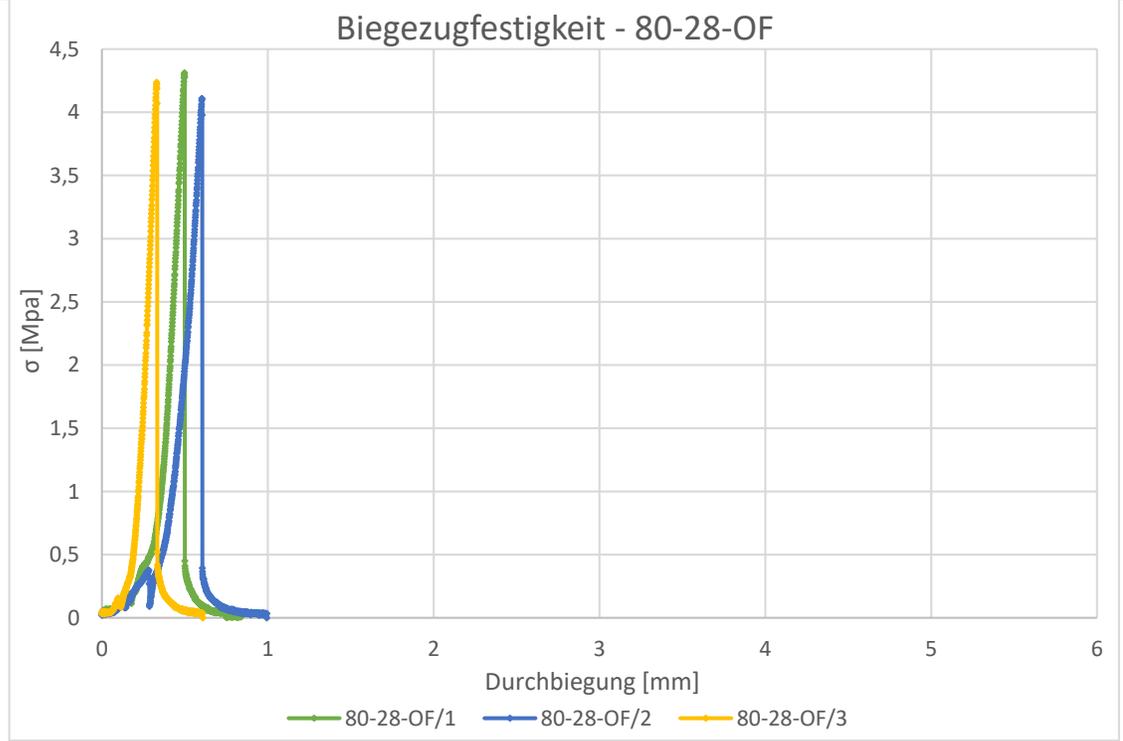
Beilage 33 – 60-28-MF



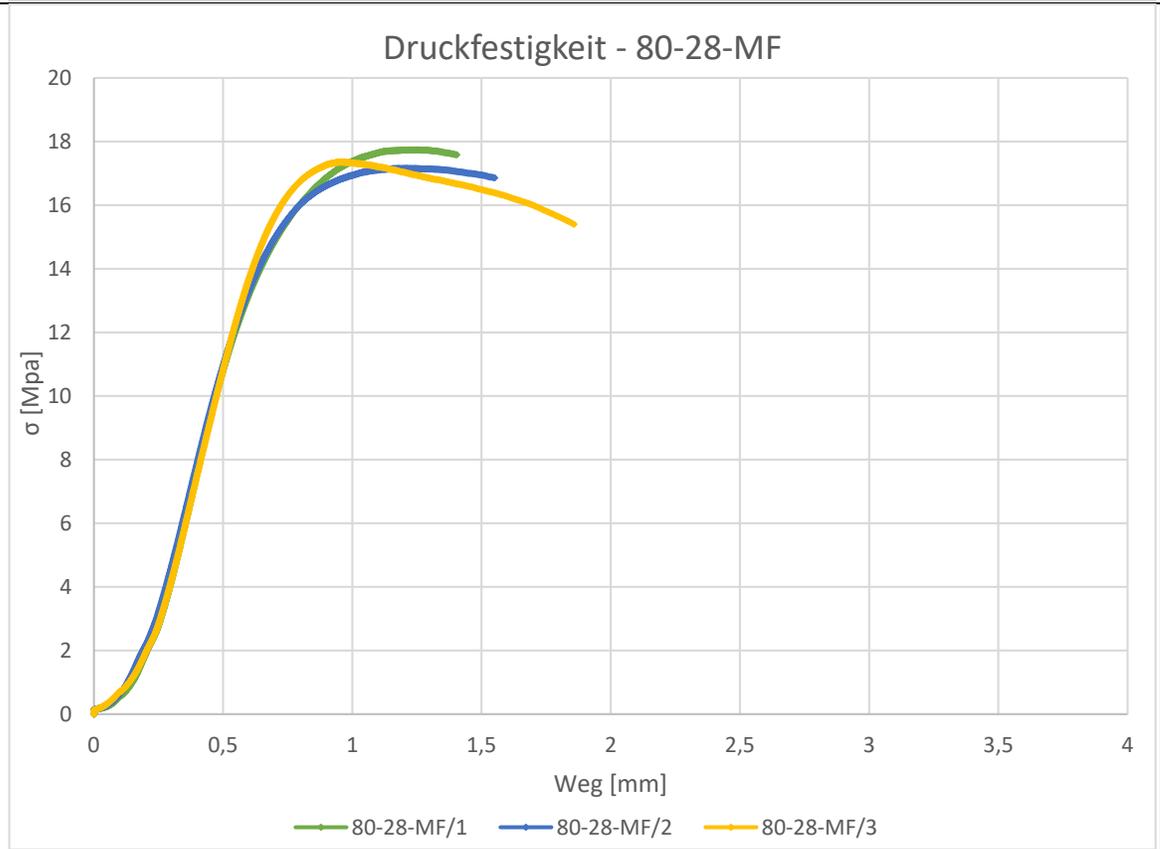
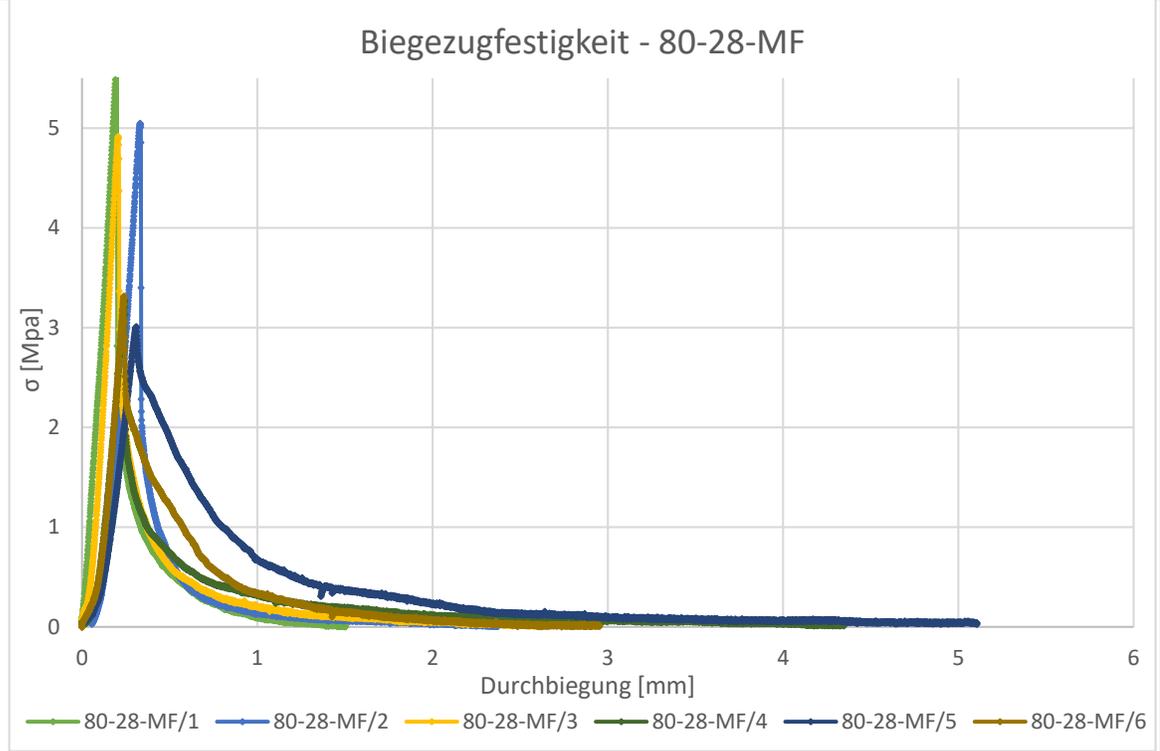
Beilage 34 – 60-28-MF



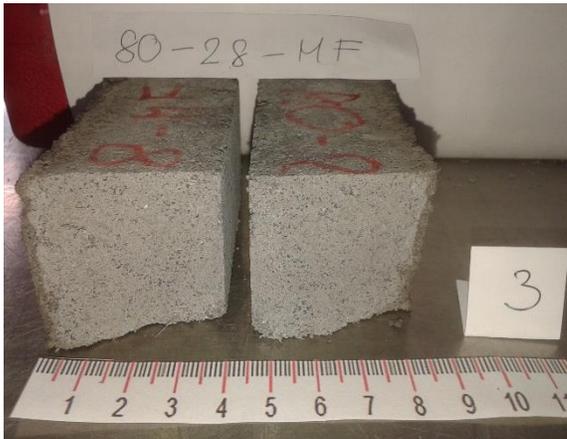
Beilage 35 – 80-28-OF







Beilage 38 – 80-28-MF



Beilage 39
Prüfzeugniss-Bestimmung des pH-Wertes

Versuchskörper	PH-Wert [-]
60-7-MF	10,73
60-7-OF	10,70
20-7-MF	10,95
20-7-OF	10,98
80-7-OF	10,72
80-7-MF	10,72
60-14-MF	10,97
60-14-OF	10,94
20-14-MF	10,94
20-14-OF	10,89
80-14-MF	11,00
80-14-OF	10,85
20-28-MF	11,33
20-28-OF	11,20
60-28-MF	10,96
60-28-OF	10,84
80-28-MF	10,89
80-28-OF	10,74

