

Diplomarbeit

# Herstellung eines CO<sub>2</sub>-armen (oder sogar negativen) Betons: Einfluss des Biokohlegehalts auf die Frisch- und Festigkeitseigenschaften

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads  
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

## Production of low- (or even negative-) CO<sub>2</sub> concrete: Influence of biochar content on fresh and hardened properties

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

von

**Andjelina Budim, BSc**

Matr.Nr.: 01246631

Betreuung: Projektass. Dipl.-Ing. **Meriton Ramizi**, BSc  
Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr. techn. **Johannes Kirnbauer**  
Univ.-Prof.in **Agathe Robisson**, PhD.  
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie  
Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie  
Technische Universität Wien,  
Lilienthalgasse 14, 1030 Wien, Österreich

Wien, im März 2025

---

---

## Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt Univ.-Prof. PhD. Agathe Robisson, Dipl.-Ing. Meriton Ramizi und Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Kirnbauer für ihre wertvolle Unterstützung und fachliche Begleitung während meiner Diplomarbeit.

Von Herzen möchte ich mich bei meinem Ehemann Philipp bedanken, der mich während des gesamten Studiums mit viel Geduld, Liebe und Verständnis begleitet hat. Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, Marijana und Tomislav, die immer an mich geglaubt haben und mir mit ihrer bedingungslosen Liebe in jeder Phase meines Lebens zur Seite standen.

Abschließend danke ich meiner lieben Freundin und Studienkollegin Sofija. Ohne ihre Ratschläge, ihre Ermutigung und unsere gemeinsame Zeit wäre diese Erfahrung nicht dieselbe gewesen.

Diese Arbeit widme ich meinen Töchtern Nika und Lucia. Ihr seid mein größtes Geschenk und die unendliche Quelle meiner Inspiration.

## Kurzfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen des Pflanzenkohlegehalts und der Vorsättigungszeit auf die Frisch- und Festigkeitseigenschaften von Beton zu untersuchen. Die Rezeptur der Mischungen wurde wie folgt ermittelt. Es wurden 5 %, 10 % und 15 % der Zementmasse berechnet, was der Masse der Pflanzenkohle entsprach. Diese Masse wurde anschließend vom Sandanteil abgezogen, um die Gesamtmasse der Mischung konstant zu halten. Zusätzlich wurde die Wirkung der unterschiedlichen Vorsättigungsdauern (0 min, 10 min, 24 Std.) auf die Eigenschaften der Mischungen überprüft.

Zu Beginn wurden Versuche zur Bestimmung der Eigenschaften der Pflanzenkohle durchgeführt, darunter die Ermittlung der Reindichte mit einem Heliumpyknometer, die Bestimmung der Rohdichte mit einem Zylinder, die Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit mittels Büchner-Trichter, die Messung des Wärmeflusses und der kumulierten Wärmeenergie mit einem Kalorimeter sowie die Bestimmung des Ausbreitmaßes. Diese Tests lieferten wichtige Informationen zur Porosität und Wasseraufnahmefähigkeit der Pflanzenkohle, die im weiteren Verlauf der Arbeit entscheidende Hinweise für die Mischungsherstellung gaben. Es zeigte sich, dass die Zugabe von Pflanzenkohle – insbesondere in höheren Anteilen – die Porosität der Mischungen erhöhte, was wiederum die Wasseraufnahmefähigkeit beeinflusste. Diese Veränderungen hatten direkte Auswirkungen auf die Festigkeit des Betons, was durch die Versuche zur Druck- und Biegezugfestigkeit bestätigt werden konnte. Dabei ergibt sich ein klares Bild: Höhere Pflanzenkohlegehalte führen zu einer Schwächung der Festigkeit. Auch die Vorsättigungszeit hat einen erheblichen Einfluss auf die Frisch- und Festigkeitseigenschaften der Mörtelmischungen.

Ein wichtiger Aspekt ist der CO<sub>2</sub>-reduzierende Effekt von Pflanzenkohle. In der Literatur ist bekannt, dass die Verwendung von Pflanzenkohle in Baustoffen wie Beton zur Kohlenstoffbindung beitragen kann. Pflanzenkohle hat die Fähigkeit, CO<sub>2</sub> über längere Zeiträume zu speichern, was zu einer potenziellen CO<sub>2</sub>-Reduktion führt. Dieser Effekt ist besonders relevant in Hinblick auf die Entwicklung von CO<sub>2</sub>-armen oder sogar CO<sub>2</sub>-negativen Baustoffen.

## Abstract

The main objective of this study was to investigate the effects of the plant charcoal content and pre-saturation time on the fresh and mechanical properties of concrete. The composition of the mixtures was determined as follows. 5%, 10%, and 15% of the cement mass were calculated, which corresponded to the mass of the biochar. This mass was then subtracted from the sand content to maintain a constant total mixture mass. Additionally, the effect of different pre-saturation durations (0 min, 10 min, 24 hours) on the properties of the mixtures was examined.

Initially, experiments were conducted to determine the properties of biochar, including the determination of bulk density using a helium pycnometer, the measurement of raw density using a cylinder, the water absorption capacity using a Büchner funnel, the measurement of heat flow and cumulative heat energy with a calorimeter, and the spread test. These tests provided crucial information on the porosity and water absorption capacity of the biochar, which later played a significant role in the formulation of the mixtures. It was found that the addition of biochar, especially in higher amounts, increased the porosity of the mixtures, which in turn influenced the water absorption capacity. These changes had direct impacts on the strength of the concrete, as confirmed by tests on compressive and flexural strength. A clear pattern emerged: higher biochar content led to a weakening of strength. The pre-saturation time also had a significant effect on the fresh and hardened properties of the mortar mixtures.

An important aspect is the CO<sub>2</sub>-reducing effect of biochar. It is well-known in the literature that the use of biochar in building materials such as concrete can contribute to carbon sequestration. Biochar can store CO<sub>2</sub> over long periods, leading to potential CO<sub>2</sub> reduction. This effect is particularly relevant in the context of developing CO<sub>2</sub>-reduced or even CO<sub>2</sub>-negative building materials.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Theoretische Grundlagen .....	2
2.1	CO <sub>2</sub> -Emissionen in der Betonproduktion .....	2
2.1.1	Zementproduktion .....	2
2.2	Pflanzenkohle .....	3
2.2.1	Herstellung von Pflanzenkohle.....	4
3	Verwendete Methoden und Materialien.....	5
3.1	Materialien .....	5
3.1.1	Normsand .....	5
3.1.2	CEM III/B 2,5 N .....	5
3.1.3	Pflanzenkohle .....	6
3.2	Voruntersuchungen der Pflanzenkohle.....	6
3.2.1	Mahlprozess .....	6
3.2.2	Ermittlung der Dichte .....	7
3.2.3	Heliumpyknometer .....	7
3.2.4	Büchner Trichter Versuch.....	9
3.2.5	Ermittlung des Wärmeflusses .....	10
3.3	Prüfung der Festbetoneigenschaften .....	11
3.3.1	Herstellung der Mischungen .....	11
3.3.2	Ermittlung des Ausbreitmaßes.....	13
3.3.3	Biegezugfestigkeit .....	13
3.3.4	Druckfestigkeit .....	14
4	Ergebnisse und Diskussion .....	16
4.1	Ergebnisse des Kalorimeterversuchs.....	16
4.2	Rohdichte.....	21
4.3	Ausbreitmaß .....	23
4.4	Biegezugfestigkeit.....	24
4.5	Druckfestigkeit.....	29
5	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	35

6	Literaturverzeichnis .....	37
7	Abbildungsverzeichnis .....	40
8	Formelverzeichnis .....	41
	Anhang A .....	42
	Anhang B .....	44
	Anhang C .....	50

# 1 Einleitung

Die Betonproduktion trägt weltweit erheblich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei, da die Herstellung von Zement eine äußerst energieintensive Prozedur ist, die mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden ist. Insbesondere die Herstellung von Zement aus Kalkstein setzt große Mengen an Kohlendioxid frei, was einen gravierenden Beitrag zu den globalen Treibhausgasemissionen leistet. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, den Klimawandel zu bekämpfen und die CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit zu reduzieren, ist es von entscheidender Bedeutung, nachhaltige Alternativen zu den konventionellen Betonproduktionsmethoden zu entwickeln. Die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in der Bauindustrie stellt eine zentrale Herausforderung dar, die innovative und praktikable Lösungen erfordert. Eine vielversprechende Möglichkeit zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Beton ist der Einsatz von Pflanzenkohle, auch Biokohle genannt. Pflanzenkohle wird durch die Pyrolyse von pflanzlichen Reststoffen gewonnen, einem thermischen Prozess, bei dem organisches Material in einer sauerstoffarmen Umgebung bei hohen Temperaturen zersetzt wird. Die resultierende Kohle ist ein poröses, stabileres Material, das Kohlenstoff speichert und somit als langfristiger Kohlenstoffspeicher fungiert. Wenn Pflanzenkohle als Zusatzmaterial in der Betonproduktion verwendet wird, kann sie nicht nur zur Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz des Betons beitragen, sondern auch potenziell die mechanischen Eigenschaften des Betons positiv beeinflussen.

Das Hauptziel dieser Diplomarbeit ist es, den Einfluss des Biokohlegehalts auf die Frisch- und Festigkeitseigenschaften von Beton zu untersuchen, um so die Entwicklung von CO<sub>2</sub>-armen oder sogar CO<sub>2</sub>-negativen Betonen zu ermöglichen. In dieser Arbeit wird der Einfluss von unterschiedlichen Mengen an Pflanzenkohle (5 %, 10 % und 15 %) auf die Verarbeitbarkeit des Betons sowie auf seine Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit analysiert. Es wird auch untersucht, wie sich die Vorsättigungszeit der Pflanzenkohle auf die Eigenschaften des Betons auswirkt, um das Potenzial dieses Materials für eine nachhaltigere Betonproduktion besser zu verstehen. Darüber hinaus wird das Ziel verfolgt, nicht nur die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Betonproduktion zu unterstützen, sondern auch die mechanischen Eigenschaften des Betons zu optimieren. Ein solcher CO<sub>2</sub>-armer oder CO<sub>2</sub>-negativer Beton könnte ein bedeutender Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Bauweise und einer Reduktion der Umweltauswirkungen der Bauindustrie sein.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen einen Beitrag zu einer umweltfreundlicheren Betonproduktion leisten und somit zur Erreichung der Klimaziele in der Bauindustrie beitragen. Mit den Erkenntnissen aus dieser Studie könnten zukünftige Entwicklungen in der Betonproduktion dazu führen, dass Pflanzenkohle als nachhaltige und kosteneffiziente Alternative in der Herstellung von Beton etabliert wird, wodurch nicht nur die CO<sub>2</sub>-Bilanz, sondern auch die Gesamtökobilanz der Bauindustrie deutlich verbessert werden könnte.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Betonproduktion

#### 2.1.1 Zementproduktion

Die Hauptrohstoffe des Zements sind Kalkstein, Ton und Mergel, diese werden in Steinbrüchen gewonnen und anschließend in Brecheranlagen zerkleinert. Das zerkleinerte Material wird in Schotterhallen transportiert, wo es homogenisiert wird. Anschließend erfolgt das Mahlen der Rohmischung in Mühlen, wo das Material auch getrocknet wird. Der wichtigste Schritt ist das Brennen des gemahlene Rohmehls zu Zementklinker bei etwa 1.450 °C in Drehrohröfen. Der Klinker wird dann mit Gips und anderen Zusatzstoffen gemahlen, um den fertigen Zement zu produzieren. Abschließend wird der Zement entweder lose oder in Säcken verpackt und versendet. [1]

Während der Zementproduktion werden zwischen 0,8 und 0,9 Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt. Es wird angenommen, dass diese verantwortlich für etwa 8 % der globalen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und rund 25 % der industriellen Kohlenstoffemissionen ist. Zwei Hauptfaktoren verursachen diesen enormen CO<sub>2</sub> Ausstoß [2]:

1. **Verbrennung:** Durch die Erhitzung von Kalkstein kommt es zur thermischen Zersetzung des Calciumcarbonats, wobei Calciumoxid und CO<sub>2</sub> freigesetzt werden.
2. **Energiebedarf:** Einsatz fossiler Brennstoffe zur Erzeugung der hohen Temperaturen, die für die chemische Umwandlung von Calciumcarbonat zu Calciumoxid erforderlich sind.

Um den ökologischen Fußabdruck der Zementherstellung zu verringern, werden verschiedene Ansätze [3] verfolgt:

1. **Ersatz von Zement mit alternativen Materialien:** Eine effektive Möglichkeit zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementproduktion ist die Verwendung von Zusatzstoffen wie Supplementary Cementitious Materials (SCMs). Diese Materialien erfordern weniger Energie bei der Herstellung und können zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen, indem sie CO<sub>2</sub> aus Industrieabfällen binden und den Klinkeranteil im Zement verringern.
2. **Umstellung auf alternative Brennstoffe:** Der Einsatz von Biomasse, Erdgas und Abfallstoffen verringert CO<sub>2</sub>-Emissionen und reduziert die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Allerdings kann dies die Zementqualität beeinträchtigen und schädliche Emissionen wie Quecksilber freisetzen.

3. **Energieeffizienzsteigerung und erneuerbare Energien:** Die Steigerung der Energieeffizienz in der Zementproduktion ist entscheidend, um CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren und die Produktionskosten zu senken. Die Umstellung auf das Trockenverfahren kann den Energieverbrauch um bis zu 50 % senken und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 20 % verringern. Weitere Effizienzsteigerungen erfordern Investitionen in moderne Technologien.
4. **Einsatz von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS):** CCS kann CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementproduktion um 65 % bis 75 % reduzieren, indem CO<sub>2</sub> aus Abgasen abgeschieden und unterirdisch gespeichert wird. Die Technologie steht jedoch vor Herausforderungen wie hohen Kosten und hohem Energieverbrauch.
5. **Abwärmerückgewinnung:** Ein erheblicher Teil der Abwärme aus dem Klinkerkühler und den Brennprozessen kann genutzt werden, um Strom zu erzeugen. Dies bietet eine kostengünstige Möglichkeit, den Energieverbrauch zu senken und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

## 2.2 Pflanzkohle

Die Herstellung von Pflanzkohle reicht bis zu 4.000 Jahre zurück, als sie erstmals in der Eisenzeit zur Eisenverhüttung eingesetzt wurde. Diese spezielle Form der Biokohle wird aus rein pflanzlichen Materialien gewonnen und unterscheidet sich wesentlich von traditioneller Holzkohle, die vor allem für energetische Zwecke genutzt wird. Pflanzkohle kann jedoch nicht nur aus Holz, sondern auch aus einer Vielzahl von Biomassequellen wie Stroh, Grünschnitt, Festmist, Gülle, Klärschlamm oder Gärresten produziert werden. Während Holzkohle überwiegend als Energieträger dient, wird Pflanzkohle vor allem in der Landwirtschaft zur Verbesserung der Bodenqualität und zur langfristigen Speicherung von CO<sub>2</sub> eingesetzt. Zudem findet sie zunehmend Anwendung in der Bauindustrie, wo sie in mineralische Bindemittel integriert wird, um die Eigenschaften von Baustoffen zu verbessern. Ein entscheidender Vorteil der Pflanzkohle ist ihre hohe Porosität und die große Oberfläche der Partikel, die während der Pyrolyse in einer sauerstoffarmen Umgebung entstehen. Diese Eigenschaften machen Pflanzkohle besonders effektiv in der Kohlenstoffbindung und ermöglichen eine erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit, was in der Bauindustrie von großem Nutzen sein kann. Eingebunden in Baustoffe wie Beton bleibt die Pflanzkohle über lange Zeiträume stabil und fungiert als dauerhafte Kohlenstoffsенке, die Kohlenstoff aus der Atmosphäre speichert und so zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt. [4,5,7]

Das Global Warming Potential (GWP) von Pflanzkohle beträgt ungefähr -2000 kg CO<sub>2</sub>e/t [24], was bedeutet, dass Pflanzkohle aktiv Kohlenstoff aus der Atmosphäre entfernt und langfristig bindet. Im Vergleich dazu liegt das GWP von Beton zwischen 100 und 900 kg CO<sub>2</sub>e/t [25], was den ökologischen Fußabdruck dieses Baustoffs erheblich erhöht.

Es existieren verschiedene Verfahren zur Herstellung von Pflanzenkohle, die sich in ihrer Geschwindigkeit, der maximalen Verarbeitungstemperatur, der Dauer der Behandlung und den erzeugten Produkterträgen unterscheiden. [4,5]

### 2.2.1 Herstellung von Pflanzenkohle

Pflanzenkohle wird durch Pyrolyse hergestellt, einem Prozess, bei dem Biomasse in Abwesenheit von Sauerstoff thermisch zersetzt wird. Es gibt verschiedene Produktionsmethoden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile bieten [6]:

1. **Traditionelle Öfen:** Dieses Verfahren beinhaltet das Stapeln von Biomasse und kontrolliertes Verbrennen. Es bietet jedoch keine präzise Steuerung der Pyrolysebedingungen, was zu variabler Qualität und variablem Ertrag der Pflanzenkohle führen kann.
2. **Retortenöfen:** Sie ermöglichen eine bessere Kontrolle der Temperatur und des Sauerstoffgehalts und führen zu einer höheren Qualität und besserem Ertrag der Pflanzenkohle als traditionelle Öfen.
3. **Vergasung:** Diese Methode erzeugt sowohl Pflanzenkohle als auch wertvolles Synthesegas durch teilweise Verbrennung von Biomasse unter kontrollierten Bedingungen. Sie bietet den Vorteil, dass neben Pflanzenkohle auch ein nützliches Gasprodukt für die Energieerzeugung entsteht.
4. **Mikrowellenpyrolyse:** Hier wird Mikrowellenenergie verwendet, um Biomasse schnell und gleichmäßig zu erhitzen. Diese Methode ermöglicht eine präzisere Temperaturkontrolle und eine schnellere Herstellung von hochwertiger Pflanzenkohle.
5. **Hydrothermale Karbonisierung (HTC):** Diese Methode eignet sich besonders für feuchte Biomasse und wandelt diese unter hohem Druck und hoher Temperatur in Pflanzenkohle um. Sie ist besonders effektiv bei der Umwandlung von Biomasse mit hohem Wassergehalt wie Klärschlamm oder Algen.

Jede dieser Methoden hat spezifische Vorteile, die je nach Zielsetzung (z. B. CO<sub>2</sub>-Sequestrierung oder Baustoffanwendung) berücksichtigt werden müssen. [6]

## 3 Verwendete Methoden und Materialien

### 3.1 Materialien

#### 3.1.1 Normsand

Die Herstellung des Normsand es erfolgte gemäß *ÖNORM EN 196-1:2016-04* [8]. Im Labor wurden mehrere Prüfsiebe aus Metallgewebe, mit einer Maschenweite gemäß ISO 565, gestapelt und miteinander verbunden. Dieser Siebturm wurde anschließend auf einen Rütteltisch gestellt und mit Sand befüllt.



Abbildung 1: Mischturm

#### 3.1.2 CEM III/B 2,5 N

Der verwendete Hochofenzement entspricht der Norm DIN 196-1. Dieser setzt sich überwiegend aus Hüttensand und Portlandzementklinker zusammen, wobei Sulfatregler als Erstarrungsregler zum Einsatz kommen. Durch den hohen Anteil an Hüttensand, welcher zwischen 66 und 80 % liegt, zeichnet sich der Zement durch eine langsame Festigkeitsentwicklung und eine ausgeprägte Nacherhärtung aus. [9]

Der GWP von CEM III liegt bei 281 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne Zement, was ihn im Vergleich zu CEM I deutlich umweltfreundlicher macht [23]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bis zu 95 % des Portlandzementanteils durch Hüttensand ersetzt werden kann. Hüttensand ist ein feinkörniges Nebenprodukt der Roheisenherstellung und benötigt weniger Primärenergie und verursacht geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen als Portlandzement. [22]

Die Partikelgrößenverteilung des verwendeten Zements ist in Abbildung 2 dargestellt.