Beilage 40

Prüfzeugniss-Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme

Probekörper	Masse des Prüfkörpers nach der Wassertränkung $t_{\text{Eintauch}} = 10 \text{ Min.}$ M1 [g]			Masse des Prüfkörpers nach der Wassertränkung $t_{\text{Eintauch}} = 90 \text{ Min.}$ M2 [g]			Kapillare Wasseraufnahm ekoeffizient C [kg/m ² *min ^{0,5}]			Mittelwert C [kg/m ² *min ^{0,5}]	Standard-abweichung C [kg/m ² *min ^{0,5}]
60-7-MF	247,15	229,34	214,25	252,97	235,38	219,72	0,58	0,60	0,55	0,58	0,03
60-7-OF	255,61	238,55	245,54	261,22	244,83	250,95	0,56	0,63	0,54	0,58	0,05
20-7-MF	232,10	253,45	235,20	238,54	260,45	241,71	0,64	0,70	0,65	0,67	0,03
20-7-OF	218,60	258,80	222,60	225,30	265,10	229,30	0,67	0,63	0,67	0,66	0,02
80-7-OF	250,50	246,80	232,40	254,50	251,40	236,60	0,40	0,46	0,42	0,43	0,03
80-7-MF	255,50	244,00	252,80	261,70	249,10	258,90	0,62	0,51	0,61	0,58	0,06
60-14-MF	239,10	219,90	270,10	243,80	224,10	274,40	0,47	0,42	0,43	0,44	0,03
60-14-OF	247,30	285,70	276,40	251,10	288,60	281,00	0,38	0,29	0,46	0,38	0,09
20-14-MF	269,80	261,50	233,80	275,80	267,40	239,30	0,60	0,59	0,55	0,58	0,03
20-14-OF	221,90	234,40	217,10	226,40	239,60	222,00	0,45	0,52	0,49	0,49	0,04
80-14-MF	234,90	232,90	250,60	239,10	237,10	254,60	0,42	0,42	0,40	0,41	0,01
80-14-OF	234,60	242,20	234,10	238,00	245,60	237,50	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00
20-28-OF	235,80	255,20	239,80	241,20	261,20	245,70	0,54	0,60	0,59	0,58	0,03
20-28-MF	252,20	234,80	267,50	258,00	240,90	274,30	0,58	0,61	0,68	0,62	0,05
60-28-OF	224,90	256,10	244,40	229,00	260,30	248,50	0,41	0,42	0,41	0,41	0,01
60-28-MF	236,30	241,20	231,80	240,50	245,80	237,00	0,42	0,46	0,52	0,47	0,05
80-28-OF	241,20	244,10	237,10	244,20	246,90	240,10	0,30	0,28	0,30	0,29	0,01
80-28-MF	234,00	239,60	242,60	237,70	243,40	246,40	0,37	0,38	0,38	0,38	0,01

Beilage 41

Prüfzeugniss-Bestimmung der Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung

Probekörper	Trockenmasse m_e [g]			Masse des wassergesättigten Probestückes an der Luft m_a [g]			Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung WB [%]			Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
60-7-MF	241,75	224,33	207,26	265,60	244,90	228,20	9,87	9,17	10,10	9,71	0,49
60-7-OF	250,96	233,91	240,99	270,70	251,30	258,50	7,87	7,43	7,27	7,52	0,31
20-7-MF	224,98	245,36	227,18	244,10	267,00	247,50	8,50	8,82	8,94	8,75	0,23
20-7-OF	213,70	253,80	217,40	229,30	269,80	231,50	7,30	6,30	6,49	6,70	0,53
80-7-OF	246,80	243,50	228,60	265,80	262,80	246,90	7,70	7,93	8,01	7,88	0,16
80-7-MF	250,50	238,50	247,20	275,50	262,40	272,40	9,98	10,02	10,19	10,07	0,11
60-14-MF	235,10	215,50	263,90	255,80	234,40	288,40	8,80	8,77	9,28	8,95	0,29
60-14-OF	242,80	282,20	272,60	261,80	303,70	292,90	7,83	7,62	7,45	7,63	0,19
20-14-MF	264,60	252,90	226,90	284,00	275,10	246,60	7,33	8,78	8,68	8,26	0,81
20-14-OF	213,50	226,70	209,60	228,00	242,40	223,60	6,79	6,93	6,68	6,80	0,12
80-14-MF	230,00	227,70	245,90	253,00	250,00	268,90	10,00	9,79	9,35	9,72	0,33
80-14-OF	231,30	238,90	231,00	249,20	257,70	249,70	7,74	7,87	8,10	7,90	0,18
20-28-OF	231,80	250,90	235,20	246,00	267,20	250,80	6,13	6,50	6,63	6,42	0,26
20-28-MF	245,50	228,60	260,40	267,10	248,30	283,20	8,80	8,62	8,76	8,72	0,09
60-28-OF	221,40	252,30	241,10	238,10	271,20	258,70	7,54	7,49	7,30	7,44	0,13
60-28-MF	231,00	236,70	227,10	252,90	258,30	248,20	9,48	9,13	9,29	9,30	0,18
80-28-OF	238,00	240,90	233,90	256,90	259,50	252,40	7,94	7,72	7,91	7,86	0,12
80-28-MF	229,80	234,50	238,40	251,30	257,40	260,80	9,36	9,77	9,40	9,51	0,23