### 3.1.3 Pflanzenkohle

Die Versuche wurden mit Pflanzenkohle der Firma „Sonnenerde“ durchgeführt. Zur Herstellung der Sonnenerde werden in der Verkohlungsanlage aufbereitetes Holz aus der Kompostierung, Obstreste, Getreidespelzen und Zellulosefasern unter Luftabschluss auf 850°C erhitzt und anschließend mit Wasser abgekühlt. Nach dem Herstellungsprozess weist die Pflanzenkohle eine fein-krümelige Struktur auf und kann direkt verwendet werden. [10]

## 3.2 Voruntersuchungen der Pflanzenkohle

### 3.2.1 Mahlprozess

Im Vorfeld wurde die Pflanzenkohle in einem Ofen bei einer Temperatur von 105°C getrocknet, um die Restfeuchtigkeit zu entfernen. Nach der Trocknung wurde die Pflanzenkohle für einen Zeitraum von 24 Stunden auf Raumtemperatur abgekühlt. Anschließend wurde die Pflanzenkohle drei Stunden lang in zwei Stahlzylindern mit je 100 Stahlkugeln langsam gemahlen, um einen gleichmäßigen Mahlprozess sicherzustellen und eine ähnliche Korngrößenverteilung wie die des Zements zu erreichen. Dies ist wichtig, um eine gleichmäßige Verteilung in der Mischung zu garantieren, damit eine homogene und stabile Mischung hergestellt werden kann. Ein ebenso wichtiger Aspekt ist es Lufteinschlüsse zu vermeiden, die entstehen können, wenn die Partikel der Pflanzenkohle zu groß sind.

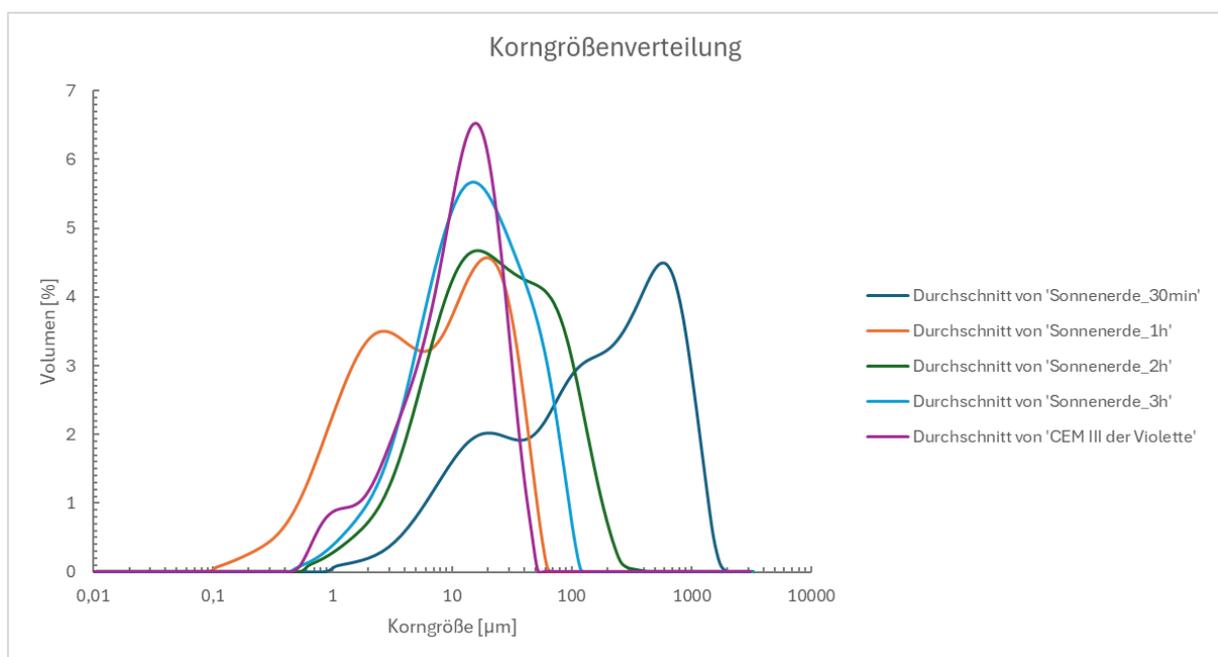


Abbildung 2: Korngrößenverteilung

### 3.2.2 Ermittlung der Dichte

Es gibt unterschiedliche Definitionen von Dichte, abhängig von der Berücksichtigung des Porenvolumens. Wenn das Porenvolumen mitberücksichtigt wird, spricht man von der Rohdichte, wenn nicht handelt es sich um die Reindichte. Bei dieser wird das Volumen des festen Materials ohne die Poren berechnet. Die Schüttdichte ist das Gewicht eines körnigen Materials im Verhältnis zu seinem Volumen, einschließlich der Poren und Lücken zwischen den Körnern. Sie wird durch die Korngröße, den Einfüllvorgang und die Feuchtigkeit beeinflusst. Mithilfe eines Heliumpyknometers kann die wahre Dichte eines Materials ermittelt werden. [11,21]

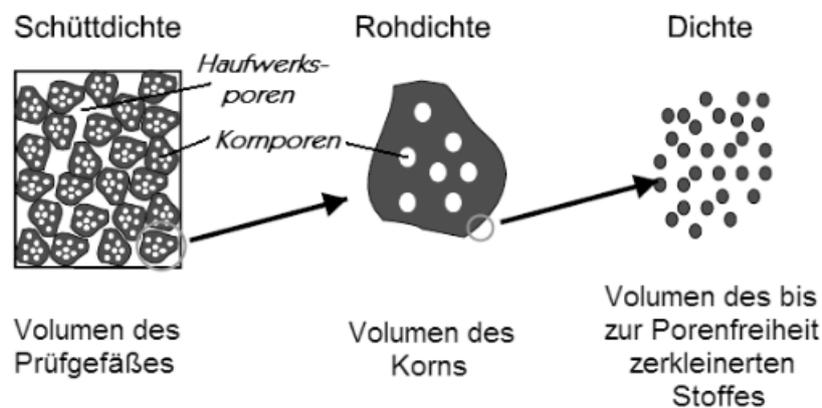


Abbildung 3: Definitionen von Dichten [19]

### 3.2.3 Heliumpyknometer

Die Ermittlung der Reindichte von Pflanzenkohle erfolgte mit einem Heliumpyknometer des Typs *MultiVolume Pycnometer 1305*.



Abbildung 4: Heliumpyknometer

Vor der Benutzung wurde das Gerät lt. Gebrauchseinweisung kalibriert und anschließend die Ergebnisse mit einem Wasserpyknometer kontrolliert. Das Heliumpyknometer ist in der Lage, Messungen in drei unterschiedlichen Volumenbereichen durchzuführen (5 cm<sup>3</sup>, 35 cm<sup>3</sup> und 150 cm<sup>3</sup>), die jeweils mit einem spezifischen Messbecher und entsprechenden Messkammereinsätzen kombiniert werden. Für den größten Messbecher (150 cm<sup>3</sup>) wird kein zusätzlicher Messkammereinsatz benötigt, während die kleineren Reichweiten durch spezielle Einsätze eine präzisere Messung ermöglichen. Die zu untersuchende Materialprobe wurde in den entsprechenden Messbecher eingefüllt. Anschließend wurde der Messbecher in die Messkammer positioniert, und der Kammerdeckel verschlossen. Heliumgas wird in die Kammer geleitet, bis sich der Druck bei 19,5 psi ± 0,2 psi ausgleicht ( $P_1^*$ ). Anschließend wurde das PREP/TEST-Ventil auf die TEST-Position geschaltet und das Expansionsvolumen geöffnet, bis sich der Druck stabilisierte. Dieser Wert wird vermerkt als  $P_2^*$ . Durch die Ermittlung der beiden Drücke  $P_1^*$  und  $P_2^*$  lässt sich das Volumen der Probe berechnen, welches anschließend zur Ermittlung der Reindichte verwendet wird. In den folgenden Berechnungen wird die Reindichte der Pflanzkohle mit 1,70 g/cm<sup>3</sup> angesetzt. [12]

Die Berechnung des Volumens [12] erfolgte wie folgt:

$$V_{\text{SAMP}} = V_{\text{CELL}} \cdot \frac{V_{\text{EXP}}}{\frac{P_1^*}{P_2^*} - 1}$$

$V_{\text{SAMP}}$  ... Volumen der Materialprobe

$V_{\text{CELL}}$  ... Leeres Volumen der Probenkammer mit den leeren Probenbechern

$V_{\text{EXP}}$  ... Erweiterungsvolumen, das hinzugefügt wird, wenn das PREP/TEST-Ventil in der TEST-Position ist

$P_1^*$  ... Ladedruck

$P_2^*$  ... Expansionsdruck

Die Reindichte wurde durch folgende Gleichung (3.1) berechnet:

$$\rho_{\text{SAMP}} = \frac{m_{\text{SAMP}}}{V_{\text{SAMP}}} \quad (3.1)$$

$\rho_{\text{SAMP}}$  ... Reindichte der Probe

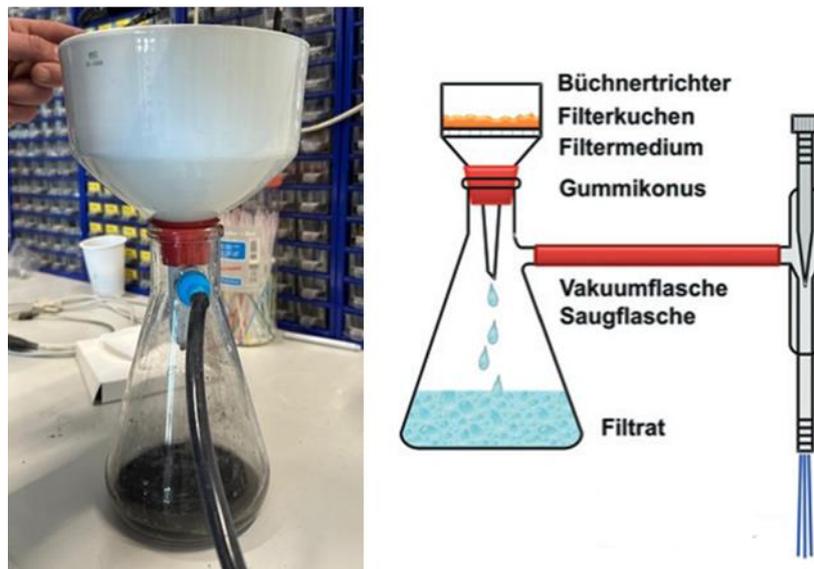
$m_{\text{SAMP}}$  ... Masse der Probe

$V_{\text{SAMP}}$  ... Volumen der Probe

### 3.2.4 Büchner Trichter Versuch

Die Wasseraufnahmekapazität wurde gemäß ÖNORM EN 1097-6:2022-05-01 [14] mit Hilfe eines Büchner-Trichters bestimmt. Während der Messung wurde die Masse des Büchner-Trichters einschließlich des verwendeten Filterpapiers ermittelt und als  $M_1$  vermerkt. Die Probe wurde in den Trichter gefüllt und anschließend wurde die gesamte Einheit gewogen und die Masse als  $M_2$  vermerkt. Der Trichter wurde auf einen Kolben gesetzt und mit Wasser befüllt. Die Probe wurde gründlich gerührt und die eingeschlossene Luft mit einem Vakuum von min. 50–100 mbar abgesaugt. Zur Ermittlung der Masse  $M_3$  wurde die gesamte Einheit einschließlich der gesättigten Probe gewogen.

Unmittelbar nach dieser Messung erfolgte die Bestimmung der Rohdichte. Hierfür wurden 500 ml Wasser in einen Messzylinder gefüllt und gewogen ( $M_4$ ). Danach wurde die Probe aus dem Büchner-Trichter in den Zylinder übertragen und das Gesamtvolumen wurde als  $V_G$  abgelesen. Anschließend wurde die Gesamtmasse ermittelt ( $M_5$ ). [14]



**Abbildung 5:** Büchner Trichter mit Kolben [15]

Durch folgende Gleichungen [14] konnten Wasseraufnahme und Rohdichte ermittelt werden:

$$WA(t) = \frac{M_3(t) - M_2}{M_2 - M_1} * 100 \quad (3.2)$$

WA(t) ... Wasseraufnahme in der vorgegebenen Eintauchzeit [%]

$M_1$  ... Masse des Büchner Trichters mit Filterpapier [g]

$M_2$  ... Masse  $M_1$  einschließlich trockener Probe [g]

$M_3(t)$  ... Masse  $M_1$  einschließlich gesättigter Probe [g]

$$\rho_{La} = \frac{A}{(V_G - 500) - \left( \frac{A * \frac{WA(t)}{100}}{\rho_w} \right)} \quad (3.3)$$

$$A = \frac{(M_5(t) - M_4)}{1 + \frac{WA(t)}{100}} \quad (3.4)$$

$\rho_{La}$  ... scheinbare Rohdichte [ $Mg/m^3$ ]

$V_G$  ... Gesamtvolumen gesättigte Probe und 500ml Wasser im Messzylinder [ml]

$\rho_w$  ... Dichte von Wasser bei Raumtemperatur [ $Mg/m^3$ ]

$M_4$  ... Masse des mit 500ml Wasser befüllten Zylinders [g]

$M_5(t)$ ... Masse des mit 500ml Wasser gefüllten Zylinders einschließlich der Probe [g]

Laut dieser Berechnung wurde eine Wasseraufnahme von ca. 61 % und eine scheinbare Rohdichte von ca.  $1,34 \text{ g/cm}^3$  ermittelt.

### 3.2.5 Ermittlung des Wärmeflusses

Zur Bestimmung des Wärmeflusses wurde ein Differential Scanning Kalorimeter (DSC) verwendet. Im ersten Schritt wurden die Mischungszusammensetzungen (siehe Anhang A) gemäß den festgesetzten Parametern (Menge, Vorsättigung) festgelegt und anschließend die Proben präzise gewogen. Diese wurden dann in die dafür vorgesehenen Kapseln gefüllt und eine separate Kapsel wurde mit der Referenzprobe (Wasser) befüllt. Während des Versuchs wurde die Temperatur in den Proben kontinuierlich überwacht und die Differenz im Wärmefluss zwischen der Probe und der Referenzmessung aufgezeichnet. Das DSC misst die Wärmemenge, die erforderlich ist, um die Temperatur der Probe im Vergleich zur Referenz konstant zu halten, wodurch der Wärmefluss ermittelt wird. [20]



Abbildung 6: Kalorimeter

### 3.3 Prüfung der Festbetoneigenschaften

#### 3.3.1 Herstellung der Mischungen

Die Auswahl der Mischungszusammensetzungen spielte eine entscheidende Rolle für den weiteren Verlauf der Versuche. Besonders im Fokus stand dabei der Einfluss der Vorsättigung sowie die Menge an zugesetzter Pflanzenkohle, um deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Betons zu untersuchen.

Um den w/z-Wert des Zements bei den Mischungen konstant zu halten, wurde der Anteil an Pflanzenkohle nicht vom Zementanteil, sondern vom Sandanteil abgezogen, sodass die Gesamtmasse der Mischung unverändert blieb. Wichtig zu beachten ist, dass dieser Anteil prozentuell vom Gesamtvolumen des Sandes abgezogen wurde. Es wurde eine Normmischung (NM) hergestellt, um einen direkten Vergleich in den Ergebnissen darzustellen. Die Menge an Pflanzenkohle wurde variiert zwischen 0% (NM), 5%, 10% sowie 15%. Bei der Vorsättigungsdauer wurde unterschieden zwischen 0min, 10min und 24Std.

In folgender Tabelle wird die Rezeptur dargestellt:

Tabelle 1: Rezeptur

	Menge Pflanzenkohle (BC)							
	NM		5%		10%		15%	
	m [g]	V [%]	m [g]	V [%]	m [g]	V [%]	m [g]	V [%]
BC trocken	0,0	0,0	22,5	1,5	45,0	3,0	67,5	4,5
BC Wasser	0,0	0,0	13,7	1,5	27,5	3,1	41,2	4,6
Wasser	225,0	25,3	225,0	25,3	225,0	25,3	225,0	25,3
Zement	450,0	17,5	450,0	17,5	450,0	17,5	450,0	17,5
Sand	1350,0	57,2	1278,6	54,2	1207,1	51,1	1135,7	48,1

Die Mischung wurde mit dem ToniMIX Visco Expert hergestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Mischung vollkommen homogen und frei von Klumpen ist. Im Anhang B sind verschiedene Kurven zur Verarbeitbarkeit der Pflanzenkohle in Abhängigkeit von deren Menge und Vorsättigung dargestellt.

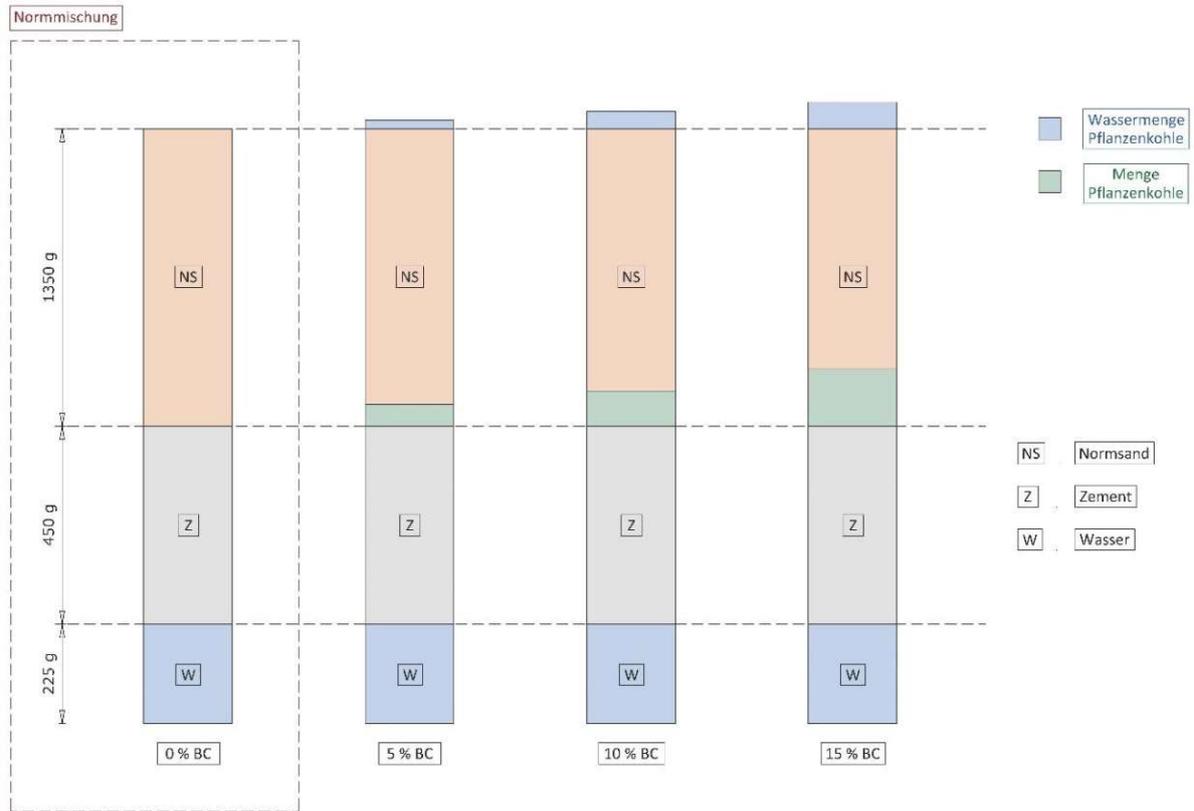


Abbildung 7: Mischungszusammensetzung



Abbildung 8: ToniMIX Visco Expert [16]

Im Anschluss daran wurde die fertige Mörtelmasse in drei prismenförmige Prüfkörper gegossen, welche die Maße 40 mm x 40 mm x 160 mm aufwiesen. Die Formen wurden sorgfältig befüllt, um eine gleichmäßige Verteilung des Materials zu gewährleisten. Die Prüfungen der Körper wurden durchgeführt nach 24 Stunden, 7 Tagen, 28 Tagen und 56 Tagen. Vor jeder Prüfung wurden die Abmessung der Prüfkörper präzise mit einer Schiebelehre gemessen und im Anschluss wurde die Rohdichte berechnet.

### 3.3.2 Ermittlung des Ausbreitmaßes

Das Ausbreitmaß wurde nach der Vorbereitung der Pflanzenkohle für die Mischungen (0 Minuten, 10 Minuten und 24 Stunden Vorsättigung) gemäß *ÖNORM EN 196-1:2016-04* [8] ermittelt. Hierzu wurde die Probe auf einem Schocktisch ausgeschüttet und mehrfach geschlagen, um eine gleichmäßige Verteilung der Partikel zu gewährleisten. Anschließend wurde der Durchmesser der ausgebreiteten Probe gemessen, um das Ausbreitmaß zu bestimmen. Dieser Prozess ermöglicht eine präzise Erfassung der Fließfähigkeit.



Abbildung 9: Schocktisch

### 3.3.3 Biegezugfestigkeit

Zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit wurde ein Drei-Punkt-Lastverfahren unter Verwendung einer Zwick-Prüfmaschine angewendet, gemäß *ÖNORM EN 196-1:2016-04* [8]. In jedem Testdurchlauf wurden ein Satz von drei Prismen mit einer gleichmäßigen Laststeigerung von  $50 \pm 10$  N/s bis zum Versagen belastet. Aus den drei Einzelergebnissen wurde die Biegezugfestigkeit als arithmetisches Mittel berechnet.

Die Biegezugfestigkeit kann bei Drei-Punkt-Lasteintragung [17] wie folgt berechnet werden:

$$f_{ct} = \frac{1,5 * F * l}{d_1 * d_2^2} \quad (3.5)$$

$f_{ct}$  ... Biegezugfestigkeit [MPa]

$F$  ... aufgebrachte Bruchlast [N]

$l$  ... Abstand zwischen den Tragrollen [mm]

$d_1$  ... Breite des Querschnittes [mm]

$d_2$  ... Höhe des Querschnittes [mm]



**Abbildung 10:** Biegezugprüfung

### 3.3.4 Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte mit Hilfe der Zwick-Prüfmaschine gemäß *ÖNORM EN 196-1:2016-04* [8]. Die gebrochenen Proben aus dem Biegezugversuch wurden gleichmäßig mit einer Laststeigerung von  $2400 \pm 200$  N/s bis zum Bruch belastet. Aus den sechs Einzelergebnissen wurde die Druckfestigkeit als arithmetisches Mittel berechnet.

Die Druckfestigkeit lässt sich durch folgende Gleichung [18] ermitteln:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.6)$$

$f_c$  ... Druckfestigkeit [MPa]

$F$  ... aufgebrachte Bruchlast [N]

$A_c$  ... Fläche des Querschnitts [mm<sup>2</sup>]

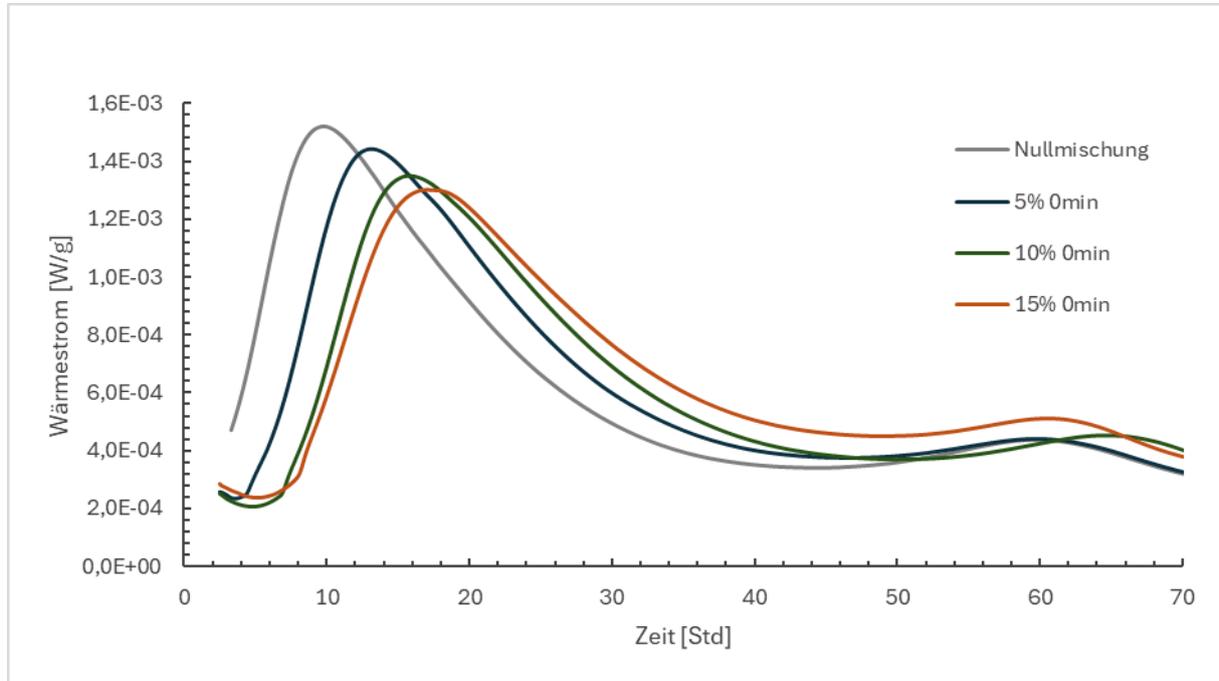


Abbildung 11: Druckprüfung

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

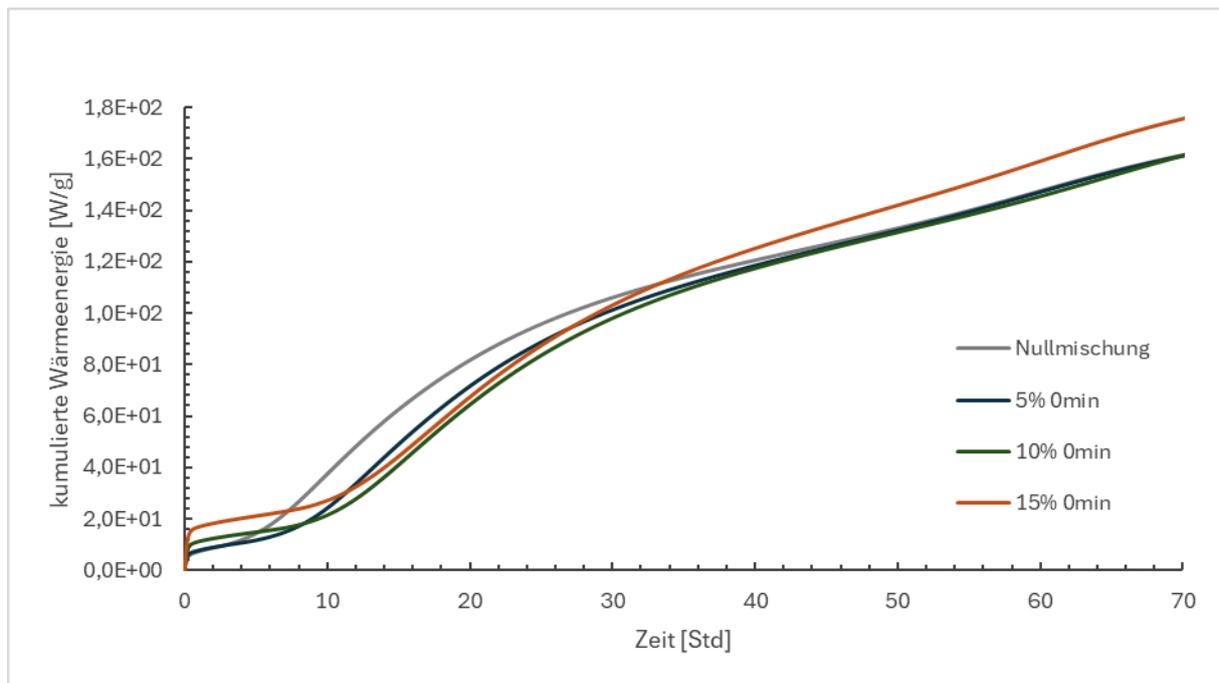
## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Ergebnisse des Kalorimeterversuchs



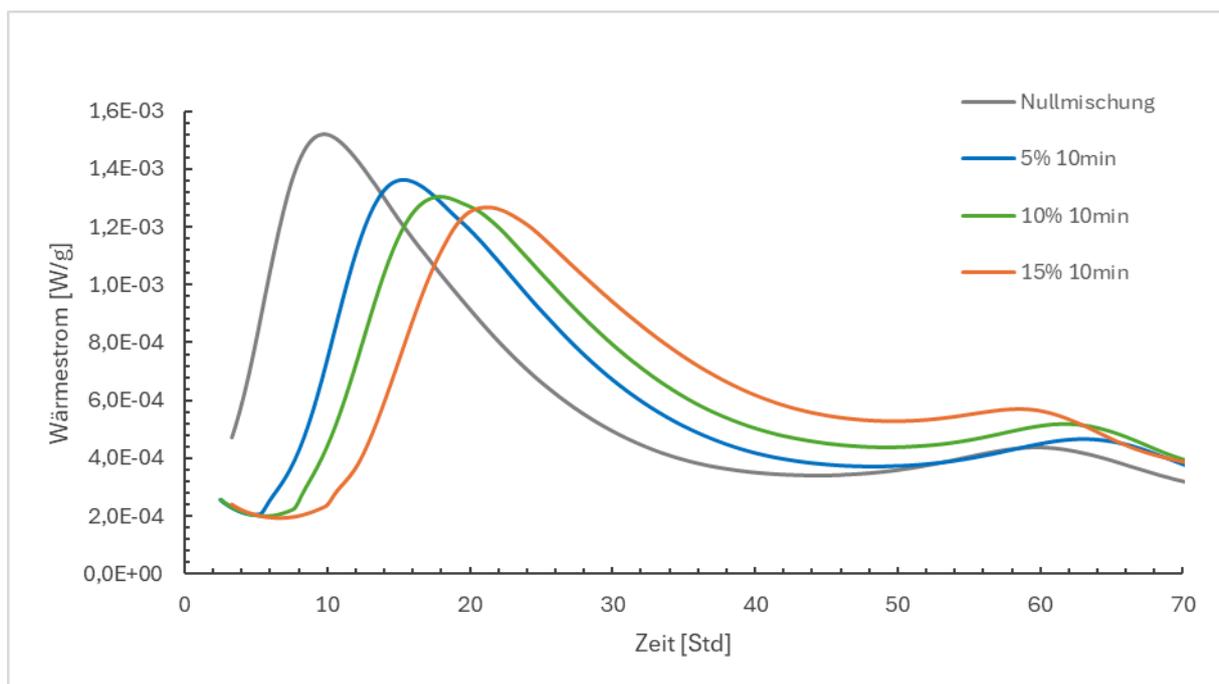
**Abbildung 12:** Wärmestrom für Mischungen mit Omin Vorsättigung [W/g<sub>cement</sub>]

Es lässt sich eindeutig feststellen, dass die Zugabe von Pflanzenkohle die Hydratationsreaktion des Zements verzögert. Der Verlauf der Reaktion wird mit zunehmendem Anteil an Pflanzenkohle in der Mischung langsamer. Diese Verzögerung ist auf die poröse Struktur der Pflanzenkohle zurückzuführen, welche die Fähigkeit besitzt, Wasser zu binden. Diese Wasseraufnahme könnte die Hydratation des Zements behindern und somit die Reaktionsgeschwindigkeit verringern. Da alle vier gemessenen Kurven einen sehr ähnlichen generellen Verlauf aufweisen, kann angenommen werden, dass der Hydratationsprozess sowohl im reinen Zement als auch in den mit Pflanzenkohle angereicherten Mischungen grundsätzlich ähnlich abläuft.



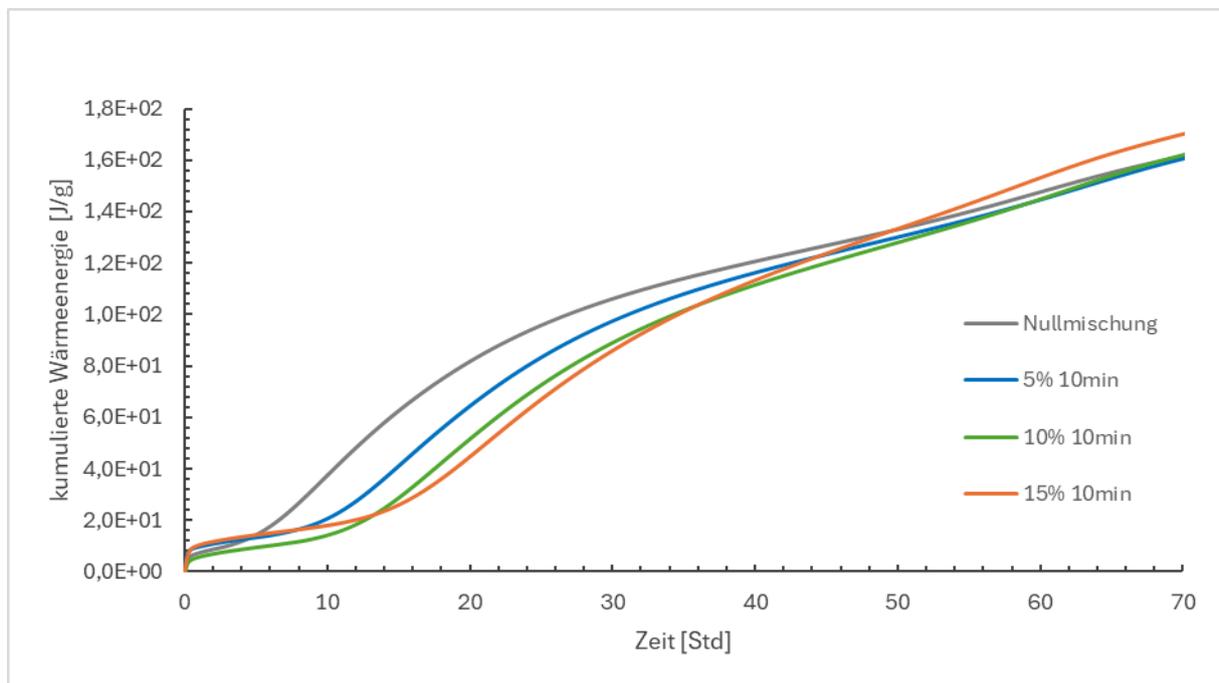
**Abbildung 13:** Kumulierte Wärmeenergie für Mischungen mit 0min Vorsättigung [ $\text{J}/\text{g}_{\text{cement}}$ ]

Die während der Hydratation freigesetzte Wärme im Zement entspricht nahezu der Menge, die von den Mischungen mit Pflanzkohle über den gesamten Zeitraum hinweg abgegeben wird. Dieser Umstand deutet darauf hin, dass die Hydratationsreaktion sowohl im reinen Zement als auch in den Zementmischungen mit Pflanzkohle in ihrer grundlegenden Dynamik weitgehend vergleichbar verläuft. Am meisten Energie über den gesamten Prozess wird von der Mischung mit 15% Pflanzkohle abgegeben.



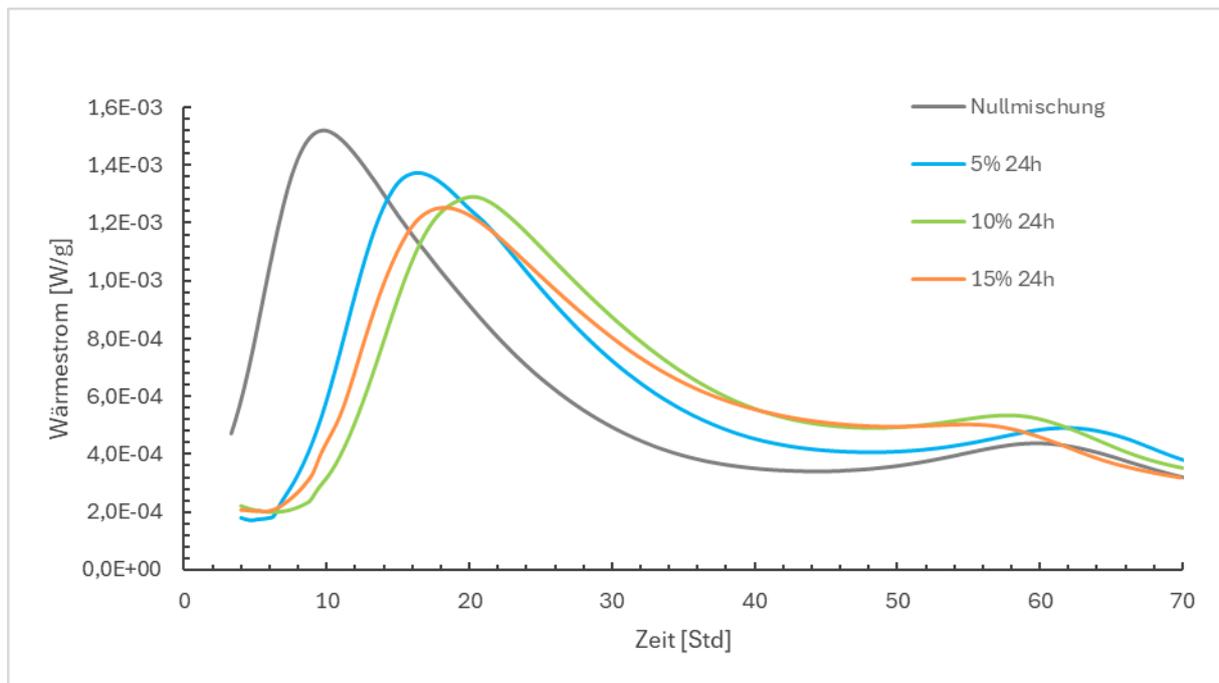
**Abbildung 14:** Wärmefluss für Mischungen mit 10min Vorsättigung [ $\text{W}/\text{g}_{\text{cement}}$ ]

Im zweiten Diagramm wird der gleiche Versuch dargestellt, jedoch mit 10 Minuten vorgesättigter Pflanzkohle. Die Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf wie im ersten Diagramm, wobei die Hydratationsreaktion auch hier mit zunehmendem Anteil an Pflanzkohle verlangsamt wird. Allerdings ist in diesem Fall die Verzögerung noch ausgeprägter. Diese zusätzliche Verzögerung lässt sich durch die Vorsättigung der Pflanzkohle erklären, da sie nun weniger Wasser aufnimmt und somit weniger Einfluss auf die Hydratation des Zements hat. Dennoch bleibt die poröse Struktur der Pflanzkohle der Hauptfaktor, der die Reaktionsgeschwindigkeit weiter reduziert. Insgesamt zeigt sich, dass auch bei vorgesättigter Pflanzkohle die Hydratationsreaktion langsamer verläuft, jedoch nicht in dem Maße wie bei der ungesättigten Variante.



**Abbildung 15:** Kumulierte Wärmeenergie für Mischungen mit 10min Vorsättigung [J/g<sub>cement</sub>]

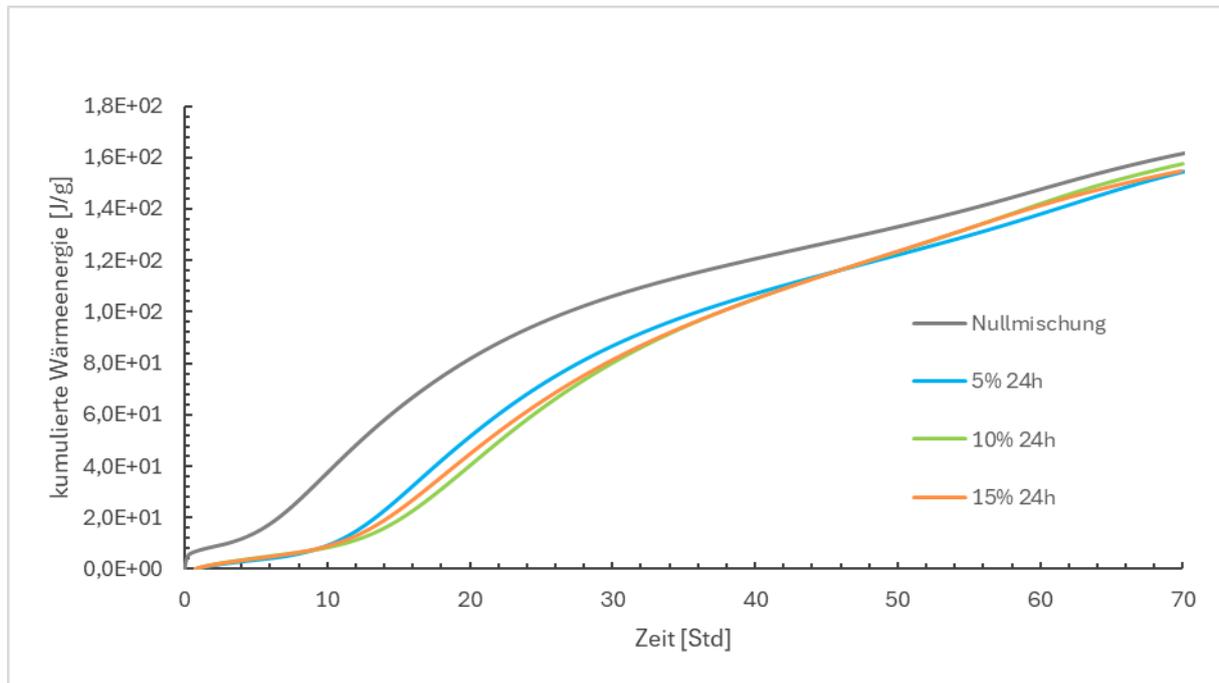
Zu Beginn ist die abgegebene Wärme bei allen drei Mischungen mit Pflanzkohle geringer als bei der reinen Zementmischung. Diese geringere Anfangsfreisetzung kann auf die Vorsättigung der Pflanzkohle zurückgeführt werden, die nun weniger Wasser bindet und somit die Hydratation des Zements anfänglich weniger stark beeinflusst. Im Verlauf des Prozesses jedoch zeigt die 15% Mischung eine höhere Wärmeabgabe als die reine Zementmischung, was darauf hinweist, dass die Hydratation hier intensiver abläuft, sobald der anfängliche Effekt der Vorsättigung überwunden ist. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Zementmischung mit 15% Pflanzkohle zu einem späteren Zeitpunkt eine stärkere Reaktionsintensität entwickelt, was zu einer höheren Wärmeabgabe führt.