Beilage 42

Prüfzeugniss-Bestimmung der Porosität

Probekörper	Trockenmasse m_e [g]			Masse des wassergesättigten Probestückes an der Luft m_a [g]			Masse des eingetauchten, wassergesättigten Probestückes m_w [g]			Porosität P_a [g]			Mittelwert [g]	Standardabweichung [g]
60-7-MF	241,75	224,33	207,26	265,6	244,9	228,2	130,4	119,3	109,2	17,64	16,38	17,60	17,20	0,72
60-7-OF	250,96	233,91	240,99	270,7	251,3	258,5	129,6	122,2	126,4	13,99	13,47	13,26	13,57	0,38
20-7-MF	224,98	245,36	227,18	244,1	267,0	247,5	123,3	130,8	121,9	15,83	15,89	16,18	15,96	0,19
20-7-OF	213,70	253,80	217,40	229,3	269,8	231,5	114,1	136,5	119,2	13,54	12,00	12,56	12,70	0,78
80-7-OF	246,80	243,50	228,60	265,8	262,8	246,9	134,2	130,8	126,5	14,44	14,62	15,20	14,75	0,40
80-7-MF	250,50	238,50	247,20	275,5	262,4	272,4	140,7	130,1	140,1	18,55	18,07	19,05	18,55	0,49
60-14-MF	235,10	215,50	263,90	255,8	234,4	288,4	124,7	117,7	141,7	15,79	16,20	16,70	16,23	0,46
60-14-OF	242,80	282,20	272,60	261,8	303,7	292,9	123,5	151,4	139,3	13,74	14,12	13,22	13,69	0,45
20-14-MF	264,60	252,90	226,90	284,0	275,1	246,6	140,5	133,5	118,0	13,52	15,68	15,32	14,84	1,16
20-14-OF	213,50	226,70	209,60	228,0	242,4	223,6	106,8	115,5	104,2	11,96	12,37	11,73	12,02	0,33
80-14-MF	230,00	227,70	245,90	253,0	250,0	268,9	129,1	127,3	135,2	18,56	18,17	17,20	17,98	0,70
80-14-OF	231,30	238,90	231,00	249,2	257,7	249,7	121,1	123,0	115,1	13,97	13,96	13,89	13,94	0,04
20-28-OF	231,80	250,90	235,20	246,0	267,2	250,8	124,8	136,2	124,0	11,72	12,44	12,30	12,15	0,39
20-28-MF	245,50	228,60	260,40	267,1	248,3	283,2	133,1	125,0	143,4	16,12	15,98	16,31	16,14	0,17
60-28-OF	221,40	252,30	241,10	238,1	271,2	258,7	117,5	139,3	128,1	13,85	14,33	13,48	13,88	0,43
60-28-MF	231,00	236,70	227,10	252,9	258,3	248,2	123,8	127,8	126,0	16,96	16,55	17,27	16,93	0,36
80-28-OF	238,00	240,90	233,90	256,9	259,5	252,4	129,3	133,7	129,9	14,81	14,79	15,10	14,90	0,18
80-28-MF	229,80	234,50	238,40	251,3	257,4	260,8	127,5	131,2	132,8	17,37	18,15	17,50	17,67	0,42

Beilage 43

Prüfzeugnis-Bestimmung der Trockenrohddichte

Prüftemperatur: 21,2 °C

Dichte des Wassers: 997,952 kg/m³

Probekörper	Trockenmasse m_e [g]			Masse des wassergesättigten Probestückes an der Luft m_a [g]			Masse des eingetauchten, wassergesättigten Probestückes m_w [g]			Trockenrohddichte P [g]			Mittelwert [g]	Standard-abweichung [g]
60-7-MF	241,75	224,33	207,26	265,60	244,90	228,20	130,40	119,30	109,20	1,79	1,79	1,75	1,78	0,03
60-7-OF	250,96	233,91	240,99	270,70	251,30	258,50	129,60	122,20	126,40	1,78	1,82	1,83	1,81	0,02
20-7-MF	224,98	245,36	227,18	244,10	267,00	247,50	123,30	130,80	121,90	1,87	1,81	1,81	1,83	0,03
20-7-OF	213,70	253,80	217,40	229,30	269,80	231,50	114,10	136,50	119,20	1,86	1,91	1,94	1,90	0,04
80-7-OF	246,80	243,50	228,60	265,80	262,80	246,90	134,20	130,80	126,50	1,88	1,85	1,90	1,88	0,03
80-7-MF	250,50	238,50	247,20	275,50	262,40	272,40	140,70	130,10	140,10	1,86	1,81	1,87	1,85	0,04
60-14-MF	235,10	215,50	263,90	255,80	234,40	288,40	124,70	117,70	141,70	1,80	1,85	1,80	1,82	0,03
60-14-OF	242,80	282,20	272,60	261,80	303,70	292,90	123,50	151,40	139,30	1,76	1,86	1,78	1,80	0,05
20-14-MF	264,60	252,90	226,90	284,00	275,10	246,60	140,50	133,50	118,00	1,85	1,79	1,77	1,80	0,04
20-14-OF	213,50	226,70	209,60	228,00	242,40	223,60	106,80	115,50	104,20	1,77	1,79	1,76	1,77	0,02
80-14-MF	230,00	227,70	245,90	253,00	250,00	268,90	129,10	127,30	135,20	1,86	1,86	1,84	1,85	0,01
80-14-OF	231,30	238,90	231,00	249,20	257,70	249,70	121,10	123,00	115,10	1,81	1,78	1,72	1,77	0,05
20-28-OF	231,80	250,90	235,20	246,00	267,20	250,80	124,80	136,20	124,00	1,92	1,92	1,86	1,90	0,03
20-28-MF	245,50	228,60	260,40	267,10	248,30	283,20	133,10	125,00	143,40	1,84	1,86	1,87	1,85	0,02
60-28-OF	221,40	252,30	241,10	238,10	271,20	258,70	117,50	139,30	128,10	1,84	1,92	1,85	1,87	0,04
60-28-MF	231,00	236,70	227,10	252,90	258,30	248,20	123,80	127,80	126,00	1,79	1,82	1,86	1,82	0,04
80-28-OF	238,00	240,90	233,90	256,90	259,50	252,40	129,30	133,70	129,90	1,87	1,92	1,91	1,90	0,03
80-28-MF	229,80	234,50	238,40	251,30	257,40	260,80	127,50	131,20	132,80	1,86	1,86	1,87	1,86	0,00