**Abbildung 16:** Wärmefluss für Mischungen mit 24 Stunden Vorsättigung [W/g<sub>cement</sub>]

Im dritten Diagramm wird der Versuch mit 24 Stunden vorgesättigter Pflanzkohle dargestellt. Wie bereits in den vorherigen Diagrammen ist die Hydratationsreaktion auch hier verlangsamt, wobei die Verzögerung im Vergleich zu den anderen Versuchen noch ausgeprägter ist. Ein bedeutender Unterschied im Verlauf der Kurven zeigt sich jedoch bei der Mischung mit 15% Pflanzkohle: Diese erreicht einen früheren Peak im Wärmestrom als die 10% Mischung. Interessanterweise ist jedoch der Peak der Intensität des Wärmestroms bei der 10% Mischung höher als bei der 15% Mischung. Dies deutet darauf hin, dass bei der 10% Mischung eine stärkere Reaktionsintensität zu einem späteren Zeitpunkt auftritt, während die Mischung mit 15% Pflanzkohle die Reaktion schneller einleitet, jedoch insgesamt weniger intensive Wärme freisetzt. Dieser Unterschied könnte auf die unterschiedlichen Wechselwirkungen zwischen der Pflanzkohle und dem Wasser in den jeweiligen Mischungen zurückzuführen sein.

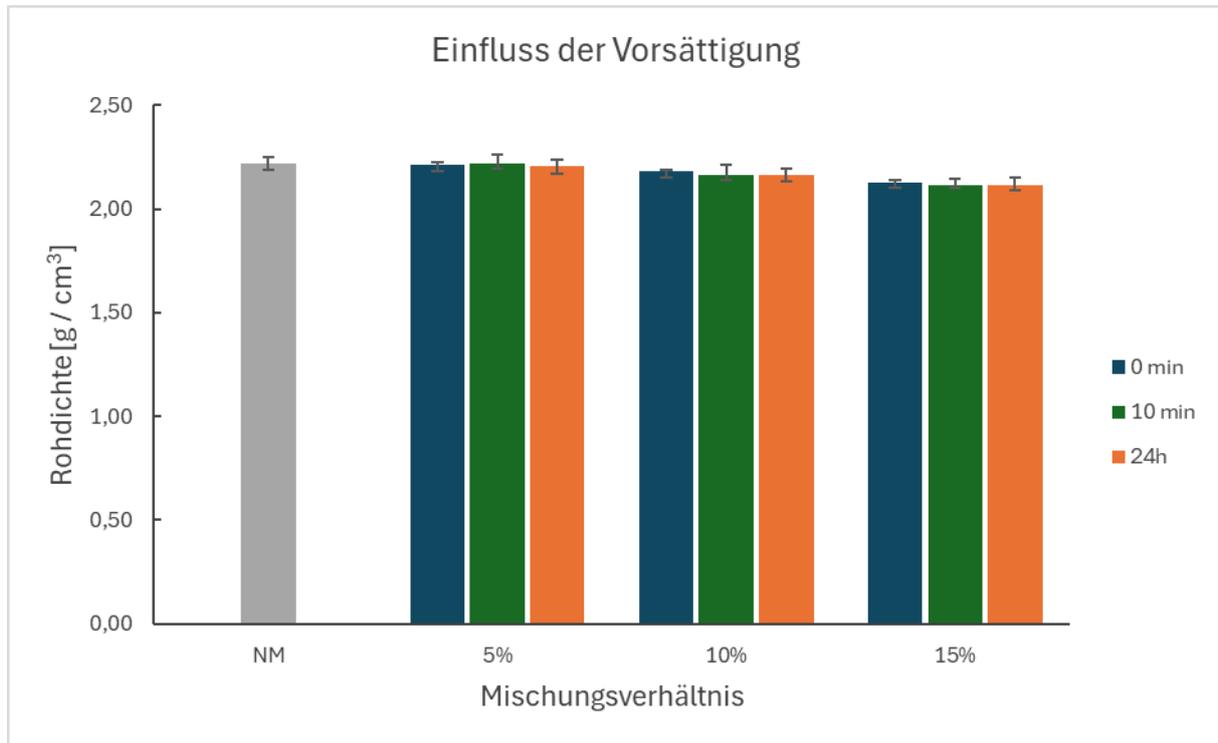
In Anhang C können weitere Ergebnisse für den Wärmefluss, sowie die kumulierte Wärmeenergie eingesehen werden.



**Abbildung 17:** Kumulierte Wärmeenergie für Mischungen mit 24 Stunden Vorsättigung [J/g<sub>cement</sub>]

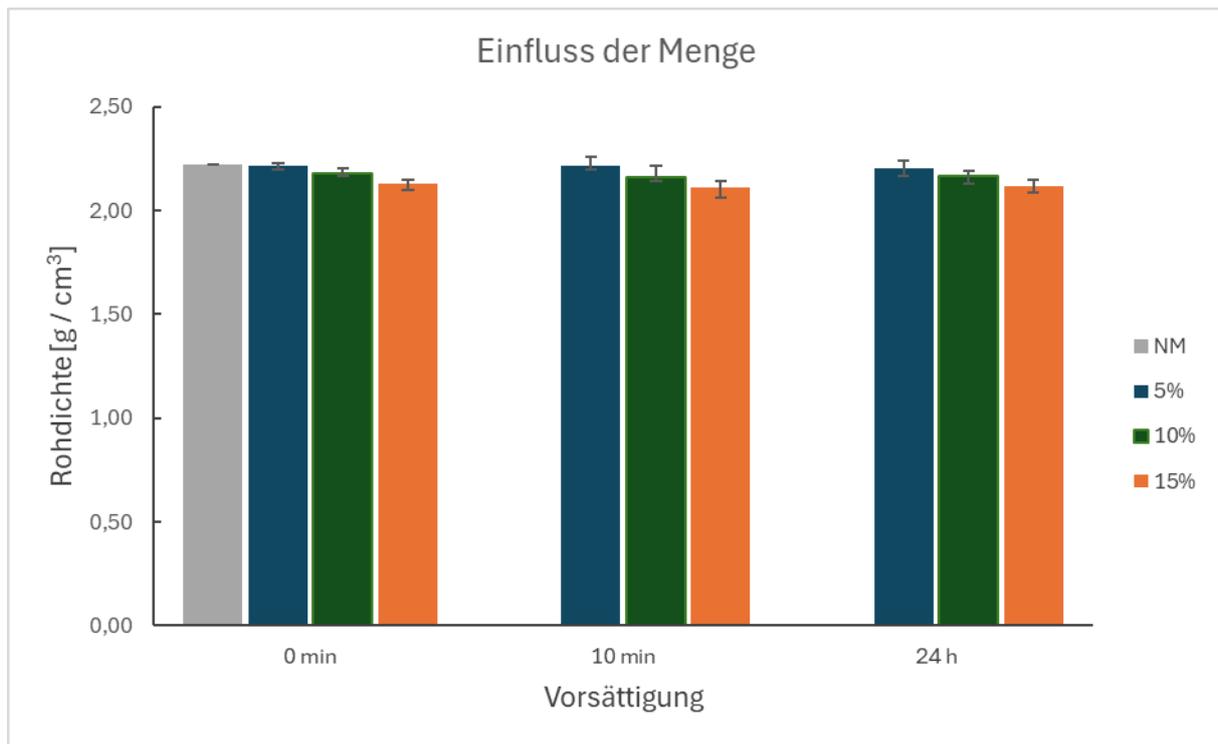
Die abgegebene Wärme über den gesamten Zeitraum hinweg fällt bei allen drei Mischungen mit Pflanzenkohle deutlich geringer aus als bei der reinen Zementmischung. Diese geringere Wärmeabgabe lässt darauf schließen, dass die Hydratationsreaktion durch die längere Vorsättigungsdauer weiter verzögert wird, da die Pflanzenkohle nun weniger Wasser aufnehmen kann und somit weniger Einfluss auf die Zementhydratation ausübt. Die Wärmeabgabe der 5% Mischung ist im Vergleich zu der 10% und 15% Mischung etwas geringer, jedoch nicht in einem so deutlichen Maß, dass sie signifikant von den anderen Mischungen abweicht.

## 4.2 Rohdichte



**Abbildung 18:** Einfluss der Vorsättigung auf die Rohdichte

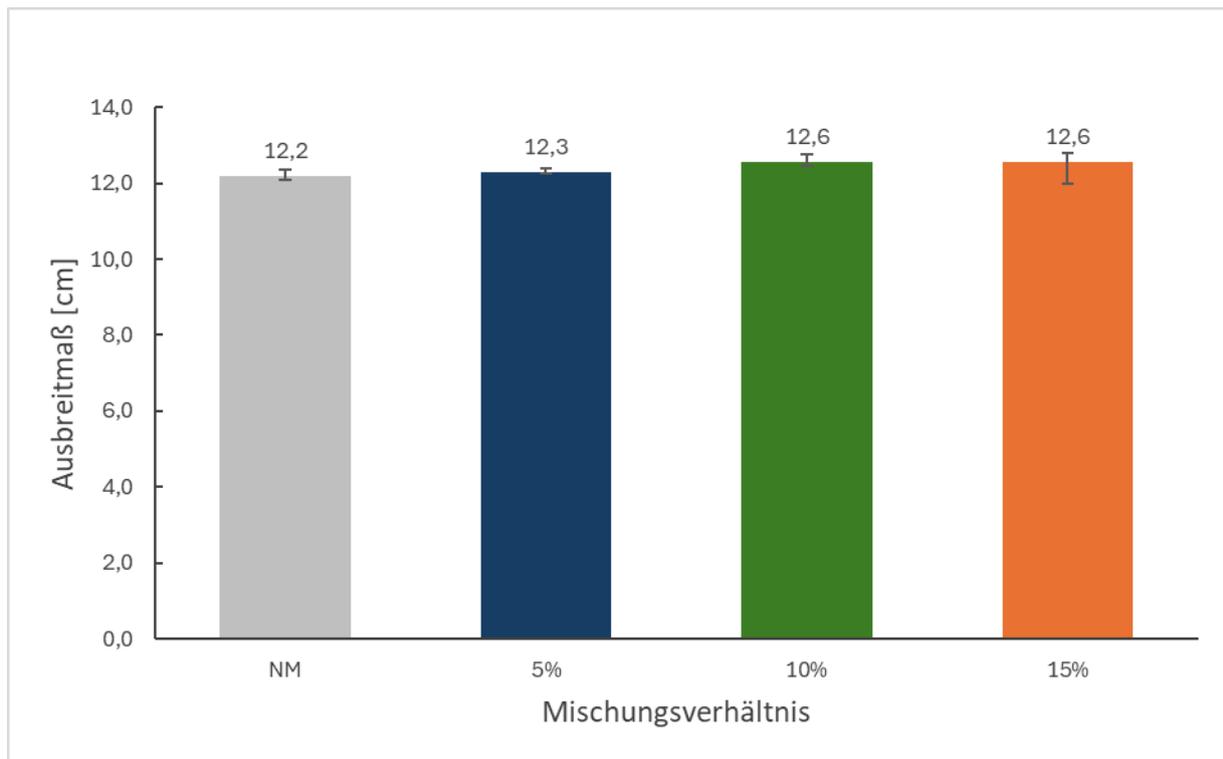
Die Rohdichte wurde für Zementproben gemessen, denen Pflanzenkohle in unterschiedlichen Vorsättigungszuständen beigemischt wurde. Die Pflanzenkohle wurde dabei in drei Varianten behandelt: ohne Vorsättigung (0 Minuten), mit 10 Minuten und mit 24 Stunden Vorsättigung. Die Auswirkung der Vorsättigungsdauer auf die Rohdichte ist sehr gering. Die prozentuelle Veränderung liegt bei 1%.



**Abbildung 19:** Einfluss der Menge an Pflanzenkohle auf die Rohdichte

Es ist ersichtlich, dass die Zugabe von Pflanzenkohle zu den Zementproben eine Verringerung der Rohdichte zur Folge hat. Dies lässt sich durch die physikalischen Eigenschaften der Pflanzenkohle erklären: Pflanzenkohle besitzt eine geringere Dichte als Sand und zeichnet sich durch eine hohe Porosität aus. Diese Eigenschaften führen dazu, dass bei der prozentualen Ersetzung des Sandanteils durch Pflanzenkohle das Volumen der Mischung vergrößert wird, ohne dass die Masse im gleichen Maße zunimmt. Infolgedessen sinkt die Gesamtmasse pro Volumeneinheit, was zu einer niedrigeren Rohdichte führt. Die Verringerung der Rohdichte durch die Zugabe von Pflanzenkohle liegt in den durchgeführten Experimenten im Bereich von 3 % bis 5 %.

### 4.3 Ausbreitmaß



**Abbildung 20:** Ausbreitmaß der Mischungen im Durchschnitt

Das Ausbreitmaß einer Mischung aus Zement mit Pflanzenkohle nimmt mit steigendem Pflanzenkohleanteil zu. Dies lässt sich durch die Eigenschaften der Pflanzenkohle erklären: Sie hat eine geringe Dichte und eine hohe spezifische Oberfläche. Dies führt dazu, dass bei höheren Anteilen die Mischung insgesamt leichter und weniger kompakt wird, was das Fließverhalten verbessert, und das Ausbreitmaß erhöht.

### 4.4 Biegezugfestigkeit

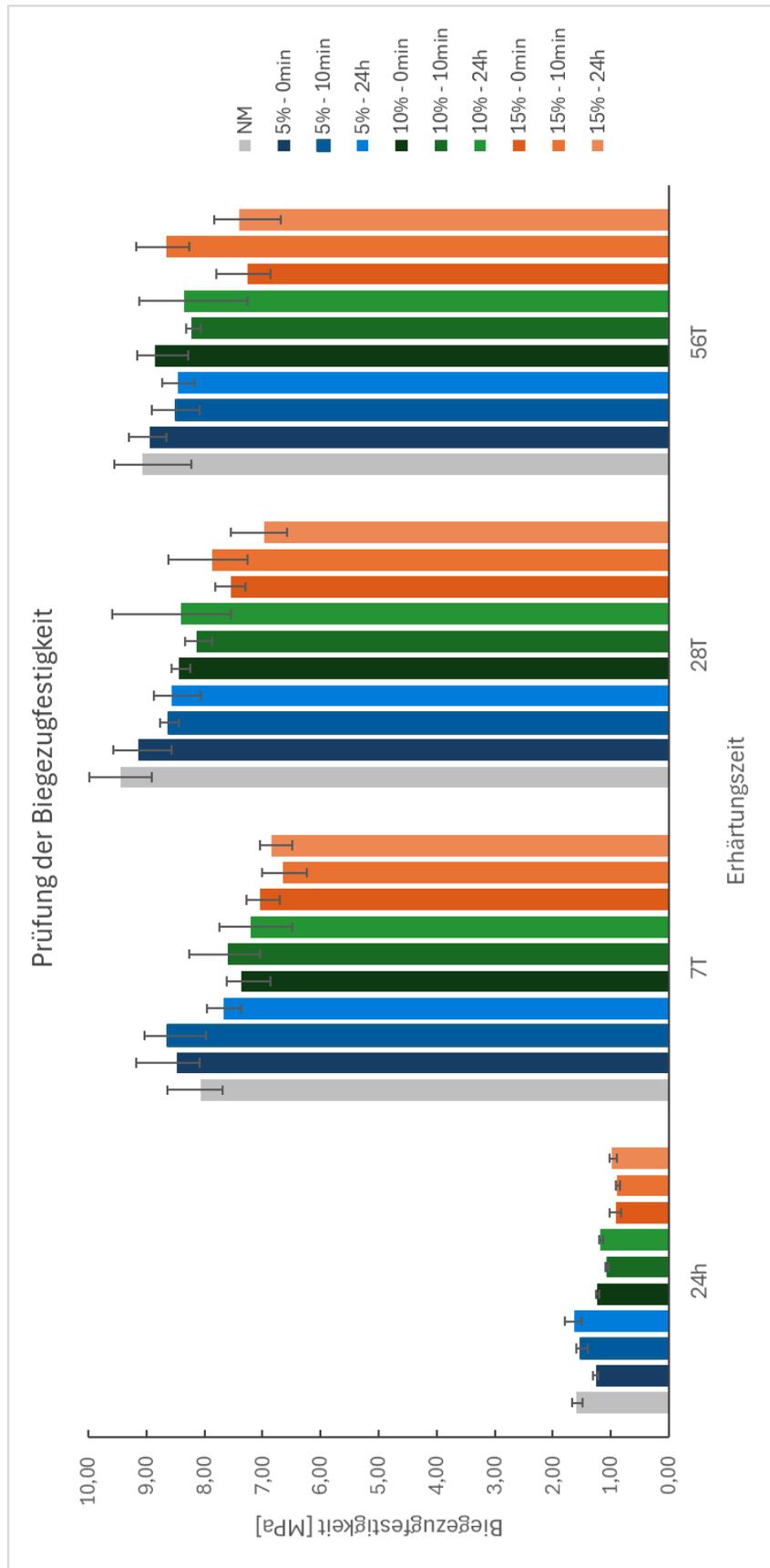
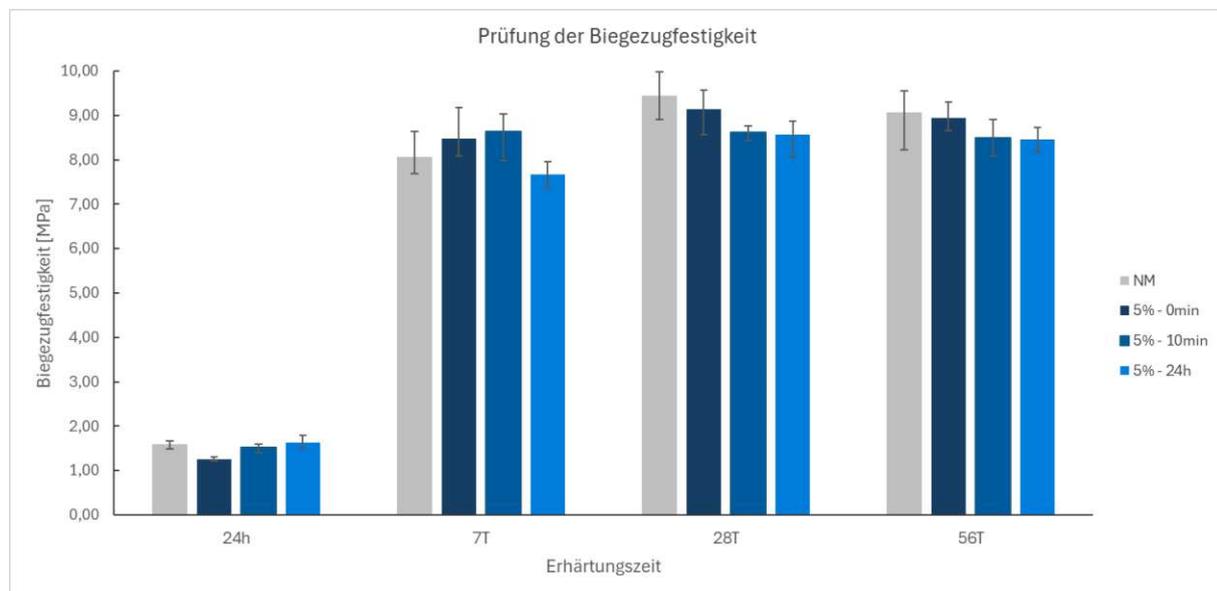


Abbildung 21: Überblick der Ergebnisse zur Biegezugfestigkeit

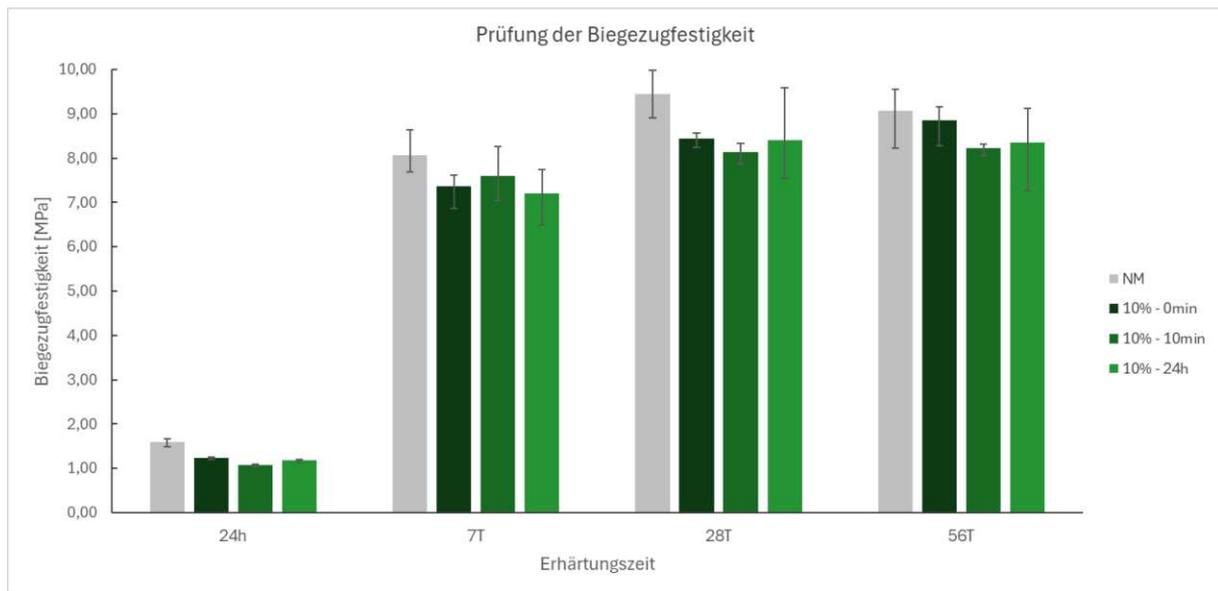
Die Zugabe von Pflanzenkohle hat insgesamt einen negativen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit des Zements, insbesondere bei höheren Anteilen von 10 % und 15 %, bei denen die Festigkeit im Vergleich zur Nullmischung deutlich verringert ist. Eine kurze Vorsättigungszeit von 10 Minuten zeigte bei der 15 %-Pflanzenkohle-Mischung ebenfalls einen positiven Effekt, während längere Vorsättigungszeiten die Festigkeit negativ beeinflussten. Insgesamt lässt sich der Trend ableiten, dass die Biegezugfestigkeit des Zements durch eine vorsichtige Auswahl der Vorsättigungszeit und des Pflanzenkohleanteils optimiert werden kann. Höhere Pflanzenkohleanteile (10 % und 15 %) führen tendenziell zu einer verringerten Festigkeit, während kürzere Vorsättigungszeiten insbesondere bei geringen Pflanzenkohleanteilen positive Auswirkungen haben können.

Es folgt eine genauere Gegenüberstellung der Ergebnisse.



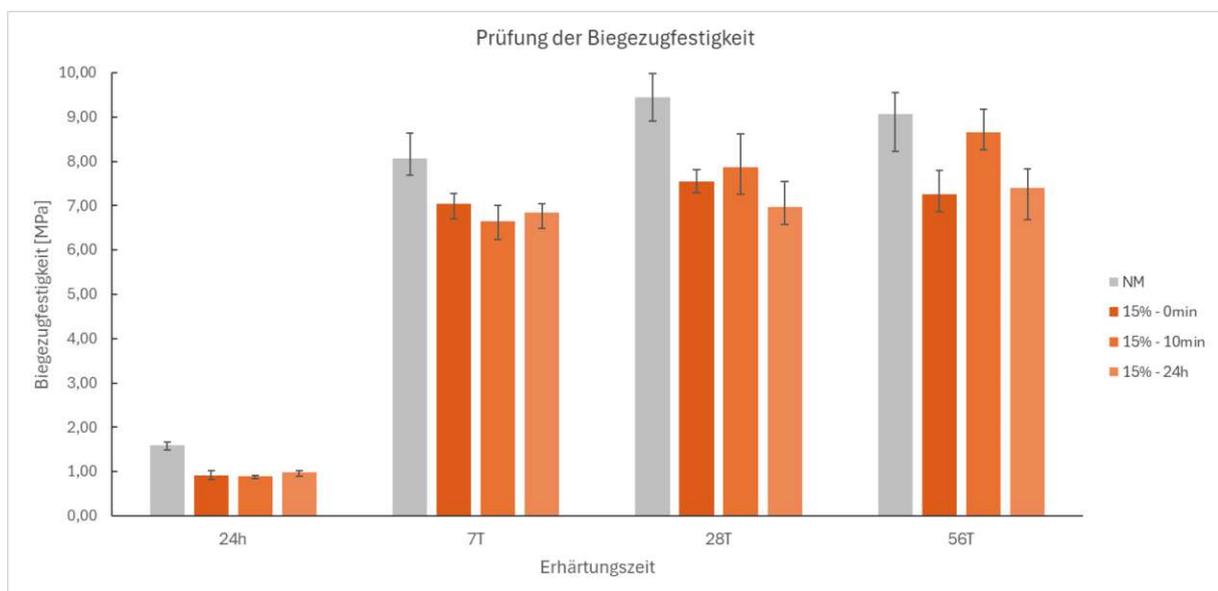
**Abbildung 22:** Einfluss der Vorsättigung auf die 5%-Mischung

Es ist ersichtlich, dass längere Vorsättigungszeiten die Biegezugfestigkeit der 5%-Mischung verringern. Dieser Trend lässt sich nach 7 Tagen, 28 Tagen sowie 56 Tagen gleichermaßen beobachten. Nach 24 Stunden zeigt sich jedoch ein umgekehrtes Bild: In diesem Fall wirkt sich die Vorsättigung positiv auf die Festigkeit aus.



**Abbildung 23:** Einfluss der Vorsättigung auf die 10%-Mischung

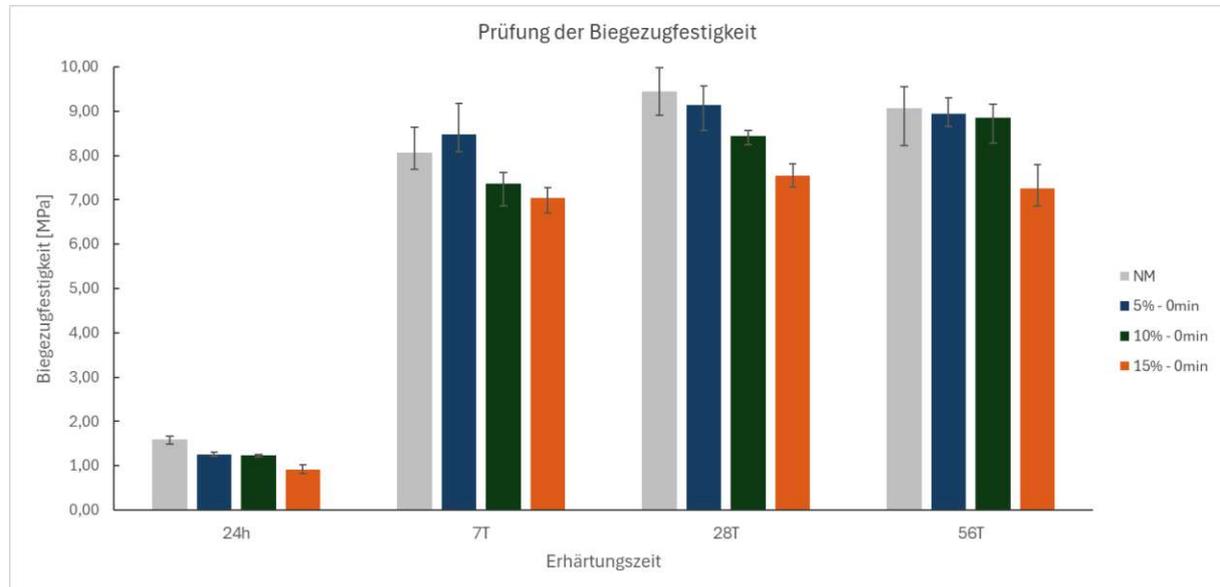
Bei den Mischungen mit 10 % Pflanzenkohleanteil konnte kein eindeutiger Trend in Bezug auf die unterschiedlichen Vorsättigungszeiten festgestellt werden. Die Testergebnisse wiesen erhebliche Schwankungen auf, die eine klare Zuordnung zu den jeweiligen Vorsättigungsdauern erschwerten. Besonders auffällig war, dass die Probe ohne Vorsättigung nach 56 Tagen die beste Biegezugfestigkeit erzielte, welche nahezu dem Wert der Nullmischung entsprach.



**Abbildung 24:** Einfluss der Vorsättigung auf die 15%-Mischung

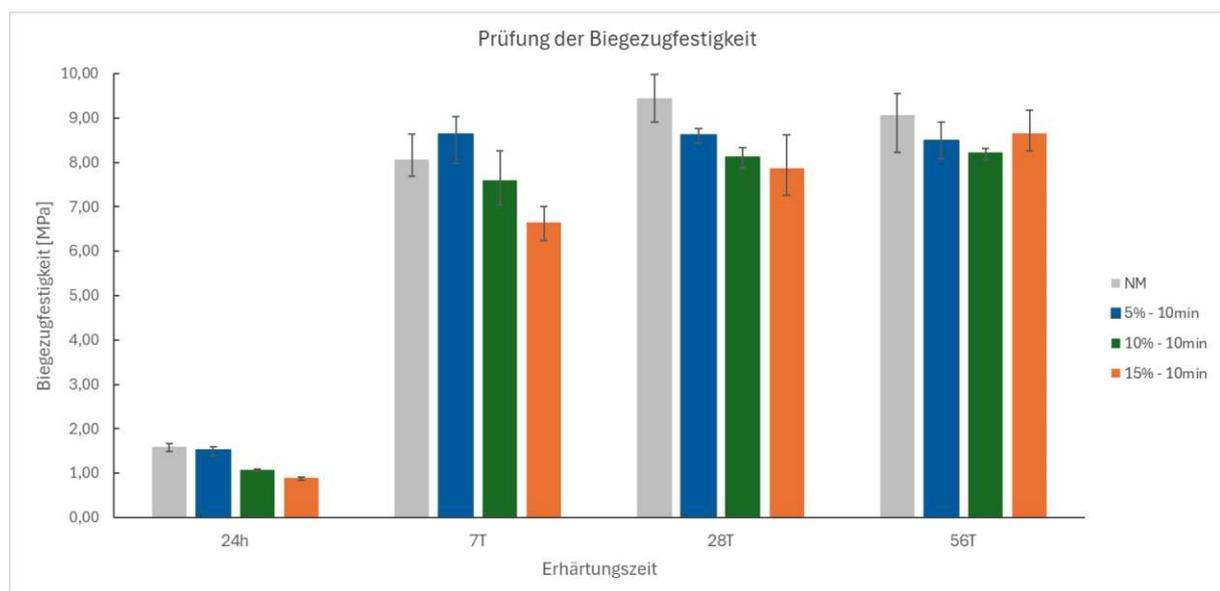
Die Mischungen mit 15 % Pflanzenkohleanteil zeigten ein ähnliches Verhalten wie die 10 %-Mischungen, jedoch war hier die 10-minütige Vorsättigung besonders überzeugend. Sowohl nach 28 als auch nach 56 Tagen konnte die Probe mit 10-minütiger Vorsättigung die

besten Ergebnisse erzielen und wie eine vergleichbare Biegezugfestigkeit auf wie die Nullmischung. Dies deutet darauf hin, dass eine kurze Vorsättigungszeit von 10 Minuten unter bestimmten Bedingungen eine günstige Wirkung auf die Festigkeitseigenschaften haben kann, ohne die negativen Effekte der längeren Vorsättigungszeiten zu verstärken.



**Abbildung 25:** Einfluss der Menge bei 0min Vorsättigung

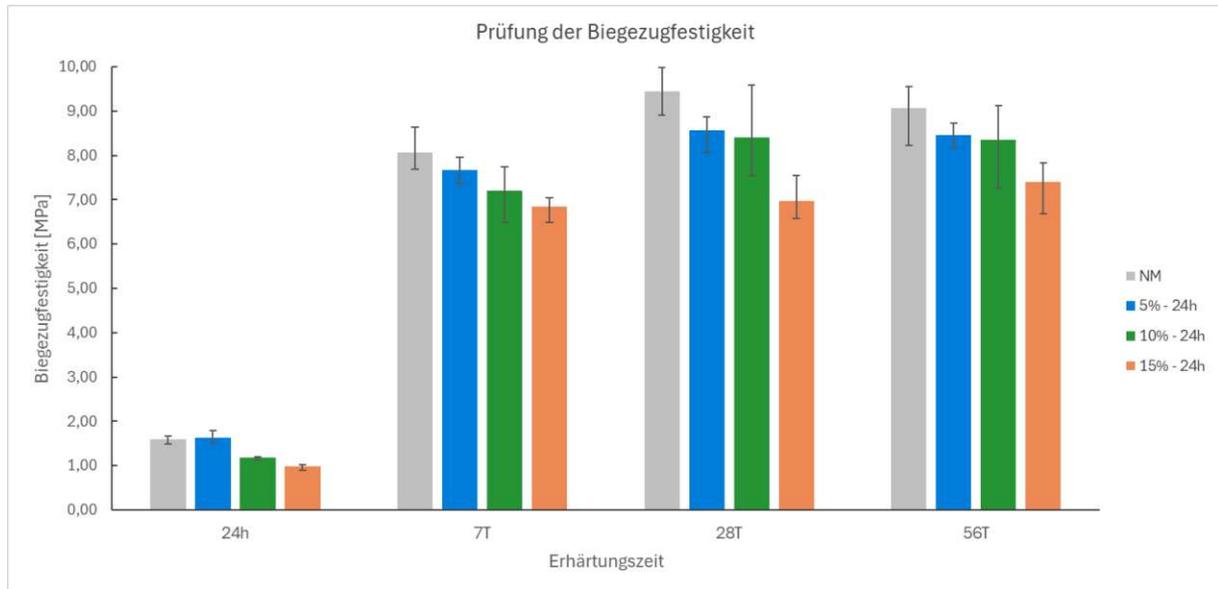
Bei den nicht vorgesättigten Mischungen führte ein höherer Pflanzenkohleanteil zu einer Verringerung der erreichten Biegezugfestigkeit. Dieses Ergebnis war nach 24 Stunden, 7 Tagen, 28 Tagen sowie 56 Tagen deutlich zu beobachten.



**Abbildung 26:** Einfluss der Menge bei 10min Vorsättigung

Die Ergebnisse zeigen einen ähnlichen Trend wie bei der 0-minütigen Vorsättigung. Die Festigkeit der Referenzmischung wurde nach 24 Stunden, 28 Tagen und auch nach 56 Tagen

nicht erreicht. Dies deutet darauf hin, dass die Zugabe von Pflanzenkohle – selbst in geringen Anteilen – zu einer Verzögerung in der Festigkeitsentwicklung führt. Im Gegensatz zu den Mischungen ohne Vorsättigung zeigte die Mischung mit 15 % Pflanzenkohleanteil bei den Versuchen mit Vorsättigung nach 56 Tagen ebenfalls überzeugende Ergebnisse. Die Festigkeit war nahezu identisch mit der der 5 %-Pflanzenkohle-Mischung.



**Abbildung 27:** Einfluss der Menge bei 24h Vorsättigung

Nach 24 Stunden Vorsättigung verringert sich die Biegezugfestigkeit im Vergleich zur Normmischung sowohl nach 7, 28 als auch 56 Tagen. Die höchste Festigkeit wurde bei einem Ersatz von 5 % des Sandanteils durch Pflanzenkohle erzielt. Dennoch bleibt diese etwa 6 % - 8 % unter der Biegezugfestigkeit der Normmischung.

## 4.5 Druckfestigkeit

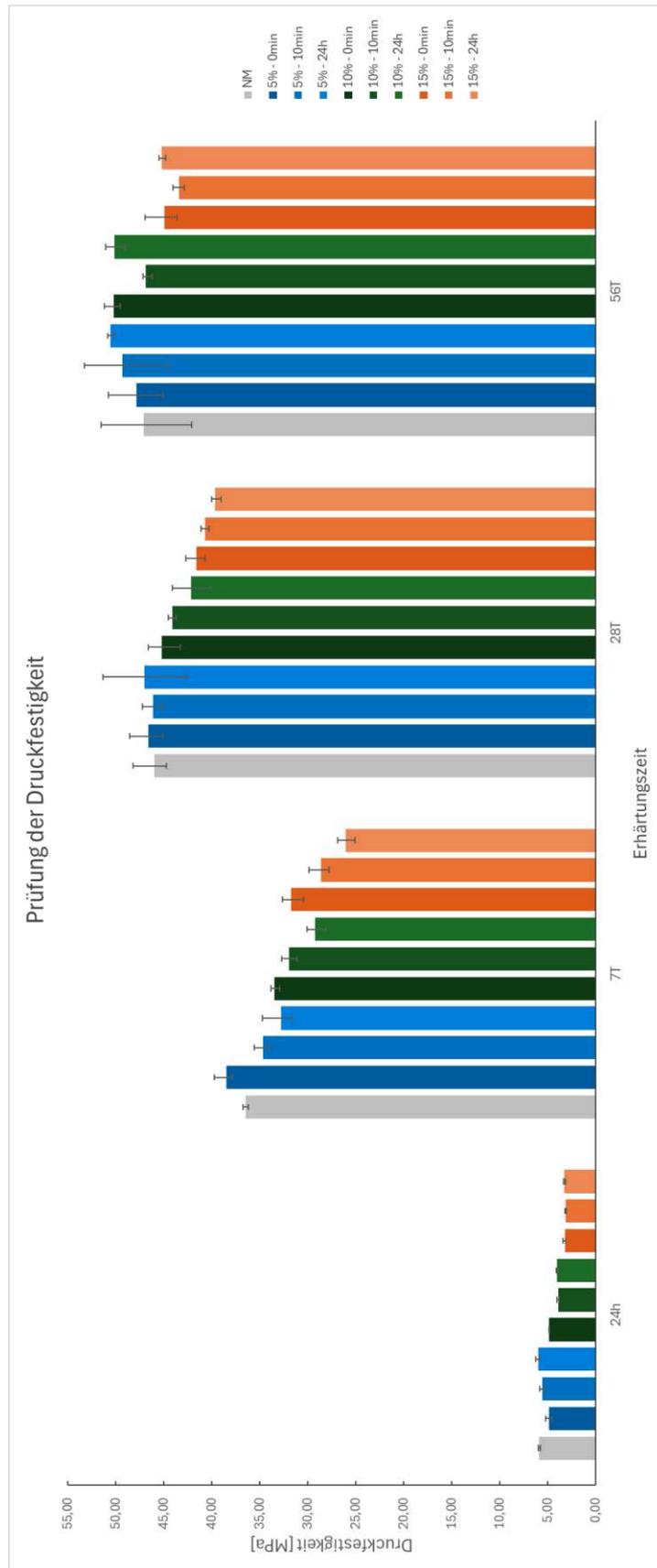
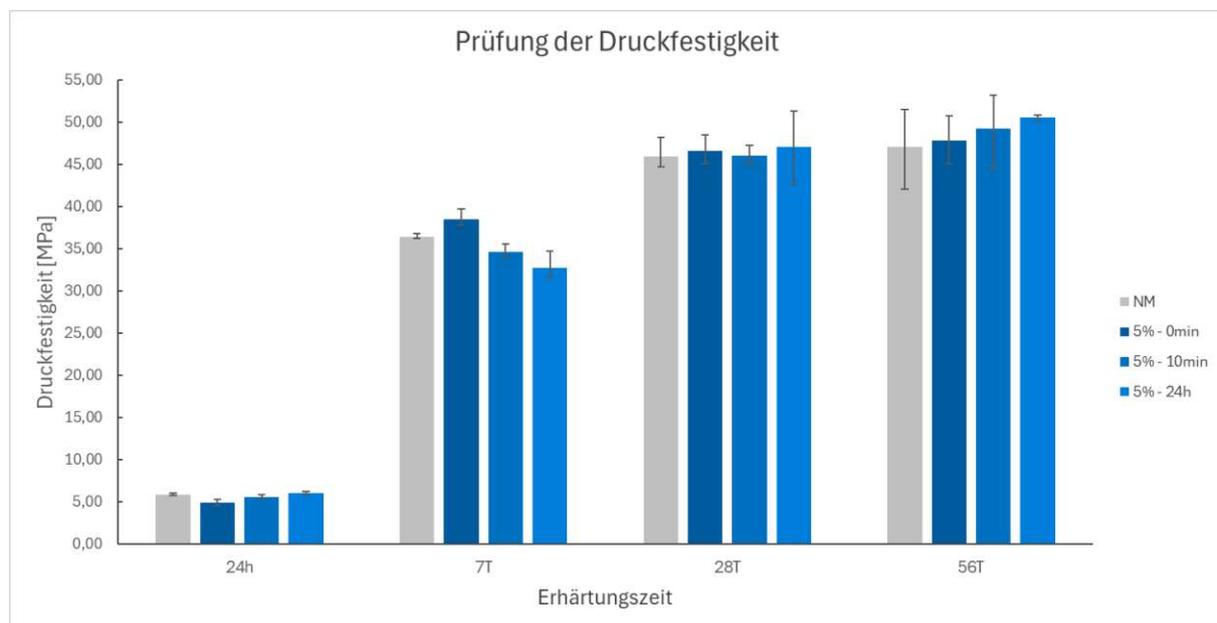