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifikation alkalisch-aktivierter Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel sowie Abgrenzung zu hydraulischen Bindemitteln auf Grundlage des Reaktionsmechanismus (nach ()) .	10
Abbildung 2: Abbindereaktion von alkalisch-aktivierten Ca-armen Bindemitteln	12
Abbildung 3: Entstehung von Flugasche in Kraftwerken	13
Abbildung 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: kugelige Flugasche.....	14
Abbildung 5: Hauptoxidzusammensetzungen verschiedener Ausgangsstoffe – Chemische Zusammensetzungen der kieselsäure- und kalkreichen Flugaschen	15
Abbildung 6: Geopolymerisation von alkalisch-aktivierten Flugasche	16
Abbildung 7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Geopolymer auf Basis von Flugasche ..	17
Abbildung 8: Probekörper nach Säurelagerung und Druckfestigkeitsermittlung	18
Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	19
Abbildung 10: E-Modul von alkalisch-aktivierten Betonen (A7 = 100 % SFA, A7T = 100 % SFA, 60 °C, A9 = 90 % SFA / 10 % HÜS) im Vergleich zu Normalbetonen nach DIN 1045-2:2008-08 im 28 Tage-Alter	20
Abbildung 11: Druckfestigkeit von AAB-Betonen und PZ-Betonen	21
Abbildung 12: Druckfestigkeiten von Flugasche Geopolymer-Mörtel („CF35-C“ Ca-reiche Flugasche, „FF35C45-C“ Ca-arme Flugasche)	23
Abbildung 13: Porengrößenverteilung von Geopolymer- und Zementmörteln	24
Abbildung 14: Protlandzement-Beton im Brandfall	25
Abbildung 15: Auswirkung der Nachbehandlungstemperatur auf die Druckfestigkeit der Geopolymere (Flugasche)	26
Abbildung 16: Geopolymer-Endprodukte (Pflasterung, Fliesen, Betonwürfel)	27
Abbildung 17: Vergleich Lastverteilung	28
Abbildung 18: Stahlfaser	29
Abbildung 19: Glasfaser	29
Abbildung 20: Polypropylenfaser	29
Abbildung 21: Polyesterfaser.....	29
Abbildung 22: Naturfaser	29
Abbildung 23: Kohlenstofffaser	29
Abbildung 24: Rissüberbrückung Abbildung 25: Pullout	30
Abbildung 26: Rissablenkung	30
Abbildung 27: Einflüsse für den Verbund der Fasern in Geopolymeren	31
Abbildung 28: Druckfestigkeitsentwicklung der Geopolymere mit und ohne Kunststofffaserverstärkung bei verschiedenen Altern	33
Abbildung 29: Biegezugfestigkeiten bei Geopolymeren mit und ohne Kunststofffaserverstärkung bei verschiedenen Altern	34
Abbildung 30: Absorbierte Energie bei Geopolymeren mit und ohne Kunststofffaserverstärkung	34
Abbildung 31: Dichtigkeit, Porosität, Wasseraufnahme.....	36
Abbildung 32: Biegezugfestigkeit der Geopolymere „vor und nach“ der Wasserabsorption	37

Abbildung 33: Verwendete Materialien	39
Abbildung 34: 1 Mörtelprisma-Serie	39
Abbildung 35: Mörtelprisma 40mm*40mm*160mm	40
Abbildung 36: Mörtelmischer	42
Abbildung 37: Einstellungen des Mörtelmischers	43
Abbildung 38: Vorbehandlung der Schalungen	43
Abbildung 39: Gefüllte Schalung in der Plastikfolie und Umlufttrockenschrank.....	44
Abbildung 40: Klima der Lagerkammer	44
Abbildung 41: Mischvorgang von Mörtelprismen	45
Abbildung 42: Biegezugfestigkeit von Mörtelprismen nach ÖNORM EN 1015-11.....	46
Abbildung 43: Druckfestigkeit von Mörtelprismen nach ÖNORM EN 1015-11.....	47
Abbildung 44: Prüfmaschine: Zwick Z 250.....	48
Abbildung 45: Abstand zwischen dem Wasserspiegel und dem Behälterboden	49
Abbildung 46: Prüfverfahren der kapillaren Wasseraufnahme nach ÖNORM EN 1015-18	50
Abbildung 47: Prüfverfahren: Wasseraufnahme bei vollständiger Wasserlagerung	51
Abbildung 48: Unterwasserwägung mit der Hilfe des archimedischen Prinzips.....	52
Abbildung 49: Porosität der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen	55
Abbildung 50: Porosität der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen	56
Abbildung 51: Vollständige Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	58
Abbildung 52: Vollständige Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	59
Abbildung 53: Kapillare Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	60
Abbildung 54: Kapillare Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	61
Abbildung 55: Porosität und Vollständige Wasseraufnahme der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen	62
Abbildung 56: Trockenrohddichte der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	63
Abbildung 57: PH-Werte der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen	65
Abbildung 58: PH-Werte der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen	66
Abbildung 59: Die Druckfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	67
Abbildung 60: Die Druckfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	68
Abbildung 61: Die Druckfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	69

Abbildung 62: Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	70
Abbildung 63: Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	71
Abbildung 64: Biegezugfestigkeit der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen.....	72
Abbildung 65: Probekörper unter Biegezugfestigkeitsprüfung	73
Abbildung 66: Bruchenergie der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen	74
Abbildung 67: Bruchenergie der Geopolymere mit und ohne Faserverstärkung bei verschiedenen Altern und Nachbehandlungstemperaturen	75

8. Quellenverzeichnis

- (1) Dai, Y. S., Yang, L. C., Ding, Y. C., Jhong, C. W., Cheng, T. W., & Lin, K. L. (2013). A Study on Application of Geopolymeric Green Cement.
- (2) Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D. (2012). GEOPOLYMER CONCRETE - A Review. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, Feb 2012. Volume 1, Issue 2, S: 118-122.
- (3) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.
- (4) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.
- (5) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.
- (6) Fernández-Jiménez, A. & Palomo, A. & López-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash. ACI Materials Journal. 103. 106-112.
- (7) MERTA I: Naturfaserbeton-Vortragsfolie. (https://www.tuwien.ac.at/fileadmin/t/t-transfer/Dokumente/Firmenservice_fuer_Untern/Innovative_Baustoffe/03_Merta_Naturfaserbeton.pdf)
- (8) Juárez, C., Durán, A., Valdez, P., Fajardo, G. (2007), Performance of Agave lecheguilla natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions, Building and Environment, Volume 42,(3), pp. 1151-1157.
- (9) Kriker, A., Bali, A., Debicki, G., Bouziane, M., Chabannet, M. (2008), Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates, Cement & Concrete Composites, Volume 30, pp. 639-648.
- (10) Hamzaoui, R., Guessasma, S., Mecheri, B., Eshtiaghi, A.M., Bennabi, A. (2014), Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes”, Materials & Design, Volume 56, pp. 60-68
- (11) Wei, J., Meyer, C. (2015), “Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites”, Cement and Concrete Research, Volume 73, pp 1-16, ISSN 0008-8846

-
- (12) Merta I, Poletanovic B, Kopecskó K (2017). DURABILITY OF NATURAL FIBRES WITHIN CEMENT-BASED MATERIALS – REVIEW. CONCRETE STRUCTURES: ANNUAL TECHNICAL JOURNAL: JOURNAL OF THE HUNGARIAN GROUP OF FIB (ISSN: 2062-7904) (eISSN: 1586-0361). 18. 10-15.
- (13) Ranjbar N, Talebian S, Mehrali M, Kuenzel C, Metselaar H-S-C, Jumaat M-Z. (1016) Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. Composites Science and Technology.
- (14) Ranjbar N, Mehrali M, Mehrali M, Alengaram UJ, Jumaat MZ. (2015) Graphene nanoplatelet-fly ash based geopolymer composites. Cement and Concrete Research.
- (15) Alzeer M, MacKenzie K.J. (2012) Synthesis and mechanical properties of new fibre-reinforced composites of inorganic polymers with natural wool fibres. J Mater Sci.
- (16) He P, Jia D, Lin T, Wang M, Zhou Y. (2010) Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced geopolymer composites. Ceramics International.
- (17) Bernal S, De Gutierrez R, Delvasto S, Rodriguez E. (2010) Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. Construction and Building Materials.
- (18) Yunsheng Z, Wei S, Zongjin L, Xiangming Z, Eddie, Chungkong C. (2008) Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. Construction and Building Materials.
- (19) <https://de.wikipedia.org/wiki/Geopolymer>
- (20) <https://de.wikipedia.org/wiki/Geopolymer>
- (21) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.
- (22) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F.: Proposal for the classification of alkaliactivated binders and Geopolymer binders. Cement International (2015), S. 62– 69.
- (23) https://www.beton.wiki/index.php?title=Hydraulische_Bindemittel
- (24) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.

-
- (25) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.
- (26) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.
- (27) Hameed A.M, Rawdhan R.R and Al-Mishhadani S.A (2017) Effect of Various Factors on the Manufacturing of Geopolymer Mortar. <https://www.omicsonline.org/open-access/effect-of-various-factors-on-the-manufacturing-of-geopolymer-mortar-96929.html>
- (28) Mucsi G. (2014) Erőműi pernye komplex hasznosítása. S. 152-154.
Hameed AM, Rawdhan RR and Al-Mishhadani SA (2017) Effect of Various Factors on the Manufacturing of Geopolymer Mortar. <https://www.omicsonline.org/open-access/effect-of-various-factors-on-the-manufacturing-of-geopolymer-mortar-96929.html>
- (29) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2017) Alkalisch-aktivierte Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel als Alternative zu Zement, S. 157.
- (30) Publikation vom „European Commission. <https://ec.europa.eu/easme/en/news/new-sustainable-material-viable-alternative-cellular-concrete>
- (31) R. Tänzer, D. Stephan (2011) „Portlandzementfreie Bindemittel – auch in der Baustoffindustrie werden Alternativen gesucht!“ S. 1-5.
- (32) R. Tänzer, D. Stephan (2011) „Portlandzementfreie Bindemittel – auch in der Baustoffindustrie werden Alternativen gesucht!“ S. 1-5.
- (33) ÖNORM EN 197-1, Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Wien: ON Österreichisches Normungsinstitut. (2018
- (34) ÖNORM EN 197-1, Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Wien: ON Österreichisches Normungsinstitut. (2018
- (35) ÖNORM EN 197-1, Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Wien: ON Österreichisches Normungsinstitut. (2018