Abbildung 28: Überblick der Ergebnisse zur Druckfestigkeit

Die Ergebnisse folgen einem klaren Trend: Längere Vorsättigungszeiten führen zu einer geringeren Druckfestigkeit. Bei einer Pflanzenkohlezugabe von 5 % wurden nach 7, 28 und 56 Tagen höhere Druckfestigkeiten erreicht als bei der Normmischung. Mischungen mit 10 % bzw. 15 % Ersatz überschritten nach 28 Tagen leicht und nach 56 Tagen deutlich die Druckfestigkeit der Normmischung. Die höchste Festigkeit von 50,60 MPa wurde nach 56 Tagen erreicht, bei einem Ersatz von 15 % Sand durch Pflanzenkohle und ohne Vorsättigungszeit. Ein möglicher Grund für diese Ergebnisse könnte sein, dass die Pflanzenkohle ohne Vorsättigung besser mit den Zementbestandteilen reagiert. In diesem Fall könnte die Pflanzenkohle die Bildung von Festigkeitsbringenden Hydratationsprodukten fördern, was die Druckfestigkeit steigert. Bei einer längeren Vorsättigungszeit könnte die Reaktivität der Pflanzenkohle hingegen eingeschränkt werden, wodurch ihre Fähigkeit, die Zementhydratation zu unterstützen, verringert wird. Zusätzlich könnte die poröse Struktur der Pflanzenkohle in Mischungen ohne Vorsättigung die Mikrostruktur des Zements positiv beeinflussen, indem sie die Mischung verdichtet und die Porosität reduziert. In den Mischungen mit längeren Vorsättigungszeiten könnte diese positive Wirkung jedoch durch eine weniger effiziente Interaktion zwischen Pflanzenkohle und Zement vermindert werden, was die Festigkeit negativ beeinflusst.

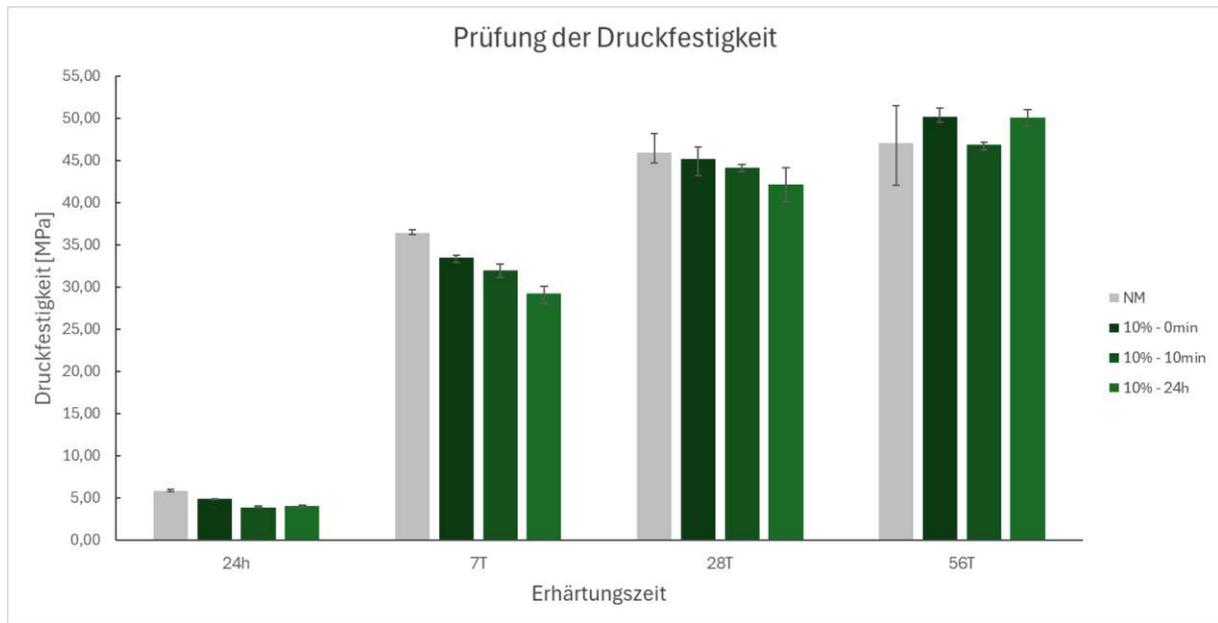
Es folgt eine genauere Gegenüberstellung der Ergebnisse.



**Abbildung 29:** Einfluss der Vorsättigung auf die 5%-Mischung

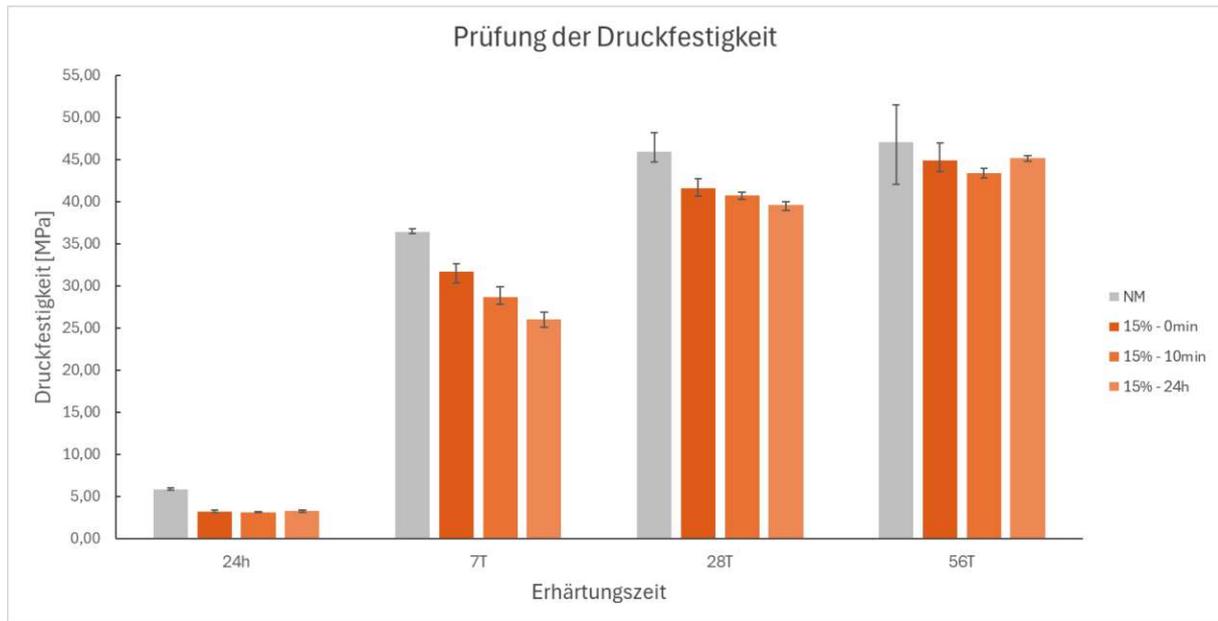
Der Einfluss der Vorsättigung auf die 5%-Mischung zeigt zunächst nach 7 Tagen eine negative Auswirkung auf die Druckfestigkeit. Allerdings verbessert sich diese im Verlauf der Zeit, sodass nach 28 und 56 Tagen eine höhere Druckfestigkeit im Vergleich zur Normmischung erreicht

wird. Interessanterweise zeigt sich, dass eine längere Vorsättigungszeit zu besseren Ergebnissen führt.



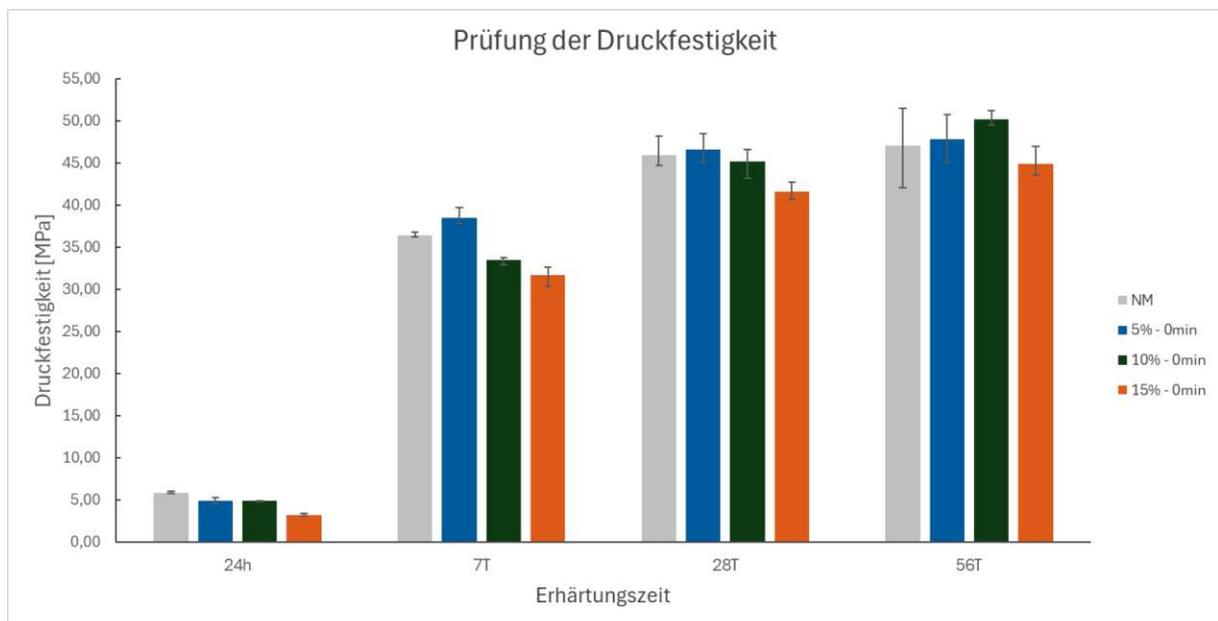
**Abbildung 30:** Einfluss der Vorsättigung auf die 10%-Mischung

Die Ergebnisse nach 24 Stunden, 7 Tagen sowie 28 Tagen zeigen eindeutig, dass längere Vorsättigungszeiten zu einer Verringerung der Druckfestigkeit führen. In diesen Zeiträumen konnte die Druckfestigkeit der Normmischung nicht erreicht werden. Nach 56 Tagen jedoch zeigt sich ein abweichendes Ergebnis: Die Mischung, die 24 Stunden vorgesättigt wurde, erreichte eine Druckfestigkeit, die nahezu jener der nicht vorgesättigten Mischung entsprach. Die Mischung, die 10 Minuten vorgesättigt wurde, hatte eine geringere Festigkeit als die beiden anderen Mischungen.



**Abbildung 31:** Einfluss der Vorsättigung auf die 15%-Mischung

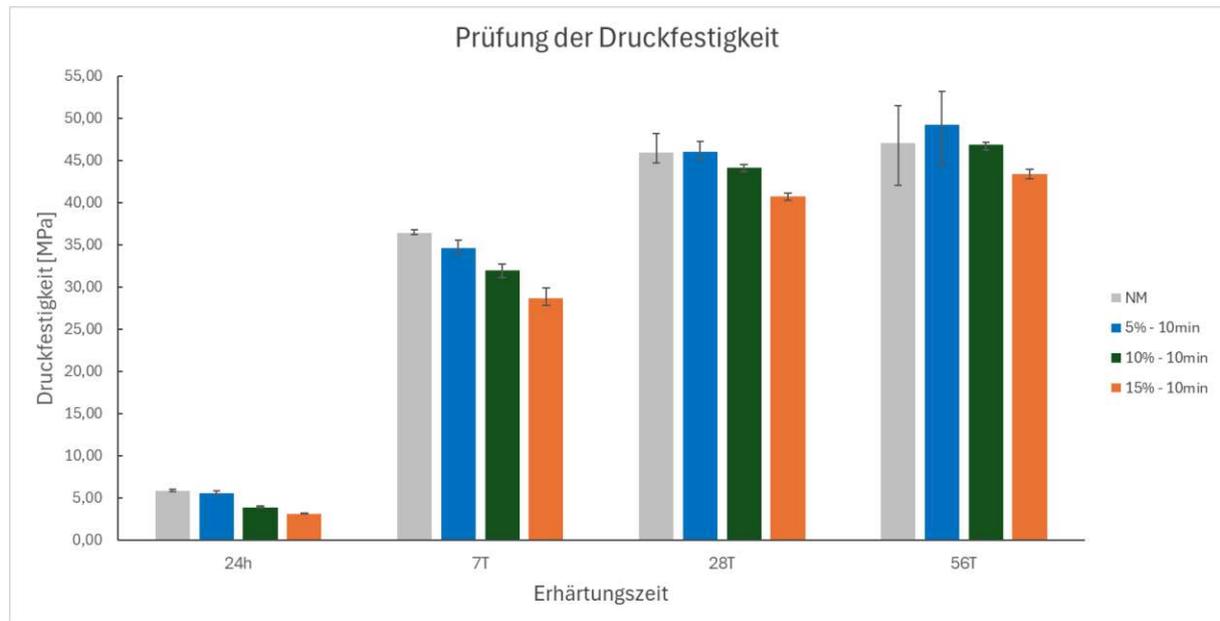
Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorsättigungsdauer nach 7 sowie 28 Tagen einen negativen Einfluss auf die Druckfestigkeit hat. Nach 24 Stunden sind keine signifikanten Unterschiede in der Festigkeit festzustellen. Es ist hervorzuheben, dass keine der 15% Mischungen die Druckfestigkeit der Normmischung erreichen konnte.



**Abbildung 32:** Einfluss der Menge bei 0min Vorsättigung

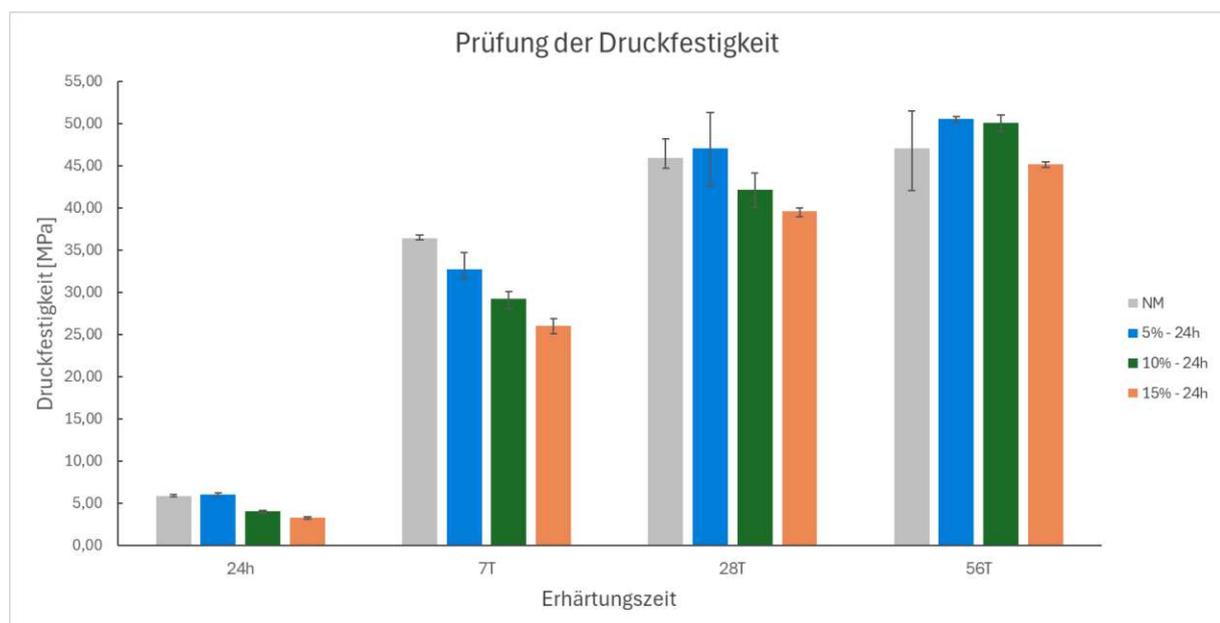
Nach 24 Stunden, 7 Tagen sowie 28 Tagen lässt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Pflanzenkohlegehalt und der Druckfestigkeit feststellen. Das Muster entspricht demjenigen, das nach einer Vorsättigungszeit von 10 Minuten und 24 Stunden beobachtet wurde, wobei ein höherer Anteil an Pflanzenkohle zu einer verringerten Druckfestigkeit führt.

Einzig nach 56 Tagen tritt ein Ausreißer auf, da die Probe mit 10 % Pflanzenkohle eine höhere Druckfestigkeit als die Probe mit 5% aufweist.



**Abbildung 33:** Einfluss der Menge bei 10min Vorsättigung

Es lässt sich ein klarer Zusammenhang zwischen der Menge an zugesetzter Pflanzenkohle und der Druckfestigkeit der Proben erkennen: Je höher der Anteil an Pflanzenkohle, desto geringer fällt die Druckfestigkeit aus. Die besten Ergebnisse wurden mit einer Zugabe von 5 % Pflanzenkohle erzielt. Nach 56 Tagen übertrifft sowohl die Probe mit 5 % als auch die mit 10 % Pflanzenkohle die Druckfestigkeit der Normmischung.



**Abbildung 34:** Einfluss der Menge bei 24h Vorsättigung

Die 5% Mischung erreicht nach 28 Tagen eine höhere Festigkeit als die Normmischung. Nach 56 Tagen weisen sowohl 5% als auch 10% Mischung eine gesteigerte Druckfestigkeit auf. Hingegen konnte die Mischung mit 15% Pflanzkohle nach 24 Stunden, 7 Tagen, 28 Tagen sowie 56 Tagen nicht die Druckfestigkeit der Normmischung erreichen.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde der Einfluss von Pflanzenkohle auf die Frisch- und Festigkeitseigenschaften von Zement untersucht, um die Herstellung eines CO<sub>2</sub>-armen (oder sogar negativen) Betons zu ermöglichen. Dabei wurde der Zement mit 5 %, 10 % und 15 % Pflanzenkohle ersetzt, wobei die Masse konstant gehalten wurde, indem der Sandanteil entsprechend reduziert wurde. Zudem wurde die Pflanzenkohle unterschiedlichen Vorsättigungszeiten (0 Minuten, 10 Minuten und 24 Stunden) ausgesetzt, um deren Einfluss auf die Eigenschaften des Zements zu überprüfen. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass längere Vorsättigungszeiten einen negativen Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Des Weiteren wurde jedoch ein klarer Trend beobachtet: Je mehr Pflanzenkohle dem Zementgemisch hinzugefügt wurde, desto schlechter fielen die mechanischen Eigenschaften aus, insbesondere die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit.

Ein möglicher Grund für diese negativen Auswirkungen liegt in der Porosität der Pflanzenkohle. Pflanzenkohle ist von Natur aus sehr porös, was zu einer erhöhten Wasseraufnahmefähigkeit führt. Wenn Pflanzenkohle in das Zementgemisch eingebracht wird, könnte sie das verfügbare Wasser binden, das für die Hydratation des Zements notwendig ist. Diese reduzierte Wasserverfügbarkeit könnte die Bildung von Hydratationsprodukten beeinträchtigen, die für die Festigkeitsentwicklung entscheidend sind. Zudem könnte die hohe Porosität der Pflanzenkohle auch die Struktur des Betons negativ beeinflussen, indem sie zusätzliche Poren im Material schafft. Diese Mikroporen könnten die Dichte des Betons verringern und somit zu einer schwächeren mechanischen Festigkeit führen. Insbesondere bei höheren Gehalten von Pflanzenkohle (10 % und 15 %) könnte dieser Effekt verstärkt auftreten, was die beobachteten Verringerungen der Druck- und Biegezugfestigkeit erklärt.

Trotz der negativen Auswirkungen auf die Festigkeit bieten die Ergebnisse dieser Arbeit wichtige Ansätze für zukünftige Forschungen. Eine mögliche Lösung könnte darin bestehen, die Eigenschaften der Pflanzenkohle weiter zu optimieren, etwa durch spezielle Vorbehandlungen oder durch eine Kombination mit anderen Materialien, die ihre Wasseraufnahmefähigkeit verringern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Pflanzenkohle trotz ihrer positiven CO<sub>2</sub>-Bindungsfähigkeit aufgrund ihrer Porosität und Wasseraufnahmefähigkeit die mechanischen Eigenschaften von Zement negativ beeinflussen kann. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die optimale Menge an Pflanzenkohle zu bestimmen und gegebenenfalls Anpassungen in der Verarbeitung oder der Mischung vorzunehmen. Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Materialien und Technologien zur CO<sub>2</sub>-Reduktion

in der Baustoffindustrie wird es in der Zukunft sicherlich möglich sein, eine bessere Balance zwischen Umweltschutz und den erforderlichen Festigkeitseigenschaften zu finden.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Zement- und Betonindustrie. (n.d.). Was ist Zement? Zement- und Betonindustrie. von <https://www.beton.org/betonbau/beton-und-bautechnik/beton-bautechnik/was-ist-zement/>
- [2] Arizona State University. (2023, 17. Oktober). Curbing concrete's carbon emissions: Innovations in cement manufacturing. Arizona State University. von <https://news-asu.edu.translate.goog/20231017-curbing-concretes-carbon-emissions-innovations-cement-manufacturing? x tr sl=en& x tr tl=de& x tr hl=de& x tr pto=rq>
- [3] Oluwafemi Ezekiel Ige, Daramy Vandi Von Kallon, Dawood Desa. (2024, 09. Januar). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. Journal of Concrete Research, Volume 26, 579-597. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>
- [4] Renergon Biogas. (n.d.). Pflanzenkohle – Biokohle Herstellung erklärt. Renergon Biogas. Abgerufen am 20. Oktober 2024, von <https://www.renergon-biogas.com/pflanzenkohle-biokohle-herstellung-erklart/>
- [5] German Biochar Association. (n.d.). Pflanzenkohle als Additiv in Baumaterialien. German Biochar Association. Abgerufen am 20. Oktober 2024, von <https://german-biochar.org/events/pflanzenkohle-als-additiv-in-baumaterialien/>
- [6] Salim Barbhuiya, Bibhuti Bhusan Das, Fragkoulis Kanavaris, Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02859, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859>.
- [7] Osama Zaid, Fahad Alsharari, Mohd Ahmed, Utilization of engineered biochar as a binder in carbon negative cement-based composites: A review, Construction and Building Materials, Volume 417, 2024, 135246, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135246.76>
- [8] Österreichisches Normungsinstitut. (2016). ÖNORM EN 196-1:2016-04: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeitsmerkmale. Österreichisches Normungsinstitut.
- [9] Heidelberg Materials. (2021). \*MA IIB3N-LH-SR-na TM\* [PDF]. [https://www.heidelbergmaterials.de/sites/default/files/2023-02/MA\\_IIB3N-LH-SR-na\\_TM\\_20210812.pdf](https://www.heidelbergmaterials.de/sites/default/files/2023-02/MA_IIB3N-LH-SR-na_TM_20210812.pdf)
- [10] Sonnenerde. (n.d.). *Produktion von Pflanzenkohle*. Sonnenerde. <https://www.sonnenerde.at/de/pflanzenkohle/produktion>

- [11] Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar ADAM (2019). [4. Bodenkenngrößen und Bodenklassifizierung]. Technische Universität Wien.
- [12] Micromeritics Instrument Corporation. (2001). *Model 1305 MultiVolume Pycnometer* (Dokument Nr. 135-42803-01). Unveröffentlichtes Dokument.
- [13] R. Yu, X. Wang, Q. Song, S. Rao, and Z. Shui, "A novel Self-Compacting Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (SCUHPFRC) derived from compounded high-active powders," *Construction and Building Materials*, vol. 158, pp. 883–893, 2018. [Online]. [https://www.researchgate.net/publication/331855899\\_A\\_novel\\_Self-Compacting\\_Ultra-High\\_Performance\\_Fibre\\_Reinforced\\_Concrete\\_SCUHPFRC\\_derived\\_from\\_compounded\\_high-active\\_powders](https://www.researchgate.net/publication/331855899_A_novel_Self-Compacting_Ultra-High_Performance_Fibre_Reinforced_Concrete_SCUHPFRC_derived_from_compounded_high-active_powders)
- [14] Austrian Standards Institute. (2022). ÖNORM EN 1097-6:2022-05-01 – Prüfverfahren für die Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Gesteinskörnungen gegen Abrieb. Austrian Standards Institute.
- [15] J. K. Felixberger, "Trennen von Stoffgemischen," in *Chemie für Einsteiger*, Springer Spektrum, 2017. [Online]. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-52821-1\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-52821-1_7)
- [16] Toni Technik, "Mortar Mixer ToniMIX Visco Expert – Model 6226," Toni Technik. [Online]. Verfügbar unter: <https://tonitechnik.com/product/mortar-mixer-tonimix-visco-expert-model-6226/>
- [17] Betontechnische Daten. (n.d.). *Biegezugfestigkeit von Festbeton*. Betontechnische Daten. Abgerufen am 07. November 2024, von <https://www.betontechnische-daten.de/de/pruefen-von-beton/festbeton/biegezugfestigkeit>
- [18] Betontechnische Daten. (n.d.). *Druckfestigkeit von Festbeton*. Betontechnische Daten. Abgerufen am 07. November 2024, von <https://www.betontechnische-daten.de/de/pruefen-von-beton/festbeton/druckfestigkeit>
- [19] G. Neroth and D. Vollenschaar, "Grundlagen," in *Wendehorst Baustoffkunde*, 27th ed., pp. 1–100, Springer Vieweg, 2011. [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4_1)
- [20] Qualitest, "Understanding DSC Testing: Principles and Applications," *World of Test*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.worldoftest.com/de/articles/understanding-dsc-testing-principles-and-applications#heat-flux-dsc> .
- [21] Neroth, G., Vollenschaar, D. (2011). Grundlagen. In: Neroth, G., Vollenschaar, D. (eds) *Wendehorst Baustoffkunde*. Vieweg+Teubner. [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4_1) [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4_1)

- [22] voestalpine. (2023). Schwellen aus Hochofenzement CEM III (Version 01). [https://cdnstorevoestalpine.blob.core.windows.net/image-container/936826/original/HH\\_MT\\_Schwellen\\_Hochofenzement\\_CEM\\_III\\_DE\\_V01.pdf](https://cdnstorevoestalpine.blob.core.windows.net/image-container/936826/original/HH_MT_Schwellen_Hochofenzement_CEM_III_DE_V01.pdf)
- [23] Holcim. (n.d.). Aqua 4 - Hochofenzement CEM III/B 42,5 L-LHSR (Version 00.01.000). [https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/309c9f5e-c9b1-4b99-9e00-7542c3e66130/Holcim\\_Aqua\\_4\\_-\\_Hochofenzement\\_CEM\\_IIIB\\_42\\_5\\_L-LHSR\\_na\\_\\_12263.pdf?version=00.01.000](https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/309c9f5e-c9b1-4b99-9e00-7542c3e66130/Holcim_Aqua_4_-_Hochofenzement_CEM_IIIB_42_5_L-LHSR_na__12263.pdf?version=00.01.000)
- [24] EBC (2020), Certification of the carbon sink potential of biochar, Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. Version 1.0E of 1st June 2020. <http://European-biochar.org>.
- [25] IBAU. (2022, 28. Februar). *Beton – Der Baustoff von gestern*. IBAU, <https://www.ibau.de/akademie/wissenswertes/beton-der-baustoff-von-gestern/>

## 7 Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Mischturm .....	5
<b>Abbildung 2:</b> Korngrößenverteilung .....	6
<b>Abbildung 3:</b> Definitionen von Dichten [19] .....	7
<b>Abbildung 4:</b> Heliumpyknometer .....	7
<b>Abbildung 5:</b> Büchner Trichter mit Kolben [15] .....	9
<b>Abbildung 6:</b> Kalorimeter .....	11
<b>Abbildung 7:</b> Mischungszusammensetzung .....	12
<b>Abbildung 8:</b> ToniMIX Visco Expert [16] .....	12
<b>Abbildung 9:</b> Schocktisch .....	13
<b>Abbildung 10:</b> Biegezugprüfung .....	14
<b>Abbildung 11:</b> Druckprüfung .....	15
<b>Abbildung 12:</b> Wärmestrom für Mischungen mit 0min Vorsättigung [W/g <sub>cement</sub> ] .....	16
<b>Abbildung 13:</b> Kumulierte Wärmeenergie für Mischungen mit 0min Vorsättigung [J/g <sub>cement</sub> ] .....	17
<b>Abbildung 14:</b> Wärmefluss für Mischungen mit 10min Vorsättigung [W/g <sub>cement</sub> ] .....	17
<b>Abbildung 15:</b> Kumulierte Wärmeenergie für Mischungen mit 10min Vorsättigung [J/g <sub>cement</sub> ] .....	18
<b>Abbildung 16:</b> Wärmefluss für Mischungen mit 24 Stunden Vorsättigung [W/g <sub>cement</sub> ] .....	19
<b>Abbildung 17:</b> Kumulierte Wärmeenergie für Mischungen mit 24 Stunden Vorsättigung [J/g <sub>cement</sub> ] .....	20
<b>Abbildung 18:</b> Einfluss der Vorsättigung auf die Rohdichte .....	21
<b>Abbildung 19:</b> Einfluss der Menge an Pflanzenkohle auf die Rohdichte .....	22
<b>Abbildung 20:</b> Ausbreitmaß der Mischungen im Durchschnitt .....	23
<b>Abbildung 21:</b> Überblick der Ergebnisse zur Biegezugfestigkeit .....	24
<b>Abbildung 22:</b> Einfluss der Vorsättigung auf die 5%-Mischung .....	25
<b>Abbildung 23:</b> Einfluss der Vorsättigung auf die 10%-Mischung .....	26
<b>Abbildung 24:</b> Einfluss der Vorsättigung auf die 15%-Mischung .....	26
<b>Abbildung 25:</b> Einfluss der Menge bei 0min Vorsättigung .....	27
<b>Abbildung 26:</b> Einfluss der Menge bei 10min Vorsättigung .....	27
<b>Abbildung 27:</b> Einfluss der Menge bei 24h Vorsättigung .....	28
<b>Abbildung 28:</b> Überblick der Ergebnisse zur Druckfestigkeit .....	29
<b>Abbildung 29:</b> Einfluss der Vorsättigung auf die 5%-Mischung .....	30
<b>Abbildung 30:</b> Einfluss der Vorsättigung auf die 10%-Mischung .....	31
<b>Abbildung 31:</b> Einfluss der Vorsättigung auf die 15%-Mischung .....	32
<b>Abbildung 32:</b> Einfluss der Menge bei 0min Vorsättigung .....	32
<b>Abbildung 33:</b> Einfluss der Menge bei 10min Vorsättigung .....	33
<b>Abbildung 34:</b> Einfluss der Menge bei 24h Vorsättigung .....	33

## 8 Formelverzeichnis

(3.1) .....	8
(3.2) .....	9
(3.3) .....	10
(3.4) .....	10
(3.5) .....	13
(3.6) .....	14

## Anhang A

In Anhang A wird die Mischungszusammensetzung der Proben, die im Rahmen des Kalorimeter Versuchs verwendet wurden, beschrieben.

### Mischungszusammensetzung für nicht vorgesättigte Proben:

<b>Null Mischung CH 1</b>	Gemischt	Ampulle
Masse der Paste	17	10,00
Zement	11,33	6,667
Wasser	5,67	3,333
BC	0,00	0,00
Referenzwasser	<b>4,545</b>	

<b>5 % P.Kohle CH 3</b>	Gemischt	Ampulle
Masse der Paste	17	10,537
Zement	11,333	6,667
Wasser	6,013	3,537
BC	0,567	0,333
Referenzwasser	<b>4,821</b>	

<b>10 % P.Kohle CH 5</b>	Gemischt	Ampulle
Masse der Paste	17	11,074
Zement	11,333	6,667
Wasser	6,359	3,741
BC	1,133	0,667
Referenzwasser	<b>5,096</b>	

<b>15 % P.Kohle CH 8</b>	Gemischt	Ampulle
Masse der Paste	17	11,611
Zement	11,333	6,667
Wasser	6,706	3,945
BC	1,700	1,000
Referenzwasser	<b>5,372</b>	

### Mischungszusammensetzung für Proben, welche 10min bzw. 24Stunden vorgesättigt wurden:

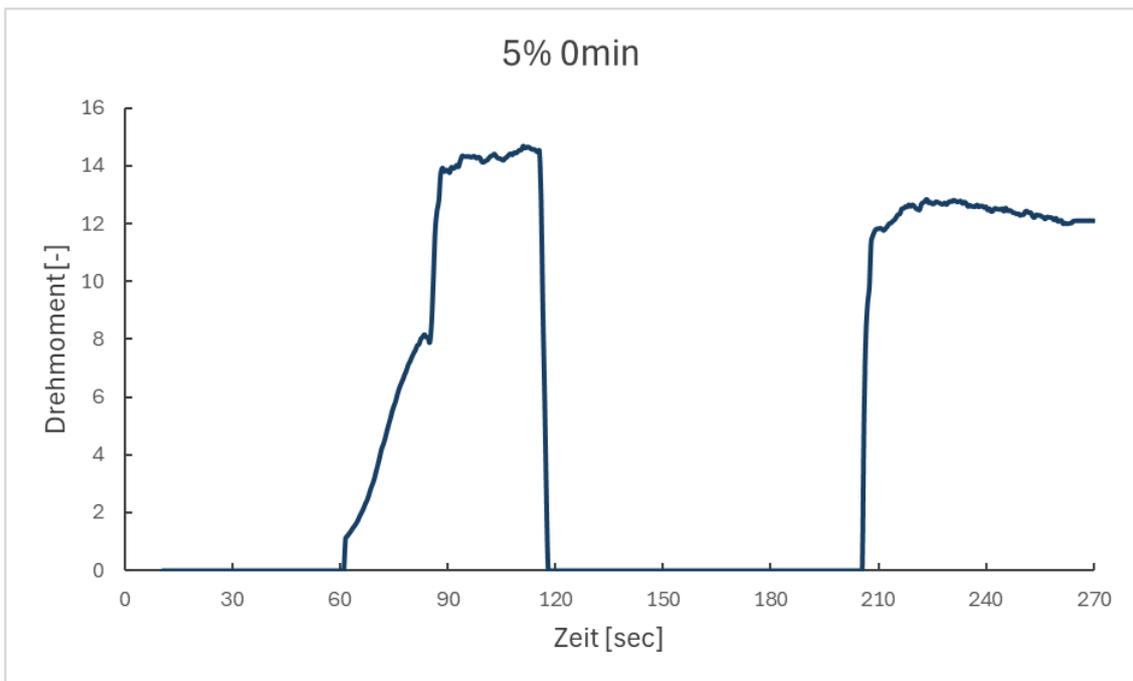
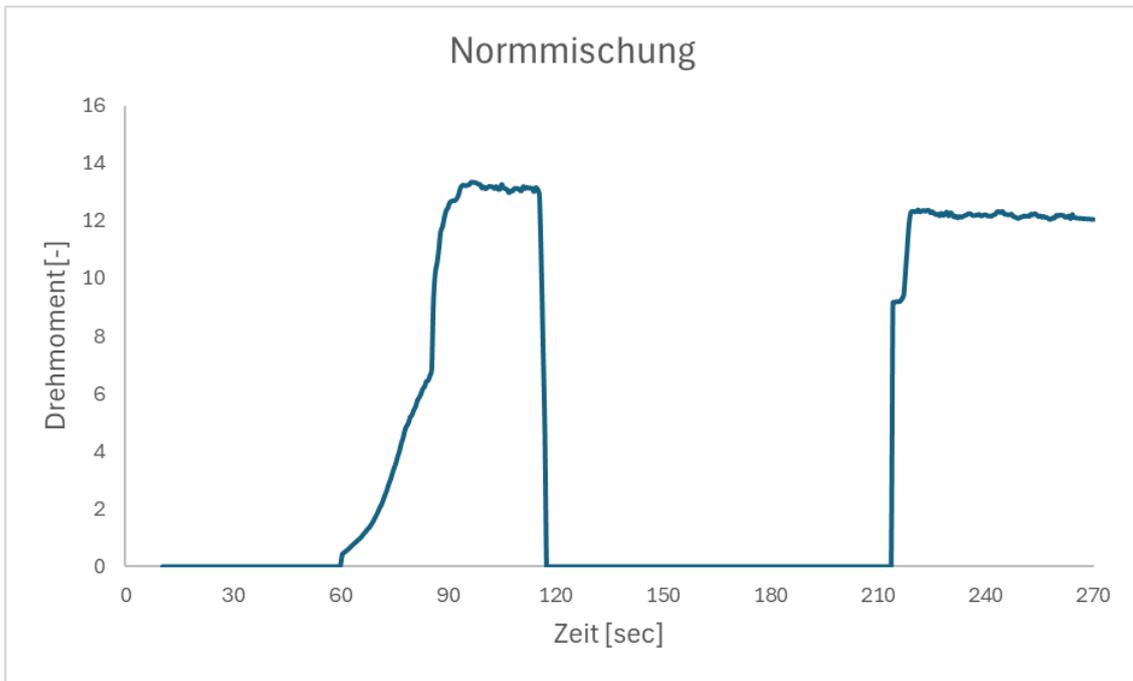
<b>5 % P.Kohle CH1</b>	Gemischt	Ampulle
Masse der Paste	17	10,537
Zement	11,333	6,667
Wasser	5,667	3,333
BCH Wasser	0,346	0,204
BC	0,567	0,333
Wasser TOT		3,537
Referenzwasser	<b>4,821</b>	

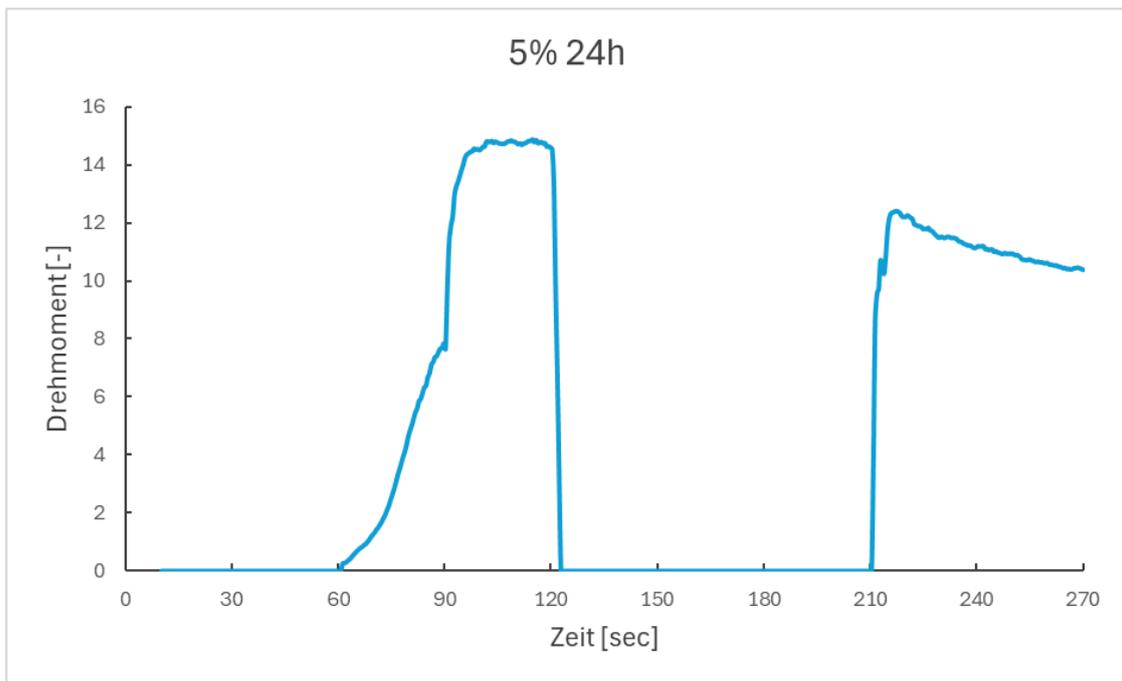
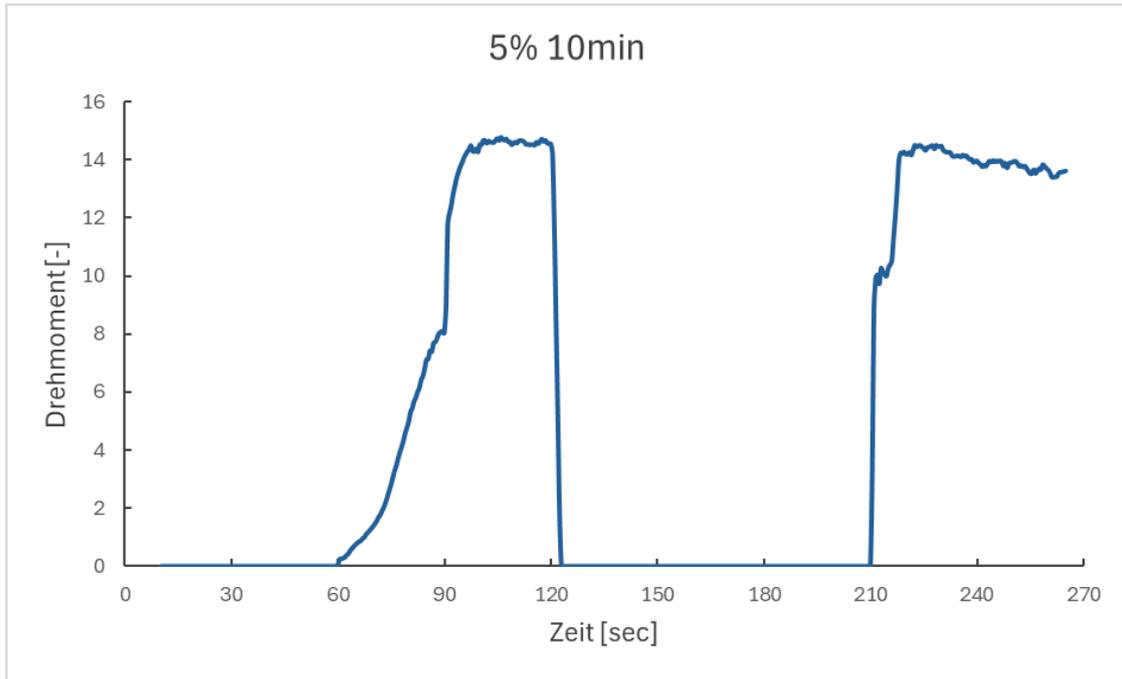
<b>15 % P.Kohle CH3</b>	Gemischt	Ampulle
Masse der Paste	17	11,611
Zement	11,333	6,667
Wasser	5,667	3,333
BCH Wasser	1,039	0,611
BC	1,700	1,000
Wasser TOT		3,945
Referenzwasser	<b>5,372</b>	

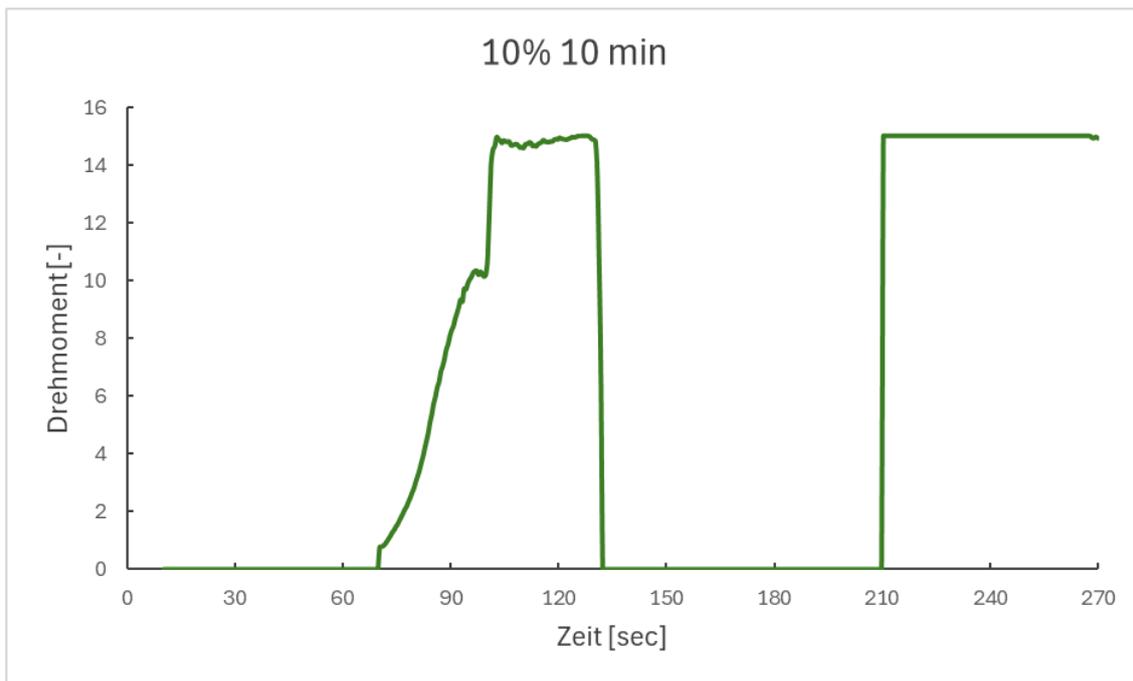
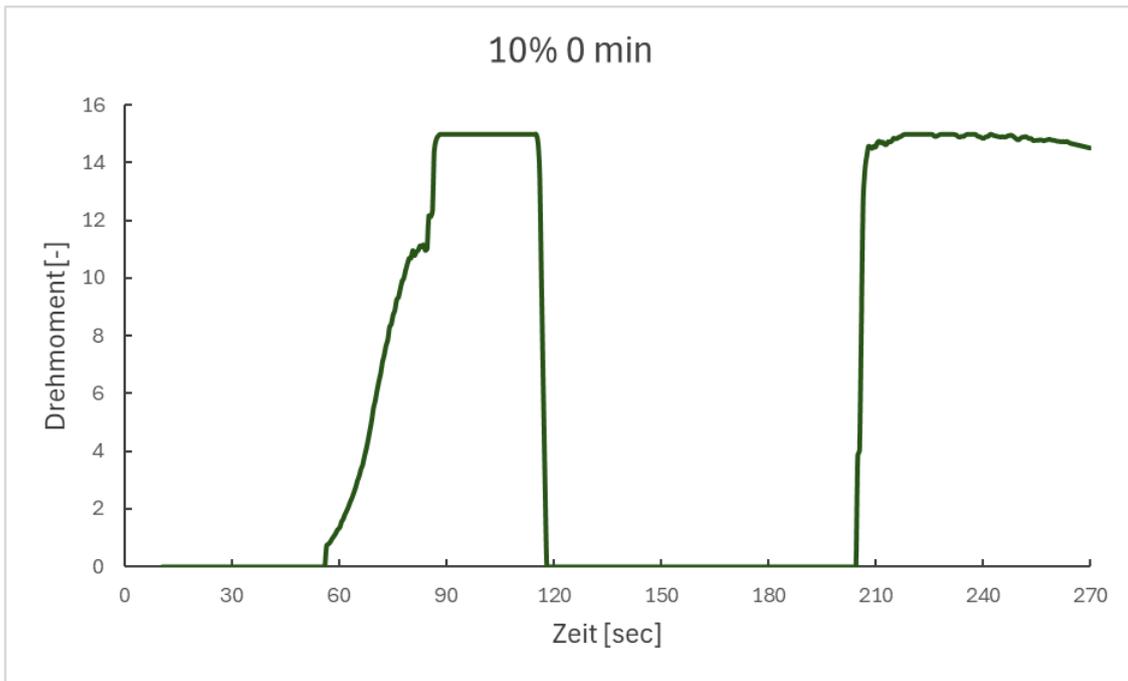
<b>10 % P.Kohle CH2</b>	Gemischt	Ampulle
Masse der Paste	17	11,074
Zement	11,333	6,667
Wasser	5,667	3,333
BCH Wasser	0,693	0,407
BC	1,133	0,667
Wasser TOT		3,741
Referenzwasser	<b>5,096</b>	

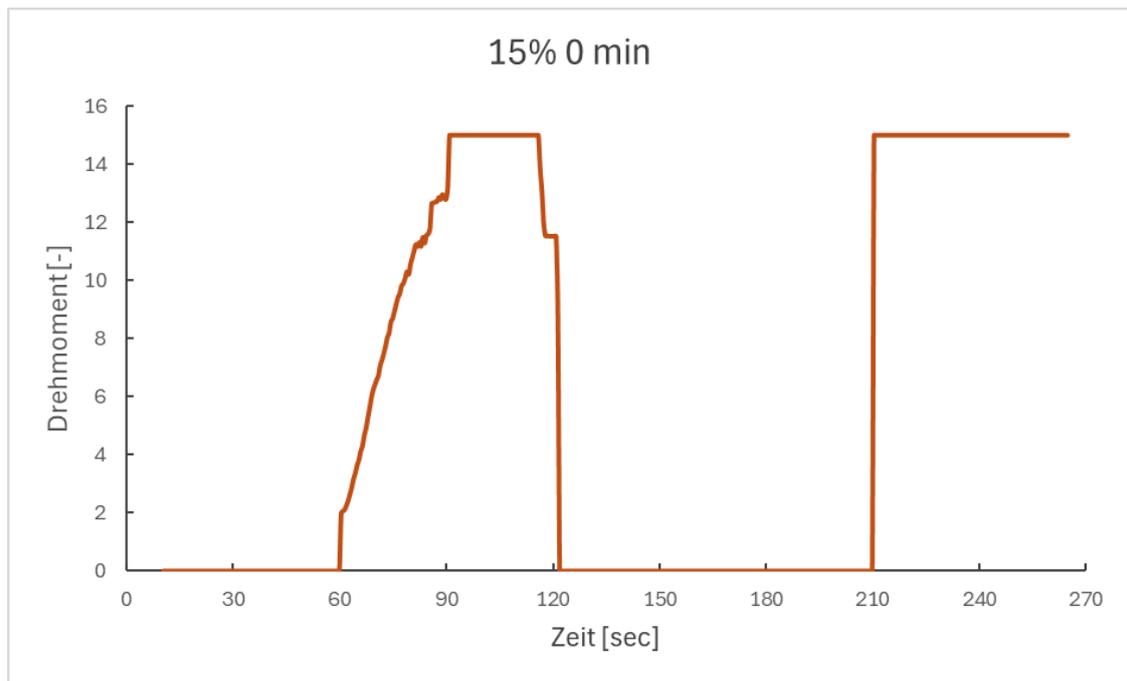
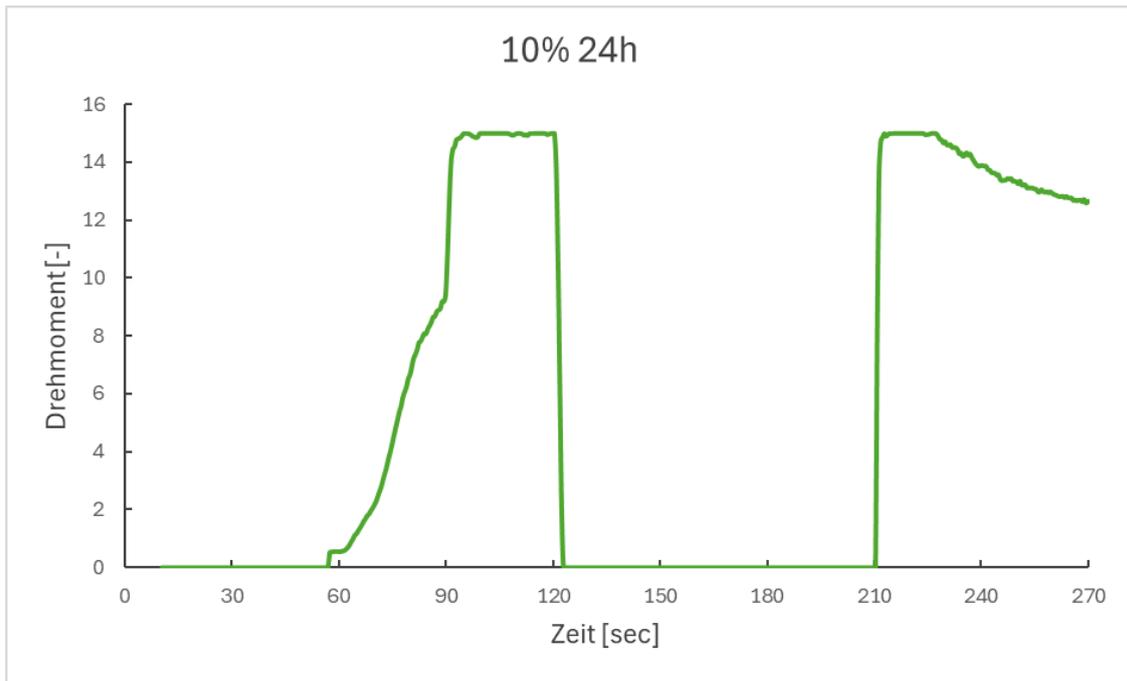
## Anhang B

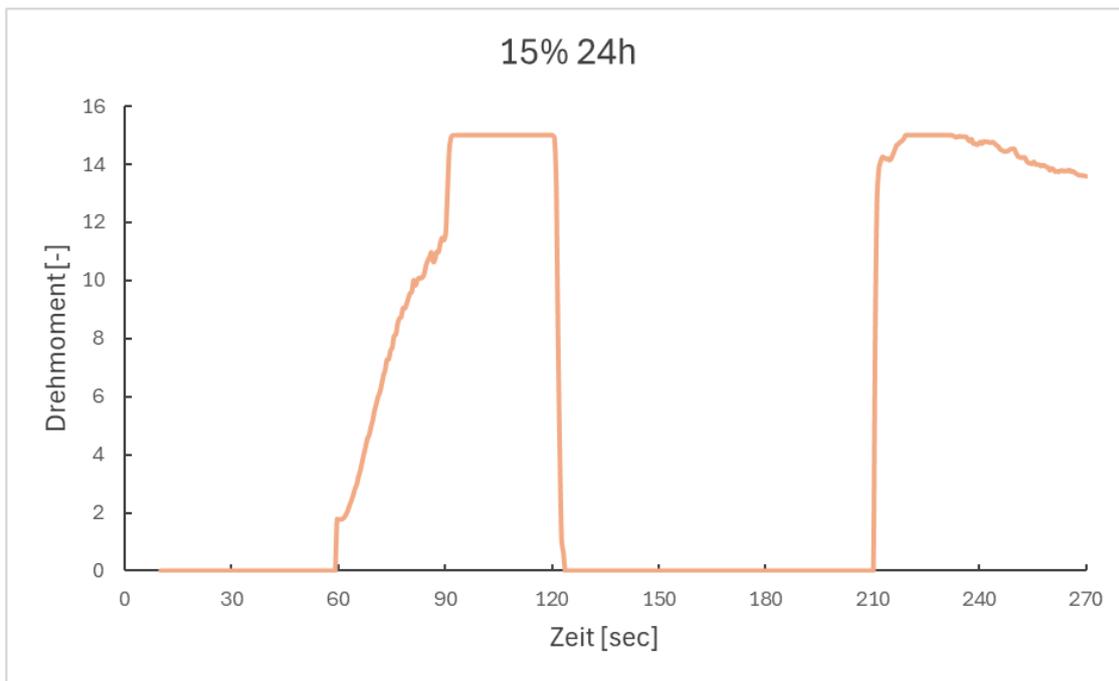
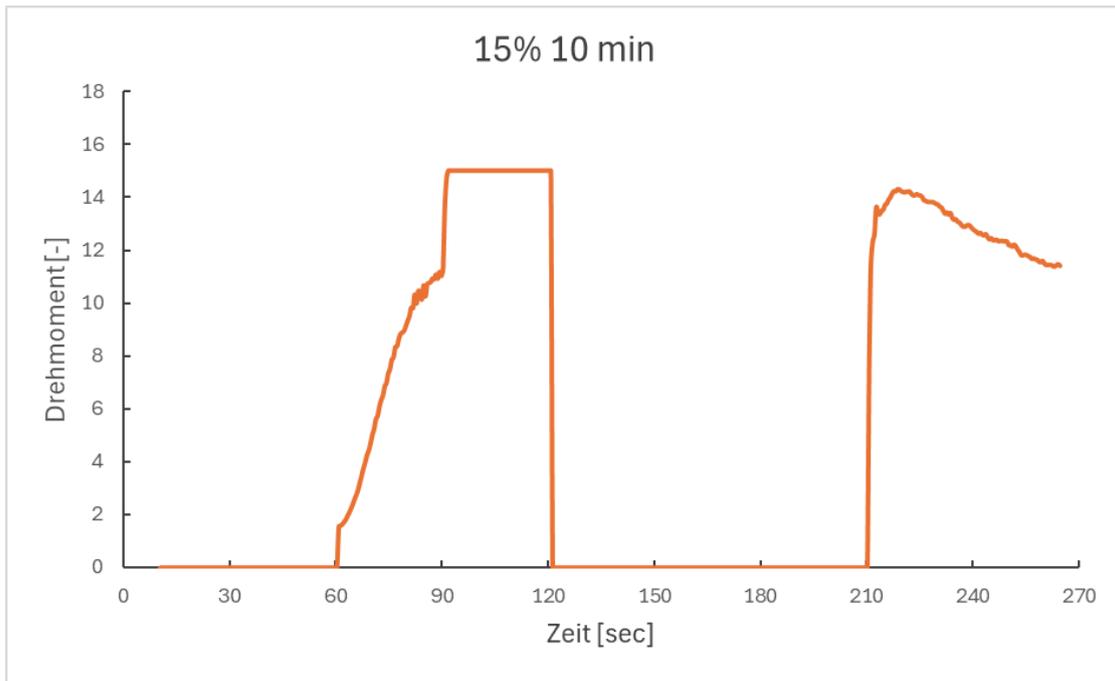
Im Anhang B sind Diagramme zur Verarbeitbarkeit der Mischungen in Abhängigkeit vom Anteil der Pflanzenkohle sowie der Vorsättigungszeit dargestellt.











## Anhang C

In Anhang C sind weitere Ergebnisse des Kalorimeter-Versuchs dargestellt. Es erfolgt eine vergleichende Analyse der verschiedenen Vorsättigungszeiten (0 min, 10 min und 24 Std.) und deren Einfluss auf den Wärmestrom sowie die kumulierte Wärmeenergie.