-
- (36) ÖNORM EN 197-1, Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Wien: ON Österreichisches Normungsinstitut. (2018)
- (37) RÖFIX Beton Handbuch.[https://www.roefix.at/Zielgruppe/Architekt-Planer/Broschueren-Folder/\(language\)/ger-DE](https://www.roefix.at/Zielgruppe/Architekt-Planer/Broschueren-Folder/(language)/ger-DE)
- (38) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (39) Xiao Y. Z., Liang C., Sridhar K., Chun H. Z., Dong S. T., Hui M. Y., Wei H. Y., Hao W. (2016) - Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications.
- (40) Xiao Y. Z., Liang C., Sridhar K., Chun H. Z., Dong S. T., Hui M. Y., Wei H. Y., Hao W. (2016) - Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications.
- (41) Xiao Y. Z., Liang C., Sridhar K., Chun H. Z., Dong S. T., Hui M. Y., Wei H. Y., Hao W. (2016) - Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications.
- (42) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (43) Nath, S.K.; Maitra, S.; Mukherjee, S.; Kumar, S. (2016) Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. Constr. Build. Mater.
- (44) https://www.beton.wiki/index.php?title=Chemischer_Angriff
- (45) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (46) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (47) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (48) Dehn, F. & Koenig, A. & Wüstemann, A. (2017). Alkalisch-aktivierte Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel als Alternative zu Zement.
- (49) König A, Schmidt J, Dehn F, Orgass M, Rasch S, Neumann T, Wöhrman K, Önal M. (2013). Entwicklung eines hinsichtlich des chemischen Angriffs optimierten mineralischen

Faserverbundwerkstoffs für dauerhafte und ressourcenschonende Konstruktionen des Biogasanlagenbaus.

(50) König A, Schmidt J, Dehn F, Orgass M, Rasch S, Neumann T, Wöhrman K, Önal M. (2013). Entwicklung eines hinsichtlich des chemischen Angriffs optimierten mineralischen Faserverbundwerkstoffs für dauerhafte und ressourcenschonende Konstruktionen des Biogasanlagenbaus.

(51) König A, Schmidt J, Dehn F, Orgass M, Rasch S, Neumann T, Wöhrman K, Önal M. (2013). Entwicklung eines hinsichtlich des chemischen Angriffs optimierten mineralischen Faserverbundwerkstoffs für dauerhafte und ressourcenschonende Konstruktionen des Biogasanlagenbaus.

(52) Dehn, F. & Koenig, A. & Wüstemann, A. (2017). Alkalisch-aktivierte Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel als Alternative zu Zement.

(53) Fernández-Jiménez, A. & Palomo, A. & López-Hombrados, C. (2006) Engineering properties of alkali-activated fly ash. ACI Materials Journal. 103. 106-112.

(54) Fernández-Jiménez, A. & Palomo, A. & López-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash. ACI Materials Journal. 103. 106-112.

(55) Dehn, F. & Koenig, A. & Wüstemann, A. (2017). Alkalisch-aktivierte Bindemittel und Geopolymer-Bindemittel als Alternative zu Zement.

(56) Ullmann, S. & Krauss, H.-W. & Budelmann, H. (2017). Mörtel für die Betoninstandsetzung auf Basis alkalisch aktivierter Bindemittel.

(57) Ullmann, S. & Krauss, H.-W. & Budelmann, H. (2017). Mörtel für die Betoninstandsetzung auf Basis alkalisch aktivierter Bindemittel.

(58) <https://www.beton.wiki/index.php?title=Zementgel>

(59) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2018). Geopolymere als Spezialbaustoff.

(60) Herrmann, A.; König, A.; Dehn, F. (2015) Vorschlag zur Klassifizierung von alkalischaktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, Beton (7+8), S. 390 - 395.

(61) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2018). Geopolymere als Spezialbaustoff.

(62) Xueying L, Zheng W and Zhenzhen J. (2013). Influence of Curing on the Strength Development of Calcium-Containing Geopolymer Mortar. S.5072 Figure 1, S.5073 Figure 3.

-
- (63) <https://www.beton.wiki/index.php?title=Permeabilit%C3%A4t>
- (64) https://de.wikipedia.org/wiki/Beton#Poren_im_Beton
- (65) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (66) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (67) Vogt, O. & Ukrainczyk, N. & Koenders, E. (2017). Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie.
- (68) https://media.springernature.com/lw785/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-981-10-4349-9_10/MediaObjects/430619_1_En_10_Fig1_HTML.gif
- (69) König A, Schmidt J, Dehn F, Orgass M, Rasch S, Neumann T, Wöhrman K, Önal M. (2013). Entwicklung eines hinsichtlich des chemischen Angriffs optimierten mineralischen Faserverbundwerkstoffs für dauerhafte und ressourcenschonende Konstruktionen des Biogasanlagenbaus.
- (70) Yahya, Z. & Abdullah, M. M. A. B. & Kamarudin, H & N, Khairul & R. Rafiza & V. Sandu, A. (2015) Effect of Solids-To-Liquids, Na₂SiO₃-To-NaOH and Curing Temperature on the Palm Oil Boiler Ash (Si + Ca) Geopolymerisation System. Materials. 8. 2227-2242. 10.3390/ma8052227.
- (71) Yahya, Z. & Abdullah, M. M. A. B. & Kamarudin, H & N, Khairul & R. Rafiza & V. Sandu, A. (2015). Effect of Solids-To-Liquids, Na₂SiO₃-To-NaOH and Curing Temperature on the Palm Oil Boiler Ash (Si + Ca) Geopolymerisation System. Materials. 8. 2227-2242. 10.3390/ma8052227.
- (72) G. Mucsi. (2014) Erőműi pernye komplex hasznosítása. S. 152-154.
- (73) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.
- (74) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.

-
- (75) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.
- (76) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.
- (77) Präsentation zum Thema: Zähle Keramik durch Gefügedesign.
<https://slideplayer.org/slide/883087/>
- (78) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.
- (79) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.
- (80) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.
- (81) D. Mosz, K.G. Süzük, R.Telle. (2013) Granulier- und Abbindeverhalten von geopolymerbasierten Systemen.
- (82) F. Nabeel & Sheikh, Md & H. Muhammad. (2018). Engineering Properties of Ambient Cured Alkali-Activated Fly Ash–Slag Concrete Reinforced with Different Types of Steel Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002333.
- (83) F. Nabeel & Sheikh, Md & H. Muhammad. (2018). Engineering Properties of Ambient Cured Alkali-Activated Fly Ash–Slag Concrete Reinforced with Different Types of Steel Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002333.
- (84) Ranjbar N, Mehrali M, Behnia A, Javadi Pordsari A, Mehrali M, Alengaram UJ, et al. (2016) A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer. *PLoS ONE* 11(1): e0147546. doi:10.1371/journal.pone.0147546
- (85) Ranjbar N, Mehrali M, Behnia A, Javadi Pordsari A, Mehrali M, Alengaram UJ, et al. (2016) A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer. *PLoS ONE* 11(1): e0147546. doi:10.1371/journal.pone.0147546
- (86) Ranjbar N, Mehrali M, Behnia A, Javadi Pordsari A, Mehrali M, Alengaram UJ, et al. (2016) A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer. *PLoS ONE* 11(1): e0147546. doi:10.1371/journal.pone.0147546

-
- (87) Ranjbar N, Mehrali M, Behnia A, Javadi Pordsari A, Mehrali M, Alengaram UJ, et al. (2016) A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer. PLoS ONE 11(1): e0147546. doi:10.1371/journal.pone.0147546
- (88) K.Korniejenko, E.Frączek, E.Pytlak, M.Adamski. (2016) Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers.
- (89) K.Korniejenko, E.Frączek, E.Pytlak, M.Adamski. (2016) Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers.
- (90) K.Korniejenko, E.Frączek, E.Pytlak, M.Adamski. (2016) Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers.
- (91) K.Korniejenko, E.Frączek, E.Pytlak, M.Adamski. (2016) Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers.
- (92) K.Korniejenko, E.Frączek, E.Pytlak, M.Adamski. (2016) Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers.
- (93) H. Assaedi, F.U.A. Shaikh, I.M. Low. (2016) Characterizations of flax fabric reinforced nanoclay-geopolymer composites.
- (94) T. H. Assaedi, F.U.A. Shaikh, I.M. Low. (2016) Characterizations of flax fabric reinforced nanoclay-geopolymer composites.
- (95) T. Alomayri, H. Assaedi, F.U.A. Shaikh, I.M. Low.(1014) Effect of water absorption on the mechanical properties of cottonfabric-reinforced geopolymer composites.
- (96) T. Alomayri, H. Assaedi F.U.A. Shaikh, I.M. Low.(1014) Effect of water absorption on the mechanical properties of cottonfabric-reinforced geopolymer composites.

-
- (97) ÖNORM EN 1015-11, Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel
- (98) Bergmeister K, Fingerloos F, Worner J-D. (2009) Beton-Kalender Schwerpunkte: Konstruktiver Hochbau
- (99)http://www.hagerbach.ch/referenzblaetter/baustoffpruefung/Wasseraufnahmekoeffizient_d.pdf
- (100) ÖNORM EN 1015-18, Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk Teil 18: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel)
- (101) Benedix R. (2017) Bauchemie für das Bachelor-Studium
- (102) Benedix R. (2011) Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten
- (103) Ziyad Kubba, Ghasan Fahim Huseie, Abdul Rahman MohdSam, Kwok WeiShah, Mohammad AliAsaad, Mohammad Ismail, Mahmood Tahir, Jahangir Mirza (2018) Impact of curing temperatures and alkaline activators on compressive strength and porosity of ternary blended geopolymer mortars.
- (104) T. Alomayri, H. Assaedi, F.U.A. Shaikh, I.M. Low.(1014) Effect of water absorption on the mechanical properties of cottonfabric-reinforced geopolymer composites.
- (105) Romildo D., Toledo F, Scrivener K, George L. England, Khosrow Ghavami. (1999). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites.