

# Schlussbericht vom 31.08.2025

zum IGF-Vorhaben 01IF23074N

## Thema

Verbesserung der Qualität von feuerfesten Zustellungen aus Vibrationsfeuerbetonen

## Berichtszeitraum

01.09.2023 – 31.08.2025

## Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V.  
Rheinstraße 58  
56203 Höhr-Grenzhausen

## Forschungseinrichtung(en)

Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V.  
Rheinstraße 58  
56203 Höhr-Grenzhausen

Hochschule Koblenz  
Fachbereich bauen-kunst-werkstoffe  
Fachrichtung Werkstofftechnik Glas und Keramik  
Rheinstraße 56  
56203 Höhr-Grenzhausen

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Stand der Forschung und Entwicklung .....  | 5  |
| 1.1     | Rheologie – allgemein .....  | 6  |
| 1.2     | Vibrationsfeuerbetone – Aufbau, Verarbeitung und Qualität im Einsatz .....   | 7  |
| 1.3     | Vibrationsfeuerbetone – Rheologie .....  | 8  |
| 1.4     | Messmethoden zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften grobdispenser Systeme – Prüfung der Konsistenz mittels Ausbreitmaß .....                         | 8  |
| 1.5     | Messmethoden zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften grobdispenser Systeme – Prüfung der Konsistenz mittels 3D-Ausbreitmaß.....                       | 9  |
| 1.6     | Messmethoden zur Bestimmung der scherratenabhängigen Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen – Kugelauszugviskosimeter mit gekoppelter CFD-FEM-Simulation ..... | 10 |
| 1.7     | Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen .....   | 11 |
| 1.8     | Einfluss der Vibrationsparameter auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen.....   | 11 |
| 1.9     | Einfluss von Temperatur und Mischenergie auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen.   | 13 |
| 2       | Wissenschaftliche und wirtschaftliche Problemstellung.....   | 14 |
| 3       | Zielsetzung .....  | 15 |
| 4       | Lösungsweg .....   | 16 |
| 5       | Materialien und Methoden .....   | 17 |
| 5.1     | Materialien .....  | 17 |
| 5.1.1   | Modellvibrationsfeuerbetone .....  | 17 |
| 5.1.2   | Industriennahe Vibrationsfeuerbetone.....  | 18 |
| 5.2     | Herstellung der Feuerbetone .....  | 19 |
| 5.3     | Rheologische Untersuchungen .....  | 19 |
| 5.3.1   | Vibrationsparameter.....   | 19 |
| 5.3.2   | Kugelauszugviskosimeter .....  | 20 |
| 5.3.2.1 | Messprinzip .....  | 20 |
| 5.3.3   | 3D-Ausbreitmaß.....  | 23 |
| 5.3.3.1 | Messprinzip .....  | 23 |
| 5.3.3.2 | Berechnung rheologischer Parameter aus dem 3D-Ausbreitmaß .....  | 24 |
| 5.3.4   | Fließgrenzenbestimmung mit Hilfe einer Baumesszelle .....  | 26 |
| 5.4     | Untersuchung der Abbindekinetik .....  | 28 |
| 5.5     | Untersuchungen der Einsatzeigenschaften.....   | 28 |
| 5.5.1   | Grüneigenschaften.....   | 28 |
| 5.5.1.1 | Festigkeit.....  | 28 |
| 5.5.1.2 | Offene Porosität .....   | 28 |
| 5.5.2   | Untersuchungen der Hochtemperatureigenschaften .....   | 29 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 5.5.2.1 | Temperaturwechselbeständigkeit .....   | 29 |
| 5.5.2.2 | Korrosionsbeständigkeit .....  | 29 |
| 6       | Ergebnisse und Diskussion.....   | 30 |
| 6.1     | AP 1 - Umbau der Messmethoden für den Einsatz von Vibration .....  | 30 |
| 6.1.1   | Kugelauszugviskosimeter .....  | 30 |
| 6.1.2   | Validierung der am Kugelauszugviskosimeter unter Einsatz von Vibration gemessenen<br>Dynamischen Viskosität anhand zementfreien Vibrationsfeuerbetonen ..... | 31 |
| 6.1.3   | 3D-Ausbreitmaß.....  | 34 |
| 6.2     | AP 2 - Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen....  | 37 |
| 6.2.1   | Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter.....   | 38 |
| 6.2.2   | Messungen mit dem 3D-Ausbreitmaß .....   | 39 |
| 6.2.3   | Messungen mit Baumesszelle-Rheometer .....   | 42 |
| 6.2.4   | Untersuchung der Abbindekinetik .....  | 42 |
| 6.2.5   | Eigenschaften nach Trocknung - Kaltbiegefestigkeit und offene Porosität.....   | 43 |
| 6.3     | AP 3 und 4 - Einfluss der Korngrößenverteilung und Vibration auf die Rheologie von<br>Vibrationsfeuerbetonen.....  | 46 |
| 6.3.1   | Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter.....   | 46 |
| 6.3.1.1 | Analyse der Effektgröße .....  | 46 |
| 6.3.1.2 | Einflussfaktoren.....  | 47 |
| 6.3.1.3 | Wechselwirkungsanalyse .....   | 49 |
| 6.3.1.4 | Vorhersage der dynamischen Viskosität.....   | 52 |
| 6.3.2   | Messungen mit dem 3D-Ausbreitmaß .....   | 53 |
| 6.3.3   | Statistische Analyse: Signifikante Einflussfaktoren auf Fließ- und Grüneigenschaften .   | 54 |
| 6.4     | Vergleichende Analyse der rheologischen Eigenschaften und deren Einfluss auf die<br>Einsatzigenschaften der Feuerbetone .....                                | 60 |
| 6.4.1   | Hochtemperatureigenschaften .....  | 60 |
| 6.4.1.1 | Temperaturwechselbeständigkeit .....   | 60 |
| 6.4.1.2 | Korrosionsbeständigkeit .....  | 62 |
| 6.5     | AP 5 - Handlungsempfehlungen .....   | 73 |
| 6.5.1   | Überprüfung des Einflusses der Handlungsempfehlungen auf die Rheologie .....   | 73 |
| 6.5.1.1 | Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter .....  | 73 |
| 6.5.1.2 | Messungen mit dem 3D-Ausbreitmaß .....   | 74 |
| 6.5.2   | Einfluss der Grüneigenschaften auf die Einsatzigenschaften .....   | 76 |
| 7       | Zusammenfassung der Ergebnisse .....   | 79 |
| 8       | Literaturverzeichnis .....   | 82 |
| 9       | Anhang.....  | 84 |



## 1 Stand der Forschung und Entwicklung

Anders als bei geformten feuerfesten Produkten, die bereits ab Werk nach Brand oder Temperung in ihren Eigenschaften klar spezifiziert sind, werden ungeformte feuerfeste Erzeugnisse als Sackware zum Anwender geliefert, wo erst durch Zugabe von Wasser und ggf. anderen Additiven eine verarbeitungsfähige Masse entsteht, die typischerweise in Verschalungen eingebracht wird. Der Vorteil hierbei ist, dass ungeformte Erzeugnisse mit deutlich weniger Aufwand installiert werden können und somit Arbeitskraft einsparen. Die gängigsten Produkte sind hier Feuerbetone, die zu meist durch die Zugabe von Calciumaluminatzement eine hinreichende Grünfestigkeit erhalten, sobald der Zement hydratisiert ist.

Die rheologischen Eigenschaften dieser Feuerbetone werden maßgeblich durch die Korngrößenverteilung und den vom Hersteller empfohlenen Wassergehalt eingestellt. In der Praxis wird eine unzureichende Verarbeitbarkeit oft durch eine Nachdosierung von Wasser ausgeglichen. Dieser Ansatz erhöht jedoch den Porenanteil bzw. die Permeabilität und wirkt sich somit nachteilig auf Dichte, Festigkeit sowie auf Infiltrations- und Korrosionsbeständigkeiten aus. Aus diesem Grund zielt die moderne Feuerbeton-Entwicklung primär auf eine Reduktion des Wasserbedarfs durch Packungs- und Dispergierkonzepte ab, anstatt den Wassergehalt nachträglich zu erhöhen [16,17]. Oberflächenaktive Additive ermöglichen zudem die Beeinflussung der Fließeigenschaften (Rheologie) während des Einbringens und wirken sich in der Regel mindernd auf den Wasserbedarf aus. Gängig sind Feuerbetone, die entweder allein durch die Schwerkraft (sogenannte Freifließer) oder durch Energiezufuhr durch Vibrieren (sogenannte Vibrationsfeuerbetone) verdichten und somit ihre gattungsgemäßen Eigenschaften erhalten. Die Vibration wird im letzteren Fall benötigt, um die Fließgrenze zu überwinden, damit eine homogene lunkerfreie Verdichtung erfolgen kann. Die Qualität der Einbringung von feuerfesten Zustellungen aus selbstfließenden Feuerbetonen oder Vibrationsfeuerbetonen ist entscheidend für die Lebensdauer von Anlagen, damit ein diskontinuierlicher und damit nicht abschätzbarer Verschleiß der feuerfesten Zustellung vermieden werden kann [15].

Die Vibrationsfeuerbetone sind in der Regel durch eine gröbere Korngrößenverteilung und einen deutlich niedrigeren Wassergehalt gekennzeichnet, sodass sie nach der Fertigstellung und Trocknung eine geringere Gesamtporosität aufweisen, welche zu einer höheren Festigkeit führt, und eine geringere Infiltrationsneigung aufweisen. Daher werden sie erstrangig in Anlagen der Stahl- und Nichteisenmetallindustrie eingesetzt, wo thermomechanische Belastungen eine besondere Herausforderung an die Festigkeit darstellen und flüssige Stoffe (Metall, Schlacke) eher weniger infiltrieren, wodurch das Gefüge der Zustellung physikalisch weniger negativ verändert wird. Die höhere Leistungsfähigkeit vibrierbarer, niedrigwasserhaltiger Rezepturen wird u. a. mit der reduzierten Porosität und der daraus resultierenden Festigkeitssteigerung begründet [15,17].

Dreh- und Angelpunkt für einen erfolgreichen Einsatz von Feuerbetonen ist somit das Verdichtungsverhalten, damit eine homogene und richtungslose Materialeigenschaft während des Einsatzes gewährleistet werden kann. Da es sich bei Feuerbetonen um grobkörnige Suspensionen handelt, gestaltet sich die Bestimmung der dynamischen Viskosität als außerordentlich schwierig, da das Material keine homogene Scherrate aufweist, weil grobe Partikel in der Suspension im Nahfeld die Scherrate signifikant beeinflussen. Die Bestimmung der dynamischen Viskosität ist aber erforderlich, wenn Feuerbetone deduktiv und zielorientiert hinsichtlich des Verdichtungsverhaltens entwickelt werden sollen. Für **selbstfließende** Feuerbetone konnte im Rahmen eines IGF-Vorhabens (Nr. 21830 N) ein Konzept entwickelt werden, mit dem die dynamische Viskosität erfasst werden kann.

Das hier beschriebene IGF-Vorhaben widmete sich der systematischen Untersuchung und Verbesserung der Qualität feuerfester Zustellungen aus **Vibrationsfeuerbetonen**. Ziel war es, ein tieferes

Verständnis für den Zusammenhang zwischen Rheologie und dem Verdichtungsverhalten auch für Vibrationsfeuerbetone zu gewinnen, indem die im IGF-Vorhaben Nr. 21830 N) entwickelten Messverfahren (Kugelauszugsviskosimeter und 3D-Ausbreitmaß) modifiziert wurden. Erst durch die Messbarkeit der rheologischen Eigenschaften können Rezepturen und Prozessparameter bei der Verarbeitung die Einsetzeigenschaften und damit die Lebensdauer solcher Zustellungen zielorientiert verbessert werden.

## 1.1 Rheologie – allgemein

Die **Rheologie** beschäftigt sich mit dem Fließ- und Verformungsverhalten von Materialien, insbesondere unter dem Einfluss von Kräften. Rheologische Messungen geben wertvolle Informationen darüber, wie sich ein Material unter verschiedenen Belastungen verhält und wie es verarbeitet werden kann. Das Fließverhalten von Materialien wird durch rheologische Größen beschrieben. Die wichtigsten rheologischen Parameter sind:

1. **Viskosität ( $\eta$ ):** Die Viskosität ist das Maß für den Widerstand eines Materials gegen Fließen oder Verformen. Sie beschreibt, wie dickflüssig oder dünnflüssig eine Substanz ist.
2. **Scherrate ( $\dot{\gamma}$ ):** Die Scherrate beschreibt, wie schnell sich eine Materialschicht gegenüber einer anderen Schicht bewegt und ist ein Maß für die mechanische Belastung auf ein Fluid.
3. **Schubspannung ( $\tau$ ):** Die Schubspannung beschreibt die Kraft pro Flächeneinheit, die benötigt wird, um das Material in Bewegung zu setzen. Sie steht im direkten Zusammenhang mit der Scherrate und der Viskosität.
4. **Fließgrenze ( $\tau_0$ ):** Die Fließgrenze ist die Schubspannung, bei der ein Material von einem festen Zustand in einen fließfähigen Zustand übergeht.

Die rheologischen Größen sind miteinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig. Ein einfaches Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs ist das **Bingham-Fluid**. Hier hat Schubspannung  $\tau$  eine lineare Beziehung zur Scherrate  $\dot{\gamma}$  hat, sobald die Fließgrenze überschritten ist (1):

$$\tau = \dot{\gamma} \times \eta + \tau_0 \quad \text{Formel 1}$$

Für zementgebundene hochkonzentrierte Suspensionen wird das Fließverhalten in der Praxis häufig näherungsweise über Bingham-Kenngrößen (Fließgrenze, plastische Viskosität) beschrieben, wobei reale Systeme zusätzlich zeitabhängige Strukturänderungen (z. B. Thixotropie/Strukturaufbau in Ruhe) zeigen können. Diese Zeitabhängigkeit ist für Verarbeitungsfenster und vibrationsinduzierte Verflüssigung besonders relevant [18]. Verschiedene rheologische Modelle beschreiben, wie sich ein Material unter Scherbelastung verhält. Die wesentlichen rheologischen Modelle lassen sich in **Newtonsche Fluide**, **strukturviskose Fluide** (scherverdünnend) und **dilatante Fluide** (scherverdickend) unterteilen (Abbildung 1):

- **Newtonsche Fluide:** Ein Newtonsches Fluid besitzt eine konstante Viskosität, die unabhängig von der Scherrate ist. Das bedeutet, dass die Schubspannung proportional zur Scherrate ansteigt. Beispiele für Newtonsche Fluide sind Wasser und viele Öle.
- **Strukturviskose (scherverdünnende) Fluide:** Strukturviskose Fluide, auch als scherverdünnend bezeichnet, weisen eine abnehmende Viskosität bei steigender Scherrate auf. Das

bedeutet, dass das Material mit zunehmender mechanischer Belastung (z. B. Rühren, Pumpen oder Vibration) flüssiger wird und leichter fließt.

- **Dilatante (scherverdickende) Fluide:** Dilatante Fluide zeigen das entgegengesetzte Verhalten: Ihre Viskosität steigt mit zunehmender Scherrate an, sodass sie unter starker Belastung fester werden.

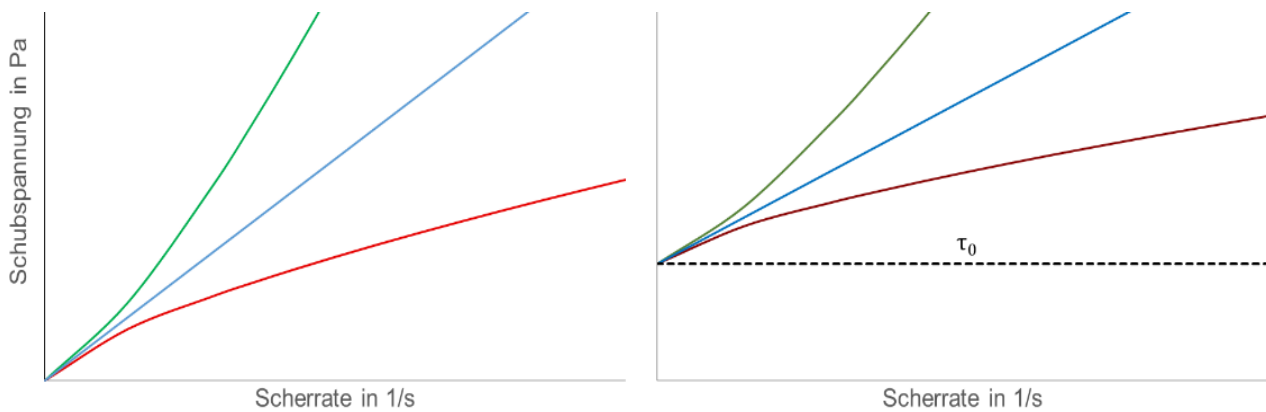


Abbildung 1: Rheologische Modelle von Fluiden. Blau: Newtonisches Fluid; Rot: Strukturviskoses Fluid; Grün: Dilatantes Fluid. Rechts: Die Fluide weisen eine Fließgrenze auf. Das Verhalten oberhalb der Fließgrenze entspricht dem der Fluide ohne Fließgrenze. Vibrationsfeuerbetone fließen erst unter Einsatz von Vibration. Unter Vibration weisen Vibrationsfeuerbetone keine Fließgrenze auf.

Vibrationsfeuerbetone bestehen aus einem komplexen Mehrkomponentensystem, das sowohl scherverdünnende als auch dilatante Anteile aufweisen kann. Daher ist es entscheidend, die dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate zu analysieren, um sicherzustellen, dass die Verdichtung durch Vibration effizient erfolgt und das Material optimal verarbeitet werden kann.

## 1.2 Vibrationsfeuerbetone – Aufbau, Verarbeitung und Qualität im Einsatz

Vibrationsfeuerbetone sind hochspezialisierte Baustoffe, die aus feuerfesten Rohstoffen, einem Bindemittel und chemischen Additiven bestehen. Die feuerfesten Rohstoffe können aus unterschiedlichen Komponenten bestehen und werden nach ihrer Korngröße in Feinkorn (0–100  $\mu\text{m}$ ), Mittelkorn (0,1–1 mm) und Grobkorn (> 1 mm) unterteilt. Das Bindemittel, in der Regel Calciumaluminatzement, sorgt für die notwendige Festigkeit. Chemische Additive wie Verflüssiger werden verwendet, um das Fließverhalten des Materials zu beeinflussen. Additive haben einen direkten Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften und die Verarbeitbarkeit der Feuerbetone und sind gemäß ISO 1927-1 ein Bestandteil für die Spezifikation moderner verflüssigter Feuerbetone.

Die Herstellung von Vibrationsfeuerbetonen erfolgt in Zwangsmischern, wobei eine gute Homogenisierung des Materials für das Verdichtungsverhalten und damit für die spätere Qualität von größter Bedeutung ist. Das Besondere an Vibrationsfeuerbetonen ist eine hohe Partikelpackungsdichte und ein geringer Wassergehalt, wodurch diese Massen nur unter Vibration installiert werden können. Vibrationsfeuerbetone kennzeichnet im Vergleich zu freifließenden Feuerbetonen eine hohe Dichte und eine hohe Festigkeit. Durch die Vibration werden Luftporen entfernt (entlüftet) und eine dichte Struktur geschaffen, was die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Feuerbetons verbessert.

### **1.3 Vibrationsfeuerbetone – Rheologie**

Die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen ist entscheidend für ihre Verarbeitung und die erreichte Materialdichte nach der Verdichtung. Im Gegensatz zu selbstfließenden Feuerbetonen, bei denen die Fließgrenze bereits durch das Eigengewicht überschritten wird, wird die Fließgrenze bei Vibrationsfeuerbetonen erst durch die externe mechanische Energie der Vibration überwunden. Das bedeutet, dass in ruhendem Zustand eine Schubspannung ( $\tau_0$ ) überwunden werden muss, um das Material zum Fließen zu bringen.

Sobald die Vibration einsetzt, führt die entstehende Scherbelastung dazu, dass die Partikel im Feuerbeton ihre Packungsstruktur lockern und sich das Material verformt. Unter Vibration kann die scheinbare Fließgrenze stark reduziert werden; das Material zeigt dann ein deutlich verändertes Fließverhalten („Verflüssigung“), sodass die Verarbeitung maßgeblich von einer vibrationsabhängigen effektiven Viskosität und der lokalen Scherbeanspruchung bestimmt wird. Entsprechend sind rheologische Kenngrößen stets im Kontext der Vibrationsintensität zu interpretieren [15,18].

Vibrationsfeuerbetone können sowohl scherverdünnende als auch dilatante Eigenschaften aufweisen. Die Verarbeitungseigenschaften von Vibrationsfeuerbetonen werden in der Regel vom dilatanten Anteil dominiert. Dies führt dazu, dass die Viskosität mit zunehmender Scherrate steigt und das Material steifer wird. Eine ausgeprägte Dilatanz, etwa infolge einer ungeeigneten Korngrößenverteilung, kann während der Verarbeitung von Vibrationsfeuerbetonen eine unzureichende Verdichtung und Entgasung zur Folge haben. Dies führt häufig zu erhöhten offenen Porosität und einer verminderten Festigkeit des Gefüges. Scherverdünnende Anteile können die Neigung zu Sedimentation unter Vibration deutlich verstärken. Sedimentation führt zu heterogenen Materialeigenschaften und zu einer verkürzten Lebensdauer der Zustellung und des damit zugestellten Aggregats.

Daher ist die Messung der scherratenabhängigen Rheologie essenziell, um sicherzustellen, dass Vibrationsfeuerbetone unter der mechanischen Beanspruchung der Vibration optimal verarbeitet werden können und nach dem Verdichten eine homogene dichte Struktur aufweisen.

### **1.4 Messmethoden zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften grobdisperser Systeme – Prüfung der Konsistenz mittels Ausbreitmaß**

In der Feuerfestindustrie werden die Verarbeitungseigenschaften von Feuerbetonen häufig durch die Bestimmung der Konsistenz mit Hilfe des Ausbreitmaßes (ISO 1927-4) ermittelt. Dabei wird eine standardisierte Trichterform (50 mm hoch, 100 mm unterer Durchmesser, 70 mm oberer Durchmesser) mit dem Feuerbeton auf einem Vibrationstisch mit der Öffnung nach unten befüllt (siehe Abbildung 2). Die Masse wird 30 Sekunden lang durch Vibration (Amplitude 0,25 mm, Frequenz 50 Hz) verdichtet. Anschließend wird der Trichter entfernt und die Masse durch Vibration für 20 s zum Fließen angeregt. Danach kann der Durchmesser des Fließkuchens gemessen werden.

Bei dieser Methode handelt es sich um eine reine Endpunktmessung, mit der sich keine zeitabhängigen rheologischen Kenngrößen wie die dynamische Viskosität bestimmen lassen. Zudem kann keine gezielte Scherrate vorgegeben werden, sodass das scherratenabhängige Fließen und somit das rheologische Modell nicht bestimmt werden können. Da die tatsächlichen Fließzustände während des Ausbreitens nicht bekannt sind, lassen sich aus dieser Messung keine detaillierten Rückschlüsse auf das komplexe Fließverhalten von Vibrationsfeuerbetonen ziehen. Endpunkt-Konsistenzprüfungen liefern primär empirische Verarbeitbarkeits-Kennwerte und erlauben ohne Zusatzannahmen keine eindeutige Bestimmung von Fließgrenze und (plastischer) Viskosität [18, 21, 22]. Für

eine präzisere Analyse müssen daher Methoden verwendet werden, die eine direkte Messung der rheologischen Eigenschaften unter realistischen Verarbeitungsbedingungen ermöglichen.

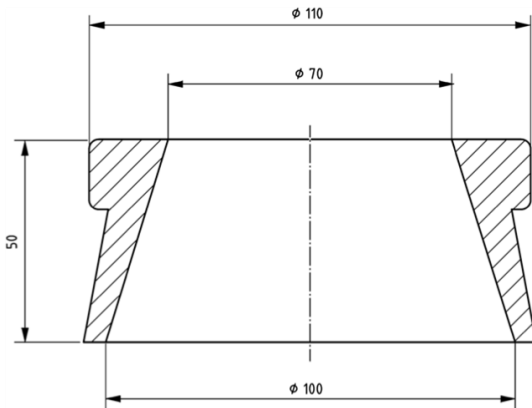


Abbildung 2: Standardisierte konische Metallform zur Bestimmung des Ausbreitmaßes bei Vibrationsfeuerbetonen gemäß DIN EN ISO 1927-4.

## 1.5 Messmethoden zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften grobdisperser Systeme – Prüfung der Konsistenz mittels 3D-Ausbreitmaß

Das 3D-Ausbreitmaß erfasst die rheologischen Eigenschaften grobdisperser Systeme. Dazu werden topographische Veränderungen, also Durchmesser, Höhe und Fließgeschwindigkeit des Fließkuchens, während des Ausbreitprozesses dokumentiert. Die Messung erfolgt über eine Bildverarbeitungsplattform, die eine Flächenkamera und mehrere Projektoren umfasst. Mithilfe der Streifenprojektion wird eine präzise 3D-Punktwolke des ausfließenden Materials erzeugt. Dieses Verfahren minimiert Abschattungseffekte und Reflexionsartefakte deutlich, wodurch eine zuverlässige und detailreiche Analyse der Fließdynamik möglich wird. Die erfassten Messdaten werden mithilfe eines Controllers und spezialisierter Software ausgewertet, um wesentliche rheologische Kenngrößen zu berechnen. Das Verfahren ermöglicht eine detaillierte Echtzeit-Abbildung der Massenveränderungen, wodurch der Einfluss verschiedener materialabhängiger Parameter auf das Fließverhalten sichtbar wird. Typische Ergebnisse zeigen Veränderungen charakteristischer geometrischer Größen des Fließkuchens, die sich über definierte Zeitintervalle (zum Beispiel 60 und 120 Sekunden) hinweg systematisch verfolgen lassen. Somit erlaubt diese Methode eine genaue rheologische Charakterisierung und den direkten Vergleich unterschiedlicher Materialsysteme. Zeitaufgelöste, sensorbasierte Slump-/Ausbreitmessungen werden im Baubeton bereits erforscht, um die Entwicklung von Durchmesser und Höhe objektiv zu erfassen und daraus zusätzliche Fließkennwerte für die Qualitätskontrolle und rheologische Korrelationen abzuleiten. Automatisierte Slump-Verfahren wurden zudem als effiziente Alternative diskutiert, um rheologische Eigenschaften indirekt vorherzusagen und Bedeinereinfluss zu reduzieren [19, 20]. Bisher beschränkten sich die Anwendungen hauptsächlich auf selbstfließende Feuerbetone. Für Vibrationsfeuerbetone existieren derzeit noch keine standardisierten Prüfmethode, die eine kontrollierte Vibration und 3D-Datenerfassung gleichzeitig gewährleisten. Dadurch sind solche Untersuchungen technisch anspruchsvoller und weniger verbreitet. Diese Einschränkung beruht insbesondere darin, dass Vibrationsbewegungen die Bilddaten erheblich verzerren können, wodurch sich wiederum die Qualität und Genauigkeit der rheologischen Auswertung beeinträchtigt.

## 1.6 Messmethoden zur Bestimmung der scherratenabhängigen Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen – Kugelauszugviskosimeter mit gekoppelter CFD-FEM-Simulation

Das Kugelauszugviskosimeter bestimmt die dynamische Viskosität von selbstfließenden Feuerbetonen unter definierten Scherbedingungen (Abbildung 3). Dabei wird eine Kugel mit konstanter Geschwindigkeit vertikal aus einer Feuerbeton-Suspension gezogen. Die Messmethode basiert auf einer erweiterten Form des Stokeschen Gesetzes, das um eine externe Kraftkomponente ergänzt wurde, um die Reibungskraft exakt zu erfassen. Die effektive Reibungskraft  $F_R$  wird durch eine direkte Kraftmessung während des Kugelauszugs bestimmt. Zur Berechnung der Viskosität wird eine Faxensche Wandkorrektur angewendet, um die Interaktionen der Kugel mit der Wand zu berücksichtigen. Durch Messungen bei unterschiedlichen Auszugsgeschwindigkeiten kann die Scherratenabhängigkeit der Viskosität analysiert werden. Ergänzend wird eine CFD-FEM-Simulation genutzt, um das Fließverhalten detailliert zu modellieren, die Versuchsergebnisse zu validieren und die beim Versuch jeweils angewandte Scherrate zu ermitteln. So wird die Bestimmung der scherratenabhängigen dynamischen Viskosität ermöglicht.

Bisher können mit einem solchen Kugelauszugviskosimeter nur selbstfließende Feuerbetone untersucht werden. Der Einsatz von Vibration führt zu einer Verzerrung der Kraftmessung, so dass die Qualität und Genauigkeit der Auswertung unzureichend sind.

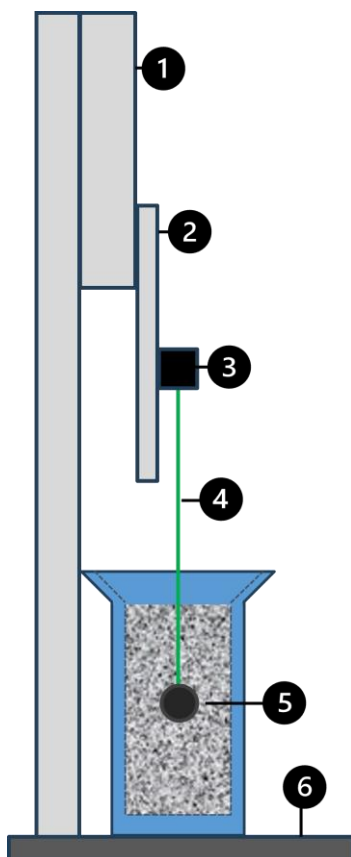


Abbildung 3: Aufbau des Kugelauszugviskosimeters für Messungen mit selbstfließenden Feuerbetonen mit einer Tischhalterung (1), Linearmotor (2), Kraftsensor (3), Messseil (4), Kugel (5), vibrationsisolierter Tisch (6). Der Einsatz von Vibration ist mit diesem Aufbau nicht möglich.

## 1.7 Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen

Die rheologischen Eigenschaften von Feuerbetonen werden maßgeblich durch die Zusammensetzung ihrer Komponenten beeinflusst [1]. Es ist dabei wichtig, zwischen verschiedenen Klassifizierungen der Rohstoffe zu unterscheiden: Feinstrohstoffe (0–100 µm), Mittelkorn (0,1–1 mm) und Grobkorn (> 1 mm). Die Korngrößenverteilung (KGV) dieser Aggregate hat einen wesentlichen Einfluss auf die Viskosität des Feuerbetons, wie in Studien gezeigt wurde [2, 3]. Dieser Einfluss ergibt sich aus der Verzahnung, Reibung und Bewegung der Aggregate während der Fließvorgänge [4, 5]. Bereits kleine Abweichungen in der Korngrößenverteilung in allen Fraktionen können signifikante Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften haben [6, 7]. Aufgrund von Unzulänglichkeiten in den Messmethoden (siehe vorherige Kapitel) war es jedoch bislang nicht möglich, den absoluten Einfluss von Aggregaten (insbesondere deren Form und Korngrößenverteilung) auf die rheologischen Eigenschaften von Vibrationsfeuerbetonen zu quantifizieren.

Die Theorie von Andreasen zur Korngrößenverteilung und der idealen Packung beschreibt, wie die Korngrößen optimal verteilt werden können, um eine maximale Packungsdichte und somit die besten rheologischen Eigenschaften zu erreichen [8]. Diese Verteilung wird über den sogenannten q-Wert definiert, der die Form und Abstufung der Partikelgrößen zueinander angibt und durch folgende Gleichung (2) dargestellt wird:

$$C(k) = \left(\frac{k}{k_{max}}\right)^q \quad \text{Formel 2}$$

Dabei bezeichnet  $C(k)$  die kumulative Massenverteilung bis zur Korngröße  $k$ ,  $k_{max}$  die maximale Korngröße und  $q$  den Parameter zur Charakterisierung der Korngrößenverteilung.

In dem IGF-Vorhaben 21830 N wurde der Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Rheologie von selbstfließenden Feuerbetonen untersucht, indem der Aggregatanteil variiert wurde. Es wurde nachgewiesen, dass Variationen innerhalb der Aggregatfraktion zu erheblichen Änderungen der rheologischen Eigenschaften führen können. Diese Veränderungen hängen von der Zusammensetzung des Feuerbetons ab, was die Notwendigkeit unterstreicht, rheologische Eigenschaften direkt zu messen und nicht durch die Analyse einzelner Bestandteile wie der Schlicker zu prognostizieren.

## 1.8 Einfluss der Vibrationsparameter auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen

Der Einfluss der Vibrationsparameter auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen ist entscheidend für eine effiziente Verarbeitung und die Qualität des Endprodukts. Im Zentrum steht dabei die Überwindung der Fließgrenze sowie die Verdichtung durch Entlüftung des Gefüges. Aus rheologischer Sicht ist zu beachten, dass die eingetragene Schwingungsanregung zu einem zeitabhängigen Strukturabbau führen kann. Dadurch können sich unter Vibration die scheinbare Fließgrenze reduzieren und die effektive Viskosität verändern [15, 18]. Aufgrund der dichten Partikelstruktur von Vibrationsfeuerbetonen genügt Schwerkraft allein nicht, um eine ausreichende Fließbewegung zu initiieren – Vibration wird daher gezielt eingesetzt, um durch externe Energiezufuhr die Fließgrenze zu überwinden und die interne Struktur kurzfristig aufzubrechen. Durch die Vibration werden die Partikel in Bewegung versetzt, was es Gaseinschlüssen ermöglicht aufzusteigen und zu entweichen. Die offene Porosität von Vibrationsfeuerbetonen wird so effektiv reduziert.

Die Verarbeitbarkeit von Vibrationsfeuerbetonen unter externer Schwingungsanregung ist als Vibrorheologie zu betrachten. Die resultierende Fließfähigkeit ergibt sich aus der entsprechenden Materialstruktur (inklusive zeitabhängiger Strukturänderungen) und den eingetragenen Vibrationsparametern [15]. Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Vibration von Feuerbetonen, je nach Anwendungsfall und Geometrie des Bauteils. Dazu gehören Innenrüttler, Außenrüttler (wie Schalungsrüttler), Tischvibrationen sowie Kombinationen daraus. Die Art der Vibration bestimmt maßgeblich die Art der Energieeinleitung in das Material und beeinflusst damit sowohl die Scherkräfte als auch die resultierende Materialbewegung. Die Reichweite der Vibration ist ebenfalls unterschiedlich und hängt vom Vibrationsaggregat, der Vibrationsstärke und der Dämpfung der Vibration durch das vibrierte Material ab. Es kommt somit zu räumlich unterschiedlichen Scherraten durch Vibration in einer komplexen feuerfesten Zustellung [15].

Die zwei zentralen Parameter der Vibration sind Amplitude und Frequenz. Die Amplitude, also der Weg, den die Vibrationsteilchen bei einer Schwingung zurücklegen, beeinflusst hauptsächlich die mechanische Energieeinleitung in das System. Größere Amplituden bewirken stärkere, grobkörnigere Bewegungen und haben damit einen größeren Einfluss auf die Bewegung grober Partikel und die Verdichtung des Gesamtgefüges. Die Frequenz hingegen beschreibt, wie oft diese Bewegungen pro Sekunde stattfinden. Höhere Frequenzen sind besonders effektiv bei der Reduktion von innerer Reibung und der Mobilisierung feiner Partikel, da diese schneller auf dynamische Veränderungen im Kraftfeld reagieren. Dies liegt daran, dass bei höheren Frequenzen die Reibung zwischen den Partikeln sinkt und die Bewegungsfrequenz der Partikel steigt, was zu einer besseren Verteilung und Dispersion der feinen Partikel führt. Bei niedrigen Frequenzen sind die Bewegungen der Partikel langsamer, und größere Partikel bewegen sich mehr als kleinere. Mit steigender Frequenz erhöht sich jedoch die Dispersion kleinerer Partikel, sodass sie bei höheren Frequenzen sogar größere Partikel in ihrer Dispersion übertreffen können [9]. Zu hohe Frequenzen können besonders bei groben Korngrößenverteilungen zu einer starken Sedimentation führen [10].

Daraus ergibt sich, dass grobe Körnungen stärker auf eine erhöhte Amplitude ansprechen, da sie mehr Energie benötigen, um ihre Trägheit zu überwinden und sich innerhalb der Matrix zu bewegen. Feine Partikel hingegen reagieren empfindlicher auf Veränderungen in der Frequenz, da sie aufgrund ihrer geringen Masse und Größe leichter beschleunigt und verschoben werden können. Eine ausgewogene Abstimmung beider Parameter ist entscheidend um eine ausreichende Verdichtung ohne Sedimentation zu erreichen.

Insgesamt zeigt sich, dass sowohl Frequenz als auch Amplitude gezielt auf die jeweilige Korngrößenverteilung und Viskosität des Systems abgestimmt werden müssen, um eine optimale Verarbeitung und Materialqualität sicherzustellen. Zur Beschreibung der Vibrationsintensität werden neben Amplitude und Frequenz häufig die Spitzengeschwindigkeit  $v_{max} = 2\pi fA$  und die Spitzenbeschleunigung  $a_{max}$  herangezogen. Diese Kenngrößen stehen in direktem Zusammenhang mit der eingetragenen Bewegungsanregung und damit der Verdichtungswirkung. [11, 12]

Neben den einzelnen Vibrationsparametern lässt sich der Effekt der Beschleunigung untersuchen. Die Beschleunigung einer harmonischen Schwingung ergibt sich aus Formel (3);

$$a_{max} = \text{Amplitude} \times (2\pi \times \text{Frequenz})^2 \quad \text{Formel 3}$$

Untersuchungen an Baubetonen haben gezeigt, dass die Höhe der Beschleunigung mit dem Radius der Vibration positiv korreliert. Durch flüssigeren Baubetone sinkt allerdings auch die

aufgenommene Energie bei gleicher Beschleunigung und der Verlust durch Dämpfung steigt. Das bedeutet, dass höhere Viskositäten die Verbreitung von Vibrationen begünstigen [11, 12].

Die Vibration wirkt als mechanische Belastung auf die Feuerbetone. Aus dieser ergibt sich eine Vibrationsscherrate (4).

$$\dot{\gamma}_{vib} = \frac{2\pi \times \text{Frequenz} \times \text{Amplitude}}{\text{Belastungsschicht}} \quad \text{Formel 4}$$

Die Belastungsschicht ergibt sich aus der Höhe, in der die Scherrate durch Vibration bestimmt wird und berücksichtigt so eine Dämpfung der Vibration durch zunehmende Schichtdicke [13].

Der Einfluss von Vibrationsparametern auf die Verarbeitungs- und Einsetzeigenschaften von Vibrationsfeuerbetonen ist bisher unzureichend erforscht. Übertragbare Erkenntnisse aus dem Bereich des Baubetons zeigen, dass nicht angepasste Vibrationsparameter die Entstehung von Defekten wie Lunker, Segregation und Rissbildung begünstigen. Für Vibrationsfeuerbeton ist die quantitative Parametrierung dieser Zusammenhänge bislang nur begrenzt systematisch beschrieben [11, 15].

## **1.9 Einfluss von Temperatur und Mischenergie auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen**

Neben den Vibrationsparametern und der Korngrößenverteilung hat die Temperatur und die Mischenergie einen signifikanten Einfluss auf die Rheologie von Feuerbetonen. Im Rahmen des IGF-Vorhabens 21830 N wurde der Einfluss von Mischenergie und Temperatur auf die rheologischen Eigenschaften von selbstfließenden Feuerbetonen untersucht [14]. Die Zufuhr von Mischenergie führt zur Homogenisierung der Suspension und beeinflusst die Fließeigenschaften der gemischten Massen. Ein erheblicher Teil der eingebrachten Energie wird in Reibungswärme umgewandelt, was zu einer Erhöhung der Massetemperatur führt. Beim Einsatz eines Eirich-Mischers zeigt sich, dass die Temperaturerhöhung linear mit der Mischzeit verläuft, da der Mischer konstant arbeitet. Höhere Mischenergien, etwa durch eine Erhöhung der Wirblergeschwindigkeit im Mischer, verkürzen die Zeit bis zur Homogenisierung und führen zu einer schnelleren Erwärmung der Masse.

Die Massetemperatur beeinflusst die rheologischen Eigenschaften erheblich. Mit steigender Temperatur nimmt die Viskosität der Masse systematisch ab und das Fließverhalten wird verbessert. Es konnte gezeigt werden, dass ein dilatanter Charakter mit steigender Temperatur zunehmend verringert wird. Dies hat auch Auswirkungen auf das ermittelte Ausbreitmaß. Temperaturunterschiede von nur 1 K können signifikante Veränderungen der rheologischen Kenngrößen verursachen.

Das IGF-Vorhaben 21830 N hat außerdem gezeigt, dass unterschiedliche Rohstofftemperaturen bei Vibrationsfeuerbetonen ebenfalls zu abweichenden rheologischen Eigenschaften führen. Um diese Effekte zu vermeiden, sollte der Mischprozess temperaturabhängig und nicht zeitabhängig durchgeführt werden. Das bedeutet, dass der Mischer gestoppt wird, sobald eine vordefinierte Zieltemperatur erreicht ist, und dass alle Rohstoffe vor dem Mischen auf die gleiche Temperatur gebracht werden.

## **2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Problemstellung**

Nach dem Stand der Technik zu Beginn des IGF-Vorhabens gab keine Messmethoden, die eine zuverlässige Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Feuerbetonen unter Anregung durch Vibration erlauben. Somit konnte kein neues Wissen über den Zusammenhang zwischen rheologischen Fundamentalgrößen, der Zusammensetzung und Vibrationsparametern auf die resultierenden Verarbeitungs- und Einsetzeigenschaften gewonnen werden.

Weiterhin konnte mangels Messdaten kein Zusammenhang zwischen rheologischen Modellen von Vibrationsfeuerbetonen und resultierenden Verarbeitungs- und Einsetzeigenschaften ermittelt werden. Somit konnte bisher die Lebensdauer von Zustellungen aus Vibrationsfeuerbetonen in Aggregaten nicht vorhergesagt werden.

Das Problem auf Seiten der Wirtschaft war, dass keine Messmethoden für die Messung der dynamischen Viskosität von Vibrationsfeuerbetonen und damit ihren rheologischen Eigenschaften zur Verfügung stand. Eine Optimierung der Fließeigenschaften von Feuerbetonen mit den Zielen verbesserter Haltbarkeit und geringerer Defektbelastung war der Wirtschaft so nicht möglich.

### 3 Zielsetzung

Das Forschungsvorhaben verfolgte daher mehrere Ziele, um den wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Problemstellungen zu begegnen:

1. **Rheologische Beschreibung von Vibrationsfeuerbetonen unter Vibration:** Es wurde das Ziel verfolgt, neue und verbesserte Messverfahren zu entwickeln, um die scherratenabhängige Viskosität sowie das Fließ- und Verdichtungsverhalten von Vibrationsfeuerbetonen unter Vibrationseinfluss zu bestimmen.
2. **Einfluss der Korngrößenverteilung (KGV):** Das Ziel war es, den Einfluss der KGV auf die rheologischen Eigenschaften sowie auf Einseitzigenschaften wie offene Porosität, Festigkeit und Beständigkeit gegen Temperaturwechsel und Korrosion zu quantifizieren.
3. **Einfluss der Vibrationsparameter:** Es wurde das Ziel verfolgt zu erforschen, wie sich Veränderungen der Vibrationsparameter auf die rheologischen Eigenschaften und die Einseitzigenschaften (offene Porosität, Festigkeit und Beständigkeit gegen Temperaturwechsel und Korrosion) auswirken. Dabei sollten Amplitude und Frequenz getrennt variiert werden können.
4. **Kombinierter Einfluss von KGV und Vibrationsparametern:** Das Ziel war, den kombinierten Einfluss von KGV und Vibrationsparametern auf die rheologischen Eigenschaften und Einseitzigenschaften (offene Porosität, Festigkeit und Beständigkeit gegen Temperaturwechsel und Korrosion) zu quantifizieren und die Wechselwirkungen zwischen beiden Faktoren zu untersuchen.
5. **Handlungsempfehlungen für die Herstellung von Vibrationsfeuerbetonen:** Das Ziel war, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse praxisorientierte Handlungsempfehlungen zu entwickeln, die eine gezielte Herstellung von Vibrationsfeuerbetonen mit verbesserter Qualität und Haltbarkeit ermöglichen.

Das neue Wissen, erlangt durch die Weiterentwicklung bestehender Messverfahren wie des Kugelauszugsviskosimeters und des Ausbreitmaßes, sollte die rheologischen Eigenschaften von Vibrationsfeuerbetonen unter realistischen Bedingungen messbar machen und damit die Feuerfestindustrie in die Lage versetzen, solche Materialien gezielt zu optimieren.

## 4 Lösungsweg

Um die definierten Ziele zu erreichen, wurden im ersten Schritt zwei Methoden weiterentwickelt, mit denen die rheologischen Fundamentalgrößen von Feuerbetonen **unter Vibration** erfasst werden können. Als erste Methode wurde ein bestehendes Kugelauszugsviskosimeter auf Basis der Ergebnisse des IGF-Vorhabens 21830 N weiterentwickelt und umfassend modifiziert. Für den Umbau des Kugelauszugsviskosimeters wurden der Linearmotor und der Kraftsensor vom Vibrationstisch entkoppelt, um eine präzisere Messung der rheologischen Eigenschaften von Vibrationsfeuerbetonen zu ermöglichen. Ein neu konzipierter Probenbehälter, entworfen in SolidWorks und mittels 3D-Druck gefertigt, gewährleistet die Einhaltung der relevanten Stokes'schen Gesetzmäßigkeiten und eine gleichbleibende Probenhöhe durch markierte Füllstände. Zur Fixierung wurde der Behälter in eine Metallplatte mit Aufsatz eingespannt, die gleichzeitig als Schutz der Tischoberfläche vor Verschmutzungen dient. Als zweite Methode wurde das Kamerasystem des 3D-Ausbreitmaßes über einem Vibrationstisch angebracht. Der Kontrast zwischen Metallplatte und Feuerbeton wurde verbessert. Die Verarbeitung der Bilddaten wurde iterativ angepasst.

Um die temperaturabhängige Rheologie von Feuerbetonen zu berücksichtigen, wurden für die Messungen mit beiden neuen Methoden alle Rohstoffe und das Anmachwasser unter kontrollierten Bedingungen gelagert. Die Temperatur vor und nach dem Mischen wurde erfasst, um einen möglichen Einfluss der Temperaturerhöhung auf die Rheologie der untersuchten Feuerbetone zu erkennen.

Zur Verifizierung des weiterentwickelten Kugelauszugsviskosimeters und des 3D-Ausbreitmaßes wurden umfangreiche Messreihen an Modellvibrationsfeuerbetonen (FB0,31-MS und FB0,31-RT) sowie an deionisiertem Wasser (nur Kugelauszugsviskosimeter) durchgeführt.

Es wurden die rheologischen Eigenschaften der Modellvibrationsfeuerbetone in Abhängigkeit des  $q$ -Wertes untersucht. Ergänzend wurden die Einsatz- (Kaltbiegefestigkeit und offene Porosität) sowie Hochtemperatureigenschaften (Temperaturwechsel- und Korrosionsbeständigkeit) untersucht.

Anschließend wurde der Einfluss von Vibrationsparameter,  $q$ -Wert und Zusammensetzung auf die Rheologie und die Einsatz- und Hochtemperatureigenschaften (offene Porosität, Festigkeit und Beständigkeit gegen Temperaturwechsel und Korrosion) mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung (Design of Experiment) systematisch untersucht. Aufgrund technischer Einschränkungen wurden bestimmte Kombinationen von Frequenz und Amplitude ausgeschlossen.

Aus den konsolidierten Ergebnissen der Untersuchungen wurden Handlungsempfehlungen zur Optimierung von Vibrationsfeuerbetonen abgeleitet. Zur weiteren Validierung wurden industriennahe Versätze sowohl nach als auch entgegen diesen Handlungsempfehlungen hergestellt und vermessen, um die praktische Relevanz der Erkenntnisse zu bewerten.

## 5 Materialien und Methoden

### 5.1 Materialien

#### 5.1.1 Modellvibrationsfeuerbetone

Für das Vorhaben wurden zwei Modellvibrationsfeuerbetone mit einem mittleren q-Wert von 0,31 mit Hilfe der Software EMMA entwickelt (Tabelle 1). Einer der Modellvibrationsfeuerbetone ist mikrosilikahaltig (FB0,31-MS) während der andere mikrosilikafrei ist (FB0,31-RT).

Der Einfluss verschiedener Korngrößenverteilung wurde an zwei zusätzlichen Modellvibrationsfeuerbetonen mit veränderter Korngrößenverteilung untersucht. Dazu wurden der Fein- und Grobkornanteil so variiert, dass die in Tabelle 1 dargestellten Feuerbetone außerdem mit einem q-Wert von 0,28 (feinere Korngrößenverteilung) und 0,34 (gröbere Korngrößenverteilung) untersucht werden konnten. Siebkurven der Modellvibrationsfeuerbetone befinden sich im Anhang (Abbildung 71).

*Tabelle 1: Modellvibrationsfeuerbetone mit einer mittleren KGV ( $q = 0,31$ ) sowie feineren ( $q = 0,28$ ) und gröberen KGV ( $q = 0,34$ ) mit (MS) und ohne Mikrosilika (RT). Die Zahlen verweisen auf das Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche mit 1 = CPA, 2 = Camsizer, 3 = BET.*

| Komponenten in Gew.-%                          | FB0,28-RT | FB0,31-RT | FB0,34-RT | FB0,28-MS | FB0,31-MS | FB0,34-MS |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| T60/T64 3-6 mm <sup>1</sup><br>(Almatis)       | 18        | 21        | 22        | 18        | 21        | 22        |
| T60/T64 1-3 mm <sup>2</sup><br>(Almatis)       | 17        | 18        | 19        | 17        | 18        | 19        |
| T60/T64 0,5-1 mm <sup>2</sup><br>(Almatis)     | 14        | 15        | 16        | 14        | 15        | 16        |
| T60/T64 0-0,5 mm <sup>2</sup><br>(Almatis)     | 12        | 12,5      | 13        | 12        | 12,5      | 13        |
| T60/T64 0-0,3 mm <sup>2</sup><br>(Almatis)     | 9         | 10        | 11        | 9         | 10        | 11        |
| T60/T64 45 µm <sup>3</sup><br>(Almatis)        | 9         | 6,5       | 4,5       | 9         | 6,5       | 4,5       |
| CT 9 FG <sup>3</sup> (Almatis)                 | 6         | 4,5       | 3         | 6         | 4,5       | 3         |
| CT 800 FG <sup>3</sup> (Almatis)               | 3         | 2         | 1,5       | 3         | 2         | 1,5       |
| CTC20 <sup>3</sup> (Almatis)                   | 4         | 2,5       | 2         | 4         | 2,5       | 2         |
| RG4000 <sup>3</sup> (Almatis)                  | 3         | 3         | 3         | 0         | 0         | 0         |
| 971-U <sup>3</sup> (Elkem)                     | 0         | 0         | 0         | 3         | 3         | 3         |
| Secar 71 <sup>3</sup> (Imerys)                 | 5         | 5         | 5         | 5         | 5         | 5         |
| Na-TPP (N25-15)<br>(Budenheim)                 | 0,05      | 0,05      | 0,05      | 0,05      | 0,05      | 0,05      |
| Zitronensäure                                  | 0,07      | 0,07      | 0,07      | 0,07      | 0,07      | 0,07      |
| Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                | 0,005     | 0,005     | 0,005     | 0,005     | 0,005     | 0,005     |
| Wasser   | 5,5       | 5,5       | 5,5       | 5,0       | 5,0       | 5,0       |
| q-Wert nach Andreasen                          | 0,28      | 0,31      | 0,34      | 0,28      | 0,31      | 0,34      |
| Wasser/Matrix-Verhältnis                       | 0,18      | 0,23      | 0,29      | 0,16      | 0,21      | 0,26      |
| Spezifische Oberfläche<br>in m <sup>2</sup> /g | 0,9055    | 0,8596    | 0,8309    | 0,3945    | 0,3487    | 0,3199    |

Alle Modellvibrationsfeuerbetone bestanden aus verschiedenen Reaktiv- und calcinierten Tonerden von Almatis sowie Calciumaluminatzement von Imerys (Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses). Das teilweise eingesetzte Mikrosilika stammte von Elkem. Die spezifische Oberfläche wurde in Abhängigkeit von der Korngröße mittels des BET-Verfahrens sowie durch Partikelanalysegeräte (Camsizer X2 und CPA) bestimmt.

### 5.1.2 Industriennahe Vibrationsfeuerbetone

Für die Überprüfung der entwickelten Handlungsempfehlungen wurden die zwei industriennahen Versätze VIB 4 STPP (Tabelle 2) und VIB A 5 (Tabelle 3), jeweils mit und ohne Mikrosilika, untersucht. Die Rohstoffe und Versatzzusammensetzungen wurden von Almatis (Mitglied des Projektbegleitenden Ausschusses) zur Verfügung gestellt:

*Tabelle 2: Zusammensetzung von VIB 4 STPP mit (-MS) und ohne Mikrosilika (-RT). Versatzzusammensetzung zur Verfügung gestellt von Almatis.*

| Komponenten in Gew.-%       | VIB 4 STPP-RT | VIB 4 STPP-MS |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| T60/64 3-6 mm (Almatis)     | 20            | 20            |
| T60/64 1-3 mm (Almatis)     | 20            | 20            |
| T60/64 0,5-1 mm (Almatis)   | 10            | 10            |
| T60/64 0,2-0,6 mm (Almatis) | 10            | 10            |
| T60/64 0-0,2 mm (Almatis)   | 15            | 15            |
| T60/64 20 µm (Almatis)      | 7             | 7             |
| CTC20 (Almatis)             | 10            | 8             |
| RG4000 (Almatis)            | 0             | 5             |
| U 971 (Elkem)               | 3             |               |
| CA-14 M (Almatis)           | 5             | 5             |
| Na-TPP (N25-15, Budenheim)  | 0,08          | 0,08          |
| Zitronensäure               | 0,05          | 0,05          |
| Wasser                      | 5             | 5             |
| q-Wert nach Andreasen       | 0,28          | 0,28          |
| Wasser/Matrix-Verhältnis    | 0,2           | 0,2           |

*Tabelle 3: Zusammensetzung von VIB A 5 mit (-MS) und ohne Mikrosilika (-RT). Versatzzusammensetzung zur Verfügung gestellt von Almatis.*

| Komponenten in Gew.-%       | VIB A 5-RT | VIB A 5-MS |
|-----------------------------|------------|------------|
| T60/64 3-6 mm (Almatis)     | 30         | 30         |
| T60/64 1-3 mm (Almatis)     | 10         | 10         |
| T60/64 0,5-1 mm (Almatis)   | 12         | 12         |
| T60/64 0,2-0,6 mm (Almatis) | 10         | 10         |
| T60/64 0-0,3 mm (Almatis)   | 12         | 12         |
| T60/64 45 µm (Almatis)      | 8          | 6          |
| CTC20 (Almatis)             | 10         | 10         |
| RG4000 (Almatis)            | 0          | 5          |
| U 971 (Elkem)               | 3          | 0          |
| CA-14 M (Almatis)           | 5          | 5          |
| ADS 1 (Almatis)             | 0,6        | -          |
| M-ADS 1 (Almatis)           | -          | 0,6        |
| ADW 1 (Almatis)             | 0,4        | -          |
| M-ADW 1 (Almatis)           | -          | 0,4        |
| Wasser                      | 4,5        | 4,5        |
| q-Wert nach Andreasen       | 0,31       | 0,31       |
| Wasser/Matrix-Verhältnis    | 0,17       | 0,17       |

## 5.2 Herstellung der Feuerbetone

Alle Feuerbetone wurden zunächst trocken (30 s) und anschließend unter Zugabe von Wasser (Modellvibrationsfeuerbetone 5 min, industriennahe Versätze 4 min) in Mixchern (KitchenAid) gemischt. Im Zuge des Mischprozesses wurde die Mischenergie der Versätze aufgezeichnet, indem die Leistung des Mischaggregat gemessen wurde.

Die Materialien wurden anschließend in die jeweiligen Probenbehälter befüllt. Sie wurden dann für 30 s bei den gewählten Vibrationsparametern verdichtet. Anschließend wurden die rheologischen Messungen durchgeführt.

Nach der Zugabe von Wasser beginnt die Hydratation des Zementes in den Feuerbetonen. Dadurch verändern sich infolge der Lösung von  $CA^{2+}$ -Ionen, die Basizität und die Rheologie. Die rheologischen Messungen wurden daher stets 15 min nach Ende des Nassmischvorganges durchgeführt. So wurde sichergestellt, dass die Vibrationsfeuerbetone stets im gleichen Zustand erfasst wurden.

Die trockenen Mischungen wurden bei  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  gelagert. Vor dem Mischen wurde sichergestellt, dass die trockenen Rohstoffe eine Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  hatten. Die rheologischen Messungen wurden bei  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  durchgeführt.

## 5.3 Rheologische Untersuchungen

### 5.3.1 Vibrationsparameter

Ein zentraler Bestandteil der Untersuchungen war die Analyse der Vibrationsparameter, insbesondere der Kombinationen aus Amplitude und Frequenz. Die Vibrationsparameter wurden durch einen Vibrationstisch (Knauer Engineering GmbH Industrieanlage & Co. KG, Modell VE10002) realisiert. Die ursprüngliche Versuchsmatrix (Tabelle 4) umfasste eine Vielzahl möglicher Parameterkombinationen, wurde jedoch durch technische Einschränkungen des Vibrationstisches limitiert.

*Tabelle 4: Ursprünglich geplanten Vibrationsparameterkombinationen.*

| A \ f   | 10 Hz                 | 30 Hz                 | 50 Hz                 | 70 Hz                 | 90 Hz                 |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,05 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |
| 0,15 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |
| 0,25 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | Referenz              | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |
| 0,35 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |
| 0,45 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |

Der Vibrationstisch erzeugt die Vibration durch Gewichte, die in einem definierten Winkel beschleunigt werden. Der Vibrationstisch erlaubt nicht alle Kombinationen von Amplitude und Frequenz, da die Gewichte nur einen maximalen Winkel von  $162^\circ$  einnehmen durften und die resultierende Beschleunigung (Formel 3) im Bereich von 1 bis  $12\text{ m/s}^2$  liegen musste. Diese technischen Begrenzungen führten dazu, dass bestimmte Parameter ausgeschlossen wurden.

Zusätzlich traten während der Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter praktische Herausforderungen auf: Aufgrund der hohen Dilatanz der untersuchten Modellvibrationsfeuerbetone riss häufig das Messseil am Kugelauszugviskosimeter.

Um trotz dieser Einschränkungen eine aussagekräftige und effiziente Untersuchung der Vibrationsparameter sicherzustellen, wurde die statistische Versuchsplanung (JMP Version 18) eingesetzt. Innerhalb der realisierbaren Parameterkombinationen wurde eine optimierte Versuchsmatrix aufgestellt, die eine möglichst effiziente Abdeckung des Parameterraums gewährleistete. Dabei wurden alle Modellvibrationsfeuerbetone mit Amplituden zwischen 0,25 und 0,45 mm sowie Frequenzen von 40 bis 90 Hz getestet (Tabelle 5). Dies ermöglichte eine fundierte Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Vibrationsparametern und den Materialeigenschaften der Feuerbetone.

*Tabelle 5: Überarbeiteten Vibrationsparameterkombinationen.*

| A \ f   | 40 Hz                 | 50 Hz                 | 60 Hz                 | 70 Hz                 | 80 Hz                 | 90 Hz                 |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,25 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | Referenz              | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |
| 0,35 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |
| 0,45 mm | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV | 2 Versätze<br>x 3 KGV |

## 5.3.2 Kugelauszugviskosimeter

### 5.3.2.1 Messprinzip

Das Kugelauszugviskosimeter ermöglicht die Bestimmung der dynamischen Viskosität unter definierten Scherbedingungen. Die Methode basiert auf dem erweiterten Stokes'schen Gesetz, welches um die extern aufgebrachte Kraft (gemessen durch den Kraftsensor, siehe Abbildung 3) ergänzt wurde, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Während das klassische Stokes'sche Gesetz das Absinken einer Kugel in einem Fluid beschreibt, wurde es hier auf den vertikalen Auszug einer Kugel aus der Feuerbeton-Suspension angepasst.

Die Bestimmung der dynamischen Viskosität  $\eta$  erfolgt unter Verwendung der folgenden modifizierten Gleichung (5):

$$\eta = \frac{F_R \times \left(1 - 2,1 \times \frac{r_p}{R_w}\right)}{6\pi r_p v_s} \times \eta + \tau_0 \quad \text{Formel 5}$$

mit:

- $F_R = F_{\text{Messung}} - F_{\text{Offset}}$ , als effektive Reibungskraft
- $r_p$  = als Kugelradius,
- $r_w$  = als Radius der Wandabmessung,
- $v_s$  = als definierte Auszugsgeschwindigkeit der Kugel,
- $F_{\text{Messung}}$  = als gemessene Kraft während des Auszugs,
- $F_{\text{Offset}}$  = als Offsetkraft (Kraftmessung ohne Kugelbewegung).

Der Term  $\left(1-2,1 \times \frac{r_p}{R_W}\right)$  beschreibt die Faxensche Wandkorrektur, um die durch die Nähe der Kugel zur Wand verursachten Strömungsinteraktionen zu berücksichtigen.

Durch die Messung bei unterschiedlichen Auszugsgeschwindigkeiten kann die Scherratenabhängigkeit der dynamischen Viskosität detailliert untersucht werden. Die ermittelte Viskosität ist dabei stets spezifisch für die jeweilige Auszugsgeschwindigkeit, weshalb die Versuchsdaten zusätzlich mittels einer CFD-FEM-Simulation ausgewertet wurden. In dieser Simulation wurden sowohl die geometrischen Konstanten des Messsystems als auch versuchsspezifische Parameter wie Viskosität, Dichte und Geschwindigkeit berücksichtigt.

Die CFD-FEM-Simulation (Computational Fluid Dynamics und Finite Element Method) wird verwendet, um das rheologische Verhalten von Feuerbetonen zu berechnen, insbesondere um die Scherrate und die daraus abgeleitete dynamische Viskosität zu bestimmen. In diesem Ansatz wird das experimentelle Messsystem durch eine dreidimensionale Simulation ergänzt, die die Interaktionen zwischen der Kugel und dem umgebenden Fluid modelliert. Bei der Simulation wird die Bewegung der Kugel im Fluid berücksichtigt, wodurch ein Geschwindigkeitsfeld entsteht. Dieses Geschwindigkeitsfeld zeigt eine nach oben gerichtete Strömung in kugelnahen Bereichen (dargestellt in hellblau bis rot) und eine abwärts gerichtete Strömung in wandnahen Bereichen (Abbildung 4 dunkelblau).

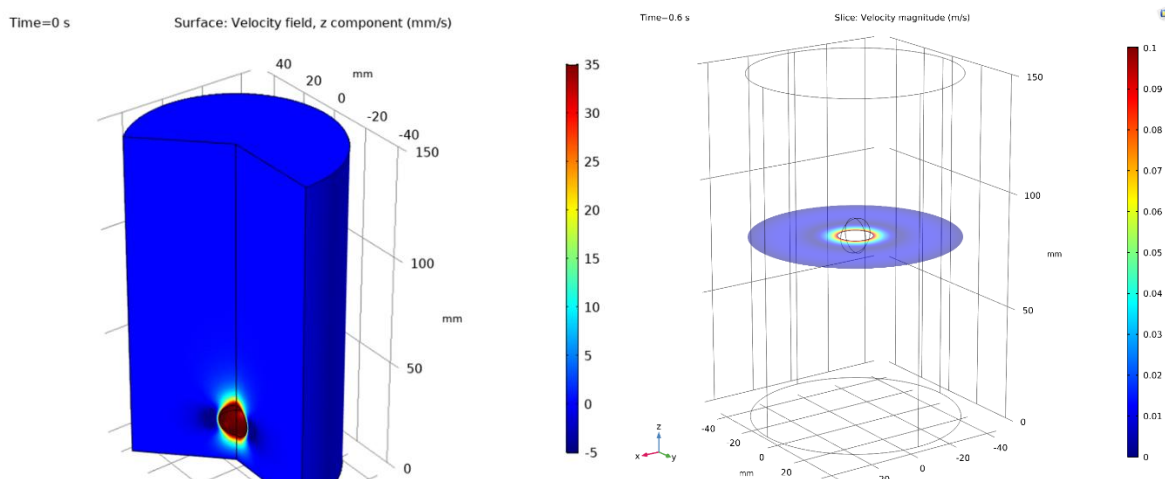


Abbildung 4: CFD-FEM-Simulation des Kugelauszugsversuchs. Links: Schnittbild des Geschwindigkeitsprofils, Kugel: transparent (wirkt rot), Fluid: blau. Rechts: Äquatoriale Scherebene der Kugel.

Die Scherrate wird innerhalb der äquatorialen Scherebene der Kugel bestimmt, die als Scherspalt definiert ist. In dieser Ebene zeigt die Simulation ein Scherratengefälle: In der Nähe der Kugel sind die Scherraten am höchsten, sie sinken mit zunehmendem Abstand vom Zentrum und steigen wieder in der Nähe der Wand an. Besonders bemerkenswert ist, dass die Scherrate in keinem Bereich den Wert  $0 \text{ s}^{-1}$  erreicht. Dies weist darauf hin, dass der Abstand zwischen der Messkugel und der Wand einen entscheidenden Einfluss auf die Scherrate hat, was in traditionellen Methoden, die keinen Scherspalt definieren, oft nicht berücksichtigt wird.

Die CFD-FEM-Simulation liefert also Erkenntnisse darüber, wie sich die Scherrate in Abhängigkeit von der Geometrie des Systems und den Fließbedingungen verändert, und ermöglicht eine präzise Bestimmung der rheologischen Eigenschaften, die durch die Auszugsgeschwindigkeit und andere Parameter beeinflusst werden. Durch diese simulationsbasierte Herangehensweise wird eine detaillierte Analyse des Fließverhaltens von Fluids ermöglicht, die in experimentellen Messungen alleine nur schwer erfasst werden kann.

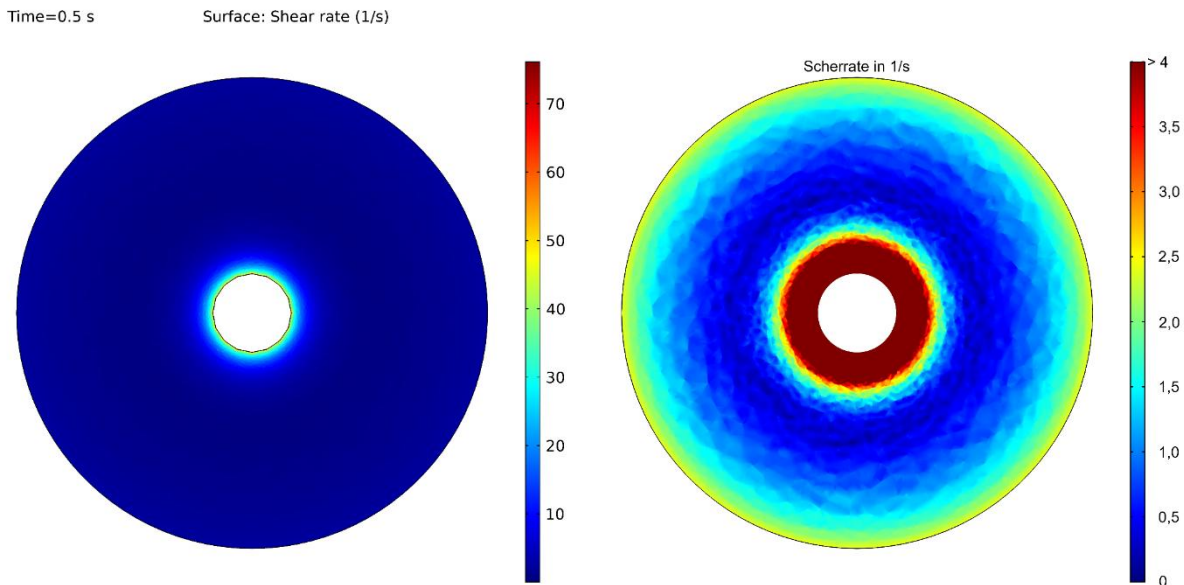


Abbildung 5: CFD-FEM-Simulation des Kugelauszugversuchs. Links: Schnittbild des Geschwindigkeitsprofils. Rechts: Äquatoriale Scherebene der Kugel.

Um eine Messmethode zu etablieren, die die Scherrate in Abhängigkeit der Versuchsparameter wie der dynamischen Viskosität, Dichte des Feuerbetons und der Auszugsgeschwindigkeit der Messkugel bestimmt, wurde im IGF-Vorhaben 21830 N eine umfangreiche Datenbank aufgebaut. Dafür wurden CFD-FEM-Simulationen des Kugelauszugversuchs unter Variation der relevanten Versuchsparameter durchgeführt. Die Dichte des Fluids wurde dabei zwischen 1000 und 3500 kg/m<sup>3</sup> und die dynamische Viskosität zwischen 0,1 und 5000 Pa\*s variiert, während die Kugelauszugsgeschwindigkeit von 1 bis 450 mm/s reichte. Insgesamt wurden 6048 Simulationen durchgeführt, um eine belastbare Datenbasis zu schaffen.

Die Auswertung der Simulationen zeigte, dass die Scherrate mit der Auszugsgeschwindigkeit ebenso linear ansteigt wie bei den Selbstfließern, während die Dichte und die dynamische Viskosität nur einen marginalen Einfluss auf die Scherrate haben. Diese Variationen in Dichte und Viskosität führten zu einer maximalen Abweichung von  $\pm 3 \%$ , was als sehr gering angesehen wird. Diese geringe Abweichung wurde in die Messungenauigkeit bei der Bestimmung der scherratenabhängigen dynamischen Viskosität integriert. Anschließend wurden Kombinationen von Versuchsparametern aus der Datenbank entfernt, die für Feuerbetone als weniger zutreffend gelten, insbesondere solche mit geringen Dichten oder Viskositäten.

Der resultierende lineare Zusammenhang zwischen Scherrate und Auszugsgeschwindigkeit, der in Abbildung 6 für Selbstfließer dargestellt wird, zeigt, dass die dynamische Viskosität für jede Auszugsgeschwindigkeit und Dichte variiert. Die Dichte hat nur einen marginalen Einfluss auf die Scherrate, sodass dieser Einfluss praktisch vernachlässigbar ist. Dank dieses linearen Zusammenhangs kann die gewünschte Scherrate direkt bei der Bestimmung der dynamischen Viskosität eingestellt werden, was eine schnelle und präzise Analyse der rheologischen Eigenschaften des Materials ermöglicht.

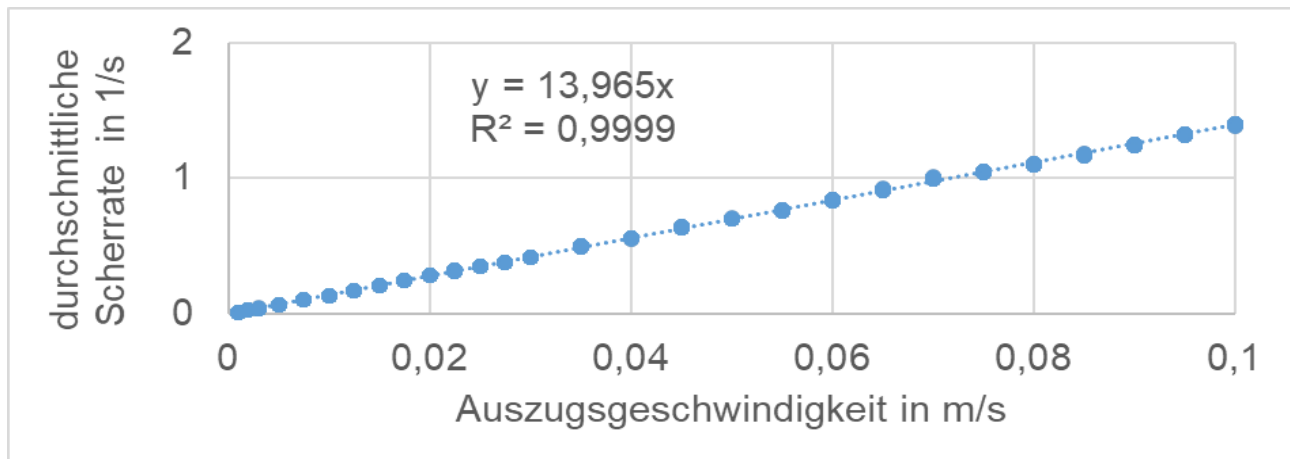


Abbildung 6: Allgemeine durchschnittliche Scherrate in Abhängigkeit der Auszugsgeschwindigkeit. Die dynamischen Viskositäten variieren für jede Auszugsgeschwindigkeit (und Dichte) und nehmen Werte von 0,5 - 5000 Pa\*s an. Die Fluid-dichten variieren für jede Auszugsgeschwindigkeit (und dynamische Viskosität) und nehmen Werte von 2500 - 3500 kg/m<sup>3</sup> an. Die durchschnittliche Scherrate variiert in Abhängigkeit der Dichte marginal, sodass deren Einfluss auf die durchschnittliche Scherrate nahezu vernachlässigbar ist.

Durch die Kombination aus direkter Kraftmessung und numerischer Simulation stellt das Kugelauszugviskosimeter eine präzise Methode zur Bestimmung der scherratenabhängigen dynamischen Viskosität dar. Im IGF-Vorhaben 21830 N konnte durch das Kugelauszugviskosimeter die scherratenabhängige dynamische Viskosität von selbstfließenden Feuerbetonen erfolgreich bestimmt werden. Für die Messung von Vibrationsfeuerbetonen wird ein Vibrationstisch ergänzt und der Linearmotor mit Kraftsensor vom Tisch entkoppelt.

### 5.3.3 3D-Ausbreitmaß

Im Rahmen des vorliegenden IGF-Projekts wurde an der Hochschule Koblenz das im IGF-Vorhaben 21830 N entwickelte 3D-Messverfahren zur rheologischen Charakterisierung von Vibrationsfeuerbetonen (VFB) gezielt weiterentwickelt. Ziel war die kontinuierliche, kontaktfreie und hochpräzise Erfassung des 3D-Ausbreitmaßes unter praxisnahen Vibrationsbedingungen.

#### 5.3.3.1 Messprinzip

Die rheologischen Parameter wurden mit Hilfe einer industriellen Bildverarbeitungseinheit (Keyence, Modell CA-DQP25X in Verbindung mit Controller CV-H1X) erfasst, die auf dem Prinzip der Streifenprojektion basiert. Dabei projizieren acht integrierte Projektoren eine definierte Lichtstruktur auf die Oberfläche der Probe. Eine Kamera erfasst die entstehenden Deformationen dieser Lichtstruktur, aus denen die Software eine dreidimensionale Punktwolke generiert (Abbildung 7). Die zeitaufgelöste 3D-Erfassung adressiert die Limitierung konventioneller Konsistenz-Endpunktprüfungen, da erst der Verlauf von Geometriegrößen (z. B.  $d(t)$ ,  $h(t)$ ) eine objektivierbare Bewertung der Fließkinetik und damit eine belastbarere rheologische Interpretation ermöglicht [18–22]. Zur Minimierung von Schattenbildungen und Reflexionseffekten wurde die Kamera in einem festen Abstand von 300 mm zur Projektionsfläche positioniert. Der Referenzabstand zwischen Lichtquelle und Messoberfläche betrug 250 mm, wodurch sich ein optimaler Erfassungsbereich von 250 × 250 mm ergab.

Die Ansteuerung der Vibrationsparameter erfolgte über einen computergesteuerten Rütteltisch (Modell VE10002, Knauer Engineering GmbH). Nach dem mechanischen Aufbau und der elektrischen Verkabelung gemäß Schaltplan wurde die Bildverarbeitungssoftware entsprechend konfiguriert und das Gesamtsystem durch eine Kalibrierung auf die definierte Messgeometrie abgestimmt. Diese Kalibrierung stellte die Grundlage für die präzise Erfassung dynamischer Topografieänderungen während des Fließvorgangs dar.

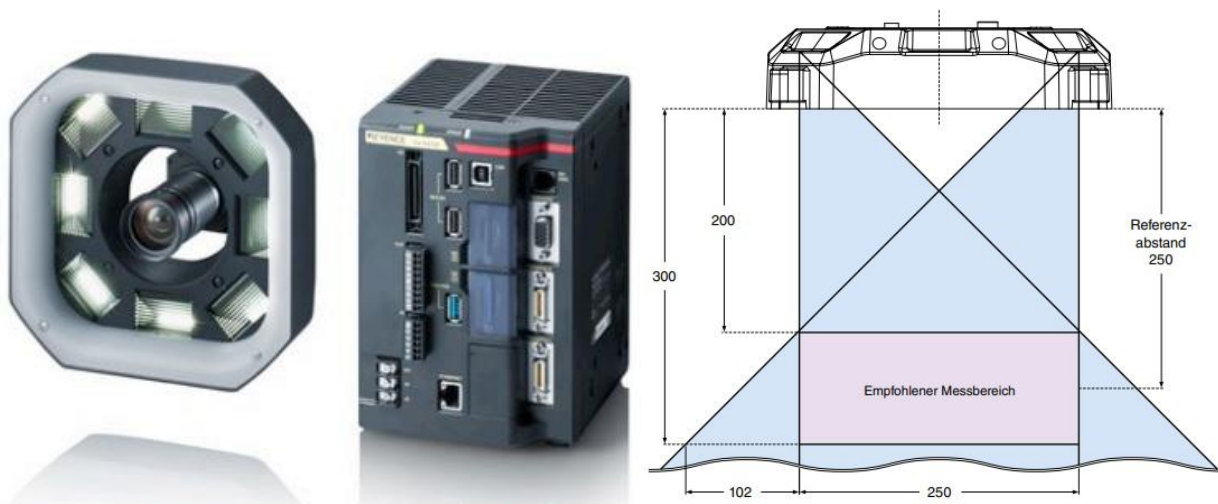


Abbildung 7: Bildverarbeitungsplattform der Keyence Corporation, links: Flächenscanner mit Projektoren, Modell CA-DQP25X, rechts: Controller, Modell CV-H1X. Links Schematische Darstellung der Streifenprojektionsbeleuchtung CA-DQP25X.

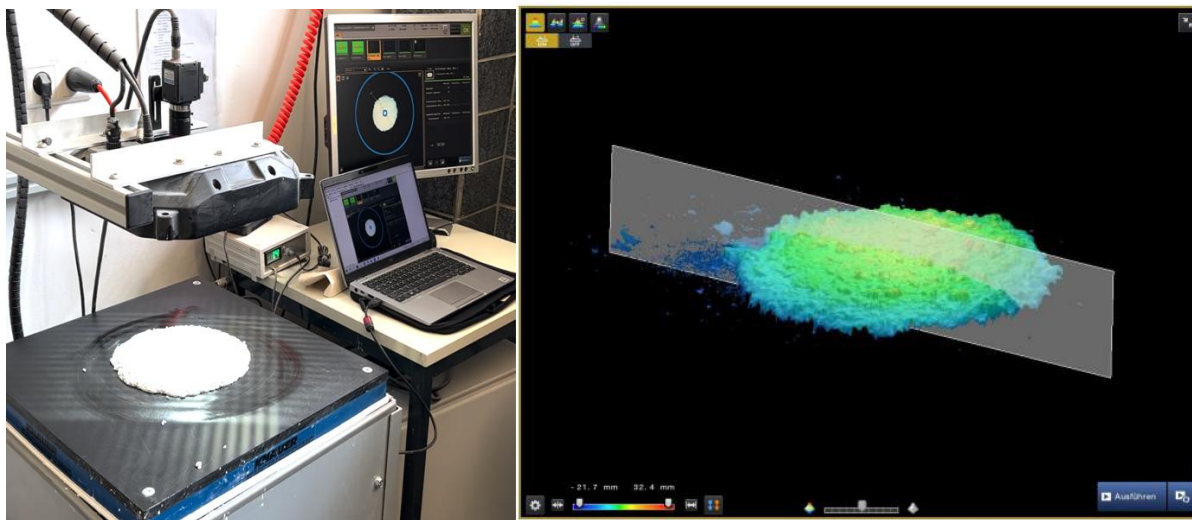


Abbildung 8: Erfassung der 3D-Topografie einer Vibrationsfeuerbeton-Probe (VFB). Links: Versuchsaufbau während einer Messung auf dem Rütteltisch. Rechts: Digitale Auswertung in Falschfarbendarstellung mit überlagerten Höhenlinien zur Darstellung der dynamischen Topografieveränderungen.

Die Erfassung und Analyse der Fließvorgänge erfolgte auf Grundlage einer zeitlich aufgelösten Bildsequenz mit einem Aufnahmeintervall von zwei Sekunden. Die Software ermöglichte die unmittelbare Messung des Ausbreitungsdurchmessers und der maximalen Schichthöhe und die vollständige digitale Rekonstruktion der dreidimensionalen Topografie der Probenoberfläche (Abbildung 8).

### 5.3.3.2 Berechnung rheologischer Parameter aus dem 3D-Ausbreitmaß

Zur Auswertung der rheologischen Eigenschaften wurde die zeitabhängige Veränderung des Ausbreitmaßes analysiert (Abbildung 9). Um eine reproduzierbare Anfangsbedingung sicherzustellen, wurde die Vibration vier Sekunden nach Beginn der Kameraaufzeichnung gestartet. Die resultierende Kurve zeigt die kontinuierliche Zunahme des Ausbreitdurchmessers mit der Zeit. Der Anfangswert der Kurve beträgt 100 mm und entspricht dem unteren Durchmesser der verwendeten Metallform zur Ausbreitmaßbestimmung. In der Darstellung sind der Beginn der Bewegung (Sekunde 4) und das Ende der Fließphase (Sekunde 24) entsprechend markiert.

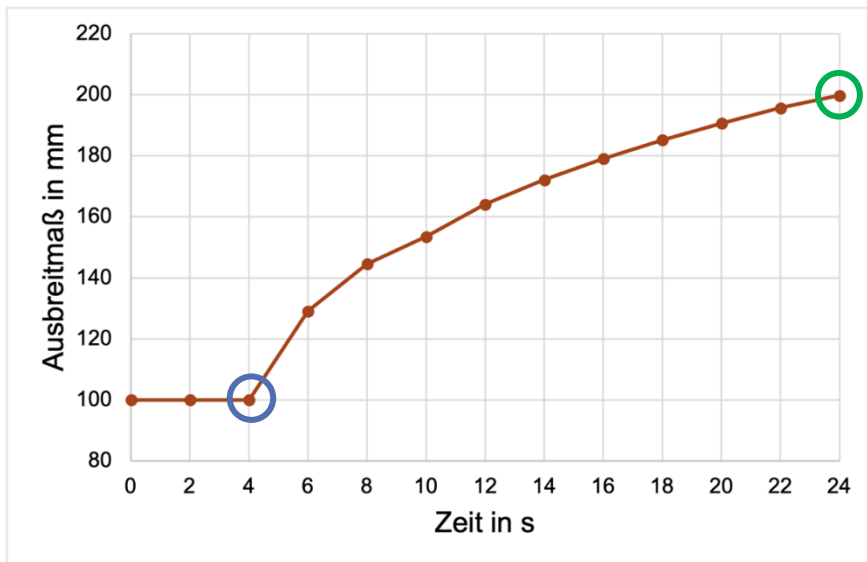


Abbildung 9 Zeitliche Entwicklung des Ausbreitmaßes während des 20-sekündigen Fließvorgangs. Der blaue Kreis markiert den Beginn der Vibration und somit den Start der Fließbewegung in Sekunde 4, der grüne Kreis kennzeichnet das Ende der Vibration und die Erfassung des Endwerts des 3D-Ausbreitmaßes in Sekunde 24.

Zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften wurde die momentane Fließgeschwindigkeit  $v_i$  in Abhängigkeit von der Zeit berechnet. Dabei wurde angenommen, dass sich die Probe während der Vibration homogen und kreisförmig ausbreitet. Die Berechnung erfolgte gemäß Gleichung (6):

$$v_i = (d_{i+1} - d_i) / 2(t_{i+1} - t_i) \quad \text{Formel 6}$$

mit  $v_i$ : Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t_i$  in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $(d_{i+1} - d_i)$ : Differenz des Fließmaßes zweier aufeinanderfolgender Messpunkte in m und  $(t_{i+1} - t_i)$ : zeitliche Differenz zweier aufeinanderfolgender Messpunkte in s. Anhand dieser Methodik wurde für jede Probe ein Fließgeschwindigkeitsprofil erstellt (vgl. Abbildung 10). Diese Parameter ermöglichen eine differenzierte Bewertung des Fließverhaltens verschiedener Rezepturen.

Zur Veranschaulichung der eingesetzten Messtechnik und Auswertungsmethodik sind in den Abbildungen 10 und 11 exemplarische Darstellungen zu sehen. Abbildung 10 zeigt das zeitabhängige Profil der Fließgeschwindigkeit und verdeutlicht, wie die maximale Fließgeschwindigkeit sowie charakteristische Zeitpunkte des Abklingverlaufs ermittelt werden können. Abbildung 11 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit und den gleichzeitig bestimmten Ausbreitmaß. Beide Diagrammtypen sind als Musterbeispiele zu verstehen und dienen der methodischen Darstellung. Sie bilden die Grundlage für spätere Auswertungen, in denen untersucht wird, ob kinetische Kenngrößen wie die maximale Fließgeschwindigkeit mit dem erreichten Ausbreitmaß korrelieren und somit als prädiktive Parameter herangezogen werden können. Der zeitliche Verlauf von  $v(t)$  kann dabei (neben Dilatanz/Sedimentationseffekten) auch thixotrope Strukturabbau-/Strukturaufbau-Prozesse widerspiegeln, die als relevante Kenngröße zur Beschreibung der Frischbetonrheologie und Verarbeitungsstabilität diskutiert werden [24].

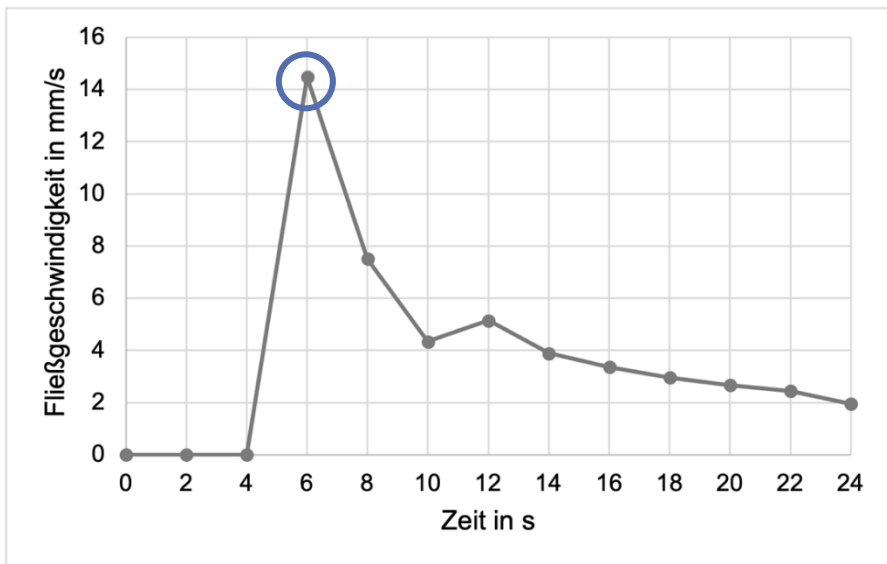


Abbildung 10: Das Fließgeschwindigkeitsprofil der Rezeptur FB0,31\_MS dient als Beispiel. Die maximale Fließgeschwindigkeit ist durch einen blauen Kreis bei 6 s markiert.

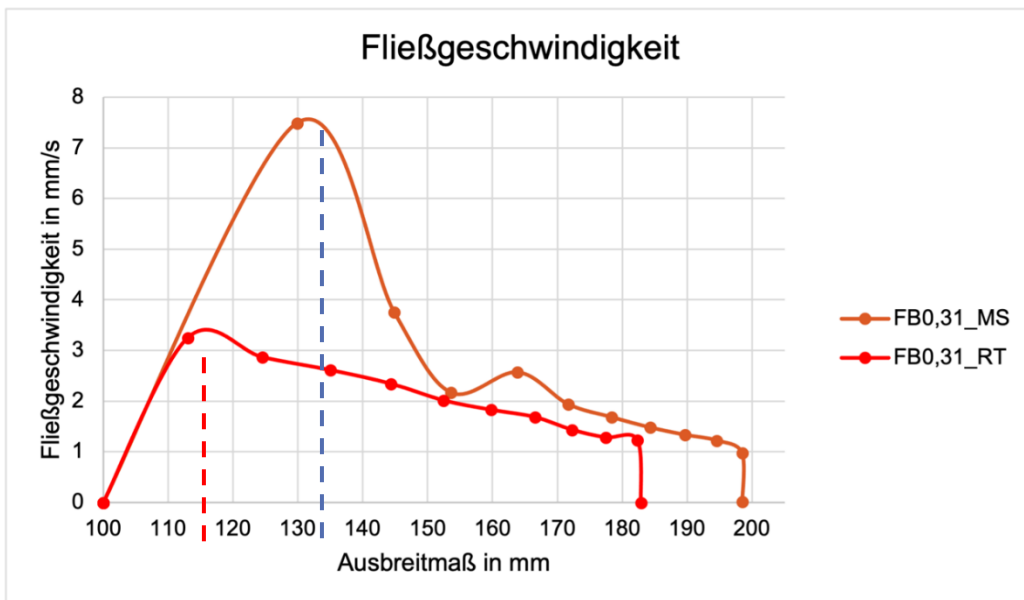


Abbildung 11: Darstellung der Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Ausbreitmaß für zwei exemplarische Versätze mit  $q=0,31$ , jeweils mit (blau) und ohne Mikrosilika (rot). Die Kurven dienen als Musterbeispiel zur Veranschaulichung der Auswertung, bei der Fließgeschwindigkeiten mit den zugehörigen Ausbreitmaßen verknüpft werden.

### 5.3.4 Fließgrenzenbestimmung mit Hilfe einer Baumesszelle

Die Fließgrenze wird als diejenige Schubspannung definiert, ab der ein zunächst ruhendes Partikelgefüge in Bewegung übergeht. Unterhalb dieser Grenze verhält sich das Material wie ein Festkörper, während es oberhalb fließfähiges Verhalten zeigt. Für Vibrationsfeuertemente stellt die Fließgrenze damit eine zentrale Kenngröße dar, um die Verarbeitbarkeit zu beurteilen und die erforderlichen Prozessparameter wie Vibrationsintensität oder Frequenz auszulegen.

Zur Charakterisierung der Fließgrenze wurde zunächst der Einsatz eines Oszillations-Plattenrheometers geprüft. Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses zwischen Spaltweite und maximaler Korngröße erwies sich diese Methode jedoch als ungeeignet. Für eine zuverlässige rheologische Bestimmung wird ein Verhältnis von mindestens 10 zwischen Spaltweite und größtem Korn gefordert. Bei

einer maximalen Korngröße von 6 mm wäre somit eine Spaltweite von mindestens 60 mm erforderlich gewesen, was mit dem vorhandenen Plattensystem nicht realisierbar war. Eine zu geringe Spaltweite führt zu Randraubung, Partikelblockaden und zu verfälschten Messergebnissen.

Daher wurde die Baumesszelle des HAAKE MARS 40 (Firma Thermo Scientific) in Kombination mit dem Rotor R 29,5 mm (Abbildung 12) eingesetzt. Diese Geometrie ermöglicht eine präzise und reproduzierbare Messung der Fließgrenze, auch bei Suspensionen mit grober Kornfraktion.



*Abbildung 12: Baumesszelle HAAKE Mars 40 mit Rotor R29,5 mm und Probenbehälter.*

Hierbei wurde die etablierte Testmethode der Schubspannungs-Amplituden-Sweep unter ansteigender Schubspannung bei konstanter Frequenz angewendet. Dabei findet eine Auflösung der mechanischen Struktur infolge der zunehmenden Schubspannung statt. Die Messung erfolgt über 20 logarithmisch verteilte Spannungsstufen bis zu einer Schubspannung von 100 Pa, wobei bei besonders stabilen Proben ggf. bis zu einer Schubspannung von 130 Pa gemessen wurde. Die Bestimmung der Fließgrenze setzt das Vorliegen eines linear viskoelastischen Bereichs (LVE) voraus, in dem  $G' > G''$  gilt. Der Schnittpunkt  $G' = G''$  definiert demnach die eigentliche Fließgrenze  $\tau_0$  (Abbildung 13). An dieser Stelle vollzieht sich der Übergang des Materialverhaltens von einem überwiegend elastisch dominierten zu einem überwiegend viskos dominierten Zustand.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Fließgrenze kein absoluter Materialkennwert ist, sondern als relativer Vergleichswert innerhalb der rheologischen Charakterisierung dient. Ihre Aussagekraft entfaltet sie insbesondere im direkten Vergleich unterschiedlicher Rezepturen, sofern diese unter identischen Prüfbedingungen untersucht werden.

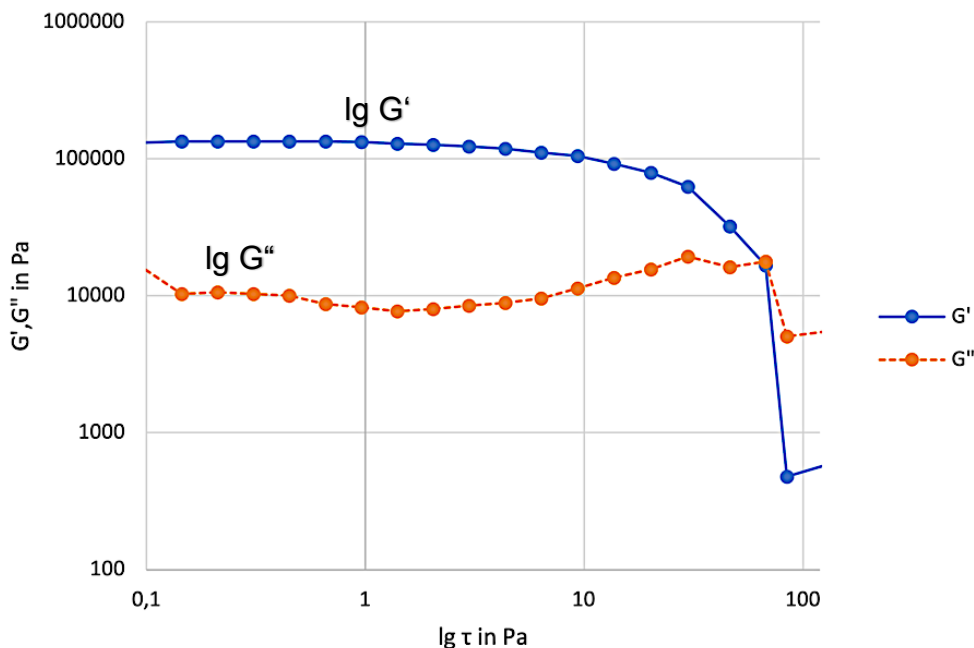


Abbildung 13: Amplitudentest als Funktion der Schubspannung. Die Fließgrenze  $\tau_f$  ist durch den Schnittpunkt der Modulkurven  $G'$  und  $G''$  definiert. Voraussetzung ist, dass im linear viskoelastischen Bereich  $G' > G''$  gilt.

## 5.4 Untersuchung der Abbindekinetik

Im Zuge der Versatzentwicklung wurde die Abbindekinetik aller Modellvibrationsfeuerbetone mittels Bestimmung der Schallgeschwindigkeit untersucht. Alle Messungen erfolgten mit dem Ultraschall-Messsystem ULTRATEST IP-8 unter definierten und konstanten Umgebungsbedingungen im Klimaschrank (20 °C, 95 % rel. Feuchte). Die Schallgeschwindigkeit wurde alle 30 s über mindestens 48 h an zylindrischen Formen gemessen. Dieses Verfahren basiert auf der Tatsache, dass physikalische Veränderungen im abbindenden Feuerbeton – insbesondere Festigkeitszunahmen – zu Veränderungen der Schallgeschwindigkeit führen, wodurch eine Korrelation zwischen der Schallgeschwindigkeit und dem Ansteifen der Feuerbetonprobe hergestellt werden kann.

## 5.5 Untersuchungen der Einseizeigenschaften

### 5.5.1 Grüneigenschaften

#### 5.5.1.1 Festigkeit

Die Kaltbiegefestigkeit wurde gemäß DIN EN 993-6 an Format-D-Prüfkörpern (40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup>) nach DIN EN ISO 1927-4 im Dreipunktbiegeversuch ermittelt. Die Probekörper wurden bei 110 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Es wurden jeweils drei Proben pro Messpunkt geprüft; angegeben werden Mittelwert und absolute Messabweichung. Die Belastung wurde mit einer materialabhängigen Belastungsrate (gemäß Normtabelle) bis zum Bruch aufgebracht und die maximale Bruchkraft erfasst.

#### 5.5.1.2 Offene Porosität

Die Messung der offenen Porosität wurde gemäß DIN EN 993-1 an halben Format-"D"-Prüfkörpern vorgenommen wie in ISO 1927-4 definiert. Die Rohdichte und die offene Porosität wurden mittels des Archimedes-Wasserauftriebsverfahrens (Wägungen im trockenen, wassergesättigten und eingetauchten Zustand) bestimmt. Dabei wurden ebenfalls jeweils drei Proben pro Messpunkt geprüft und Mittelwert und absolute Messabweichung angegeben.

## 5.5.2 Untersuchungen der Hochtemperatureigenschaften

### 5.5.2.1 Temperaturwechselbeständigkeit

Die Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit erfolgte nach DIN EN 993-11 Methode B, Luftabschreckung mit anschließender Ultraschallmessung.

### 5.5.2.2 Korrosionsbeständigkeit

Die Korrosionsbeständigkeit wurde anhand von Tiegeltests mit Stahl (ST37, Baustahl) und synthetische Schlacke in Anlehnung an Elektrolichtbogenofenschlacke (Tabelle 6) untersucht.

*Tabelle 6: Zusammensetzung der für die Korrosionstiegeltest verwendeten Schlacke.*

| Komponente                     | Gew.-% |
|--------------------------------|--------|
| CaCO <sub>3</sub>              | 67     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 23     |
| SiO <sub>2</sub>               | 7      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4      |

Die Tiegel aus den Vibrationsfeuerbetonen wurden nach dem Gießen 24 h getrocknet und bei 1200 °C vorgebrannt. Die Untersuchung wurden mit einer Heizrate von 5 K/min für eine Haltezeit von 5 h bei 1650 °C durchgeführt. Das Gewichtsverhältnis von Stahl zu Schlacke war ca. 4,3.

## 6 Ergebnisse und Diskussion

Es wurden zunächst die beiden Methoden zur Messung der rheologischen Eigenschaften, Kugelauszugviskosimeter und 3D-Ausbreitmaß, umgebaut, um diese für die Messungen unter Vibration zu ertüchtigen, und die Methoden unter Vibration durch Messungen an Modellvibrationsfeuerbetonen validiert. Das Kugelauszugviskosimeter wurde an Wasser validiert. Um das mit den Methoden ermittelte neue Wissen zu beschreiben, wird in Kapitel 6.2 auf den Einfluss der Korngrößenverteilung bei Standardvibrationsbedingungen und in Kapitel 6.3 auf den konsolidierten Einfluss von Korngrößenverteilung und Vibration eingegangen. Abschließend werden der Einfluss von Temperatur und Mischenergie diskutiert.

### 6.1 AP 1 - Umbau der Messmethoden für den Einsatz von Vibration

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden das Kugelauszugviskosimeter und die 3D-Ausbreitmaßmessung konstruktiv und messtechnisch so modifiziert, dass sie für Untersuchungen unter Vibration einsetzbar sind. Hierzu wurden beide Systeme mit einem Vibrationstisch gekoppelt, der eine Einstellung der Vibrationsparameter in einem weiten Bereich erlaubt. Es wurde eine Software für das Kugelauszugviskosimeter aufgesetzt. Beide FE setzten den gleichen Vibrationstisch ein.

#### 6.1.1 Kugelauszugviskosimeter

Das neue Kugelauszugviskosimeter basiert auf dem im IGF-Vorhaben IGF 21830 N entwickelten System bestehend aus einer Linearmotorachse, an der eine Kraftmessdose angebracht ist (Abbildung 14). An der Kraftmessdose ist durch ein Messseil die Messkugel befestigt, die aus der zu untersuchenden Probe – dem Vibrationsfeuerbeton – ausgezogen wird. Während des Kugelauszugs mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit wird die Kraft gemessen, die erforderlich ist, um die Kugel vertikal durch das Material zu bewegen.

Da der Kraftsensor empfindlich auf Erschütterungen reagiert, wurde die Linearmotorachse samt Kraftmessdose entkoppelt und separat an der Wand befestigt. Der einzige Kontakt zwischen Kraftdose und Vibration besteht somit über die eingetauchte Kugel im vibrierenden Fluid. Trotz dieser Entkopplung traten jedoch – unabhängig vom untersuchten Material (Vibrationsfeuerbeton oder Wasser) – starke Oszillationen in den Messsignalen auf.

Es wurde angenommen, dass die reale dynamische Viskosität dem Mittelwert der Oszillationen entspricht. Eine Glättung der Kurve war erforderlich, musste jedoch unter Berücksichtigung des Abtasttheorems der Fourier-Analyse erfolgen: Die Abtastfrequenz  $f_A$  muss größer als das Zweifache der Signalfrequenz  $f_S$  sein ( $f_A > 2 \times f_S$ ). Die ursprüngliche Messsignalfrequenz war jedoch niedrig (~ 40 Hz). Eine Anpassung der Software war zunächst nicht möglich. Ein externer Dienstleister führte daher eine Schnittstellenanalyse durch und entwickelte auf Kosten der FE 1 (ungefördert) eine neue Softwarelösung. Mithilfe einer Taktfrequenz von 1000 Hz wurden die jeweiligen Positions- und Kraftwerte über eine Ethernet-Verbindung am Controller abgefragt. Aufgrund der begrenzten Verarbeitungsgeschwindigkeit der Schnittstelle konnte eine maximale Antwortfrequenz von 400,98 Hz über den gesamten Testzeitraum erreicht werden. Dank dieser neuen Antwort- bzw. Messsignalfrequenz wird das Abtasttheorem der Fourier-Analyse bei 100 Hz (= Maximale Frequenz des Vibrationstisches) erfüllt, wodurch eine zuverlässige Glättung der Messkurve möglich war.

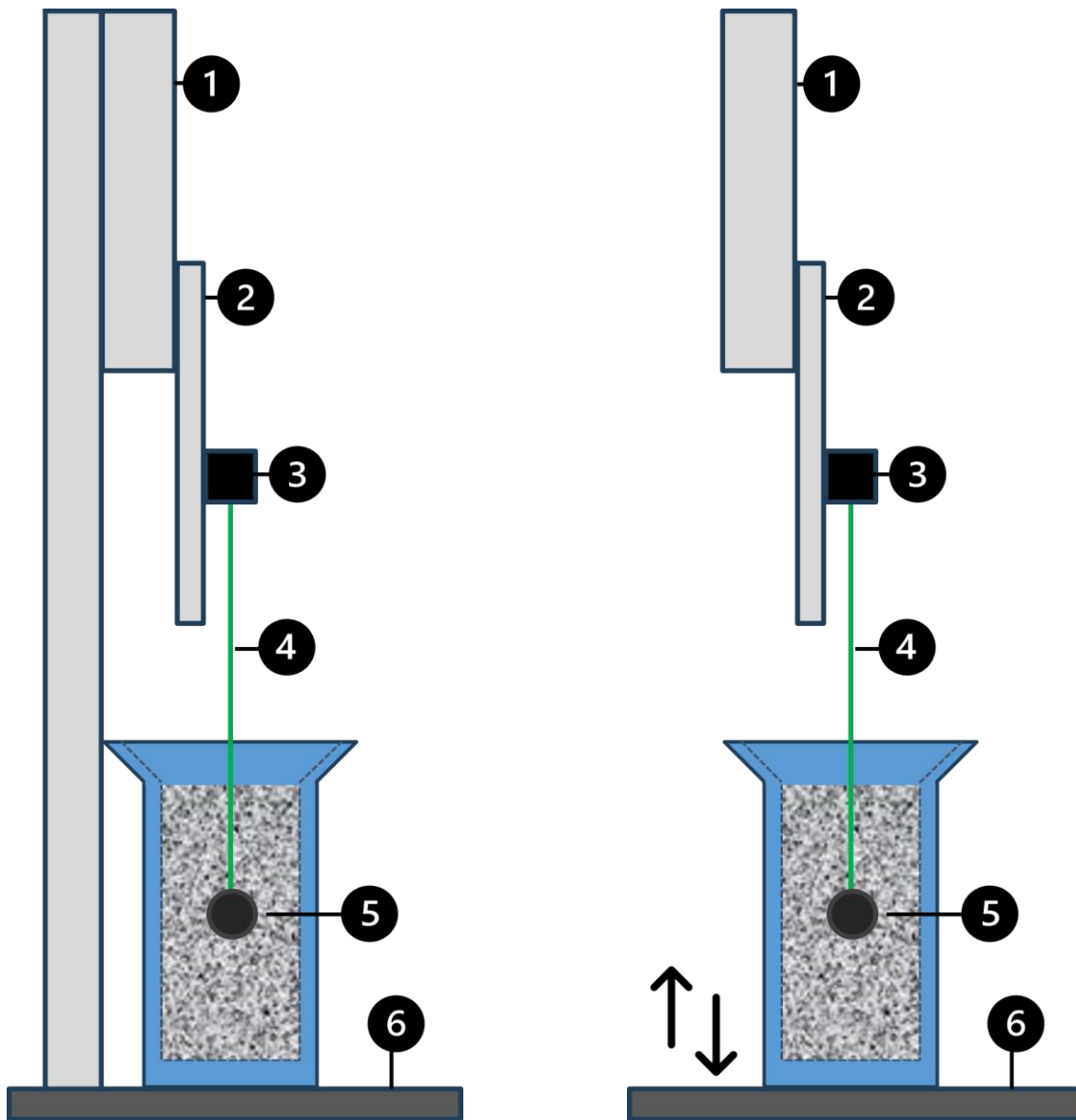


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Kugelauszugsviskosimeters für Selbstfließbeton (links) und für Vibrationsfeuertbeton unter Einsatz von Vibration (rechts) mit (1) Tisch- bzw. Wandhalterung, (2) Linearmotor, (3) Kraftsensor, (4) Messseil, (5) Kugel, (6) vibrationsisolierender bzw. Vibrationstisch.

### 6.1.2 Validierung der am Kugelauszugsviskosimeter unter Einsatz von Vibration gemessenen Dynamischen Viskosität anhand zementfreien Vibrationsfeuertbetonen

Zur Validierung des Kugelauszugsviskosimeters unter Vibration wurden die Auswirkungen der Vibration die Messgenauigkeit der dynamischen Viskosität von Vibrationsfeuertbeton untersucht. Dazu wurden nach den Umbauten des Kugelauszugsviskosimeters Messungen an Modellvibrationsfeuertbetonen mit erhöhtem Wassergehalt (5,5 Gew.-%) durchgeführt (Abbildung 15). Dabei traten Messartefakte auf, die sich in drei Hauptkategorien einteilen lassen:

#### 1. Bodeneffekte

Bodeneffekte entstehen durch makroskopische Massenbewegungen am Boden des Behälters während der Vibration. Beim initialen Anheben der Kugel entsteht unter ihr ein Niederdruckbereich, in den Material nachströmt. Dies erzeugt eine Gegenkraft zur Hubbewegung der Kugel, wodurch die

gemessene Hebekraft steigt. Dies kann fälschlicherweise auf eine erhöhte dynamische Viskosität des Fluids hinweisen, obwohl der Effekt eine Folge der Massenzirkulation am Behälterboden ist.

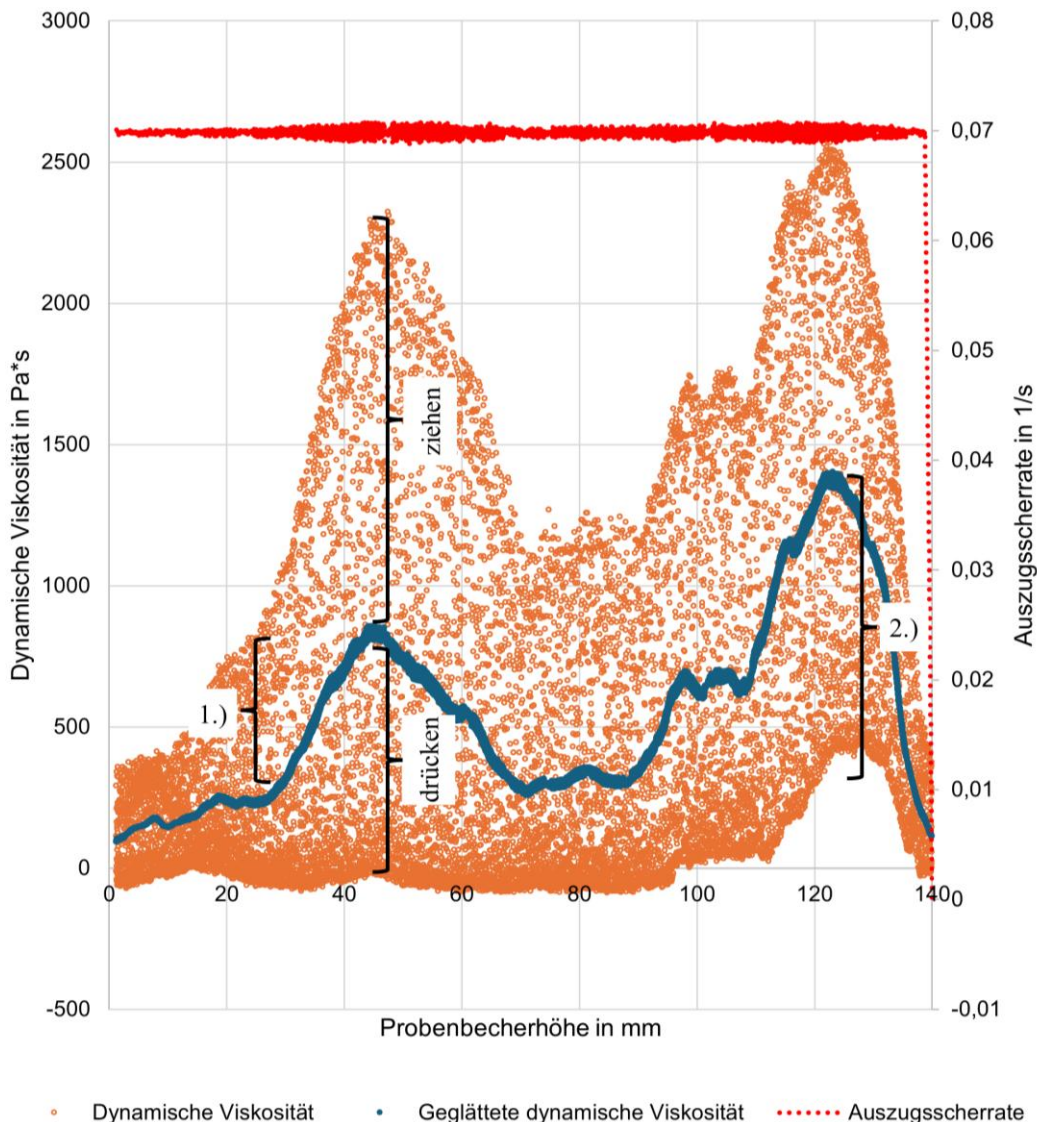


Abbildung 15: Dynamische Viskosität von FB0,31-RT in unterschiedlichen Probenbecherbereichen bei einer Vibration von 0,25 mm und 50 Hz. 1.) Bodeneffekte, 2.) Oberflächeneffekte. Die Vibration erzeugt während der Messung ein abwechselndes ziehen und Drücken am Kraftsensor, was zur Oszillation der Messsignale führt.

## 2. Oberflächeneffekte

Oberflächeneffekte treten durch die Oberflächenspannung des zu untersuchenden Materials auf, die eine zusätzliche Kraft erfordert, um die Kugel durch die obere Schicht des Materials zu ziehen. Im Falle von Vibrationsfeuerbetonen kann eine partielle Trocknung der Oberfläche diesen Effekt verstärken. Auch hier führt dies zu einer scheinbar erhöhten Viskosität, die nicht der realen dynamischen Viskosität des Fluids entspricht.

Um diese Artefakte zu vermeiden, wurden nur Messungen in mittlerer Höhe des Behälters als repräsentativ für die tatsächliche dynamische Viskosität gewertet.

## 3. Rauscheffekte durch Oszillation

Durch die Oszillation des Systems entstehen erhebliche Signalstörungen, die zu Standardabweichungen von über 100 % führen können. Diese Schwankungen sind darauf zurückzuführen, dass

die Kugel während der Vibration permanent durch kleine Impulse in unterschiedliche Richtungen bewegt wird. Dadurch wird abwechselnd an der Kugel gezogen (erhöhte dynamische Viskosität) oder sie wird hochgedrückt (reduzierte bis negative dynamische Viskositäten).

Um diesen Effekt zu kompensieren, wurde postuliert, dass die reale dynamische Viskosität im Mittel der oszillierenden Werte liegt. Daher wurde eine Glättung der Daten vorgenommen, um das Signalrauschen zu reduzieren, ohne die Messwerte zu verfälschen. Zur Verifikation wurde deionisiertes Wasser bei 20 °C ohne und mit Vibration (Amplitude: 0,25 mm; Frequenz: 50 Hz) untersucht bei Auszugsgeschwindigkeiten von 5–100 mm/s (entsprechend Scherraten von ca. 0,07–1,4 1/s). Ein Vergleich der Messungen zeigt, dass zwar aufgrund der sehr geringen dynamischen Viskosität ein hoher Fehler auftritt, die geglätteten Werte jedoch mit den Messungen ohne Vibration übereinstimmen. Dies bestätigte, dass die Glättung der Oszillation die Messwerte nicht verzerrt und zuverlässige Messungen auch unter Vibrationsbedingungen möglich sind.

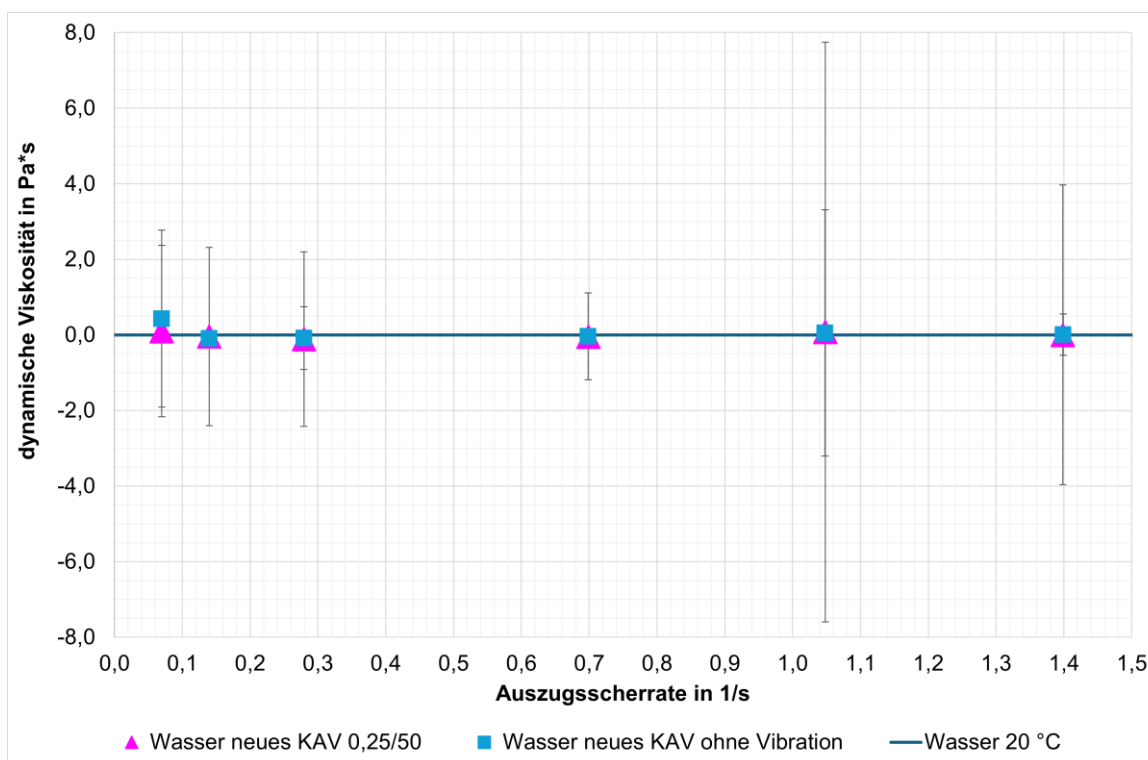


Abbildung 16: Vergleichende Messungen der dynamischen Viskosität von deionisiertem Wasser bei 20 °C bei Scherraten von 0,07-1,4 m/s mit Vibration (Amplitude = 0,25 mm, Frequenz = 50 Hz, pinke Dreiecke) und ohne Vibration (blaue Rechtecke). Da Wasser ein newtonsches Fluid ist, sollte die dynamische Viskosität in der Theorie bei 0,001 Pa\*s liegen (blaue Linie).

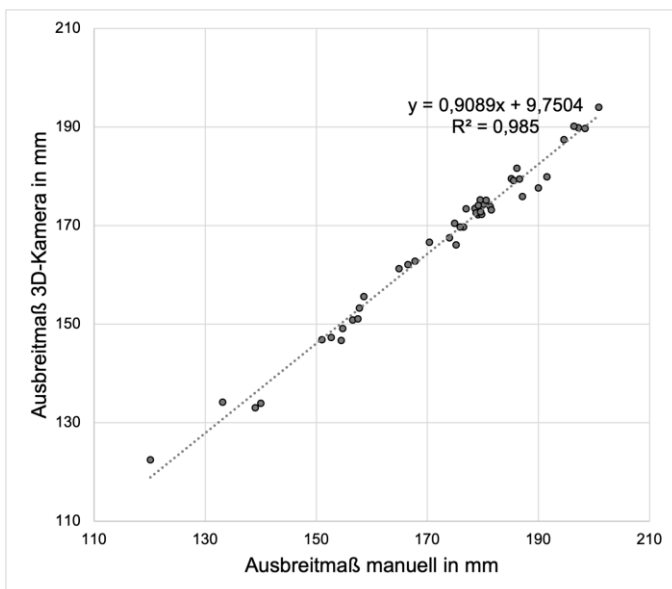
Obwohl das Kugelauszugviskosimeter unter Vibration valide Messwerte liefert, gibt es Grenzen der Methode. Hohe dynamische Viskositäten, Bodeneffekte, Oberflächeneffekte oder hohe Scherraten können dazu führen, dass die maximale Belastung des Messeils überschritten wird und es reißt.

Dennoch zeigte die Validierung unter Vibrationsbedingungen, dass reproduzierbare Messungen möglich sind, sofern Boden- und Oberflächeneffekte minimiert und Rauscheffekte durch Glättung korrigiert werden. Die Untersuchungen mit deionisiertem Wasser bestätigten zudem, dass diese Korrekturen die Viskositätswerte nicht signifikant verfälschen. Somit kann das System zuverlässig für Messungen unter Vibration eingesetzt werden. Alle Messergebnisse mit dem Kugelauszugviskosimeter wurden durch eine Dreifachbestimmung gesichert.

### 6.1.3 3D-Ausbreitmaß

Das im IGF-Vorhaben 21830 N entwickelte 3D-Ausbreitmaßverfahren zur Charakterisierung selbstfließender Feuerbetone wurde im Rahmen dieses Projekts für den Einsatz bei Vibrationsfeuerbetonen weiterentwickelt. Ziel war die berührungslose Echtzeit-Erfassung rheologischer Eigenschaften unter standardisierten Vibrationsbedingungen. Die Versuche orientierten sich an Norm DIN EN ISO 1927-4:2013 und wurden bei 50 Hz und einer Amplitude von 0,25 mm durchgeführt.

Die Validierung des Verfahrens erfolgte durch den Vergleich kamerabasierter Ausbreitmaße mit Referenzwerten, die manuell mittels Messschieber bestimmt wurden. Wie in Abbildung 17 dargestellt, zeigte sich eine nahezu perfekte lineare Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,985$ . Die Regressionsanalyse zeigt, dass das kamerabasierte Verfahren bei kleineren Ausbreitmaßen eine sehr gute Übereinstimmung mit den manuellen Messschieberwerten aufweist, bei größeren Ausbreitmaßen jedoch systematisch um ca. 10 mm niedrigere Werte erfasst. Potenzielle Ursachen für diese Abweichung wurden ergänzend analysiert.



*Abbildung 17: Korrelation zwischen den kamerabasiert erfassten Ausbreitmaßen und den mittels Messschieber bestimmten Werten. Die Kameraauswertung zeigt eine hohe Präzision und Übereinstimmung mit manuellen Messungen.*

Um diese Abweichung näher zu untersuchen, wurden systematische Versuchsreihen durchgeführt, in denen potenzielle Einflussfaktoren variiert wurden. Berücksichtigt wurden insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit der Rüttelplatte, die durch das Aufbringen unterschiedlicher Mengen von Öl verändert wurde. Generell dient das Öl als Gleitmittel, womit Friktionen verringert werden und das Ausbreitmaß typischerweise vergrößert wird. Ferner wurde die Abhängigkeit der Ergebnisse von der durchführenden Person untersucht und mit den durch die Kamera automatisch erfassten Messergebnissen verglichen. Der Vergleich erfolgte in Abhängigkeit der verstrichenen Zeit nach Mischen, der Massetemperatur an Versätzen mit unterschiedlichem  $q$ -Wert (Abschnitt 5.1.1). Diese Untersuchungen dienen der Eingrenzung möglicher Ursachen für die abweichende Bewertung und der Analyse von Reproduzierbarkeit und Konsistenz des 3D-Ausbreitmaßverfahrens.

## Einfluss eines Ölfilms auf die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

Zur Untersuchung des Einflusses eines Ölfilms auf der Rüttelplatte wurden drei Varianten verglichen: „Normal“ (2 g Öl, vollflächig verteilt nach der Standardvorgehensweise der Forschungsrichtung), „Wenig“ (2 g Öl, anschließend weitgehend abgewischt, um Reflexionen in der Kamera zu minimieren) und „Kein“ (ohne Öl). Jeweils zehn Wiederholungen wurden mit dem Modell-Vibrationsfeuerbeton FB0,31\_MS (Abschnitt 5.1.1) unter definierten Vibrationsbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse (Abbildung 18) zeigen, dass eine vollflächige Einölung zwar zu größeren Ausbreitmaßen führt, jedoch auch stärkere Streuungen und optische Störeffekte durch Reflexionen verursacht. Die geringste Standardabweichung wurde bei der Verwendung von wenig Öl erreicht, wodurch also die Reproduzierbarkeit verbessert wurde. Für die weiteren Versuchsreihen wurde daher diese Variante gewählt, da auch Reflexionen auf der Oberfläche minimiert wurden. Die Hauptversuche wurden in Folge mit wenig Öl durchgeführt, wodurch hinreichend ein Anhaften der Masse vermieden wird, aber optischen Beeinträchtigungen der Messung durch Reflexion minimiert wird.

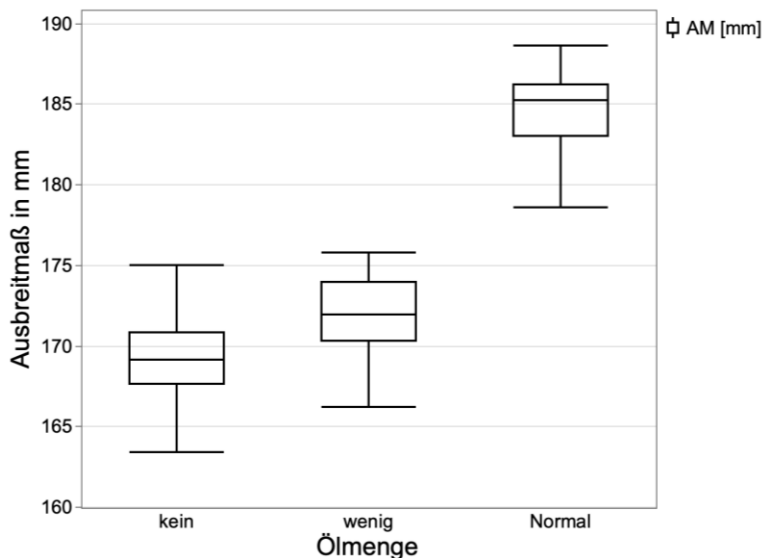


Abbildung 18: Einfluss unterschiedlicher Einölungsvarianten auf das Ausbreitmaß des Modell-Vibrationsfeuerbetons FB0,31\_MS. Verglichen wurden die Kategorien kein Öl, wenig Öl (Restfilm) und normal (vollflächig eingölt).

## Einfluss der Bedienpersonen und der Zeit nach dem Mischen

Zur Bewertung des Einflusses der Bedienpersonen auf die Bestimmung des Ausbreitmaßes wurden manuelle Referenzmessungen mit einem Messschieber den Ergebnissen des 3D-Kamerasystems gegenübergestellt. Zusätzlich zur digitalen Erfassung mittels eines kamerabasierten Systems (D) wurde der Einfluss der Bedienperson betrachtet: eine Bedienperson (E) vs. wechselnde Bedienpersonen (Z). Pro Konstellation wurden  $n = 10$  Wiederholungen durchgeführt; das Ausbreitmaß wurde nach einer Fließzeit von 20 s unter definierten Vibrationsbedingungen (Amplitude 0,25 mm; Frequenz 50 Hz) bestimmt. Um auch potenzielle Effekte der Standzeit zu erfassen, erfolgten die Messungen zusätzlich 15, 30 und 60 Minuten nach dem Mischen.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 dargestellt. Die Boxplots verdeutlichen, dass das kamerabasierte System (D) über alle Messungen hinweg die geringste Streuung aufwies, was sich in engen Boxen und kurzen Whiskern widerspiegelt. Auch die Medianwerte blieben über die gesamte Versuchsreihe konstant, was auf eine hohe Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität schließen lässt.

Demgegenüber zeigten die manuell erfassten Daten, insbesondere bei wechselnden Bedienpersonen (Z), eine deutlich größere Streuung und damit eine geringere Konsistenz. Während die Medianwerte weitgehend stabil blieben, war bei den oberen Whisker-Werten der Kameramessungen mit zunehmender Standzeit (15–60 Minuten) eine leichte Abnahme zu beobachten. Diese Tendenz lässt auf ein beginnendes Ansteifen des Materials schließen.

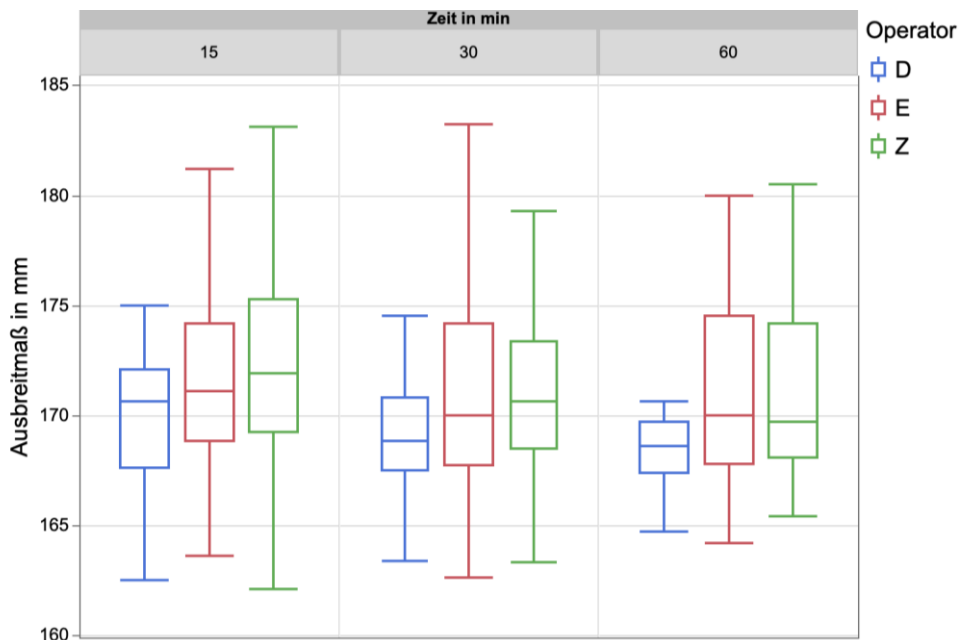


Abbildung 19: Einfluss der Bedienpersonen auf das Ausbreitmaß des FB0,31\_MS bei Messungen nach 15, 30 und 60 Minuten. Verglichen wurden das 3D-Kamerasystem (D: Blau), eine Bedienperson (E: Rot) und wechselnde Bedienpersonen (Z: Grün) bei wenig Öl auf der Rütteltischoberfläche.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Bedienperson einen signifikanten Einfluss auf die Messqualität ausübt. Das automatisierte 3D-Kamerasystem bietet dagegen eine konstant hohe Wiederholgenauigkeit und ist insbesondere für zeitabhängige rheologische Untersuchungen als bevorzugte Methode einzustufen.

### Einfluss der Rezeptur und Temperatur

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Versätze auf das Fließverhalten wurden drei der in Abschnitt 5.1.1 spezifizierten Rezepturen (FB0,28-MS, FB0,31-MS und FB0,34-MS) mit dem 3D-Kamerasystem erfasst. Die Versuche erfolgten unter identischen Vibrationsbedingungen, wobei die Rütteltischoberfläche jeweils mit wenig Öl eingerieben wurde, um optische Störungen zu minimieren. Die Frischmasstemperaturen wurden unmittelbar nach dem Mischen bestimmt und in Abbildung 20 farblich codiert (Rot = 23 °C, Grau = 22 °C, Blau = 21 °C).

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Versätzen. Die grobkörnige Rezeptur FB0,34-MS erreicht mit einem Ausbreitmaß von 167–182 mm die höchsten Werte, die zudem bei den niedrigsten gemessenen Temperaturen von 21–22 °C auftraten. Im Gegensatz dazu weist die feinkörnige Mischung FB0,28-MS die kleinsten Ausbreitmaße von 147–158 mm auf, die mit den höchsten Frischmasstemperaturen von 22,5–23 °C einhergingen. Die Rezeptur FB0,31-MS liegt in etwa auf dem Niveau des FB0,34, zeigt aber eine geringere Standardabweichung der Ergebnisse.

Dies kann durch Unterschiede in der Korngrößenverteilung erklärt werden: Feinkörnige Rezepturen weisen aufgrund ihrer höheren spezifischen Oberfläche stärkere interpartikuläre Wechselwirkungen

auf, was einen erhöhten Wasserbedarf bedingt und die Fließfähigkeit reduziert. Die erhöhte Reibung in diesen Mischungen führt zu höheren Frischmasstemperaturen unmittelbar nach dem Mischen.

Neben den Unterschieden in den Rezepturen verdeutlicht die Temperaturcodierung, dass selbst geringe Temperaturunterschiede (21–23 °C) das Ausbreitverhalten messbar beeinflussen und daher in rheologischen Untersuchungen zu berücksichtigen sind. Es ist zwar nicht neu, dass die Viskosität aller Stoffe temperaturabhängig ist, findet aber keine Berücksichtigung in der Norm, ISO 1927-4, was unbedingt angepasst werden sollte, da selbst ein Unterschied von drei K einen signifikanten Unterschied im Ausbreitmaß ausmacht [23].

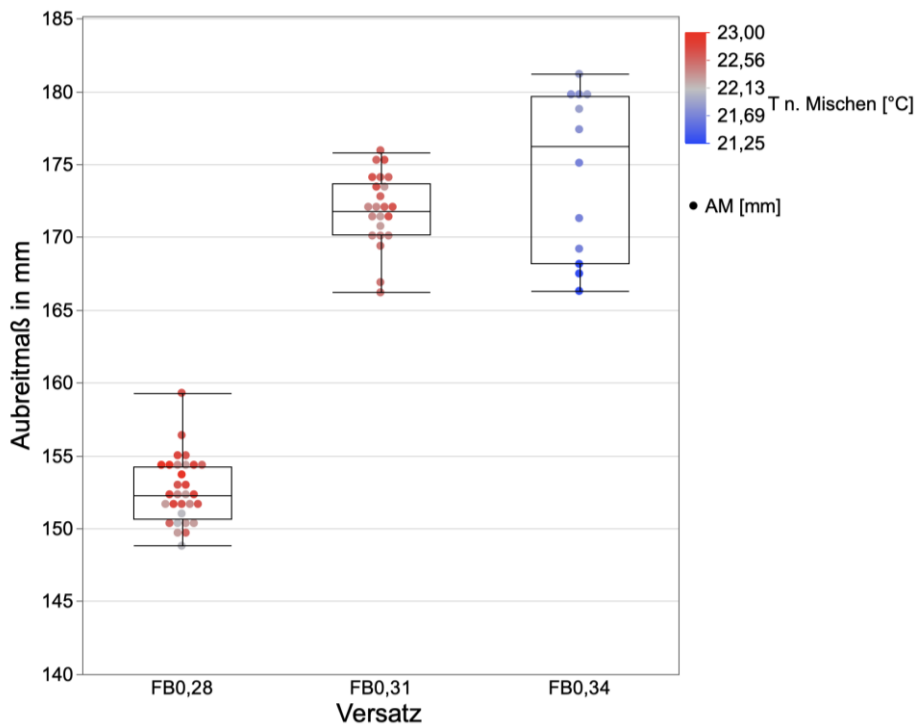


Abbildung 20: Reproduzierbarkeit des 3D-Ausbreitmaßes, gemessen an drei verschiedenen Versätzen. Die Oberfläche des Rütteltisches wurde mit wenig Öl vorbehandelt. Die Frischmasstemperatur ist farblich codiert: Rot = 23 °C, Grau = 22 °C, Blau = 21 °C.

Eine detaillierte und systematische Analyse der Einflüsse von q-Wert, Korngrößenverteilung und Zusatzstoffen (z. B. Mikrosilika) anhand des 3D-Kamerasystems erfolgt in Abschnitt 6.2.2.

Insgesamt belegen die geringe Streuung innerhalb der Wiederholungsmessungen (bei wenig Öl auf der Rüttelplatte) sowie die hohe Übereinstimmung mit manuellen Referenzwerten die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des 3D-Kamerasystems zur Bestimmung des Ausbreitmaßes. Damit steht eine verlässliche Grundlage zur Verfügung, um Korrelationen zwischen dem rheologischen Verhalten und gezielt variierten Parametern wie Korngrößenverteilung und Temperatur zu erfassen.

## 6.2 AP 2 - Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen

In Arbeitspaket 2 wurde der Einfluss der Korngrößenverteilung (q-Wert = 0,28, 0,31, 0,34) auf die Rheologie von zwei Modellvibrationsfeuerbetonen (FBq-RT und FBq-MS) exemplarisch untersucht.

## 6.2.1 Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter

Der Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen wurde durch Messungen der zwei Modellvibrationsfeuerbetonen (FBq-RT und FBq-MS) mit unterschiedlichen q-Werten (0,28, 0,31, 0,34) untersucht (Abbildung 21). Dazu wurde mittels Kugelauszugviskosimeter unter Einsatz von (Standard-)Vibrationsparametern (Amplitude 0,25 mm, Frequenz 50 Hz) gemessen.

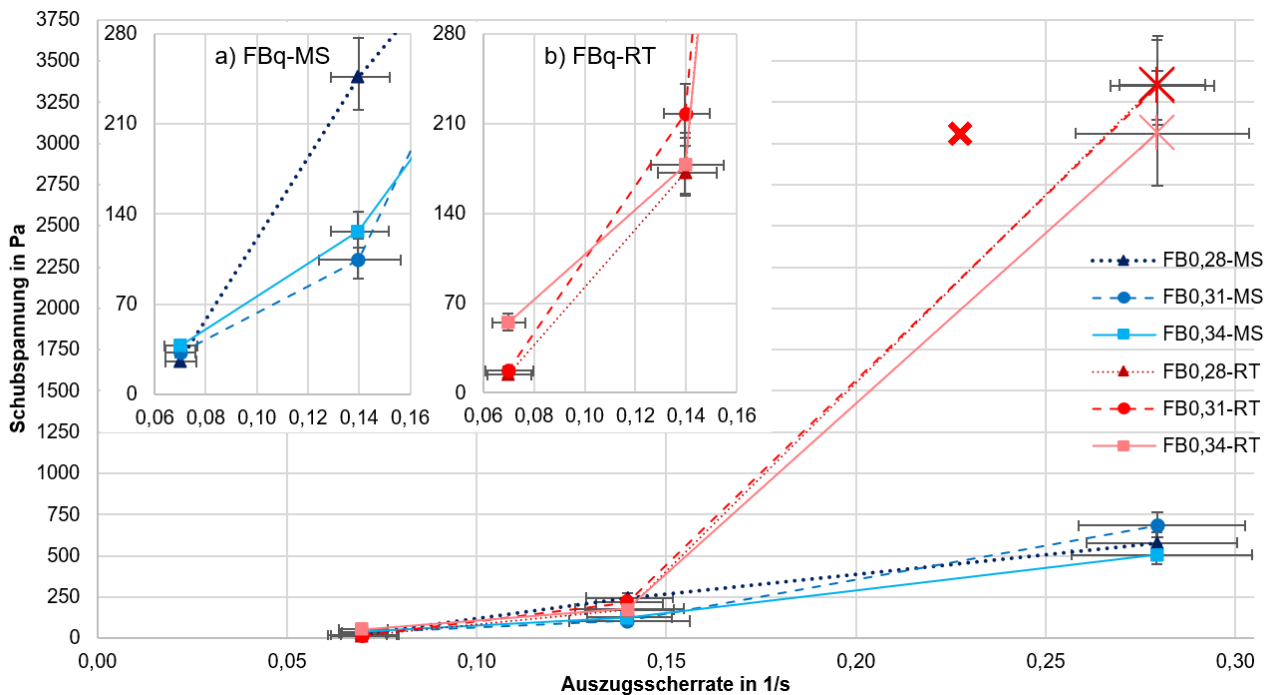


Abbildung 21: Vergleich der auszugsscherratenabhängigen Schubspannungen der Modellvibrationsfeuerbetone FBq-RT und FBq-MS mit variiertem q-Wert unter Standardvibrationsbedingungen (Amplitude 0,25 mm, Frequenz = 50 Hz). Messungen, bei denen das Seil gerissen ist, sind mit „X“ markiert. Alle Modellvibrationsfeuerbetone sind dilatant, wobei FBq-RT eine deutlich höhere Dilatanz aufweist. FB1-RT (a) und FBq-MS (b) sind tendenziell viskoser mit niedrigerem q-Wert bei niedrigeren Auszugsscherraten und viskoser mit höherem q-Koeffizienten bei höheren Auszugsscherraten.

Die Korngrößenverteilung, ausgedrückt durch den q-Wert, beeinflusst maßgeblich die rheologischen Eigenschaften der untersuchten Modellvibrationsfeuerbetonen. Besonders deutlich wird dieser Einfluss bei der Betrachtung der Scherspannung in Abhängigkeit von der Scherrate. In beiden untersuchten Serien, FBq-MS und FBq-RT, zeigt sich eine ausgeprägte Dilatanz, das heißt eine Zunahme der Scherspannung mit steigender Schergeschwindigkeit. Dabei führen unterschiedliche q-Werte zu charakteristischen Unterschieden im Fließverhalten.

In der FBq-MS-Serie nimmt die Scherspannung bei niedrigen Schergeschwindigkeiten mit steigendem q-Wert tendenziell zu. Besonders bei einem q-Wert von 0,28 war die Partikelverzahnung so stark ausgeprägt, dass es in einzelnen Messreihen zum Abriss des Messseils kam. Die Feuerbetone mit  $q = 0,31$  und  $q = 0,34$  zeigten eine ähnliche rheologische Charakteristik, jedoch mit einem entscheidenden Unterschied: Bei einer Scherrate von  $0,28 \text{ s}^{-1}$  lag die Scherspannung des Feuerbetons mit  $q = 0,34$  deutlich unter der des Feuerbetons mit  $q = 0,31$ . Dies weist darauf hin, dass  $q = 0,31$  innerhalb der FBq-MS-Serie die beste Fließfähigkeit ermöglicht, während ein weiterer Anstieg des q-Werts möglicherweise nicht mehr zu einer weiteren Verbesserung führt.

Ähnlich verhält es sich bei der FBq-RT-Serie. Auch hier zeigt sich eine starke Dilatanz mit zunehmender Schergeschwindigkeit. Bei einem q-Wert von 0,28 war die gemessene Viskosität bei niedrigen Schergeschwindigkeiten zunächst gering, doch unter Belastung trat ein anderes Phänomen auf:

In sämtlichen Messversuchen riss das Messeil, was darauf hindeutet, dass die internen Widerstandskräfte des Materials mit steigender Schergeschwindigkeit anstiegen. Insgesamt erwies sich die FBq-RT-Serie als besonders dilatant, was die Messbarkeit bei höheren Scherraten einschränkte.

Die Ergebnisse zeigen, dass niedrige q-Werte mit einem hohen Anteil feiner Partikel verbunden sind, die sich bei niedrigen Schergeschwindigkeiten leichter in Bewegung setzen lassen. Gleichzeitig führt die erhöhte spezifische Oberfläche jedoch zu einer verstärkten Partikelverzahnung, die insbesondere bei steigender Schergeschwindigkeit die Fließfähigkeit reduziert und die Scherspannung erhöht. Dies kann so weit gehen, dass die maximale Belastbarkeit des Messeils überschritten wird und das Messeil reißt. Höhere q-Werte hingegen sind mit einem höheren Anteil grober Partikel und einem erhöhten Wasser/Matrix-Verhältnis verbunden, was die Fließfähigkeit bei höheren Scherraten verbessert. Die Viskosität nimmt dabei insgesamt ab, da weniger Partikelverzahnung auftritt und die Scherspannung nicht so stark ansteigt.

Vorteilhaft für die Fließeigenschaften des Vibrationsfeuerbetons scheint eine ausgewogene Korngrößenverteilung mit einem moderaten q-Wert zu sein. Während ein zu niedriger q-Wert die Dilatanz erhöht und die Messbarkeit einschränkt, verschlechtern zu hohe q-Werte die Fließeigenschaften bei niedrigen Schergeschwindigkeiten. Die Untersuchungsergebnisse legen nahe, dass ein q-Wert von etwa 0,31 für eine gute Balance zwischen Fließfähigkeit und Scherspannung sorgt. Um die absoluten rheologischen Eigenschaften noch genauer zu erfassen, sind weitere Analysen erforderlich, insbesondere zur quantitativen Erfassung der durch die Vibration zusätzlich induzierten Scherraten.

## 6.2.2 Messungen mit dem 3D-Ausbreitmaß

Zur systematischen Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung auf das rheologische Verhalten von Vibrationsfeuerbetonen (VFB) wurden sechs Modellrezepturen mit gezielt variierten q-Werten (0,28, 0,31 und 0,34) jeweils in Kombination mit Mikrosilika (MS) sowie ohne Mikrosilika (RT) entwickelt. Alle Versuche wurden unter konstanten Prüfbedingungen (Amplitude: 0,25 mm; Frequenz: 50 Hz; Vibrationsdauer: 20 s) durchgeführt. Das Fließverhalten wurde mithilfe des 3D-Ausbreitmaßes erfasst. Abbildung 22 zeigt die zeitabhängige Entwicklung des Ausbreitmaßes für alle sechs Rezepturen. Die Versätze mit mittlerer Korngrößenverteilung ( $q = 0,31$ ) erreichten in beiden Systemen, sowohl mit als auch ohne Mikrosilika, die größten Endausbreitmaße. Die feinkörnigen Rezepturen ( $q = 0,28$ ) zeigten dagegen die geringsten Fließweiten, während die grobkörnigen Varianten ( $q = 0,34$ ) in beiden Fällen im mittleren Bereich lagen.

Die in Abbildung 23 dargestellten zeitabhängigen Fließgeschwindigkeiten zeigen bei allen Rezepturen einen Anstieg nach Beginn der Vibration, gefolgt von einem kontinuierlichen Abfall über die Messdauer. Die höchsten Werte wurden bei FB0,31-MS gemessen, welcher mit mehr als 7,5 mm/s die maximale Fließgeschwindigkeit erreichte. Im Gegensatz dazu wies die feinkörnige Mischung FB0,28-RT über den gesamten Zeitraum die geringsten Fließgeschwindigkeiten auf. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse insbesondere im Bereich der Anfangsdynamik deutliche Unterschiede zwischen den Systemen, während sich die Fließgeschwindigkeiten im weiteren Verlauf angleichen.

Bei Übertragung der Fließgeschwindigkeit auf das Ausbreitmaß (Abbildung 24) wird deutlich, dass die Dynamik in der Anfangsphase der Vibration entscheidend für das Ausbreitmaß ist. Es zeigt sich eine eindeutige Korrelation zwischen höheren maximalen Fließgeschwindigkeiten und größeren Endwerten des Ausbreitmaßes. Eine Ausnahme bildet die Rezeptur FB0,31-RT, die trotz moderater Maximalgeschwindigkeit ein überdurchschnittlich hohes Endausbreitmaß erreicht. Dies weist auf eine materialspezifische Struktur hin, die nicht allein durch die Anfangsdynamik determiniert wird.

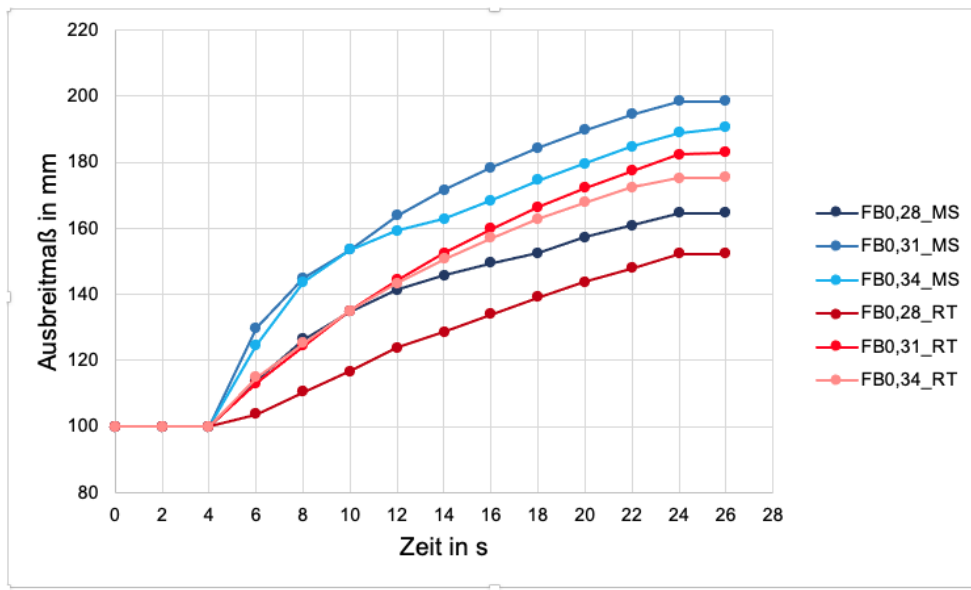


Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung des 3D-Ausbreitmaßes während 20 s Vibrationszeit für sechs Modellfeuerbetonen mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen. Jeder Versatz zeigt ein charakteristisches Fließverhalten unter identischen Prüfbedingungen.

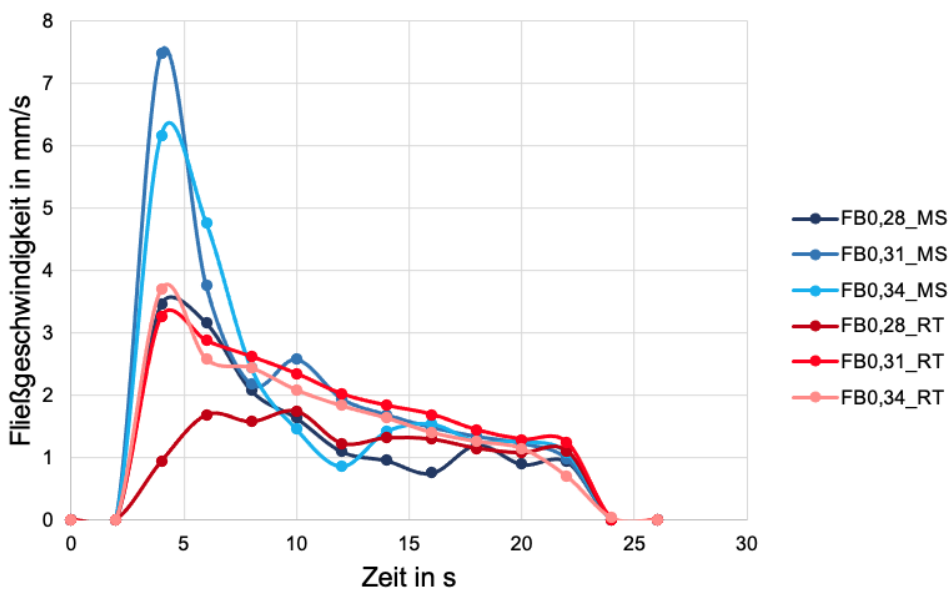


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der Fließgeschwindigkeit für sechs Modellfeuerbetone mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen unter Standard-Vibrationsbedingungen. Deutliche Unterschiede zeigen sich im Bereich der Anfangsdynamik.

Auf Basis der erhobenen Daten wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen maximaler Fließgeschwindigkeit und finalem Ausbreitmaß quantitativ zu erfassen und in ein prädiktives Modell zu überführen. Hierbei wurde die Maximalgeschwindigkeit innerhalb der ersten zwei Sekunden nach Vibrationsbeginn als Prädiktor herangezogen. Abbildung 25 zeigt die Regressionsfunktionen für die einzelnen Modellversätze. Die erreichten Bestimmtheitsmaße ( $R^2 = 0,45\text{--}0,85$ ) verdeutlichen eine insgesamt gute bis sehr gute Korrelation, womit die Bedeutung der Anfangsdynamik für das spätere Ausbreitverhalten bestätigt wird. Besonders ausgeprägt ist der Zusammenhang bei den Rezepturen FB0,34\_RT ( $R^2 = 0,85$ ) und FB0,31\_MS ( $R^2 = 0,79$ ), während FB0,28\_RT mit  $R^2 = 0,45$  eine vergleichsweise schwächere Vorhersagekraft aufweist.

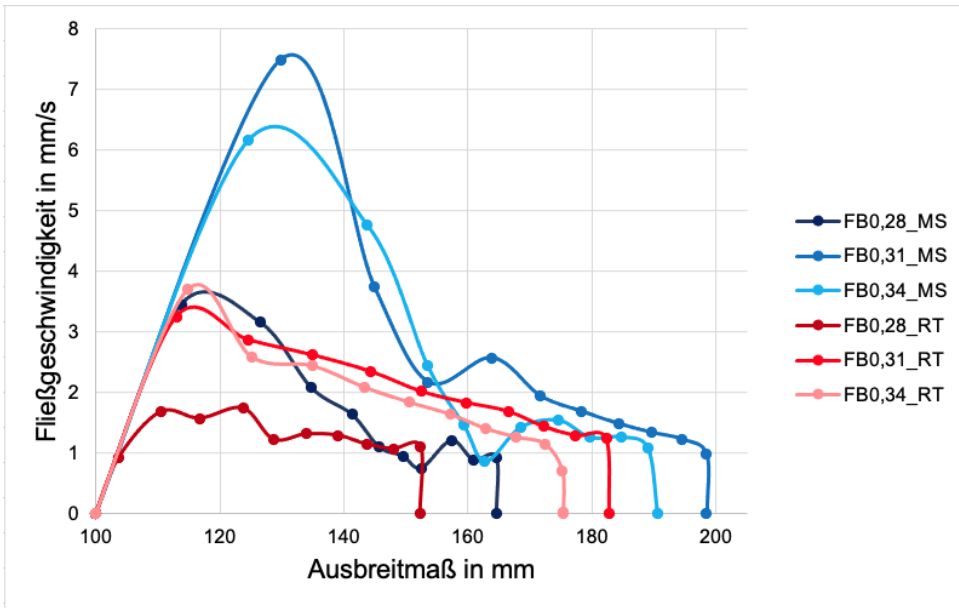


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und 3D-Ausbreitmaß der Modellfeuerbetone.

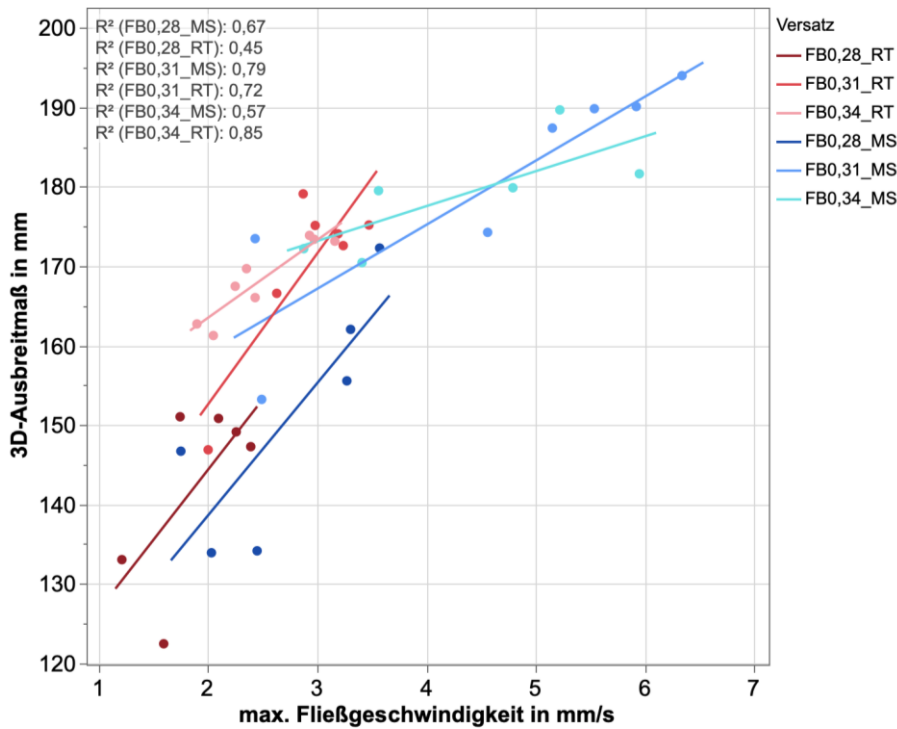


Abbildung 25: Lineare Regressionsanalyse zwischen maximaler Fließgeschwindigkeit innerhalb der ersten zwei Sekunden nach Vibrationsbeginn und dem finalen 3D-Ausbreitmaß für die untersuchten Modellversätze. Angegeben sind die Regressionslinien sowie die zugehörigen Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich das finale Ausbreitverhalten bereits zuverlässig aus den frühen Fließgeschwindigkeiten ableiten lässt. Auf diese Weise entsteht ein belastbares Modell, das eine schnelle Einschätzung der rheologischen Eigenschaften ermöglicht. Damit eröffnet sich eine praxisnahe Ergänzung zur klassischen Werkstoffcharakterisierung und zur Prozesskontrolle.

### 6.2.3 Messungen mit Baumesszelle-Rheometer

Die Bestimmung der Fließgrenze ( $\tau_0$ ), einschließlich Reproduzierbarkeitsmessungen, wurde für alle sechs Modell-VFB mit dem HAAKE MARS 40 Rheometer durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 als Mittelwert aus drei Wiederholungen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Versätze mit MS-Zugabe (FBq-MS) im Mittel geringere  $\tau_0$ -Werte aufweisen als die Versätze ohne MS-Zugabe (FBq-RT). Zudem liegen die feinkörnigen Systeme ( $q = 0,28$ ) durchweg unterhalb der grobkörnigen ( $q = 0,34$ ). Konkret steigt die Fließgrenze bei den MS-Versätzen von 18,2 Pa (FB0,28-MS) auf 108 Pa (FB0,34-MS), während sie bei den RT-Versätzen von 48,3 Pa (FB0,28-RT) auf 113 Pa (FB0,34-RT) zunimmt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Fließgrenze sowohl von der Partikelgrößenverteilung ( $q$ -Wert) als auch von der MS-Zugabe beeinflusst wird.

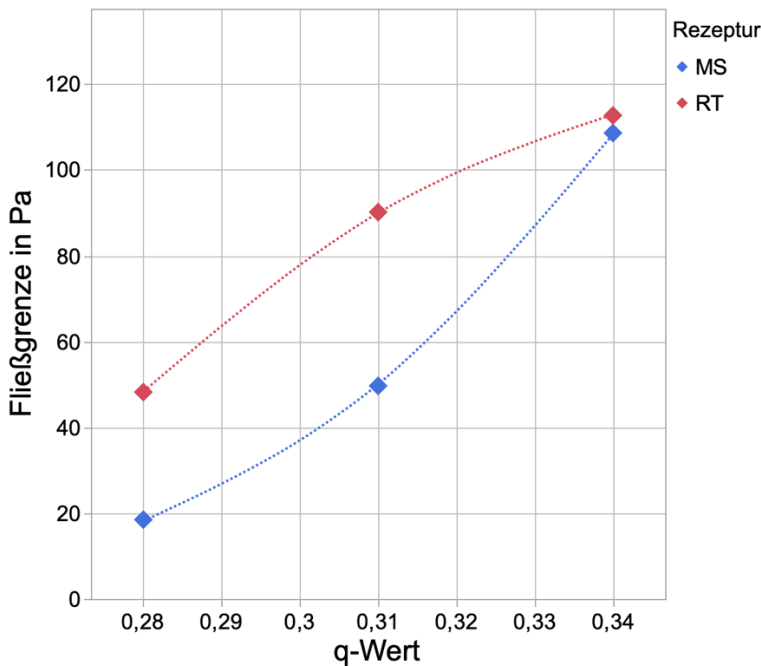


Abbildung 26: Die mittlere Fließgrenze zeigt bei beiden Modell-Feuerbetonsystemen FBq-RT (Rot) und FBq-MS (Blau) unter Standardbedingungen eine steigende Tendenz bei zunehmenden Q-Werten.

### 6.2.4 Untersuchung der Abbindekinetik

Die zeitabhängige Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit (UPV) der Modell-Feuerbetone FBq-MS (Mikrosilika-haltige Matrix, blaue Kurven) und FBq-RT (Reaktivtonerde-haltige Matrix, rote Kurven) wurde gemäß dem Kapitel 5.4 beschriebenen Versuchsablauf über einen Zeitraum von 48 h erfasst und ist in Abbildung 27 dargestellt. Die gestrichelten Verläufe zeigen die Proben temperatur (rechte Achse) in °C. In allen Versätzen ist ein zweistufiger Verlauf erkennbar: Das erste Ansteifen wird durch den Zeitpunkt des ersten messbaren UPV-Anstiegs charakterisiert, der den Beginn der Tragwerksbildung im Grünzustand markiert. Anschließend folgt eine zweite Steigungsstufe mit deutlich erhöhter UPV-Steigung, die im Rahmen dieser Auswertung der Aushärtung zugeordnet wird.

Als dominierender Effekt zeigt sich eine ausgeprägte zeitliche Verschiebung der Aushärtung zwischen den Matrixzusammensetzungen. Bei FBq-RT setzt das erste Ansteifen früh im Zeitbereich von ca. 2–4 h ein, die zweite Steigungsstufe liegt im Zeitfenster von ca. 6–10 h mit einer UPV von ca. 4500–4900 m/s. FB0,q-MS zeigt demgegenüber eine verzögerte Entwicklung: Das erste Ansteifen beginnt nach ca. 5–7 Stunden und die zweite Steigungsstufe tritt deutlich später auf (nach ca. 14–22 Stunden). Trotz der verzögerten Aushärtung liegen die UPV-Endniveaus nach 48 Stunden bei FBq-MS mit 5.600 bis 6.000 m/s höher als bei FBq-RT mit 5.000 bis 5.400 m/s. Innerhalb beider

Systeme ist ein q-Einfluss erkennbar. Für die Plateauwerte nach 48 Stunden ergibt sich konsistent, dass die grobkörnige Versatzte mit  $q = 0,34$  die höchsten und die Varianten mit  $q = 0,28$  die niedrigsten UPV-Niveaus aufweisen ( $q = 0,31$  liegt dazwischen). Die Probentemperatur bleibt insgesamt in einem engen Bereich und steigt lediglich moderat von ca. 19,5 auf ca. 20,1 °C. Die zeitliche Überlagerung dieses Temperaturanstiegs mit der zweiten Steigungsstufe ist mit der Zuordnung dieser Phase zur Aushärtung vereinbar.

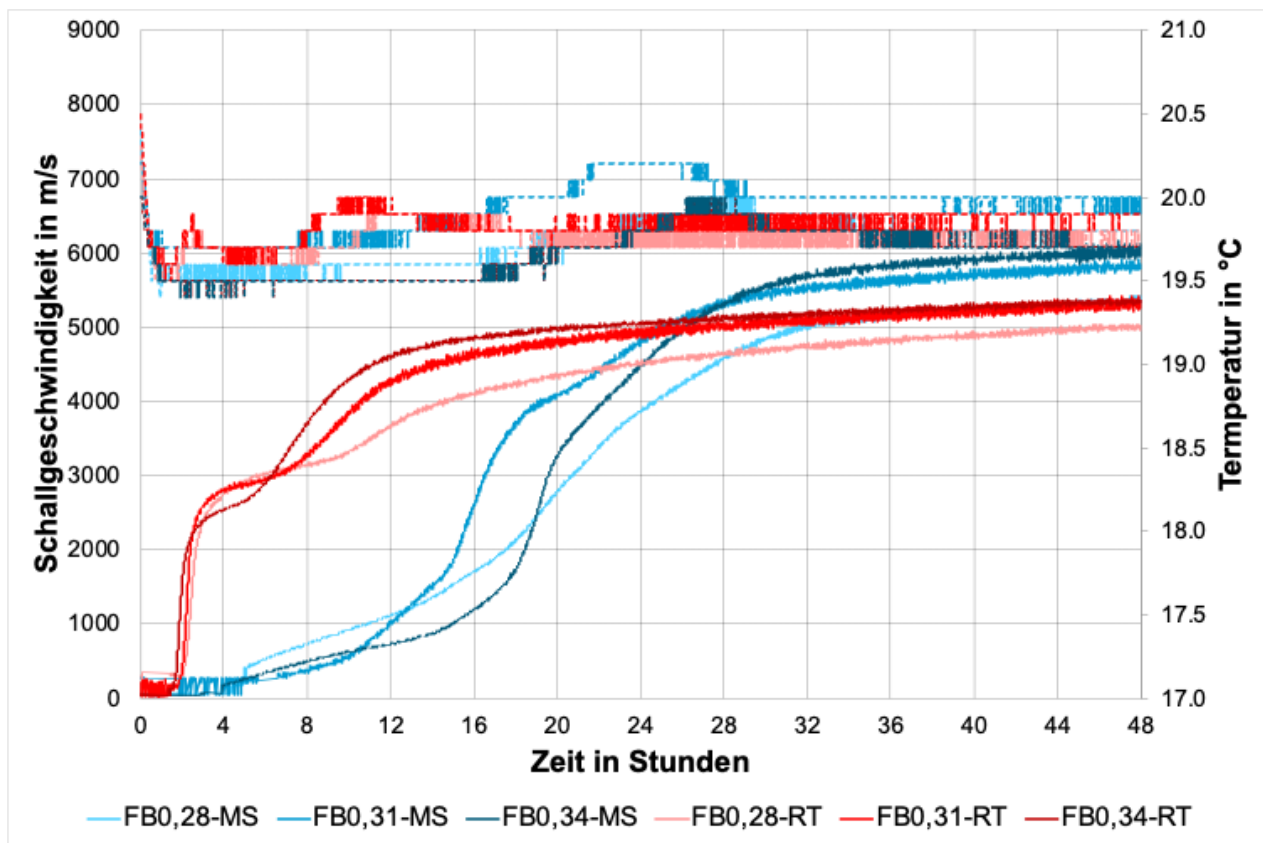


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit der Modell-Feuerbetone  $FB_{0,q-MS}$  (mikrosilika-haltig) und  $FB_{0,q-RT}$  (reaktivtonerde-haltig) über 48 h; gestrichelt: Probentemperatur.

### 6.2.5 Eigenschaften nach Trocknung - Kaltbiegefestigkeit und offene Porosität

Zur Charakterisierung der Grüneigenschaften der Modellfeuerbetone wurden die Kaltbiegefestigkeit (KBF) und die offene Porosität nach Trocknung bei 110 °C in Abhängigkeit vom q-Wert und der Rezepturzusammensetzung untersucht (Abbildung 28 und 29). Die höchsten Kaltbiegefestigkeiten wurden bei den feinkörnigen Versätzen ( $q = 0,28$ ) gemessen: 22 MPa für  $FB_{0,28-MS}$  und 11,4 MPa für  $FB_{0,28-RT}$ . Mit zunehmendem q-Wert nahm die Festigkeit tendenziell ab und erreichte bei  $q = 0,34$  die niedrigsten Werte (16,6 MPa für  $FB_{0,34-MS}$  und 8,3 MPa für  $FB_{0,34-RT}$ ). Die Regressionsanalyse bestätigt einen signifikanten Einfluss beider Faktoren ( $r^2 = 0,97$ ): der q-Wert wirkt negativ auf die Festigkeit, während die Mikrosilika-Zugabe diese im Mittel um +4,58 MPa erhöht. Damit wird die festigkeitssteigernde Wirkung feinkörniger Zusammensetzungen und die Matrixverdichtung durch Mikrosilika belegt.

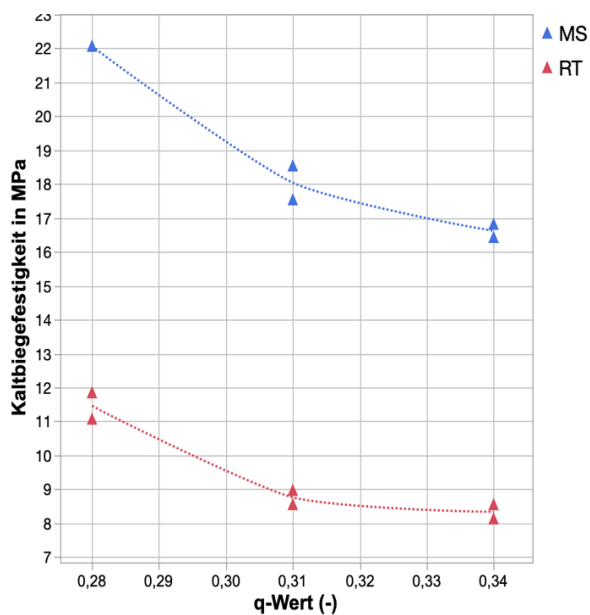


Abbildung 28: Die Kaltbiegefestigkeit (KBF) bei 110 °C der Modellversätze in Abhängigkeit vom q-Wert. Die Ergebnisse zeigen eine Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Grobkörnigkeit. Versätze mit MS-Zugabe erreichen durchweg höhere Werte als die RT-Varianten.

Die Ergebnisse zur offenen Porosität (Abbildung 29) spiegeln diesen Trend wider. MS-Versätze weisen insgesamt geringere Werte auf als die RT-Varianten. Bei den MS-Versätzen steigt die offene Porosität mit zunehmendem q-Wert kontinuierlich an (von 8,15 % bei q = 0,28 bis 10,9 % bei q = 0,34). Bei den RT-Versätzen zeigt sich hingegen ein Anstieg bis zu einem Maximum bei q = 0,31 (16,4 %), gefolgt von einem leichten Rückgang auf 15,6 % bei q = 0,34.

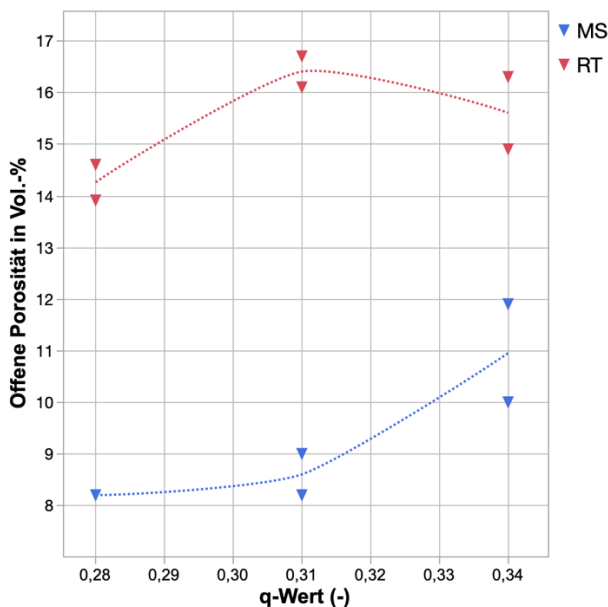


Abbildung 29: Die ermittelte offene Porosität der Modellfeuerbetone in Volumenprozent unter Standard-Vibrationsbedingungen wurde in Abhängigkeit von verschiedenen q-Werten dargestellt. Die Messungen, die mit Mikrosilika (blaue Dreiecke) durchgeführt wurden, zeigen eine geringere offene Porosität im Vergleich zu den Messungen ohne Mikrosilika (rote Dreiecke).

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass feinkörnige Mischungen, die Mikrosilika enthalten eine deutlich höhere Grünfestigkeit und eine geringere offene Porosität aufweisen. Diese Befunde stehen

in engem Zusammenhang mit den zuvor ermittelten rheologischen Kennwerten und dem Ausbreitverhalten.

Ergänzend zu den Einzelbetrachtungen von Kaltbiegefestigkeit und offener Porosität ordnet die Korrelationsdarstellung in Abbildung 30 beide Kenngrößen gemeinsam ein. Unter Standard-Vibrationsbedingungen zeigt sich eine ausgeprägte inverse Beziehung zwischen offener Porosität (Vol.-%) und Kaltbiegefestigkeit (MPa). Somit wird der in Abbildung 28 beobachtete Abfall der Kaltbiegefestigkeit mit zunehmendem q-Wert in beiden Systemen wesentlich über die gleichzeitig veränderte Porosität vermittelt. Die FBq-MS-Varianten weisen deutlich geringere offene Porosität (8,15–10,9 Vol.-%) auf und erreichen entsprechend höhere Kaltbiegefestigkeiten (16,6–22,0 MPa) im Vergleich zu den FBq-RT-Varianten. Letztere weisen bis zu einer offenen Porosität von etwa 16,4 Vol.-% lediglich 8,3–11,4 MPa auf. Die hohe Modellgüte der Regressionsanalyse ( $R^2 = 0,97$ ) und der mittlere Festigkeitszuwachs durch Mikrosilika von 4,58 MPa stützen diese Einordnung und bestätigen den porositätsdominierten Charakter der Grünfestigkeit.

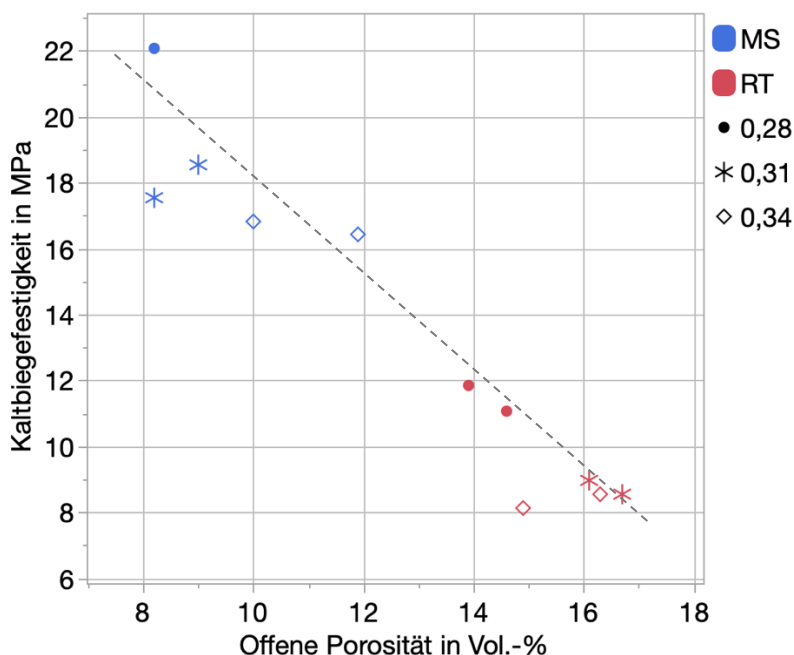


Abbildung 30: Zusammenhang zwischen offener Porosität in Vol.-% und Kaltbiegefestigkeit in MPa der Modellfeuerbetone FBq-MS und FBq-RT nach Trocknung bei 110 °C unter Standard-Vibrationsbedingungen.

Anschließend wird die in Abschnitt 6.2.3 ermittelte Fließgrenze mit der Kaltbiegefestigkeit nach Trocknung bei 110 °C korreliert, um den Einfluss der Frischbetonrheologie auf die resultierenden Grüneigenschaften unter Standard-Vibrationsbedingungen einzuordnen. Die Abbildung 31 zeigt für beide FBq-RT- und FBq-MS-Systeme eine negative Tendenz, wobei mit steigender Fließgrenze die Kaltbiegefestigkeit abnimmt. Bei den FBq-MS-Varianten liegen die Kaltbiegefestigkeiten im Bereich von etwa 16–22 MPa und sinken mit zunehmender Fließgrenze von ungefähr 15–120 Pa. Die FBq-RT-Varianten liegen insgesamt auf einem niedrigeren Kaltbiegefestigkeitsniveau von etwa 8–12 MPa und zeigen denselben Trend bei Fließgrenzen bis etwa 130 Pa. Die getrennten Trendlinien stützen somit die Einordnung, dass die rheologischen Unterschiede innerhalb der jeweiligen Systeme die Grünfestigkeiten der untersuchten Modellfeuerbetone beeinflussen können.

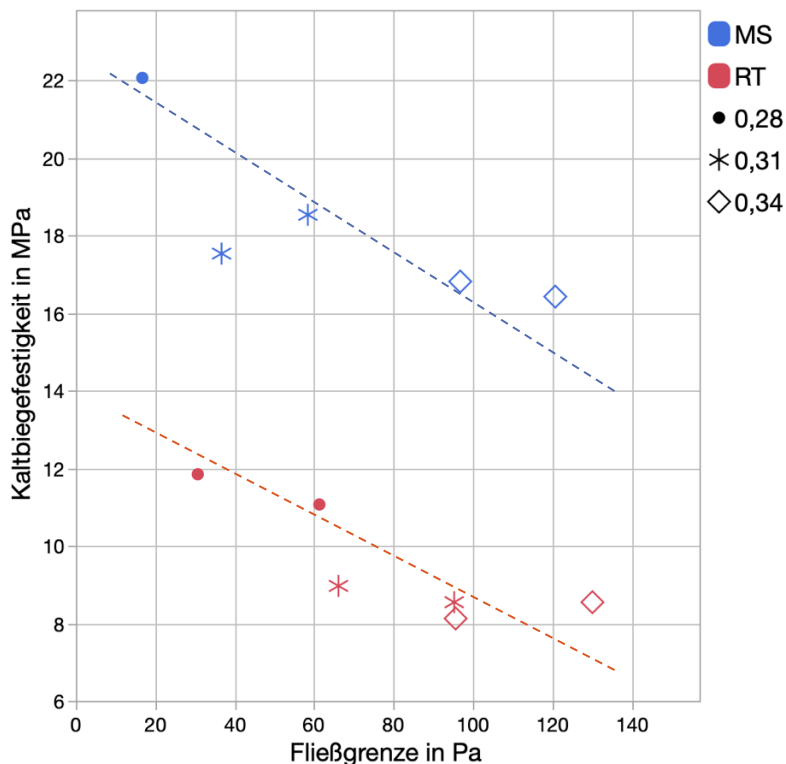


Abbildung 31: Korrelation zwischen der Fließgrenze in Pa (Abschnitt 6.2.3) und der Kaltbiegefestigkeit in MPa nach Trocknung bei 110 °C der Modell-Feuerbetone unter Standard-Vibrationsbedingungen für MS- und RT-Systeme. Die gestrichelten Linien zeigen die linearen Trendlinien für die jeweiligen MS- oder RT-Systeme.

## 6.3 AP 3 und 4 - Einfluss der Korngrößenverteilung und Vibration auf die Rheologie von Vibrationsfeuerbetonen

### 6.3.1 Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter

#### 6.3.1.1 Analyse der Effektgröße

In dieser Untersuchung wurde der Einfluss der Auszugsscherrate, q-Wert, Amplitude und Frequenz auf die dynamische Viskosität (Dreifachbestimmung) von Modellvibrationsfeuerbetonen analysiert. Ziel war es, die Effektgrößen dieser Variablen im Hinblick auf ihre Fähigkeit zur Erklärung der Zielgrößen-Varianz zu bewerten. Dazu wurde ein Prädiktor- und ein Zielgrößen-Screening mittels JMP durchgeführt. Zur Ermittlung der Effektgrößen wurde der  $r^2$ -Wert als Maßstab herangezogen, um zu quantifizieren, wie viel der Varianz der Zielgrößen durch jeden der Prädiktoren erklärt werden kann.

Im direkten Vergleich der beiden Modellvibrationsfeuerbetone FBq-RT und FBq-MS zeigen sich deutliche Unterschiede in der Relevanz einzelner Faktoren für die Erklärung der dynamischen Viskosität (Abbildung 32).

Die Auszugsscherrate stellt in beiden Modellen den wichtigsten Einflussfaktor dar. Für die Modellvibrationsfeuerbetone FBq-RT weist sie mit einem Wert von 65,77 % eine starke Effektgröße auf, während sie im Modell FBq-MS mit einem  $r^2$ -Wert von 52,63 % eine mäßige bis starke Wirkung entfaltet. Somit bleibt sie in beiden Fällen der zentrale Prädiktor für die Zielgröße.

Die Frequenz hat bei FBq-MS eine deutlich höhere Bedeutung als im bei FBq-RT. Während sie dort lediglich 2,44 % der Varianz erklärt und damit kaum Einfluss nimmt, erklärt sie bei FBq-MS immerhin 39,4 %, was auf einen moderaten Einfluss schließen lässt.

Der q-Wert zeigt in beiden Modellen eine geringe bis sehr geringe Effektgröße. Im Modell FBq-RT erklärt er 5,87 % der Varianz, was auf einen schwachen Zusammenhang mit der dynamischen Viskosität hinweist. Im Modell FBq-MS hingegen fällt sein Einfluss mit 0,43 % der Varianz nahezu vernachlässigbar aus.

Auch die Amplitude weist in beiden Modellen äußerst geringe Effektgrößen auf. Sowohl bei FBq-RT (2,44 %) als auch im Modell FBq-MS (0,08 %) lässt sich kein relevanter Zusammenhang zur Zielgröße feststellen. Die Auszugsscherrate ist der primäre Prädiktor, der die dynamische Viskosität maßgeblich beeinflusst. Der Einfluss überlagert damit wahrscheinlich den Einfluss der anderen Faktoren. Daher kann der Einfluss der anderen Faktoren durch Messungen der scherratenabhängigen Viskosität, der in diesem Kontext nicht herausgestellt werden.

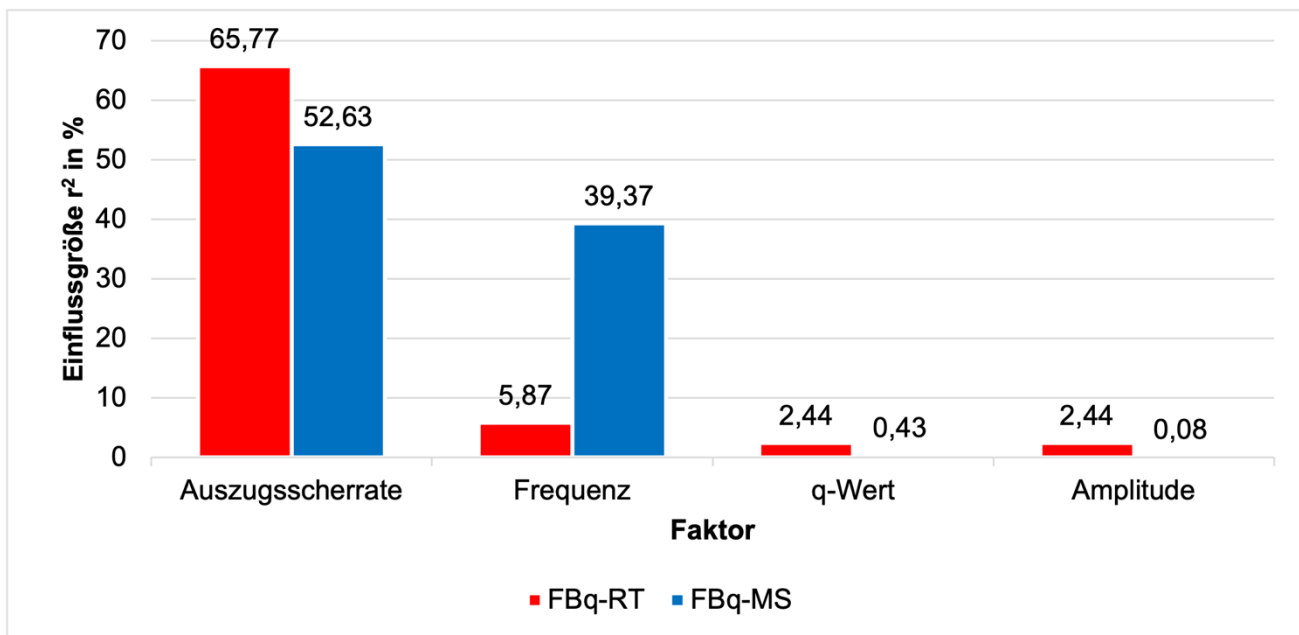


Abbildung 32: Einflussgrößen  $r^2$  in % der verschiedenen Faktoren für die Modellvibrationsfeuerbetone FBq-RT (rot) und FBq-MS (blau).

### 6.3.1.2 Einflussfaktoren

Im Folgenden werden die Einflussfaktoren Auszugsscherrate und Frequenz auf die dynamische Viskosität diskutiert. Die Einflussfaktoren q-Wert und Amplitude werden aufgrund ihrer geringen Effektgröße nicht diskutiert.

#### Einfluss der Auszugsscherrate auf die dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität zeigt eine starke positive Korrelation mit steigender Auszugsscherrate und bestätigt die unter Standardvibration bestimmte Dilatanz der Modellvibrationsfeuerbetone (Abbildung 33). Anhand der Steigung bestätigt sich, dass die Dilatanz bei FBq-RT (Steigung = 11599) deutlich höher ist als bei FBq-MS (7338). Aufgrund der Überlagerung von anderen Effekten (Frequenz bei FBq-MS), bzw. der hohen Anzahl an Fehlversuchen (FBq-RT) ist das Bestimmtheitsmaß für die Korrelation gering (FBq-MS  $r^2 = 0,526$ , FBq-RT  $r^2 = 0,658$ ).

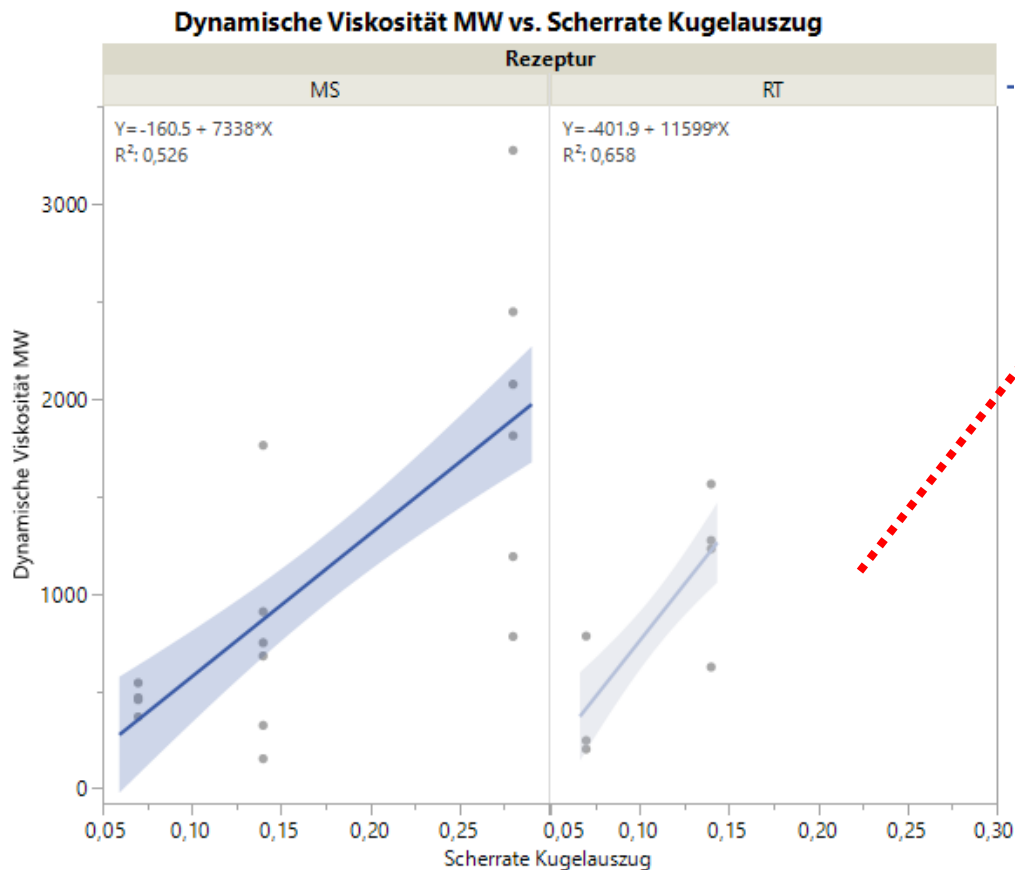


Abbildung 33: Dynamische Viskosität der Modellvibrationsfeuerbetone FBq-MS (links) und FBq-RT (rechts) als Funktion der Auszugsscherrate. Bei FBq-RT kam es aufgrund der hohen Dilatanz häufig zu Fehlversuchen. Die rot gestrichelte Linie stellt den postulierten Verlauf der auszugsscherratenabhängigen dynamischen Viskosität dar.

### Einfluss der Frequenz auf die dynamische Viskosität

Zwischen der scherratenabhängigen dynamischen Viskosität der Modellvibrationsfeuerbetone und der Frequenz besteht ein negativer Zusammenhang (Abbildung 34). Dies deckt sich mit dem Stand der Forschung zu Baubetonen, wonach sich eine steigende Frequenz verflüssigend auswirkt [11, 12]. Die Frequenz sorgt dafür, dass mechanische Schwingungen auf die Partikel übertragen wird, wodurch interpartikuläre Kräfte und Verzahnungen zwischen Partikeln überwunden werden und die Masse ins Fließen übergeht. Durch die Bewegung der Körner kommt es zu einer Lockerung der Struktur und die Körner können durch die Bewegung aneinander vorbeigleiten. Je höher die Frequenz ist, desto mehr Bewegung Schwingung wird ins System gebracht und der „verflüssigende“ Effekt wird verstärkt.

Bei einer niedrigeren Frequenz ist die Dämpfung stärker und der Effekt somit weniger stark. Bei Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter kommt es daher in höheren Schichten schneller zum Reißen des Messseils, da hier der „verflüssigende“ Effekt der Frequenz weniger Wirkung zeigt und es in höheren Schichten somit zu einer stärkeren Verzahnung der Partikel kommt. Bei den Modellvibrationsfeuerbetonen FBq-RT ist dieser Effekt so stark, dass es bei niedrigeren Frequenzen häufig zu Fehlversuchen kam und kaum Dreifachbestimmungen durchgeführt werden konnten.

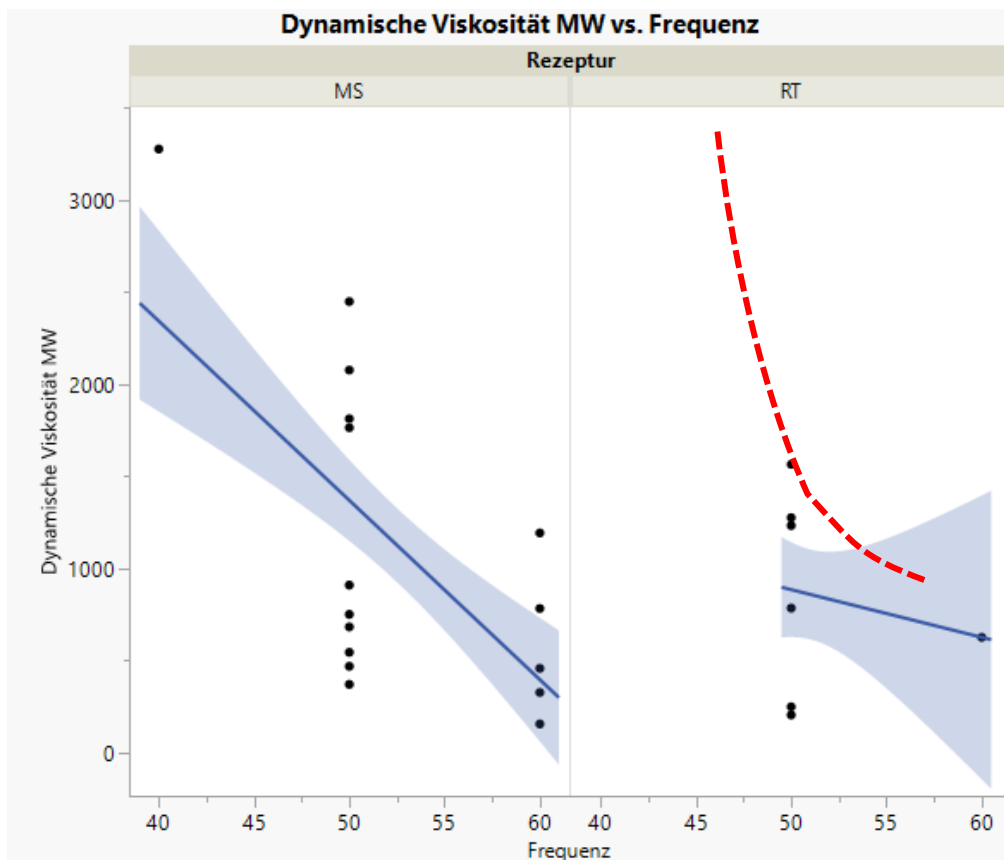


Abbildung 34: Dynamische Viskosität der Modellvibrationsfeuerbetone FBq-MS (links) und FBq-RT (rechts) als Funktion der Frequenz. Bei FBq-RT kam es aufgrund der hohen Dilatanz häufig zu Fehlversuchen. Die rot gestrichelte Linie stellt den postulierten Verlauf der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit der Frequenz dar.

### 6.3.1.3 Wechselwirkungsanalyse

Die Wechselwirkungsanalyse zeigt, wie die dynamische Viskosität der Modellvibrationsfeuerbetone durch das Zusammenspiel zwischen zwei Faktoren (q-Wert, Amplitude, Auszugsscherrate und Frequenz) beeinflusst wird (Abbildung 35 und Abbildung 36). Das Maximum eines Faktors ist dabei in blau, das Minimum in Rot dargestellt. Ein paralleler Verlauf zeigt, dass es keine Wechselwirkung gibt. Kreuzen sich die Kurven, tritt eine Wechselwirkung auf.

#### FBq-RT

Die Wechselwirkungsanalyse der Modellvibrationsfeuerbetone FBq-RT zeigt, dass nur Wechselwirkungen zwischen dem q-Wert und der Auszugsscherrate sowie der Frequenz und der Auszugsscherrate auftreten (Abbildung 35). Dabei zeigt sich, dass bei einer niedrigen Scherrate bei niedrigen q-Werten niedrigere dynamische Viskositäten auftreten. Gleichzeitig neigen Feuerbetone mit geringen q-Werten bei höheren Scherraten zu einer stärkeren Dilatanz. Währenddessen führt ein größerer q-Wert zu einer reduzierten Dilatanz.

Kleine q-Werte sind mit einer höheren Konzentration an Feinpartikeln verbunden, die leichter in Bewegung gesetzt werden können. Dies führt zu einer niedrigeren Fließgrenze, da diese Partikel bei geringeren Scherraten leichter fließen. Bei höheren Scherraten jedoch kommt es zu einer schnellen Verzahnung der Partikel, was den Fluss erschwert und zu einer stärkeren Dilatanz führt. Darüber hinaus geht mit einem niedrigeren q-Wert eine größere Menge an Feinpartikeln und damit verbundenen geringeren Wasser/Matrix-Ratio sowie höheren spezifischen Oberflächen der Partikel. Ein geringeres Wasser/Matrix-Verhältnis führt zu einer zähflüssigeren Schlicker, was die Fließfähigkeit

verringert und die Reibung zwischen den Partikeln erhöht. Ein weiterer Einflussfaktor ist die unvollständige Benetzung der feinsten Partikel, die durch einen leichten Wassermangel verursacht werden kann und zu einer stärkeren Verzahnung und höheren Reibung führt.

Zudem muss der Einfluss der Zementpartikelgröße berücksichtigt werden. Da die Zementkonzentration konstant gehalten wurde, fördert ein niedriger q-Wert eine monomodalere Partikelgrößenverteilung (PSD) und führt somit zu einer höheren dynamischen Viskosität.

Die Unterschiede zwischen den q-Werten werden auch durch den konstanten Additivgehalt begünstigt, da eine höhere Matrixkonzentration (z.B.  $q = 0,28$ ) für die gleiche Plastifizierung mehr Verflüssiger benötigt. Ein konstanter Additivgehalt bei unterschiedlichen Korngrößenverteilungen verringert jedoch den Verflüssigungseffekt bei Mischungen mit niedrigeren q-Werten.

Höhere q-Werte hingegen sind mit einer größeren Menge an groben Partikeln verbunden, was die Fließfähigkeit erhöht. Ein höherer q-Wert führt zudem zu einem höheren Anteil an Grobkorn. Bei niedrigeren Scherraten sind diese schwieriger in Bewegung zu setzen, was zu einer höheren Fließgrenze führt. Ist die Fließgrenze überwunden führt allerdings das geringere Wasser/Matrix-Verhältnis und niedrigeren spezifischen Oberfläche der Partikel in Kombination mit einem konstanten Additivgehalt zu einer niedrigeren Dilatanz.

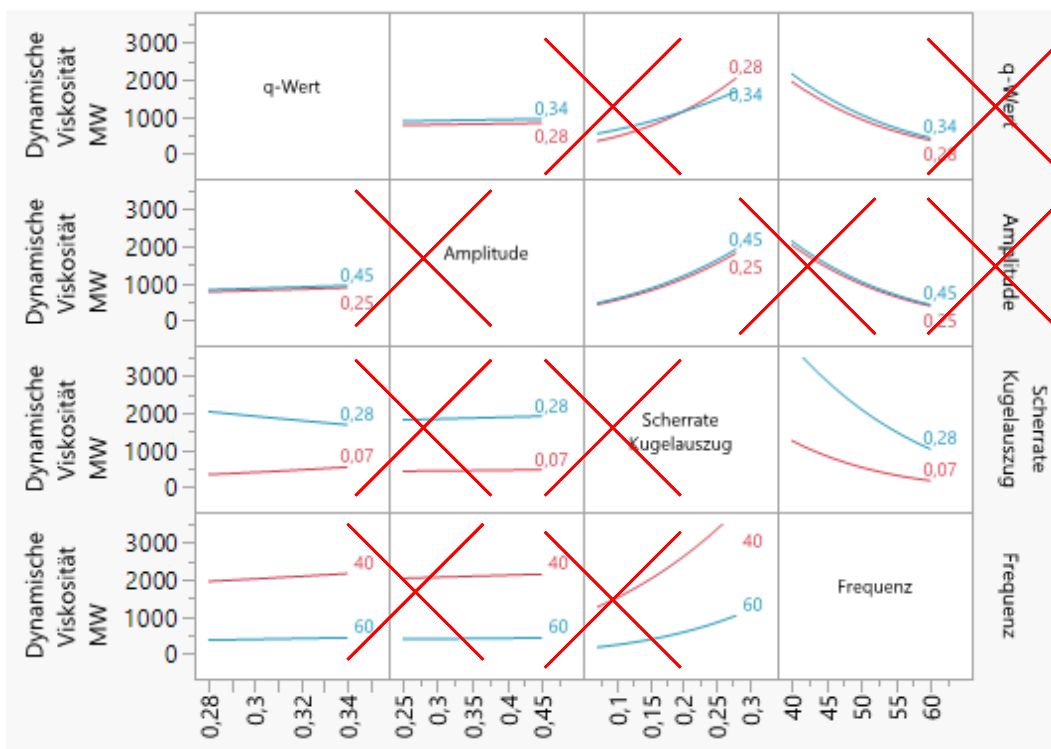


Abbildung 35: Wechselwirkungsanalyse der Faktoren q-Wert, Amplitude, Auszugsscherrate (hier Scherrate Kugelauszug) und Frequenz auf die dynamische Viskosität der Serie FBq-RT. „X“ markiert das Ausbleiben einer Wechselwirkung zwischen zwei Einflussfaktoren.

Neben der Wechselwirkung zwischen q-Wert und Auszugsscherrate, gibt es einen Trend zwischen Auszugsscherrate und Frequenz. Obwohl sich die Kurven nicht kreuzen, da die Effektgröße der Auszugsgeschwindigkeit deutlich höher ist, lässt sich erkennen, dass eine hohe Frequenz tendenziell zu einer niedrigeren Dilatanz führt.

Dilatanz tritt in Vibrationsfeuertbetonen auf, wenn sich die Partikel in einer Mischung verhaken oder miteinander "verzahnen", was die Fließfähigkeit verringert. Höhere Frequenz führen dazu, dass die

Partikel häufiger bewegt werden. Diese vielen Bewegungen verhindern, dass sich die Partikel langfristig in einer stabilen Verzahnung befinden. Bei hohen Frequenzen hingegen sorgen die häufigeren Bewegungen, bzw. die häufige Bewegungswechsel dafür, dass sich die Partikel ständig neu orientieren und lockern. Das hilft, die Verzahnungen zu lösen, da die Partikel mehr Chancen haben, ihre Position zu ändern und nicht in einer festen, verhakten Struktur zu bleiben. Infolgedessen wird die Struktur insgesamt lockerer und es entsteht weniger interpartikuläre Reibung, was zu einem niedrigeren Fließwiderstand führt. Durch das lockerere Gefüge bei erhöhten Frequenzen, kann die Kugel bei hohen Auszugsscherraten leichter durch das Gefüge bei geringem Widerstand gezogen werden, was zu einer geringen Dilatanz führt.

Neben einem gelockerten Gefüge kann eine erhöhte Frequenz durch erhöhte Reibung zu einem erhöhten Temperaturanstieg während der Messung führen. Ein Temperaturanstieg kann dazu beitragen, dass sich die Partikel leichter bewegen, da die Viskosität des Systems (insbesondere bei einer wässrigen Matrix) sinken kann.

### FBq-MS

Die Wechselwirkungsanalyse der Modellvibrationsfeuerbetone FBq-MS zeigt, dass Wechselwirkungen zwischen Frequenz und Auszugsscherrate und zwischen Frequenz und Amplitude auftreten (Abbildung 36). Bei niedrigen Frequenzen zeigt das Material eine stärkere Dilatanz, da die Partikel durch die vergleichsweise geringen Schwingungen weniger Gelegenheit haben, Verzahnungen zwischen Partikeln zu lösen. Diese Verzahnungen führen zu einer Erhöhung der Viskosität, da die Partikelstrukturen dem Fließen, bzw. dem Auszug der Kugel einen erhöhten Widerstand entgegenzusetzen. Gerade bei hohen Scherraten sorgt das dichte, verzahnte Gefüge zu einem hohen Fließwiderstand. Bei hohen Frequenzen hingegen bleibt die Viskosität auch bei hohen Auszugsscherraten nahezu unverändert. Dies liegt daran, dass die Partikel, durch die die Vielzahl an Bewegungen und die wechselnden Richtungen der Schwingungen verhindern, dass sich die Partikel dauerhaft ineinander verhaken, was eine Lockerung der Partikelstruktur zur Folge hat. Gleichzeitig sorgt die hohe kinetische Energie der Partikel dafür, dass sie sich weniger gegenseitig blockieren, wodurch die interpartikuläre Reibung sinkt und das Material fließfähiger bleibt.

Darüber hinaus wird die dynamische Viskosität der FBq-MS-Serie durch die Wechselwirkung von der Frequenz und Amplitude beeinflusst. Während bei hohen Amplituden keine Wechselwirkung auftritt, führt bei hohen Frequenzen eine niedrige Amplitude zu niedrigeren dynamischen Viskositäten. Eine hohe Amplitude führt bei niedrigen Frequenzen dazu, dass die Partikel größere Bewegungen ausführen und sich dadurch leichter aus stabilen Verzahnungen lösen. Dies reduziert die interpartikuläre Reibung und senkt somit die Viskosität.

Bei hohen Frequenzen hingegen hat eine große Amplitude kaum noch Einfluss auf das Fließverhalten. Da die Partikel bereits durch die hohe Frequenz kontinuierlich bewegt werden, sind sie ohnehin weniger stark verzahnt, sodass eine zusätzliche Auslenkung nicht zu einer weiteren Reduzierung der Viskosität führt. Die Partikelstruktur bleibt aufgrund der intensiven Schwingungen ohnehin gelockert, sodass die Amplitude hier keinen signifikanten zusätzlichen Effekt mehr hat.

Auch der  $q$ -Wert, zeigt eine deutliche Wechselwirkung mit der Frequenz. Niedrigere  $q$ -Werte, die mit einem höheren Anteil an Feinpartikeln einhergehen, zeigen bei niedrigen Frequenzen eine höhere dynamische Viskosität. Dies liegt daran, dass die feinen Partikel durch ihre größere spezifische Oberfläche mehr Kontaktpunkte haben und sich leichter verzahnen, was die Fließfähigkeit einschränkt.

Bei hohen Frequenzen hingegen zeigen Materialien mit niedrigem q-Wert eine niedrigere dynamische Viskosität. Der höhere Anteil an Feinpartikeln wird durch die Vibration leichter in Bewegung gesetzt, wodurch sich ein aufgelockertes Gefüge bildet. Die häufigen Schwingungen verhindern, dass sich stabile Netzwerke aus Partikeln ausbilden, da die feinen Partikel ständig umgelagert werden und weniger Gelegenheit haben, feste Verbindungen einzugehen. Dadurch bleibt das Material insgesamt fließfähiger.

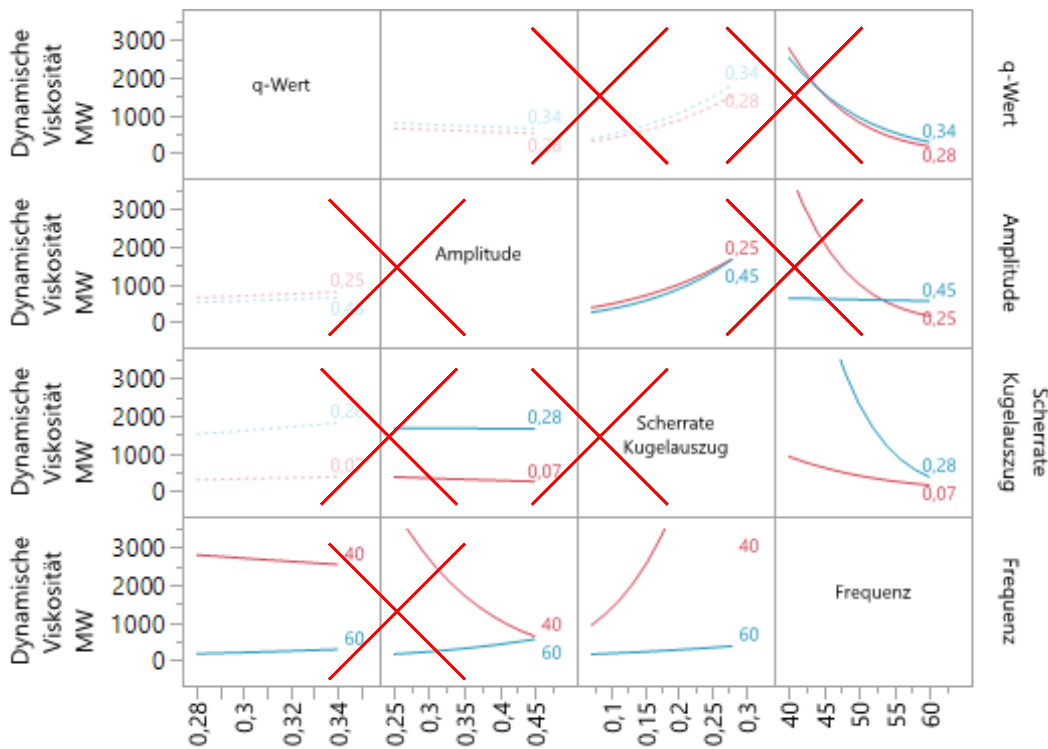


Abbildung 36: Wechselwirkungsanalyse der Faktoren q-Wert, Amplitude, Auszugsscherrate (hier Scherrate Kugelauszug) und Frequenz auf die dynamische Viskosität der Serie FBq-MS. „X“ markiert das Ausbleiben einer Wechselwirkung zwischen zwei Einflussfaktoren.

### 6.3.1.4 Vorhersage der dynamischen Viskosität

Aus den konsolidierten Ergebnissen wurde eine Vorhersageformel der dynamischen Viskosität für FBq-RT und FBq-MS entwickelt. Diese ermöglicht es, in Abhängigkeit der Vibrationseinstellungen (Frequenz und Amplitude), Korngrößenverteilung (q-Wert) und Auszugsscherrate die dynamische Viskosität und damit die Fließfähigkeit der Modellvibrationsfeuerbetone vorherzusagen. In Abbildung 37 ist der Zusammenhang zwischen empirisch bestimmten und den vorhergesagten dynamischen Viskositäten gegenübergestellt. Anhand des Bestimmtheitsmaß wird deutlich, dass die Vorhersage für die Modellvibrationsfeuerbetone FBq-RT weniger genau ist. Dies bedingt sich durch die gegenüber FBq-MS deutlich höhere Dilatanz und die daraus folgenden Fehlversuche. Die Datenmenge ist daher geringer und die Vorhersage ungenauer.

Die Vorhersage von FBq-MS ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 genauer. Trotzdem führt die Vorhersage hier noch zu einer leichten Überschätzung der dynamischen Viskosität gegenüber den gemessenen dynamischen Viskositäten. Die Genauigkeit beider Vorhersagen kann durch weitere Variationen der Faktoren verbessert werden, ermöglicht aber bereits, die Fließfähigkeit einzuschätzen.

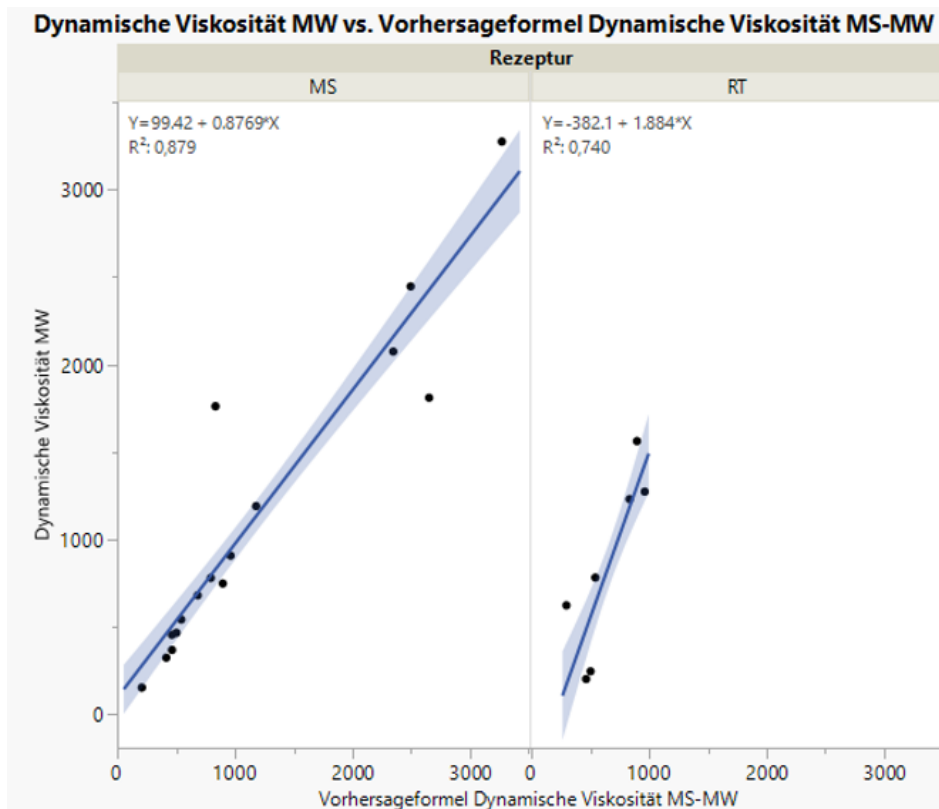


Abbildung 37: Gemessene dynamische Viskosität gegenüber der durch die Vorhersageformel berechneten dynamischen Viskosität. Durch die hohe Dilatanz der FBq-RT-Modellvibrationsfeuerbetone kam es zu häufigen Fehlversuchen, was zu einem geringen Bestimmtheitsmaß ( $r^2 = 0,74$ ) gegenüber der FBq-MS-Reihe ( $r^2 = 0,88$ ) führt.

### 6.3.2 Messungen mit dem 3D-Ausbreitmaß

Aufgrund der signifikanten Unterschiede im rheologischen Verhalten zwischen den mit Mikrosilika hergestellten (FBq-MS) und den Referenzsystemen ohne Mikrosilika (FBq-RT) wurde die Interaktion von Korngrößenverteilung und Vibrationsparametern getrennt für beide Systemvarianten untersucht. Ziel war es, das Sensitivitätsverhalten der jeweiligen Mischungen gegenüber variierenden Vibrationsbedingungen systematisch zu erfassen.

Die Versuchsreihen basierten auf einem statistisch geplanten Ansatz mit unterschiedlichen Amplituden (0,25 mm, 0,35 mm, 0,45 mm) und Frequenzen (40–80 Hz). Abbildung 38 zeigt den Zusammenhang zwischen Vibrationsbeschleunigung (Formel 3) und 3D-Ausbreitmaß für verschiedene  $q$ -Werte ( $q = 0,28$  blau,  $q = 0,31$  rot,  $q = 0,34$  grün), getrennt nach FB\_MS (links) und FB\_RT (rechts). Die grobkörnigen Versätze ( $q = 0,34$ ) reagieren deutlich auf ansteigende Beschleunigung: Das Ausbreitmaß nimmt mit zunehmender Vibrationsintensität stark zu, erkennbar an den steileren Regressionsgeraden und geringeren Streuung im Vergleich zu den feinkörnigen Versätzen. Im Gegensatz dazu zeigen die feinkörnigen Mischungen ( $q = 0,28$ ) kaum eine Abhängigkeit vom Beschleunigungsniveau; ihr Ausbreitverhalten bleibt nahezu konstant, was auf erhöhte innere Reibung und geringere Fließfähigkeit hinweist.

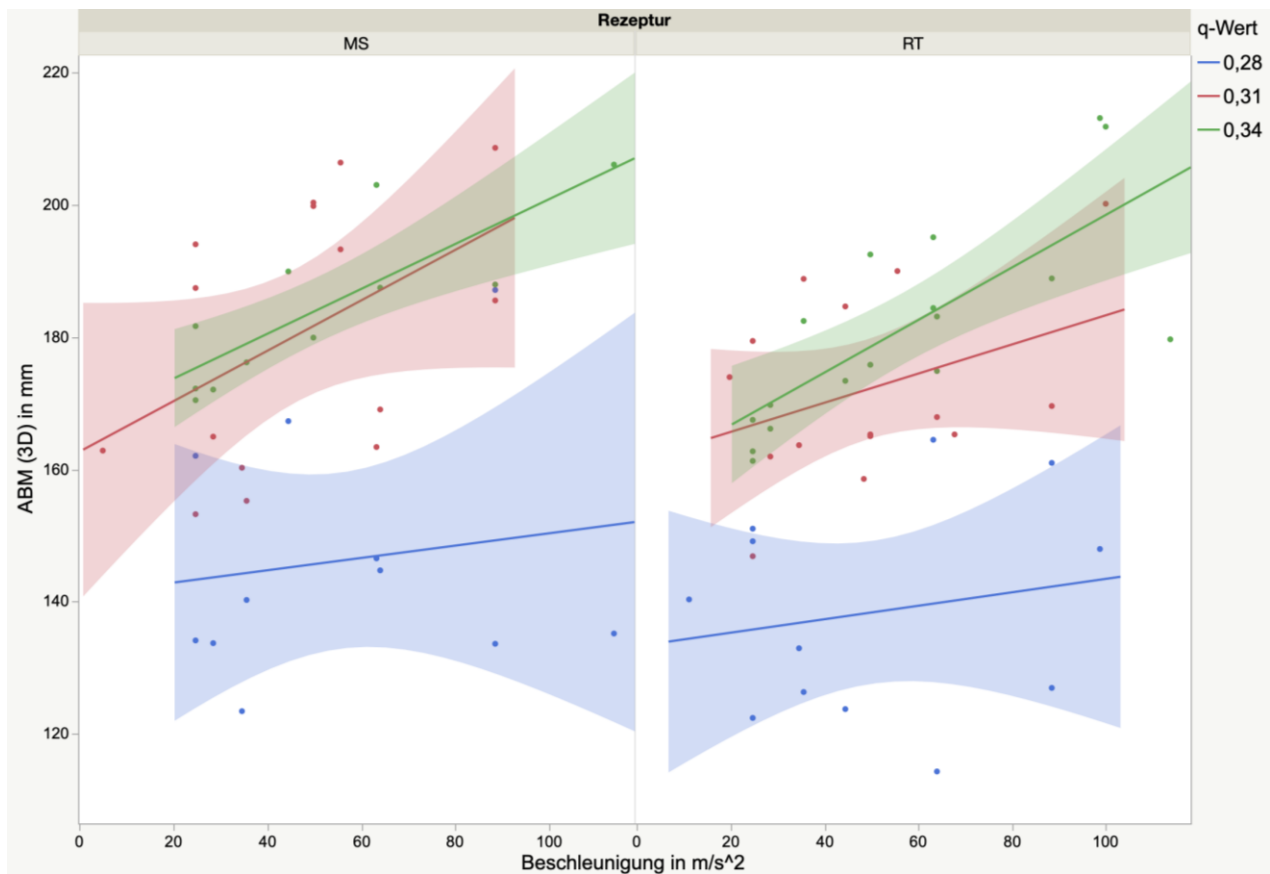


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Vibrationsbeschleunigung und 3D-Ausbreitmaß für verschiedene q-Werte (0,28: blau, 0,31: rot, 0,34: grün) dargestellt für FBq\_MS (links) und FBq\_RT (rechts). Größere Versätze reagieren sensibler auf ansteigende Beschleunigung und weisen höhere Ausbreitmaße auf.

### 6.3.3 Statistische Analyse: Signifikante Einflussfaktoren auf Fließ- und Grüneigenschaften

Zur Identifikation der maßgeblichen Einflussfaktoren auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften wurden ergänzend statistische Auswertungen mit JMP nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate durchgeführt. Dabei wurden Signifikanztests mit einem Signifikanzniveau von  $p = 0,05$  angewendet. Einflussgrößen mit  $p < 0,05$  wurden als statistisch signifikant bewertet und zur weiteren Interpretation herangezogen.

#### Statistische Analyse von FBq-RT

Im Rahmen der statistischen Auswertung zur Bestimmung relevanter Einflussgrößen auf das Fließverhalten grobkörniger Modellfeuerbetone (FBq-RT) konnten zwei Parameter als signifikant identifiziert werden: der q-Wert und die Frequenz. Die Analyse ergibt, dass der q-Wert einen nicht-linearen Einfluss auf das 3D-Ausbreitmaß ausübt (Abbildung 39). Mit zunehmendem q-Wert steigt das Ausbreitmaß zunächst deutlich an und erreicht bei etwa  $q = 0,33$  einen Wendepunkt. Jenseits dieses Wertes ist keine weitere signifikante Erhöhung zu beobachten, was auf eine optimale Fließfähigkeit des Systems schließen lässt. Darüber hinaus erweist sich auch die Frequenz als signifikanter Einflussfaktor. Es konnte festgestellt werden, dass höhere Frequenzen zu einem kontinuierlichen Anstieg des 3D-Ausbreitmaßes führen. Dieser Anstieg lässt sich durch eine intensivere Energieübertragung während der Vibration erklären. Die Amplitude hingegen weist eine schwache Wirkung auf, die im vorliegenden Modell nicht als statistisch signifikant bestätigt werden konnte.

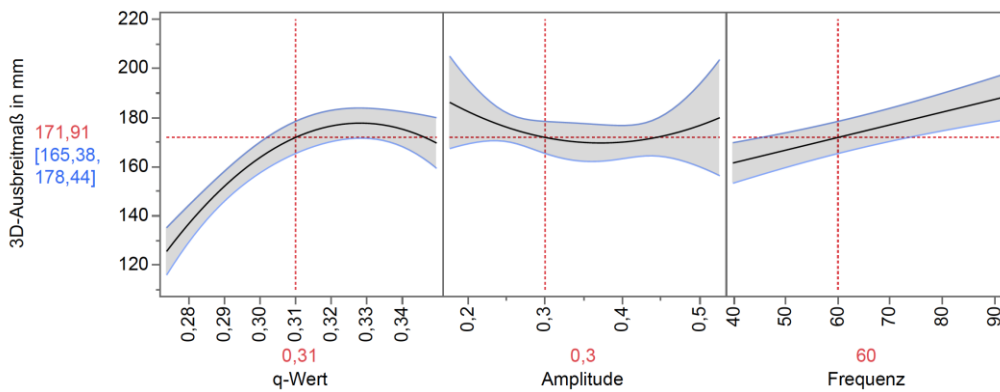


Abbildung 39: Vorhersageanalyse von 3D-Ausbreitmaßen der FBq-RT durch Änderung von Q-Wert, Amplitude und Frequenz.

### Kaltbiegefestigkeit FBq-RT

Die Zusammenfassung der Effekte in Bezug auf die Kaltbiegefestigkeit bei 110 °C (Abbildung 40) zeigt, dass der q-Wert einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit der FBq-RT hat. Mit zunehmendem q-Wert ist ein deutlicher Rückgang der Kaltbiegefestigkeit zu beobachten, der bis zu einem Minimum bei einem q-Wert von etwa 0,32 führt. In diesem Bereich erreicht die Festigkeit einen Tiefpunkt von rund 8,5 MPa. Im Vergleich dazu wirken sich Amplitude und Frequenz im untersuchten Bereich nur geringfügig auf die Festigkeit aus. Das gleiche Tendenz wurde ebenfalls (Abschnitt 6.2.5) bei der Analyse der Kaltbiegefestigkeit unter Standard-Vibrationsparametern festgestellt.

Ein leichter Anstieg der Kaltbiegefestigkeit ist bei höheren Amplituden und niedrigeren Frequenzen erkennbar, dieser Effekt bleibt jedoch im Vergleich zum Einfluss des q-Werts deutlich geringer. Das Modell bestätigt somit, dass grobkörnigere Versätze zu einer signifikanten Schwächung der Kaltbiegefestigkeit führen und die Variation der Vibrationsparameter keinen substanziellen Ausgleich dieses Effekts ermöglicht.

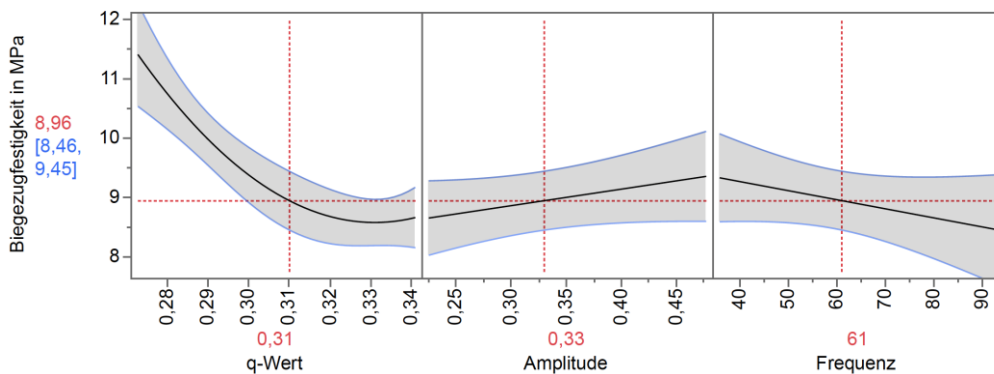


Abbildung 40: Effektzusammenfassung der Einflussfaktoren Q-Wert, Frequenz und Amplitude auf die Kaltbiegefestigkeit bei 110 °C von FBq-RT.

### Offene Porosität

Die statistische Modellierung der offenen Porosität für FBq-RT zeigt, dass die Vibrationsparameter – insbesondere Amplitude und Frequenz – signifikant zum Porenanteil beitragen, während der q-Wert keinen relevanten Einfluss ausübt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich die offene Porosität mit zunehmender Amplitude und Frequenz zunächst verringert, bei etwa 0,35 mm Amplitude und 65 Hz Frequenz ein Minimum erreicht und bei weiterer Erhöhung der Amplitude wieder zunimmt. Dieses Verhalten weist auf einen optimalen Wirkungsbereich der Vibrationsparameter hin, innerhalb dessen eine

maximale Verdichtung und somit eine minimale offene Porosität erzielt wird. Außerhalb dieses Bereichs nimmt der Porenanteil wieder zu, was auf mögliche Entmischungseffekte oder unzureichende Konsolidierung hindeutet.

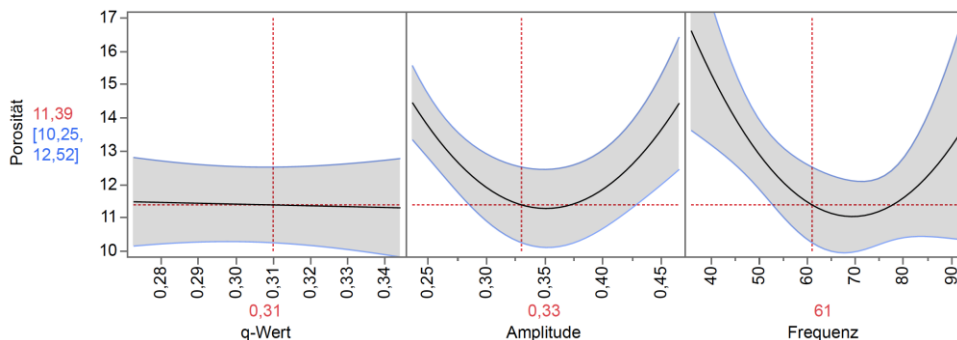


Abbildung 41: Einfluss von q-Wert, Amplitude und Frequenz auf die offene Porosität (FBq-RT). Das Minimum liegt bei ca. 0,35 mm Amplitude und 65 Hz Frequenz, während der q-Wert keine signifikante Auswirkung zeigt.

### Effektzusammenfassung des gesamten Modells FBq-RT

Zur integrativen Betrachtung wurden die Ergebnisse für das 3D-Ausbreitmaß, die Kaltbiegefestigkeit bei 110 °C und die offene Porosität in Abbildung 42 zusammengeführt. Damit lassen sich die dominierenden Einflussgrößen und ihre Wechselwirkungen simultan bewerten.

Die Auswertung bestätigt, dass das rheologische Verhalten der Versätze ohne MS-Zugabe (FBq-RT) im Wesentlichen durch die Kornzusammensetzung (q-Wert) und die Vibrationsfrequenz bestimmt wird. Die Amplitude zeigt dagegen nur in Teilbereichen messbare Effekte. Besonders auffällig ist der Einfluss auf die offene Porosität, die bei etwa 0,35 mm Amplitude sowie bei Frequenzen um 60 Hz ein Minimum erreicht.

Die Ergebnisse verdeutlichen zudem bestehende Zielkonflikte: Während feinere Versätze eine höhere Kaltbiegefestigkeit aufweisen, geht dies mit einem reduzierten Fließvermögen einher. Gleichzeitig steigt die offene Porosität außerhalb des optimalen Parameterfensters wieder an, was die Materialdichte und damit die Endfestigkeit nachteilig beeinflussen kann.

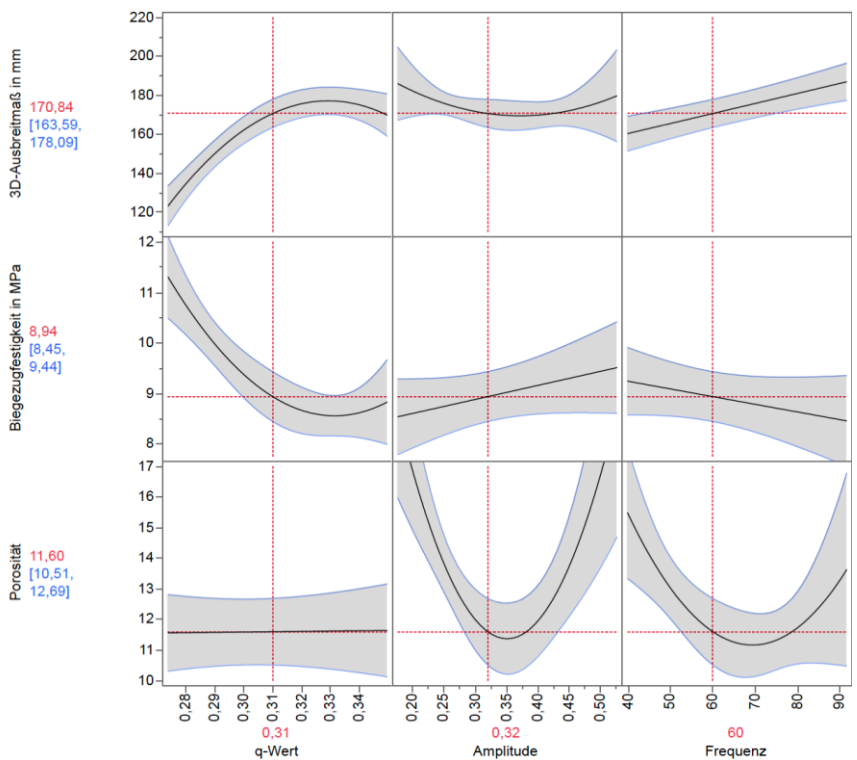


Abbildung 42: Prediction Profiler für 3D-Ausbreitmaß, Kaltbiegefestigkeit und offene Porosität der Referenzversätze (FBq-RT) in Abhängigkeit von q-Wert, Amplitude und Frequenz.

### Statistische Analyse von FBq-MS

Die statistische Auswertung der Versätze mit MS-Zugabe (FBq-MS) zeigt eine vergleichbare Tendenz zu den Ergebnissen der Systeme ohne MS-Zugabe (FBq-RT). Als signifikante Einflussgrößen auf das 3D-Ausbreitmaß wurden der q-Wert und die Frequenz identifiziert, während die Amplitude lediglich marginale Effekte aufwies und statistisch nicht signifikant war.

Abbildung 43 verdeutlicht, dass das Ausbreitmaß mit zunehmender Frequenz kontinuierlich ansteigt und mit steigendem q-Wert bis etwa 0,31 zunimmt. Jenseits dieses Bereichs stabilisieren sich die Werte, ohne dass ein weiterer signifikanter Zuwachs erkennbar ist. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Fließfähigkeit von MS-haltigen Versätzen insbesondere im Bereich mittlerer q-Werte und höherer Frequenzen optimiert werden kann.

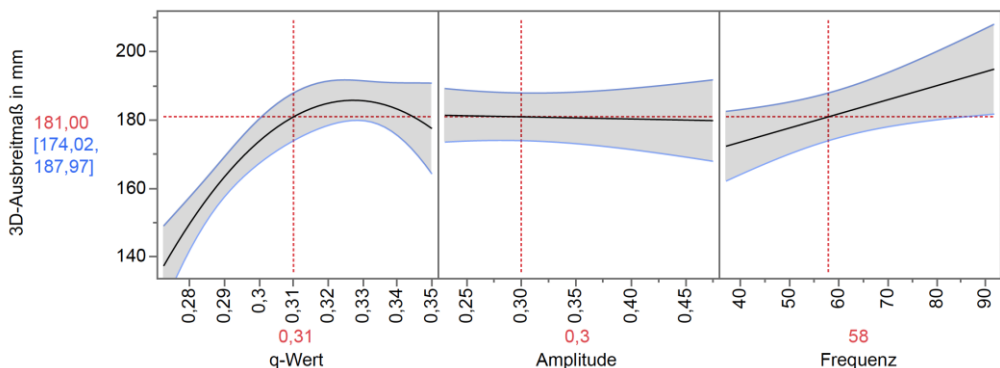


Abbildung 43: Vorhersageanalyse von 3D-Ausbreitmaßen der FBq-MS durch Änderung von Q-Wert, Amplitude und Frequenz.

### Kaltbiegefestigkeit FBq-MS

Die Analyse der Kaltbiegefestigkeit bei 110 °C der Versätze mit Mikrosilika (FBq-MS) zeigt, dass im Gegensatz zu den Versätzen ohne Mikrosilika keine statistisch signifikanten Haupteffekte identifiziert werden konnten. Das Modell weist für die Vorhersage der KBF eine begrenzte Erklärungskraft auf, was darauf hindeutet, dass die untersuchten Faktoren (q-Wert, Amplitude, Frequenz) im gewählten Bereich keinen dominanten Einfluss ausüben.

Wie in Abbildung 44 dargestellt, lässt sich dennoch ein leichter Trend erkennen. Die Festigkeit erreicht bei einem q-Wert von etwa 0,31 einen schwachen Maximalwert. Darüber hinaus zeigt die Frequenz einen abnehmenden Einfluss, insbesondere oberhalb von 60 Hz. Die Amplitude entfaltet im untersuchten Bereich keine systematische Wirkung.

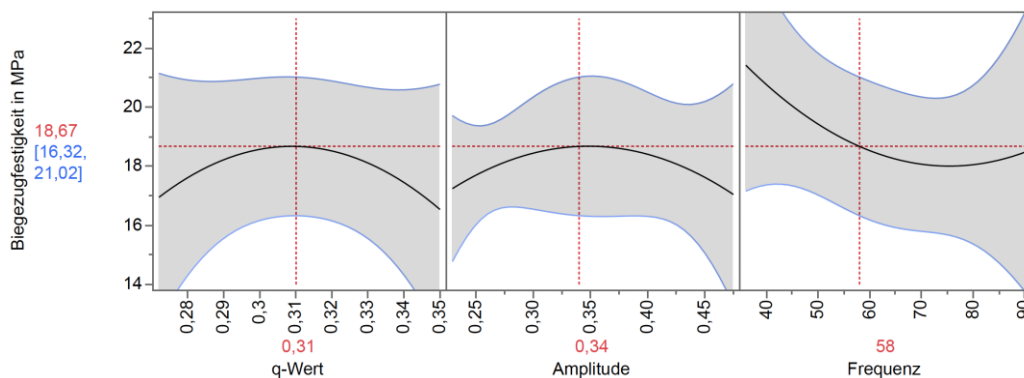


Abbildung 44: Prediction Profiler des multiplen Regressionsmodells für die Kaltbiegefestigkeit der Versätze mit MS-Zugabe (FBq-MS) in Abhängigkeit von q-Wert, Amplitude und Frequenz.

### Offene Porosität FBq-MS

Die statistische Analyse zur offenen Porosität von Mikrosilika-haltigen Modellfeuerbetonen (FBq-MS) zeigt ein differenziertes Bild im Vergleich zur RT-Variante. Während Frequenz und q-Wert keine signifikanten Einflüsse auf die offene Porosität ausüben, identifiziert das Modell einen quadratischen Effekt der Amplitude als relevanten Einflussfaktor. Wie Abbildung 45 darstellt, weist die offene Porosität ein charakteristisches Minimum bei einer Amplitude von 0,34 mm auf. Dies legt nahe, dass sich durch gezielte Wahl der Vibrationsamplitude der Porenanteil im Frischzustand der Feuerbetone optimieren lässt. Außerhalb dieses Bereichs steigt die offene Porosität wieder an, was auf einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Amplitude und Porenstruktur hinweist. Die Ergebnisse unterstreichen, dass im Gegensatz zu FBq-RT bei FBq-MS die Amplitudensteuerung ein effektiverer Ansatz zur Steuerung der Materialverdichtung und somit zur Verbesserung der Grünroh-dichte sein kann.

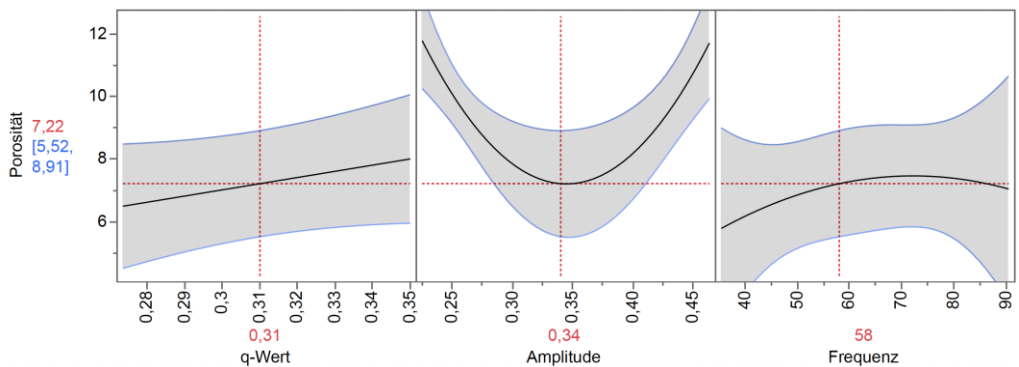


Abbildung 45: Vorhersageanalyse der offenen Porosität von FBq-MS in Abhängigkeit von Q-Wert, Frequenz und Amplitude.

**Effektzusammenfassung des gesamten Modells FBq-MS**

Die in Abbildung 46 dargestellte Gesamtanalyse verdeutlicht die Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Parametern (q-Wert, Amplitude, Frequenz) und den Zielgrößen 3D-Ausbreitmaß, Kaltbiegefestigkeit sowie offener Porosität bei Mikrosilika-haltigen Modellfeuerbetonen. Die statistische Modellierung zeigt, dass kein einzelner Parameter alle Eigenschaften gleichzeitig optimiert. Vielmehr tritt ein Zielkonflikt zwischen hoher Fließfähigkeit und günstigen Grüneigenschaften auf.

Das 3D-Ausbreitmaß steigt bei mittleren q-Werten ( $\approx 0,31$ ) sowie mit zunehmender Frequenz signifikant an, während in diesem Bereich die Kaltbiegefestigkeit leicht abnimmt. Für die offene Porosität wird hingegen ein Minimum bei einer Amplitude von etwa 0,34 mm erreicht, was auf einen optimalen Verdichtungszustand hinweist.

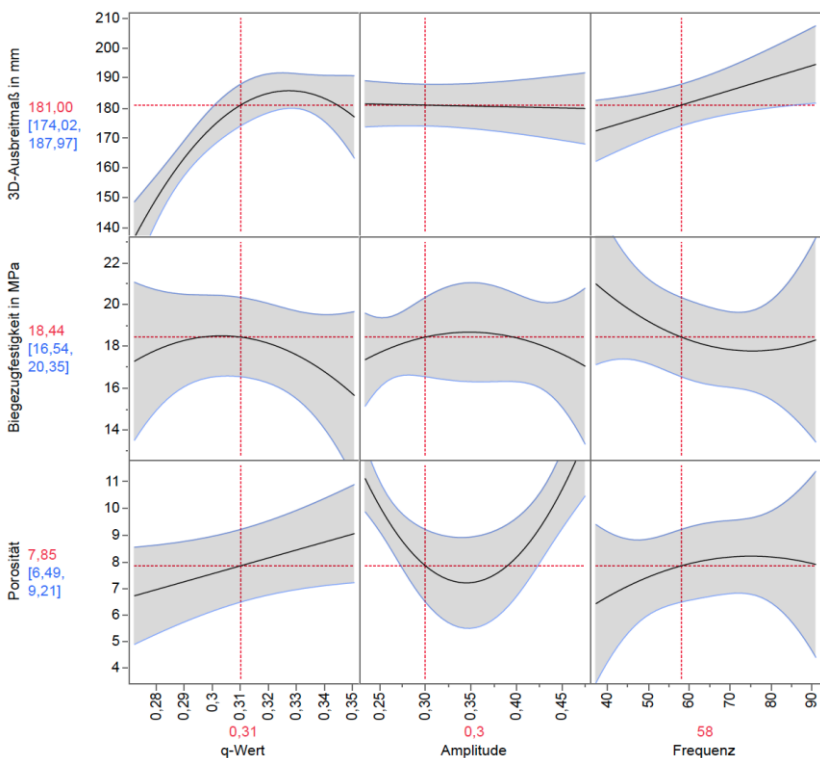


Abbildung 46: Effektzusammenfassung und Wechselwirkungen verschiedener Einflussfaktoren auf die Fließ- und Grüneigenschaften von FBq-MS.

Die kombinierte Betrachtung aller Zielgrößen macht deutlich, dass ein ausgewogenes Zusammenspiel der Parameter erforderlich ist, um ein optimiertes Eigenschaftsprofil zu erzielen. Die so ermittelten optimalen Einstellwerte für FBq-RT und FBq-MS sind in der nachfolgenden Übersichtstabelle zusammengefasst und bilden eine fundierte Grundlage für die materialtechnische Auslegung vibrationsverarbeiteter Feuerbetone.

### Fließgrenze

Die statistische Auswertung der Einflussfaktoren auf die Fließgrenze der Modellfeuerbetone zeigt, dass sowohl die Rezeptur (MS- bzw. RT-Systeme) als auch die Korngrößenverteilung (q-Wert) hochsignifikante Effekte aufweisen. Im Gegensatz dazu konnten für Frequenz und Temperatur keine signifikanten Einflüsse identifiziert werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Fließgrenze der RT-Versätze mit zunehmendem q-Wert ansteigt, während die MS-Versätze im Mittel niedrigere Werte erreichen und weniger sensitiv auf Änderungen des q-Werts reagieren. Dieser Unterschied ist auf die Kornstruktur und die erhöhte Packungsdichte durch Mikrosilika zurückzuführen, die zu einer Verringerung der inneren Reibung führt.

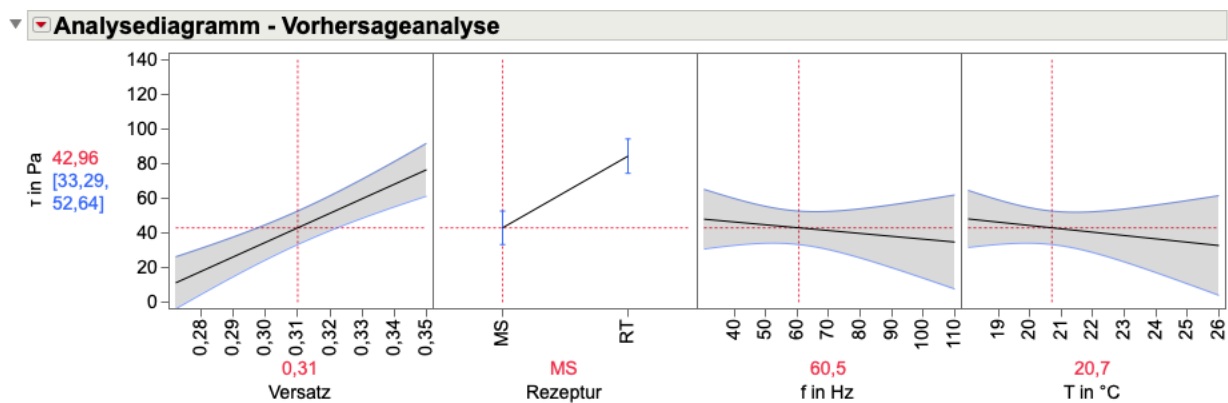


Abbildung 47: Vorhersageanalyse der Einflussfaktoren auf die Fließgrenze der Modellfeuerbetone. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Anstieg der Fließgrenze mit zunehmendem q-Wert sowie bei RT-Rezepturen, während Frequenz und Temperatur im untersuchten Bereich nur geringe Effekte aufweisen.

Frequenz und Temperatur zeigen lediglich geringfügige Schwankungen ohne systematischen Trend. Damit bestätigt sich, dass die Fließgrenze primär durch die Materialzusammensetzung bestimmt wird, während externe Faktoren wie Vibration und Umgebungstemperatur innerhalb der untersuchten Bereiche nur eine untergeordnete Rolle spielen.

## **6.4 Vergleichende Analyse der rheologischen Eigenschaften und deren Einfluss auf die Einseigenschaften der Feuerbetone**

### **6.4.1 Hochtemperatureigenschaften**

#### **6.4.1.1 Temperaturwechselbeständigkeit**

Die Temperaturwechselbeständigkeit aller MS und RT-Versätze wird in Abbildung 48 anhand der Restschalllaufzeiten in Prozent dargestellt, wie es in EN 993-11 Methode B vorgegeben ist. Die Temperaturwechselbeständigkeit wurde an 3 Prüfkörpern pro Material und Vibrationsparametern durchgeführt und die Restschalllaufzeit gemessen. Typischerweise verringert sich die Schalllaufzeit, da die Temperaturwechsel das Material schädigen. Je größer die Schädigung, desto geringer wird die Restschalllaufzeit, womit man einen Überblick der Temperaturwechselbeständigkeit erhält.

Im Folgenden wird die Auswirkung der Änderung der q-Werte (0,28/0,31/0,34) auf die Temperaturwechselbeständigkeit untersucht. Zudem wird der Einfluss der Vibrationsparameter anhand des Vergleichs zwischen Standard- (Amplitude = 0,25 mm, Frequenz = 50 Hz) sowie deutlich höheren Vibrationsparametern (Amplitude = 0,45 mm, Frequenz = 80 Hz) diskutiert. Zunächst zeigt Abbildung 48, dass die Schädigung durch Thermoschocks, indiziert über die Restschalllaufzeit in einer Größenordnung von 63,5 bis 70,5 % zu liegen kommen. Die Ergebnisse haben zum Teil hohe Mittelwertabweichungen von bis zu 8 Prozentpunkten, was für den Versuch nicht untypisch ist, da ein Auftreten von Risseinleitungen mitunter eine statistische Größe ist.

Dennoch können hier Trends beobachtet werden, die eine Abhängigkeit der Thermoschockbeständigkeit von der Auswahl der Vibrationsparametern vermuten lässt. Mit Ausnahme des mikrosilikahaltigen Versatzes mit einem q-Wert von 0,28, zeigen alle Prüfkörper, die unter Standardbedingungen, also einer Amplitude von 0,25 mm und einer Frequenz von 50 Hz, einvibriert wurden, höhere Restfestigkeiten als die mit höherem Energieeintrag (0,45 mm, 80 Hz) hergestellten. Für die Modellfeuerbetone ohne Mikrosilika (FBq-RT) korreliert das gut mit der offenen Porosität, die in Abbildung 49 und Abbildung 50 gegen die Restschalllaufzeit abgetragen ist. Hier wird deutlich, dass mit zunehmender offener Porosität die Temperaturwechselbeständigkeit besser wird und die mit 0,45 mm, 80 Hz hergestellten Proben dichter sind. Generell wird davon ausgegangen, dass bis zu einer Gesamtporosität von 25 Vol.-% die Temperaturwechselbeständigkeit besser wird. Für die Modellfeuerbetonreihe mit Mikrosilika (FBq-MS) ist der Trend weniger ausgeprägt, was daran liegt, dass diese Feuerbetone allgemein mit einer offenen Porosität < 12 Vol.-% eine geringere Porosität aufweisen.

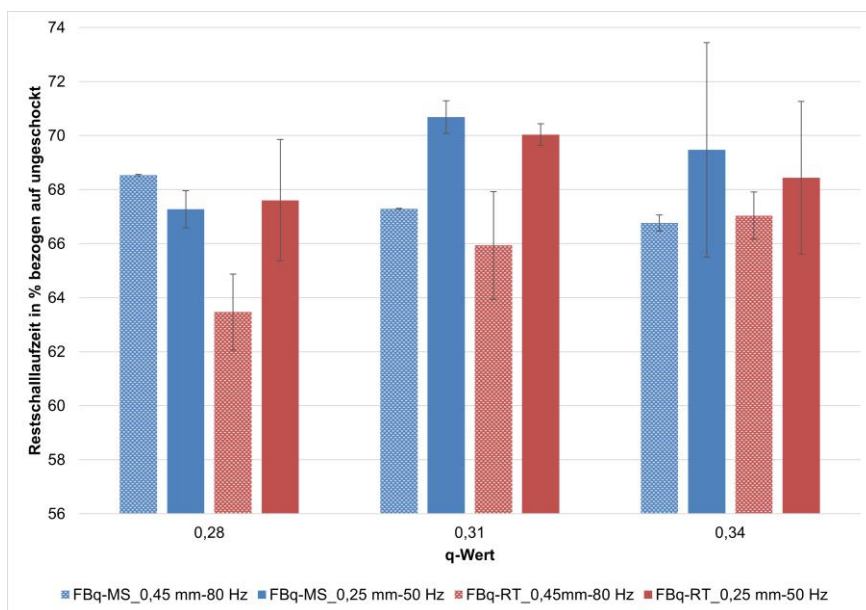


Abbildung 48: Temperaturwechselbeständigkeit der Modellvibrationsfeuerbeton-Serien FBq-MS und FBq-RT mit unterschiedlichen q-Werten und unterschiedlichen Vibrationsbedingungen (Amplitude 0,25 vs. 0,45 mm, Frequenz 50 vs. 80 Hz) dargestellt, nach der Restschalllaufzeit in %.

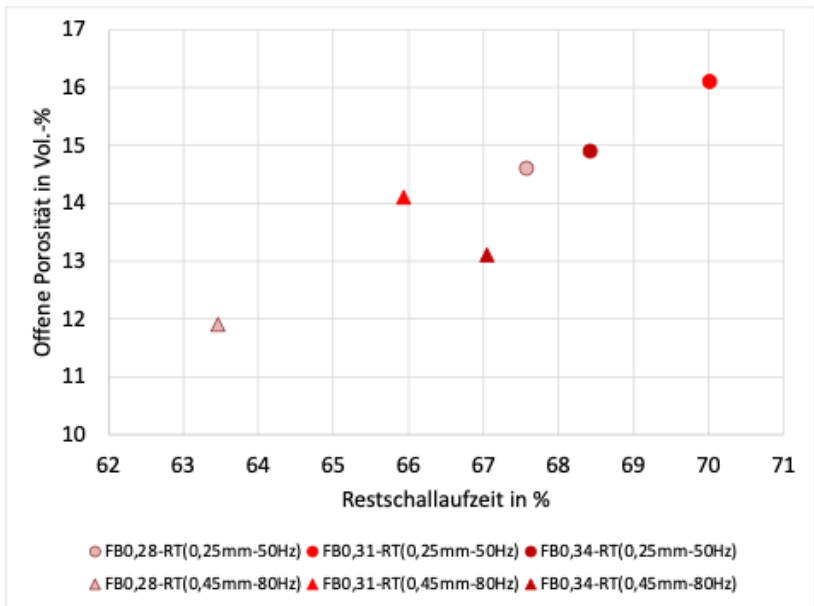


Abbildung 49: Restschalllaufzeit nach Temperaturwechsel in Abhängigkeit von der offenen Porosität für die Modellvibrationsfeuerbeton-Serie FBq-MS mit unterschiedlichen q-Werten und unterschiedlichen Vibrationsbedingungen (Amplitude 0,25 vs. 0,45 mm, Frequenz 50 vs. 80 Hz).

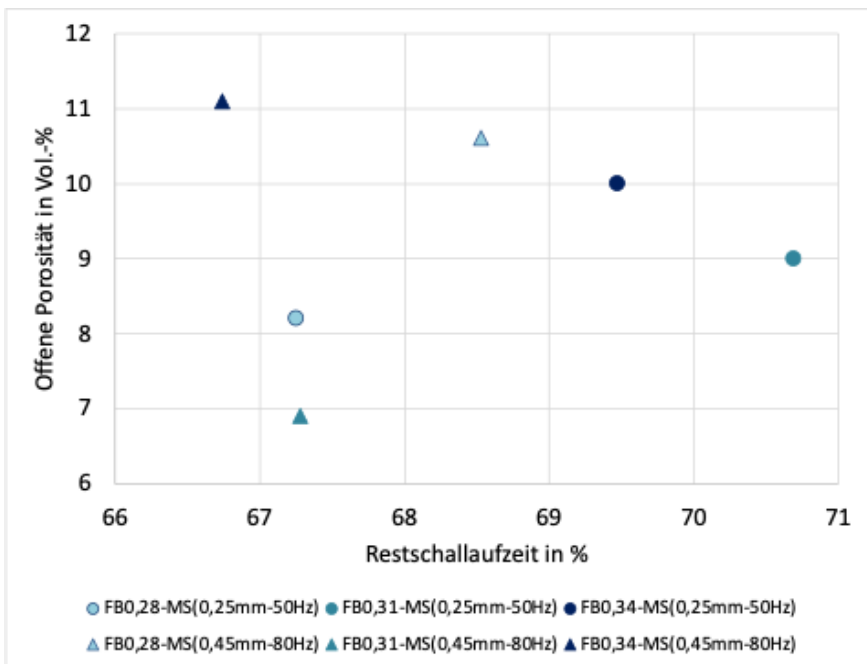


Abbildung 50: Restschalllaufzeit nach Temperaturwechsel in Abhängigkeit von der offenen Porosität für die Modellvibrationsfeuerbeton-Serie FBq-MS mit unterschiedlichen q-Werten und unterschiedlichen Vibrationsbedingungen (Amplitude 0,25 vs. 0,45 mm, Frequenz 50 vs. 80 Hz).

### 6.4.1.2 Korrosionsbeständigkeit

Die Korrosionsbeständigkeit in Abhängigkeit von q-Wert und Vibrationsparametern wurde gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.5.2.2 durchgeführt.

### Makroskopische Beurteilung der geschnittenen Tiegel im Vergleich

Nach erfolgtem Korrosionstest wurden die Tiegel mittig zersägt, fotografisch dokumentiert und gegenübergestellt. Die Abbildung 51 dokumentiert das Infiltrationsverhalten der mikrosilikafreien Versatzvariationen und in Abbildung 52 die mit Mikrosilika.

Beide Typen lassen sich an der Eigenfarbe gut unterscheiden, da die Zugabe vom Mikrosilika eine grauere Eigenfarbe der Feuerbetone verursacht. Zunächst fällt auf, dass im Falle der Feuerbetone ohne Mikrosilika dem Stahlkörper noch die Ca-reiche Schlacke überlagert ist, die im Falle der Versätze mit Mikrosilika vollständig in das Gefüge des Feuerbetons infiltriert ist. Die rote, gestrichelte Linie zeichnet in etwa die Infiltrationstiefe nach.

Anhand der roten, gestrichelten Linie wird aus Abbildung 51 deutlich, dass bei den Feuerbetonen ohne Mikrosilika kaum eine Abhängigkeit der Infiltrationstiefe vom  $q$ -Wert, also der Partikelgrößenverteilung besteht. Die Intensivierung des Vibrationsprozess (0,45mm und 80 Hz) führt zu keiner signifikant höheren Infiltrationstiefe

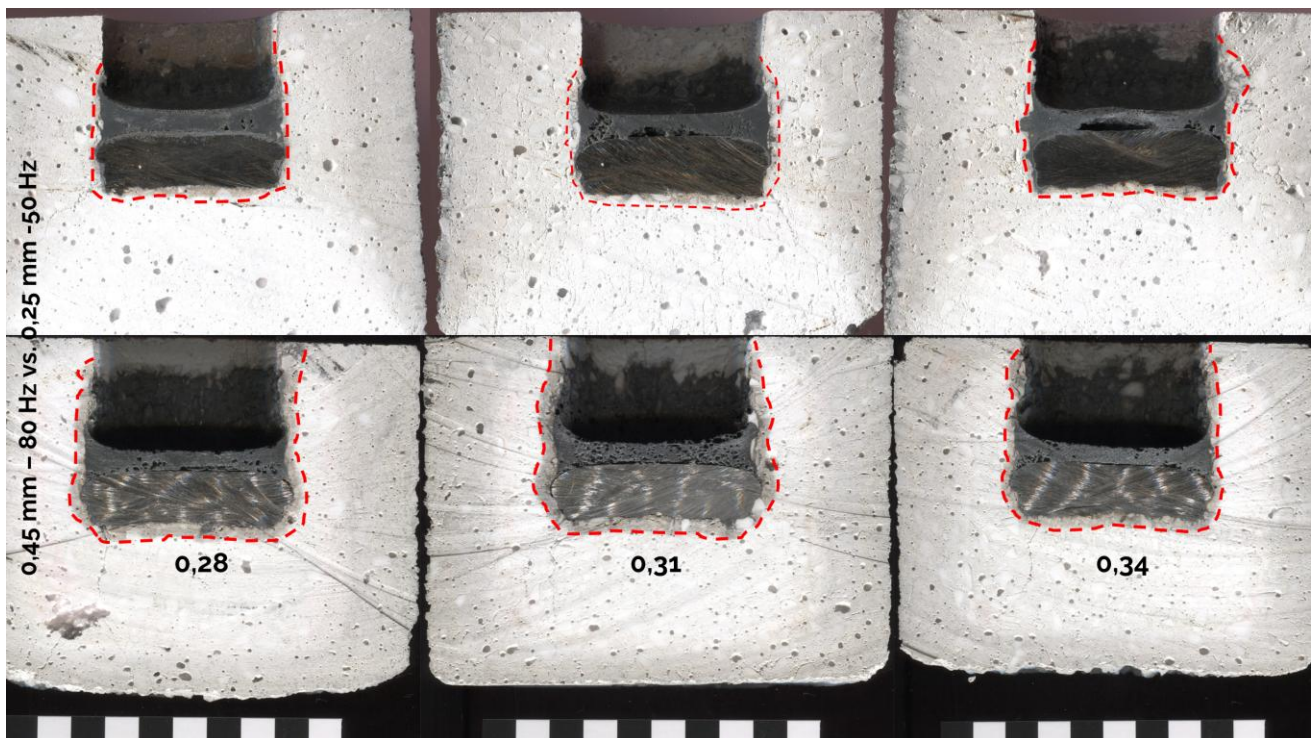


Abbildung 51: Korrosionsbeständigkeit der Modellvibrationsfeuerbetone ohne Mikrosilika (FBq-RT) mit  $q = 0,28$  (links),  $0,31$  (mitte),  $0,34$  (rechts) bei Standardvibration (0,25 mm und 50 Hz, oben) und Maximalvibration (0,45mm und 80 Hz, unten).

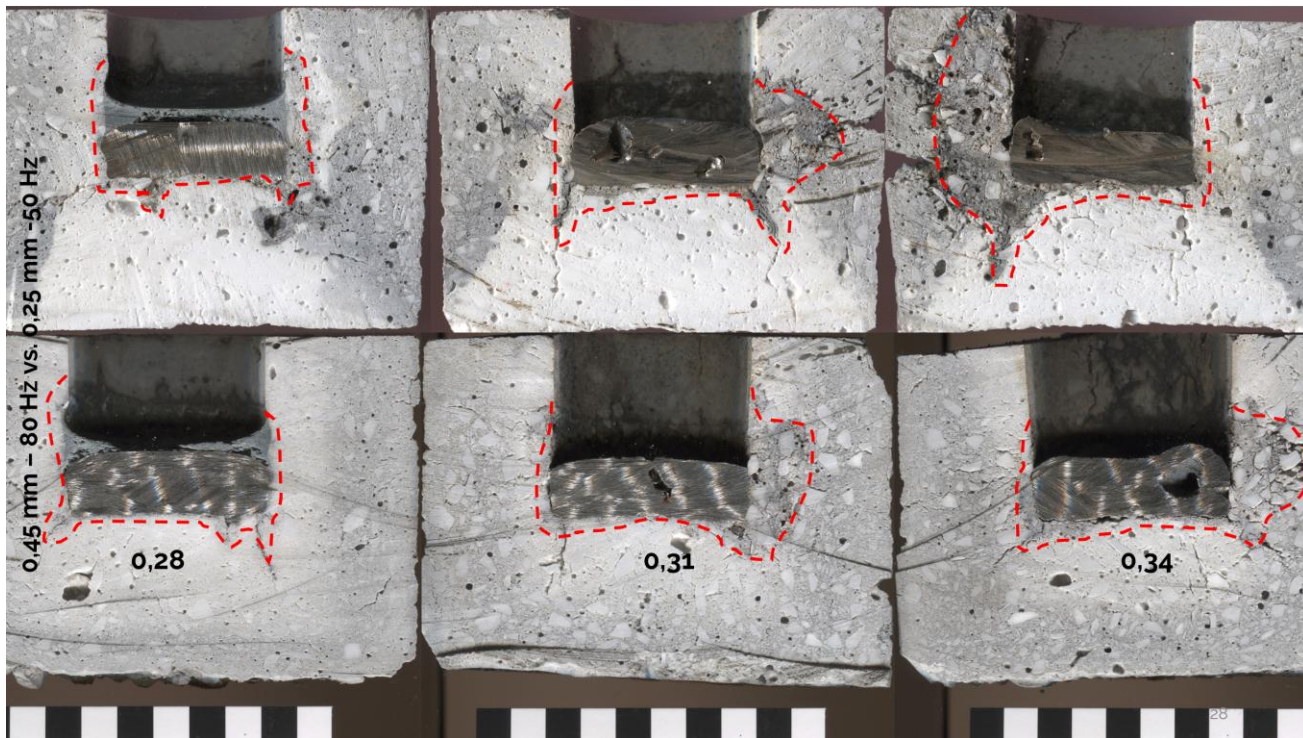


Abbildung 52: Korrosionsbeständigkeit der Modellvibrationsfeuerbetone mit Mikrosilika (FBq-MS) mit  $q = 0,28$  (links),  $0,31$  (mitte),  $0,34$  (rechts) bei Standardvibration ( $0,25$  mm und  $50$  Hz, oben) und Maximalvibration ( $0,45$  mm und  $80$  Hz, unten).

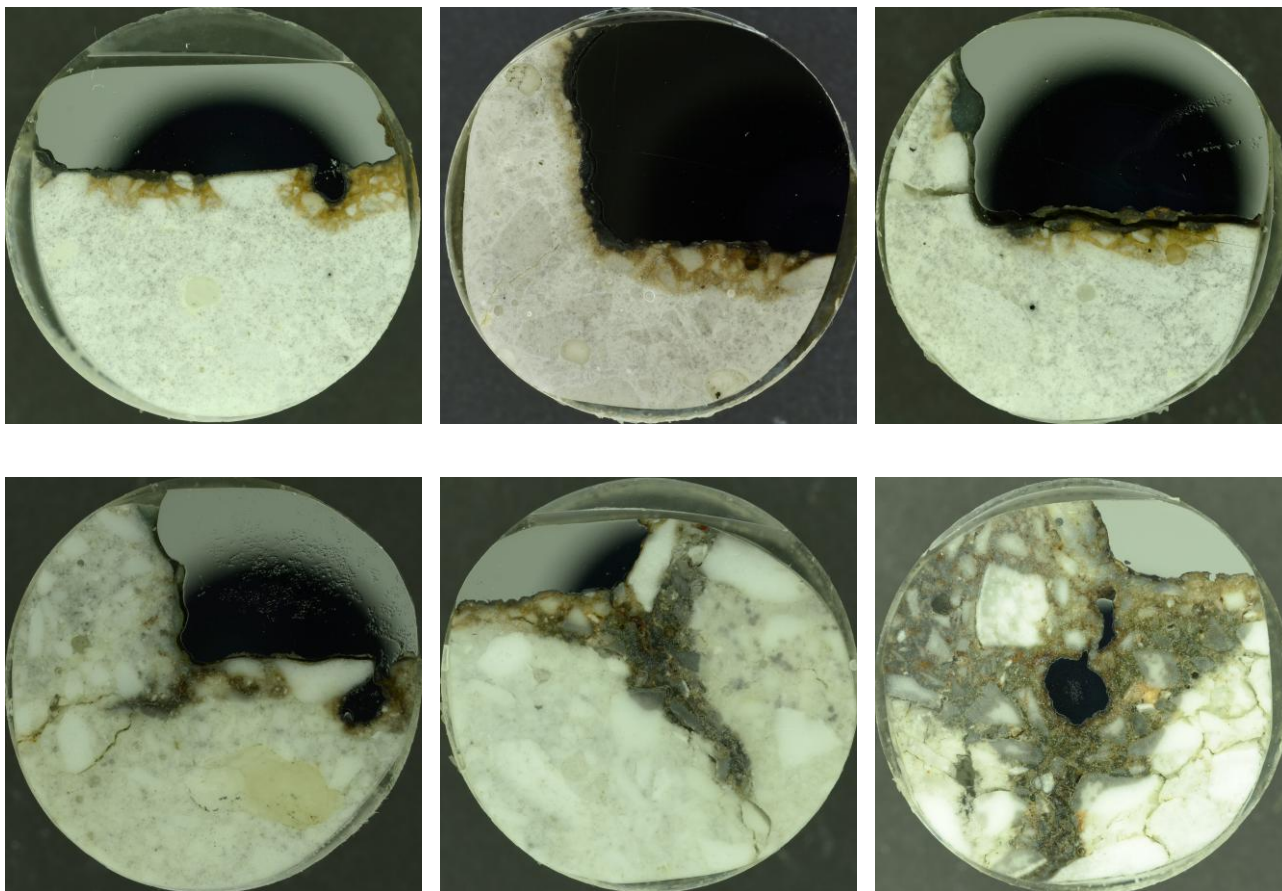


Abbildung 53: Übersicht der Anschliffproben der Versätze ohne Mikrosilika (oben) und mit Mikrosilika (unten). Von links nach rechts steigt der  $q$ -Wert mit  $q = 0,28$  (links),  $0,31$  (Mitte) und  $0,34$  (rechts). Die Feuerbetone wurden unter Standardvibration präpariert ( $0,25$  mm,  $50$  Hz). Eine von Weiß abweichender Farbe weist auf eine Infiltration durch eisenhaltige Schlacken hin.

Bei 100-facher Vergrößerung wird generell ein offenerporigeres Gefüge erzielt, wodurch die Infiltrierbarkeit erhöht wird. Neben sphärischen zumeist kugelförmigen Poren, die während des Gießprozesses wassergefüllt waren, liegen eine Vielzahl von unregelmäßig begrenzten Poren vor, die sehr wahrscheinlich auf eine Aufnahme von Luft während der Vibration zurückzuführen ist. Für die Feuerbetone ohne Mikrosilika wird zudem deutlich, dass trotz der hohen Temperatur von 1650°C keine signifikante Versinterung der Matrix erfolgt ist. Vergleicht man die Infiltrationstiefe mit der gemessenen Porosität aus Abbildung 49, so wird deutlich, dass hier die offene Porosität in der Größenordnung 12 bis 16 Vol.-% variiert, was offensichtlich noch keinen maßgeblichen Einfluss auf die Infiltrationstiefe ausübt.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Feuerbetonen, die Mikrosilika enthalten, wird zunächst aus Abbildung 55 deutlich, dass Mikrosilika eine deutliche Kornvergrößerung in der Matrix und zu Schwindrissen führt, wodurch der Eindruck entsteht, dass dieser Feuerbetontyp bereits oberhalb der Anwendungsgrenztemperatur betrieben wurde.

Insbesondere die Schwindrisse erlauben eine gute Infiltrierbarkeit dieser Betongruppe unabhängig vom q-Wert und der Vibrationsparametern. Wie aus Abbildung 52 zu entnehmen ist, wurde hier in allen Fällen die Schlacke vollständig in den Feuerbeton aufgenommen. Die Infiltration findet vorzüglich über Schwindrisse statt die vorrangig im Übergangsbereich von Tiegelboden und Tiegelwand ausgebildet sind. Dadurch ist die Infiltrationstiefe sehr heterogen ausgebildet und eignet sich daher wenig zur Bewertung, welche Versatzvariation, respektive Vibrationsparameter besonders anfällig auf die Infiltrationsneigung sind. Dies beruht auf der Tatsache, dass ein anderer Sägeschnitt bereits einen anderen Eindruck vermitteln könnte.

#### Korrosionsmechanismen abgeleitet am Mikrogefüge

Im nicht infiltrierte Bereich der Feuerbetone werden hauptsächlich die isothermen Bedingungen des Versuches wirksam, wodurch an jeder Stelle von einer Temperaturbeaufschlagung 1650°C für 5 Stunden ausgegangen werden kann. Im Falle der Versätze ohne Mikrosilika setzt sich der Calciomaluminatezement mit dem Korund unter Ausbildung von Hibonit (CA6) vollständig um, was gut in Abbildung 56 und Abbildung 58 zu erkennen ist. Hibonit ist zumeist dünntafelig in die Porosität eingewachsen oder umgibt als Reaktionssaum größere Korundkörner. Korund ist demnach so lange instabil, wie noch Hibonit gebildet werden kann. Die Partikelgrößenverteilung (q-Wert) zeigt sich hier lediglich in der für den Falle FB036-RT höhere Porosität, die wiederum am Kontakt zur Schmelze zu einer höheren Infiltration führt. Unabhängig vom q-Wert bildet sich im Falle der RT-Versätze zunächst eine massive Grossit-Schicht aus, gefolgt von Hibonit. Der in der Schlacke vorhandene SiO<sub>2</sub>-Anteil führt zur Ausbildung von Gehlenit, der zwickelfüllend zwischen den hypidiomorph ausgebildeten Grossit- und Hibonitkristallen in Erscheinung tritt (Abbildung 57 und Abbildung 59). Die Ausbildung von Grossit ist darauf zurückzuführen, dass an vorderster Fron, am Kontakt zur Schmelze nicht ausreichend Korund zur Ausbildung von Hibonit zur Verfügung stand. Die hypidiomorphe Kornform von Grossit und Hibonit lässt vermuten, dass beide Phasen erst während des Abkühlens (retrograd) auskristallisiert sind.

Wird dem Versatz Mikrosilika zugesetzt, wie im Falle der MS-Versätze, reagiert das SiO<sub>2</sub> mit dem Zement und vermutlich Anteilen des Korunds zu Anorthit, der im hinteren, nicht infiltrierte Bereich zwickelfüllend auftritt und die Bildung von Hibonit unterdrückt (Abbildung 60). Korund bleibt eine stabile Phase, die retrograd hypidiomorphe Kornformen ausbildet. Nach Auslagerung bei 1650°C erscheint das Gefüge völlig überhitzt und zeigt, wie bereits beschrieben, Schwindrisse, die auf eine hohe Versinterung hindeuten. Aufgrund der höheren Porosität des Feuerbetons mit einem q-Wert

von 0,34 ist im Schliffbereich kein uninfiltrierter Bereich zu erkennen und selbst im hinteren Gefügebereich scheidet sich massenhaft Hibonit neben zwickelfüllendem Gehlenit aus (Abbildung 62). Im infiltierten Bereich wird somit so viel Calcium zugeführt, dass Korund nicht mehr stabil ist und stattdessen Hibonit gebildet wird. Offensichtlich wird hier, bedingt durch die Schlacke das System an Ca übersättigt, sodass die  $\text{SiO}_2$ -Konzentration im Verhältnis zu gering ist, um Anorthit auszubilden.

#### Fazit der Korrosionsversuche

Die Korrosionsversuche zeigen keine klare Abhängigkeit des Infiltrationsvermögens des Stahls und der basischen Schlacke von der Korngrößenverteilung (q-Wert) und den Vibrationsparametern. Obwohl auch die Modellfeuerbetone ohne Mikrosilika (FBq-RT) eine für moderne Feuerbetone eine hohe Porosität von bis zu 16 Vol.-% aufweisen, normal wären 3 bis 10 Vol.-%, zeigen alle Variationen ein hinreichend gutes Rückhaltevermögen gegenüber der Schlacke, sodass dies noch im Tiegel verblieben ist. Das mag daran liegen, dass am Kontakt eine massive Reaktion zu Grossit und Hibonit mit dem Korund aus dem Feuerbeton und vorrangig dem CaO-Anteil aus der Schlacke den Tiegel abgedichtet hat, sodass der Einfluss der offenen Porosität kaum mehr relevant ist.

Wird Mikrosilika zugesetzt (FBq-MS) setzt bei einer Prüftemperatur von  $1650^\circ\text{C}$  eine starke Versinterung ein, wobei das Material bereits zu einem erheblichen Grad aufgeschmolzen wird. Hierfür spricht die teils idiomorphe Kornform des rekristallisierten Korunds und die Gegenwart von Anorthit, der im Idealfall Temperaturen bis ca.  $1450^\circ\text{C}$  erträgt. Die Folge ist eine hohe Schwindung, die im Gefüge eine Rissbildung auslöst, die wiederum leicht von der Schlacke infiltriert werden können. Daher ist im Falle der FBq-MS kein gleichmäßiger Infiltrationshorizont erkennbar, die Schlacke folgt den Rissen und durchdringt das Gefüge, solange Schlacke im Tiegel ist. Die Infiltration dürfte bereits zu Beginn des Korrosionsversuches abgeschlossen gewesen sein, da sie sehr spontan erfolgt sein dürfte. Am Kontakt zum Modellfeuerbeton zersetzt die Schlacke das betongefüge vollständig. Korund ist nicht mehr stabil und es bildet sich Hibonit und Gehlenit.

Im Falle der mikrosilikahaltigen Modellfeuerbetone kann somit wenig über die Abhängigkeit des Infiltrationsvermögens über die offene Porosität ausgesagt werden.

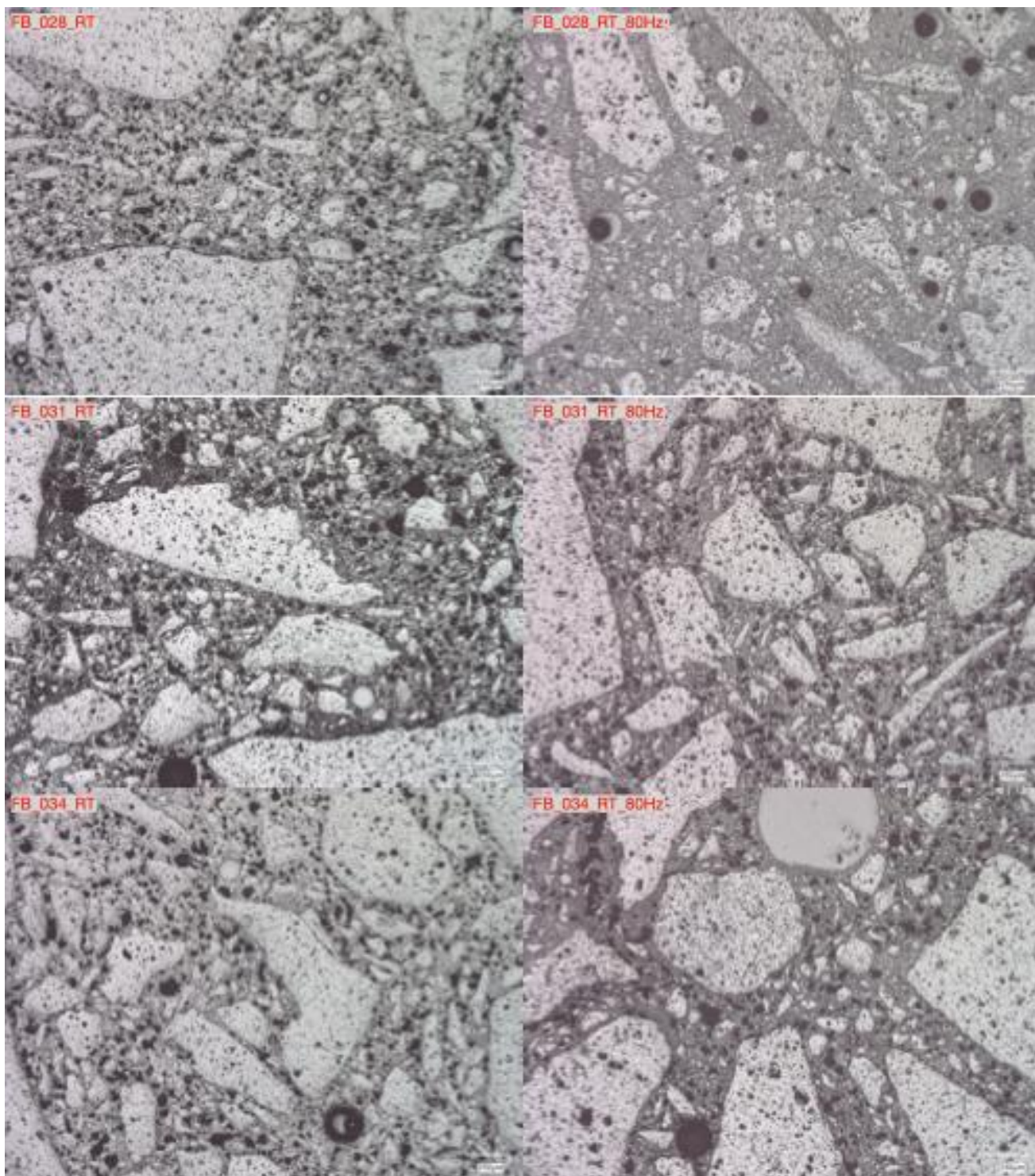


Abbildung 54: Mikrogefüge (Auflicht bei 100-facher Vergrößerung) der Modellvibrationsfeuerbetone ohne Mikrosilika (FBq-RT) mit  $q = 0,28$  (oben),  $0,31$  (mitte),  $0,34$  (unten) bei Standardvibration (0,25 mm und 50 Hz, linke Spalte) und bei Maximalvibration (0,45mm und 80 Hz, rechte Spalte).

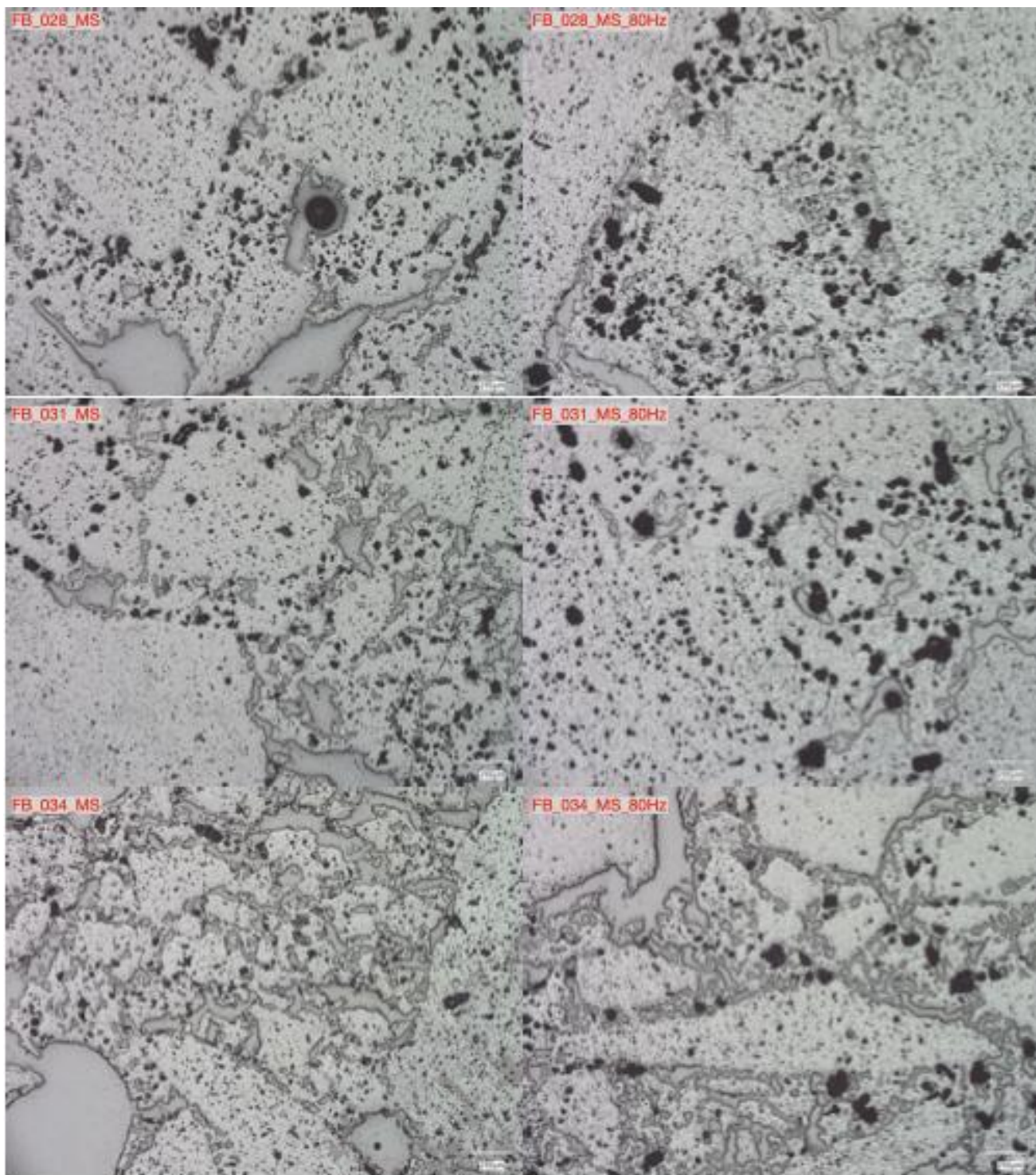


Abbildung 55: Mikrogefüge (Auflicht bei 100-facher Vergrößerung) der Modellvibrationsfeuerbetone mit Mikrosilika (FBq-MS) mit  $q = 0,28$  (oben),  $0,31$  (mitte),  $0,34$  (unten) bei Standardvibration (0,25 mm und 50 Hz, linke Spalte) und bei Maximalvibration (0,45 mm und 80 Hz, rechte Spalte).

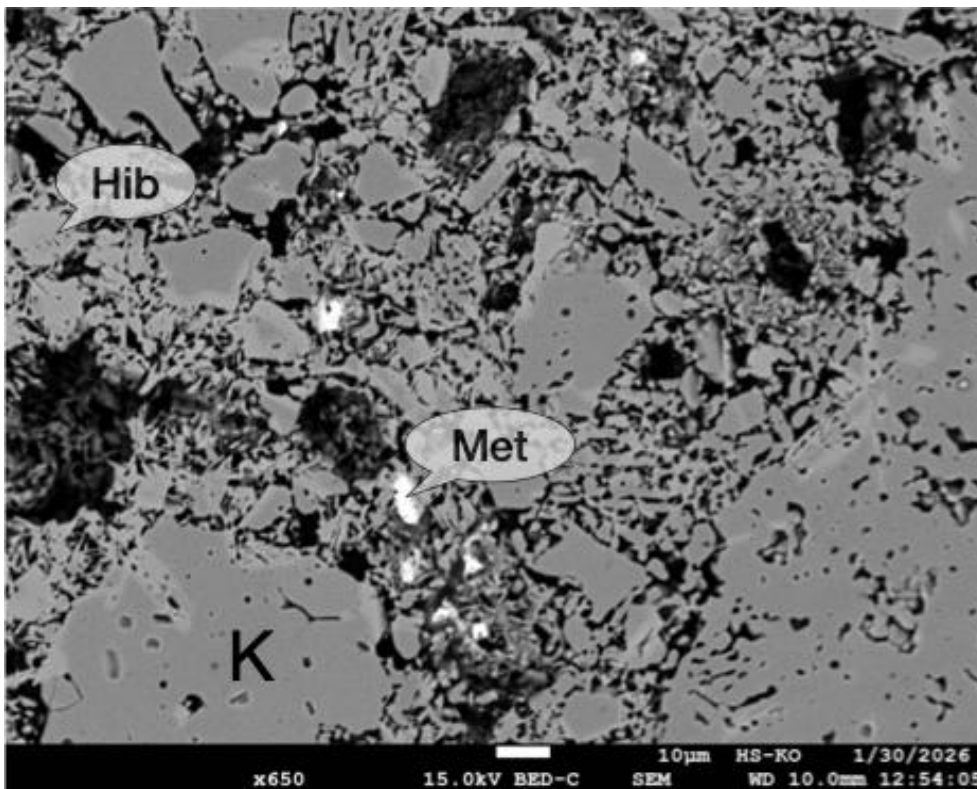


Abbildung 56: Typisches Gefüge des FB0,28-RT nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosion abgewandten Seite (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung). Abgesehen von der Vielzahl an Poren ist ein typisches Gefüge zu erkennen, welches aus Korund und dünntafeligem Hibonit besteht. Die Herkunft der Metalleinschlüsse ist unklar, zumal diese Mn und Cr enthalten, also Elemente, die nicht im Korrosionsmedium enthalten sind.

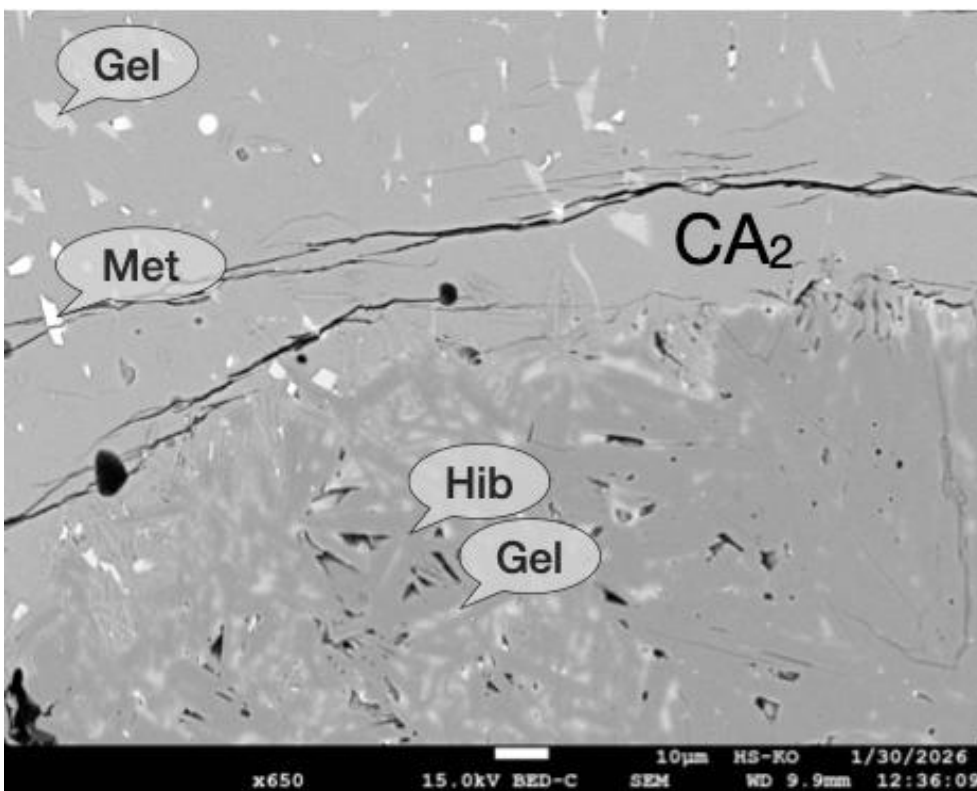


Abbildung 57: Typisches Gefüge des FB0,28-RT nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosionsfront im Bodenbereich (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung). Durch die Ca-betonete Schlacke (s. Tabelle 6) bildet sich am Kontakt zum Stahl eine massive Schicht aus CA2 (Grossit), gefolgt von CA6 (Hibonit). In den Zwickeln ist Gehlenit zu finden, wobei der SiO<sub>2</sub>-Anteil ebenfalls aus der Schlacke stammt.

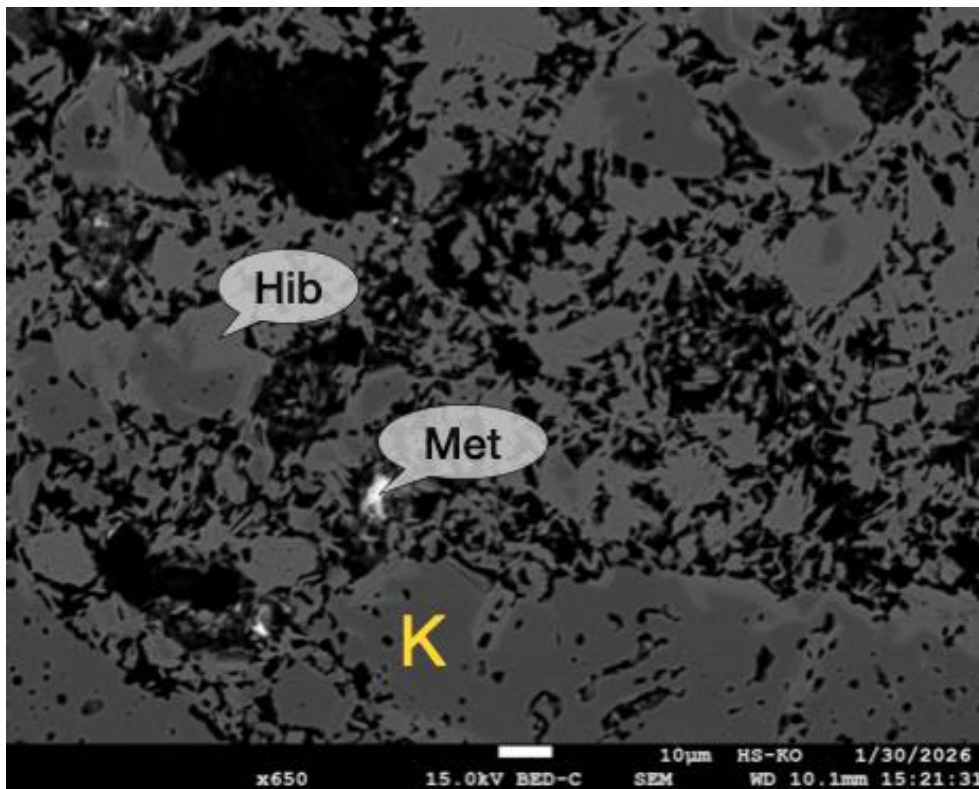


Abbildung 58: Typisches Gefüge des FB0,34-RT nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosion abgewandten Seite (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung). Das Bild ist vergleichbar mit Abbildung 57. Auch hier hat der Ca-Anteil des Zements sich vollständig zu CA6 (Hibonit) unter Lösung des Korunds umgesetzt.

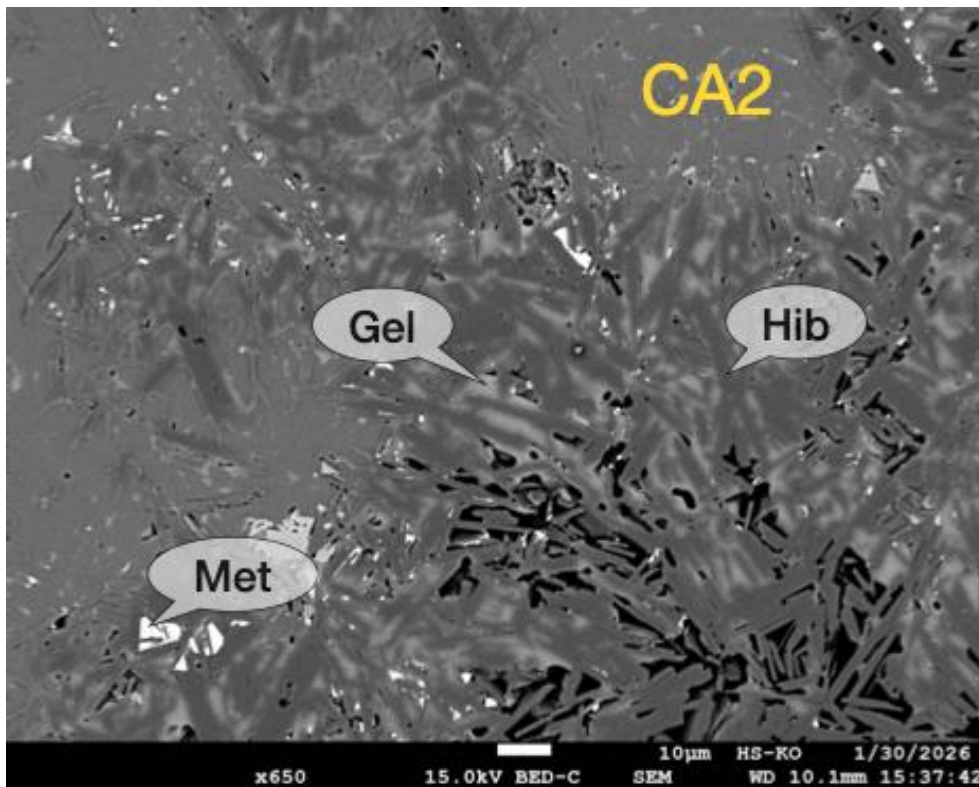


Abbildung 59: Typisches Gefüge des FB0,34-RT nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosionsfront im Bodenbereich (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung). Wie der FB0,28-RT ist am Kontakt zur Schmelze das Tiegelmateriale vollständig zu Grossit und Hibonit umgewandelt. Auch Gehlenit ist wieder Zwickelfüllend vorhanden.

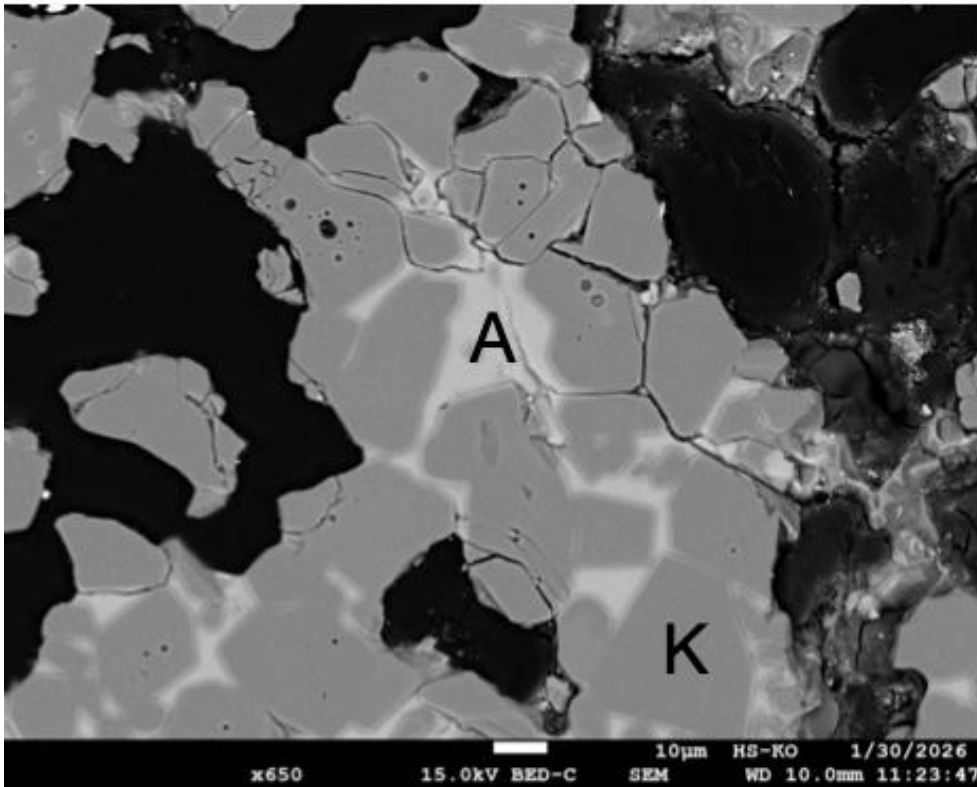


Abbildung 60: Typisches Gefüge des FB0,28-MS nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosion abgewandten Seite (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung). In Gegenwart von Mikrosilika und Zement wird die Matrix zu Anorthit und Korund umgesetzt. Im Gegensatz zu den RT-Versätzen ist Korund stabil und wächst idiomorph, vermutlich während des Abkühlens.

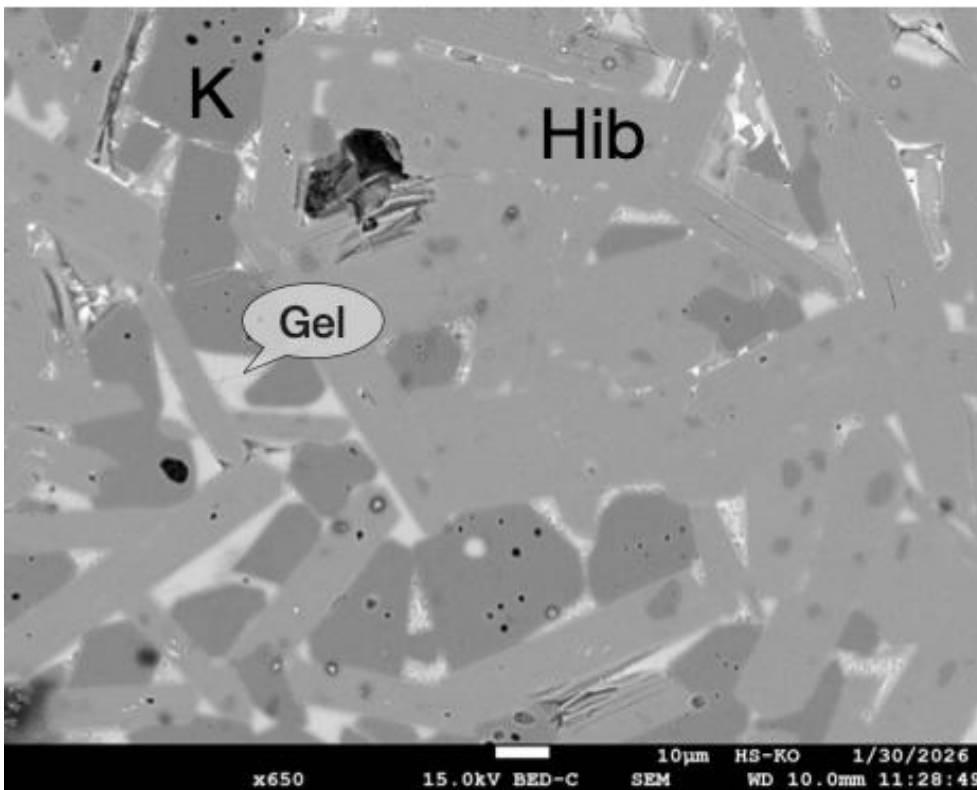


Abbildung 61: Typisches Gefüge des FB0,28-MS nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosionsfront im Bodenbereich (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung). Am Kontakt zur Schmelze bildet sich hier kein Grossit, dafür massenhaft Hibonit, neben Korund und zwickelfüllendem Gehlenit.

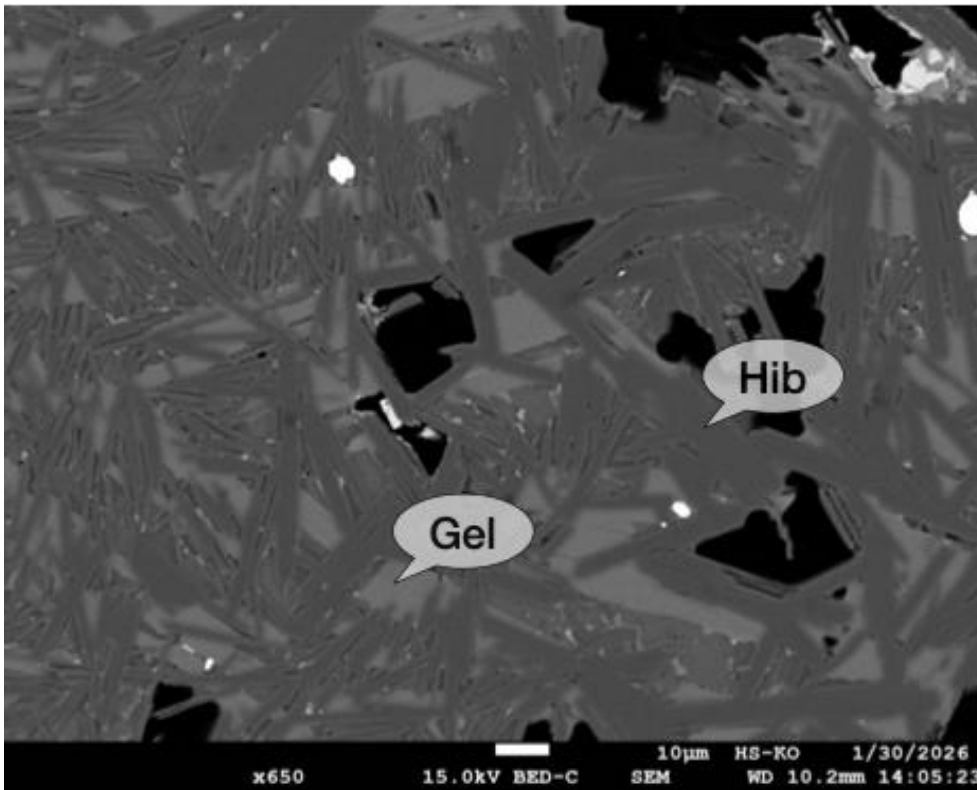


Abbildung 62: Typisches Gefüge des FB0,34-MS nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosion abgewandten Seite (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung). Der Tiegel ist infiltriert durch die Schlacke, sodass Korund völlig resorbiert wurde und mineralisch nur noch aus idiomorph ausgebildetem Hibonit und zwickelfüllendem Gehlenit besteht. Spärlich ausgebildete Metalleinschlüsse deuten auch auf eine Infiltration durch Stahl hin.

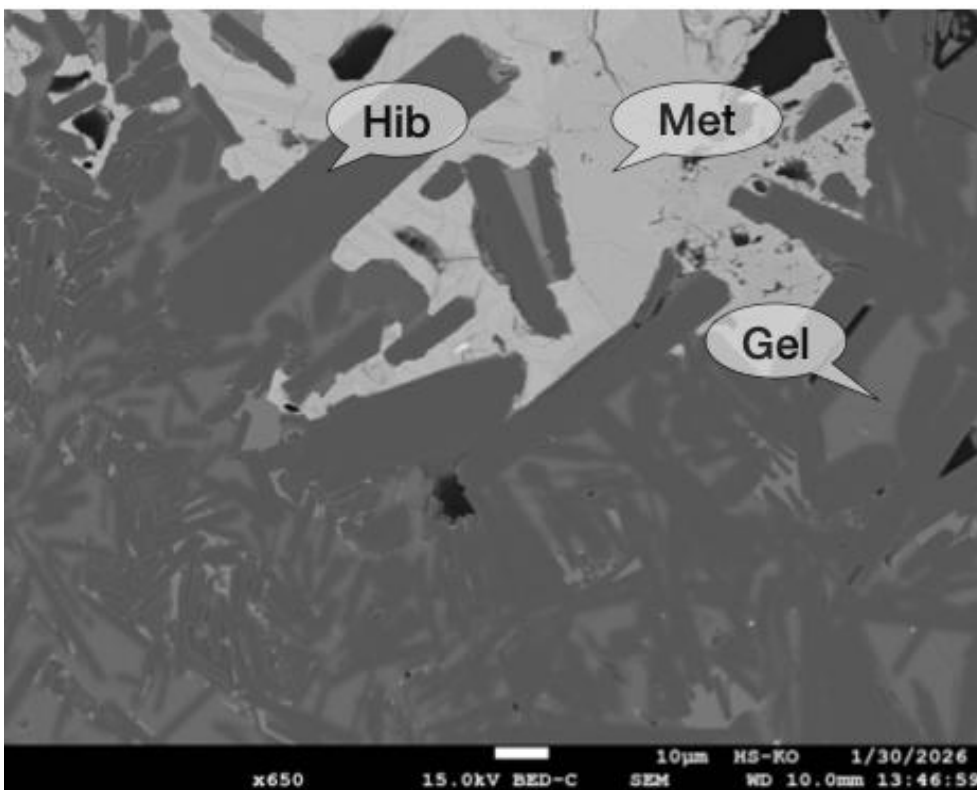


Abbildung 63: Typisches Gefüge des FB0,34-MS nach dem Korrosionstest, an der von der Korrosionsfront im Bodenbereich (Rückstreuelektronenbild bei 650-facher Vergrößerung).

## 6.5 AP 5 - Handlungsempfehlungen

### 6.5.1 Überprüfung des Einflusses der Handlungsempfehlungen auf die Rheologie

#### 6.5.1.1 Messungen mit dem Kugelauszugviskosimeter

Zur Überprüfung der Handlungsempfehlungen wurde der industrienahe Versatz VIB 4 STPP unter Einsatz von Vibration nach Standardbedingungen (0,25 mm, 50 Hz) und nach Handlungsempfehlungen (0,35 mm, 80 Hz) untersucht (

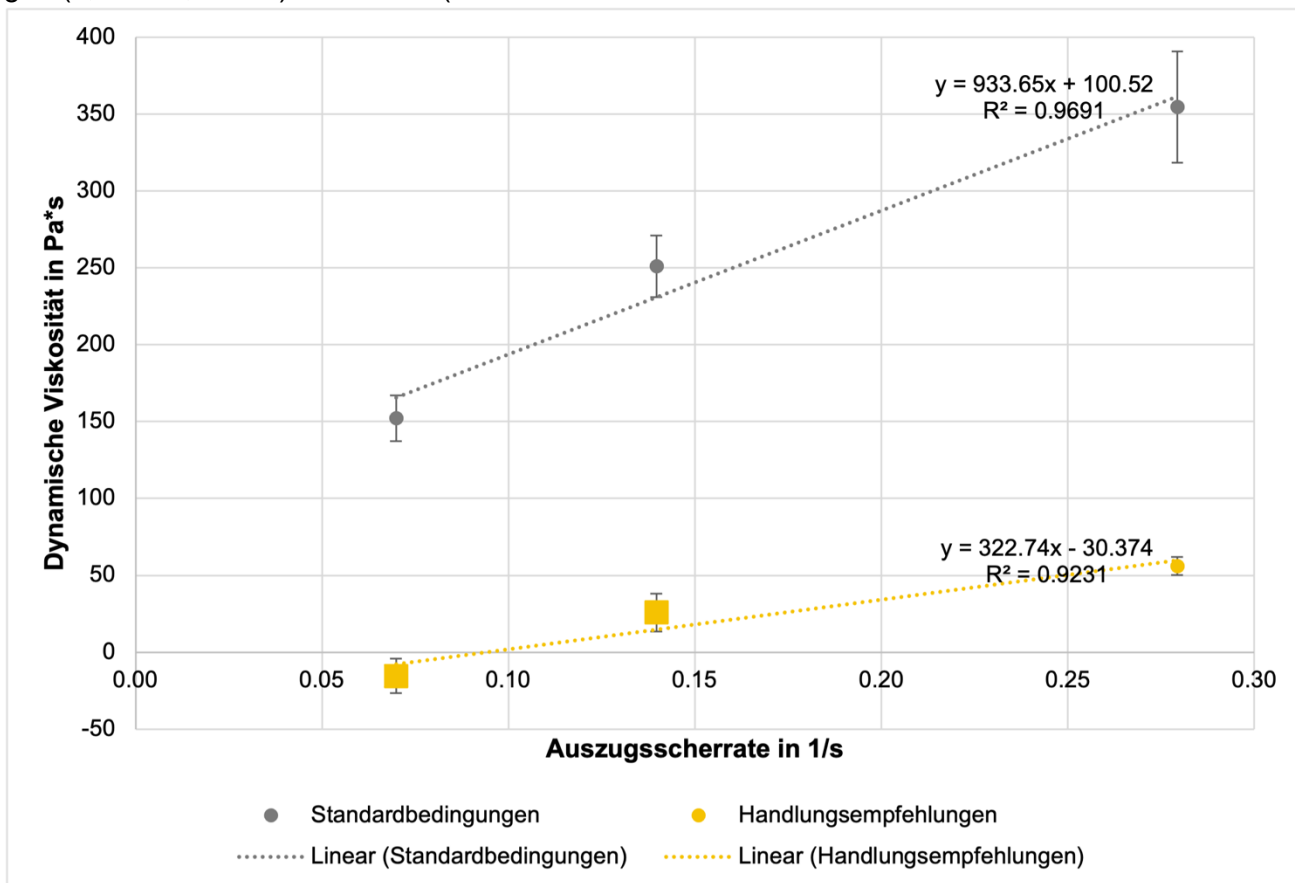


Abbildung 64). Allgemein zeigt sich, dass der Einsatz von Vibration nach Handlungsempfehlung die dynamische Viskosität deutlich reduziert und die Dilatanz (Steigung der scherratenabhängigen dynamischen Viskosität) abnimmt.

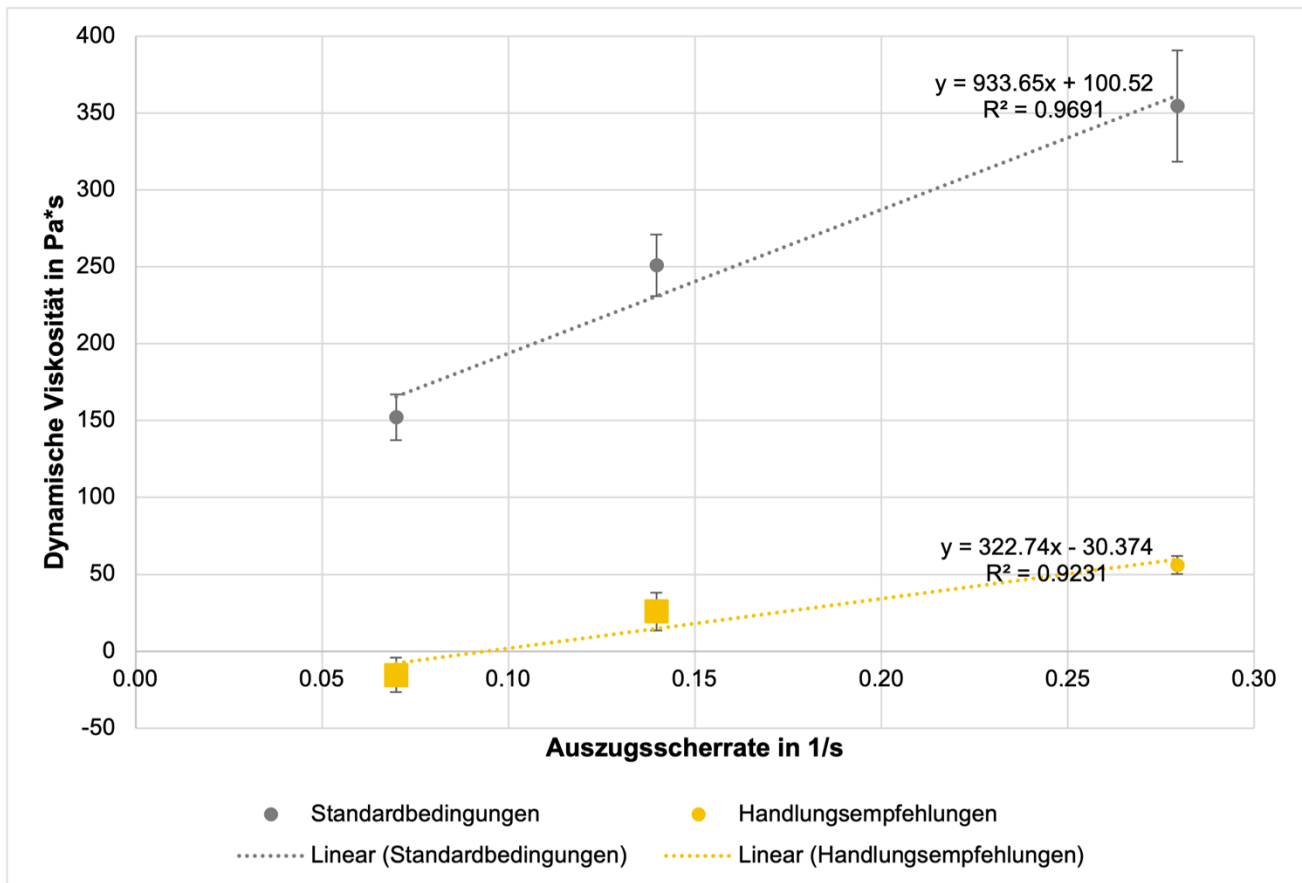


Abbildung 64: Untersuchung der auszugsscherratenabhängigen dynamischen Viskosität in Pa\*s unter Einsatz von Vibration nach Standardbedingungen (0,25 mm, 50 Hz, grau) und nach Handlungsempfehlungen (0,35 mm, 80 Hz, gelb). Die mit Vierecken markierten Punkte symbolisieren Messungen, die durch Walzbewegungen verzerrt sind.

Beim Einsatz von Vibration nach den Handlungsempfehlungen kam es zu starken Walzbewegungen in der Feuerbetonmasse (Abbildung 65). Durch die Walzbewegung wurde die Kugel des Viskosimeters nach oben gedrückt, was teilweise zu der Aufzeichnung von negativen und damit unplausiblen dynamischen Viskositäten führte (mit Vierecken markierte Datenpunkte). Eine Dreifachbestimmung mit plausiblen Werten war hier nicht möglich.

Je höher die Auszugsscherrate gewählt wurde, desto seltener wurden negative Viskositäten aufgezeichnet. Dies liegt daran, dass eine stärkere gerichtete Gegenkraft gegen die Walzbewegungen wirkt und dass die Verweildauer der Kugel an einem Punkt deutlich geringer wird. Dabei kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Walzbewegung auch die Messungen bei hohen Auszugsscherraten leicht verzerrt, indem die gemessene Kraft durch ein leichtes Hochdrücken der Kugel reduziert wird.

Grund für die Walzbewegung der Masse ist dabei wahrscheinlich die kleine Probengeometrie auf die die Vibration einwirkt. Die Feuerbetone werden durch die Vibration in Bewegung versetzt und verflüssigt, indem die innere Reibung reduziert wird. Durch die aufsteigenden Gaseinschlüsse und die Vibrationsquelle von unten wird die Masse dabei in erster Linie von unten nach oben bewegt. Oben angekommen wird die Masse durch die nachkommende Feuerbetonmasse zu den Seiten verdrängt und es entstehen vibrationsbedingte Kreislaufbewegungen.

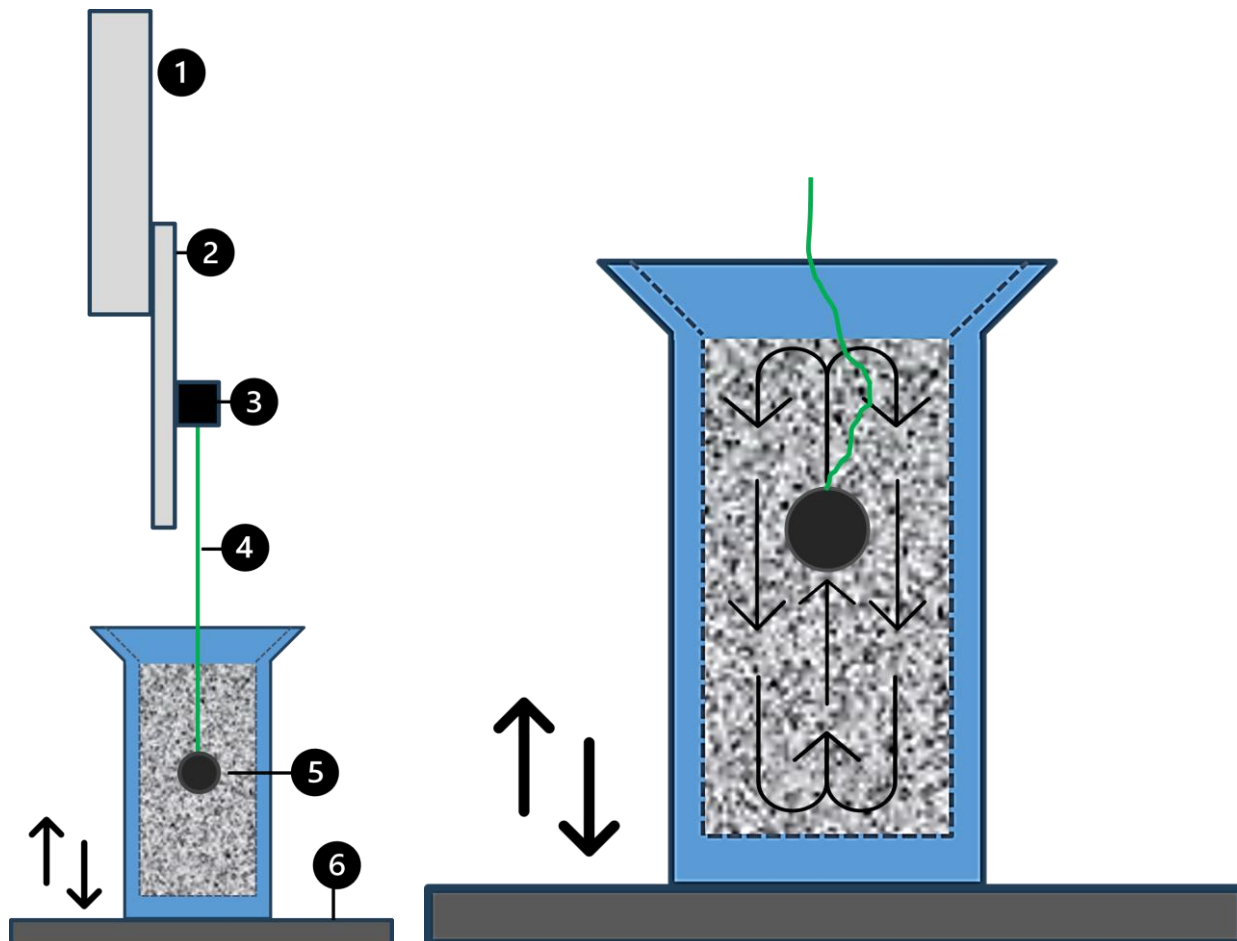


Abbildung 65: Schematische Darstellung des Kugelauszugviskosimeters (links) mit Wandkopplung (1), Linearmotor (2), Kraftsensor (3), Messseil (4), Kugel (5) und Vibrationstisch (6). Rechts ist die Walzbewegung unter Vibration schematisch dargestellt. Durch das Hochdrücken der Kugel und unter Berücksichtigung der Offsetkraft wird eine negative dynamische Viskosität gemessen.

Alles in allem konnte mit Hilfe des Kugelauszugviskosimeters die auszugsscherratenabhängige dynamische Viskosität unter Einsatz der Vibration nach Handlungsempfehlungen nicht verlässlich gemessen werden. Im Weiteren wurden die Handlungsempfehlungen daher ausschließlich durch das 3D-Ausbreitmaß verifiziert.

#### 6.5.1.2 Messungen mit dem 3D-Ausbreitmaß

Zur Untersuchung des Ausbreitverhaltens wurden zwei Systeme mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung eingesetzt: VIB4STPP ( $q = 0,28$ ) und VIBA5 ( $q = 0,31$ ). Beide Systeme lagen jeweils in einer Variante mit und ohne Mikrosilika vor. Die Fließeigenschaften wurden zunächst unter standardisierten Vibrationsbedingungen mithilfe des 3D-Ausbreitmaßes bestimmt (Abbildung 66).

Die Ergebnisse zeigen, dass das Ausbreitmaß von VIBA5 mit Mikrosilika um 34 mm höher ist als das der RT-Variante. Bei VIB4STPP hingegen ist das Ausbreitmaß mit Mikrosilika um 16 mm geringer. Diese gegensätzlichen Trends verdeutlichen, dass die Wirkung von Mikrosilika stark von der spezifischen Materialzusammensetzung und der eingesetzten Additivkombination abhängt.

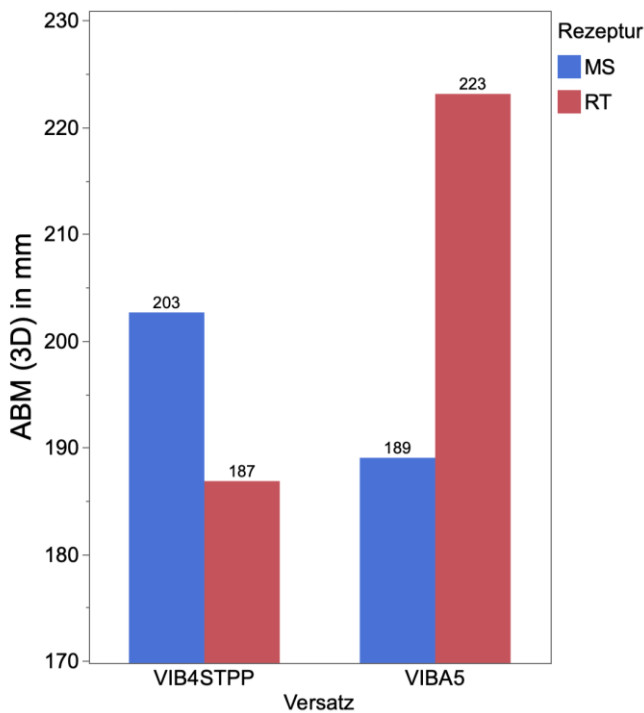


Abbildung 66: 3D-Ausbreitmaß für feinere VIB4STPP und mittlere VIBA5 mit Mikrosilika (blau) und ohne Mikrosilika (rot).

In einer erweiterten Versuchsreihe wurde das Ausbreitverhalten in Abhängigkeit von der Vibrationsbeschleunigung (Formel 3) analysiert (Abbildung 67). Alle Versätze zeigten eine deutliche Zunahme des 3D-Ausbreitmaßes mit steigender Beschleunigung. Die höchsten Werte wurden bei einer Frequenz von 80 Hz und einer Amplitude von 0,35 mm erreicht, was einer Beschleunigung von etwa 88,4 m/s<sup>2</sup> entspricht. Eine Ausnahme bildet VIBA5 mit Mikrosilika: Dieser Versatz erreichte sein Maximum bereits bei einer geringeren Beschleunigung von 63,2 m/s<sup>2</sup>, was auf eine systemspezifische Reaktion schließen lässt.

Im Vergleich zu den Modellversätzen bestätigen die Ergebnisse der industrienahen Systeme den zuvor beobachteten Zusammenhang zwischen Korngrößenverteilung, Rezeptur und Fließeigenschaften. Auch der positive Einfluss steigender Vibrationsenergie auf die Fließfähigkeit konnte erneut nachgewiesen werden. Die unterschiedlichen Beobachtungen legen nahe, dass das Verhalten von Mikrosilika-haltigen Versätzen maßgeblich von deren spezifischer Zusammensetzung und der jeweiligen Verarbeitung abhängt.

Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse die Systemabhängigkeit der Fließoptimierung und zeigen die Notwendigkeit auf, Vibrationsparameter stets rezepturspezifisch einzustellen.

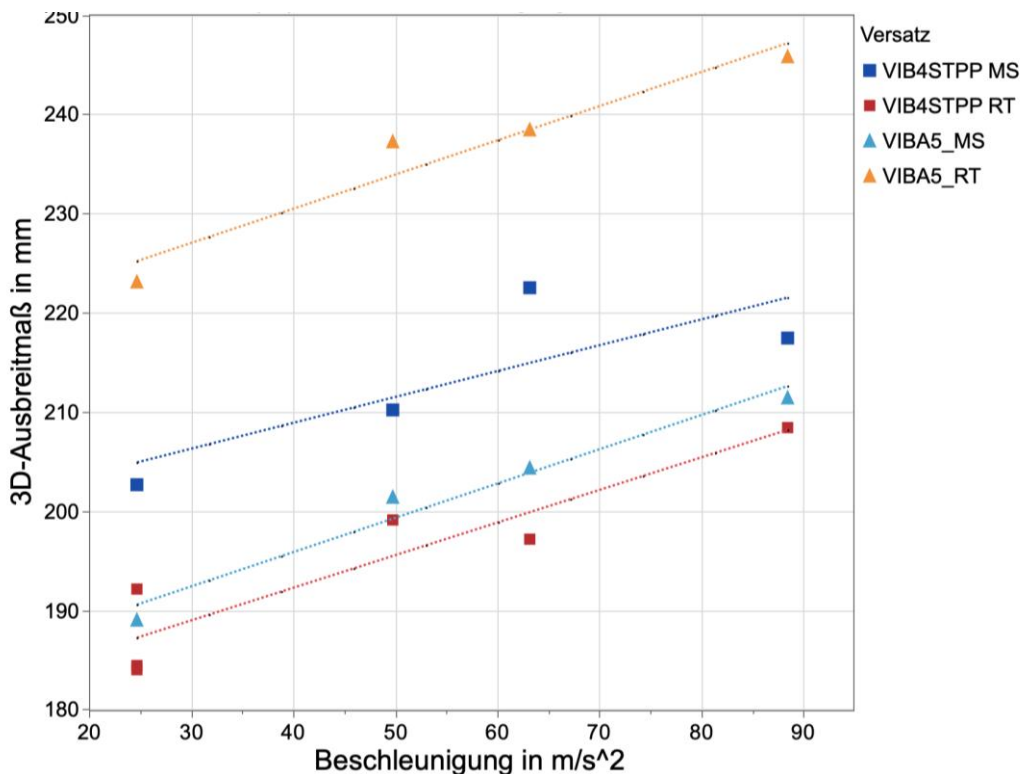


Abbildung 67: Die 3D-Ausbreitmaße für vier industrienahe Versätze unter verschiedenen Vibrationsbeschleunigungen.

### 6.5.2 Einfluss der Grüneigenschaften auf die Einsetzeigenschaften

Im Rahmen der Handlungsempfehlung wurden die Grüneigenschaften der vier industrienahe Versätze VIB4STPP und VIBA5, jeweils mit (MS) und ohne Mikrosilika (RT), systematisch untersucht. Die Analyse erfolgte sowohl unter Standard-Vibrationsbedingungen (50 Hz, 0,25 mm) als auch bei erhöhten Vibrationsparametern (bis 80 Hz und 0,35 mm), um das Verhalten bei realitätsnahen Verarbeitungsbedingungen zu erfassen.

Die Ergebnisse unter Standardbedingungen zeigen, dass die feinere Korngrößenverteilung von VIB4STPP mit einer im Mittel niedrigeren Kaltbiegefestigkeit und höheren offenen Porosität verbunden ist als bei VIBA5. Damit stehen die Ergebnisse im Gegensatz zu den Modellversuchen der vorangegangenen Arbeitspakete, in denen feinere Versätze tendenziell höhere Festigkeiten aufwiesen. Diese Abweichung deutet auf die stärkere Systemabhängigkeit und den Einfluss weiterer Faktoren wie Additivkombination und Wassergehalt hin.

Die Zugabe von Mikrosilika führt in beiden Fällen zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. In VIB4STPP erhöht sich die KBF durch Mikrosilika von 9,02 MPa auf 15,1 MPa, in VIBA5 von 17,0 MPa auf 20,9 MPa. Parallel dazu wird eine Reduktion der offenen Porosität beobachtet: von 15 % auf 11 % bei VIB4STPP und von 7,9 % auf 7,5 % bei VIBA5. Dieses Verhalten steht im Einklang mit den vorherigen Ergebnissen des Basis-Modellfeuerbetons und unterstreicht die festigkeitssteigernde und strukturverdichtende Wirkung von Mikrosilika unter praxisnahen Bedingungen.

Die Wirkung der Vibrationsbeschleunigung, berechnet gemäß Gl. Formel 3, auf die Kaltbiegefestigkeit (KBF) bei 110 °C und die offene Porosität wurde an vier industrierelevanten Versätzen analysiert. Detaillierte Ergebnisse sind in Abbildung 69 für die Kaltbiegefestigkeit und in Abbildung 70 für die offene Porosität dargestellt. Während die Versätze VIBA5\_MS, VIBA5\_RT und VIB4STPP\_MS über den untersuchten Bereich hinweg (Beschleunigung von ca. 25 bis 90 m/s<sup>2</sup>) stabile Werte für KBF- und Porosität aufweisen, zeigt sich bei VIB4STPP\_RT ein signifikant abweichendes Verhalten.

Bei diesem feinkörnigen mikrosilikafreien System führt die zunehmende Verdichtungsenergie zu einem kontinuierlichen Festigkeitsverlust und gleichzeitigem Anstieg der offenen Porosität. Dies deutet auf eine empfindliche Mikrostruktur hin, bei der übermäßige Vibration eine Entmischung oder lokale Überverdichtung auslösen könnte.

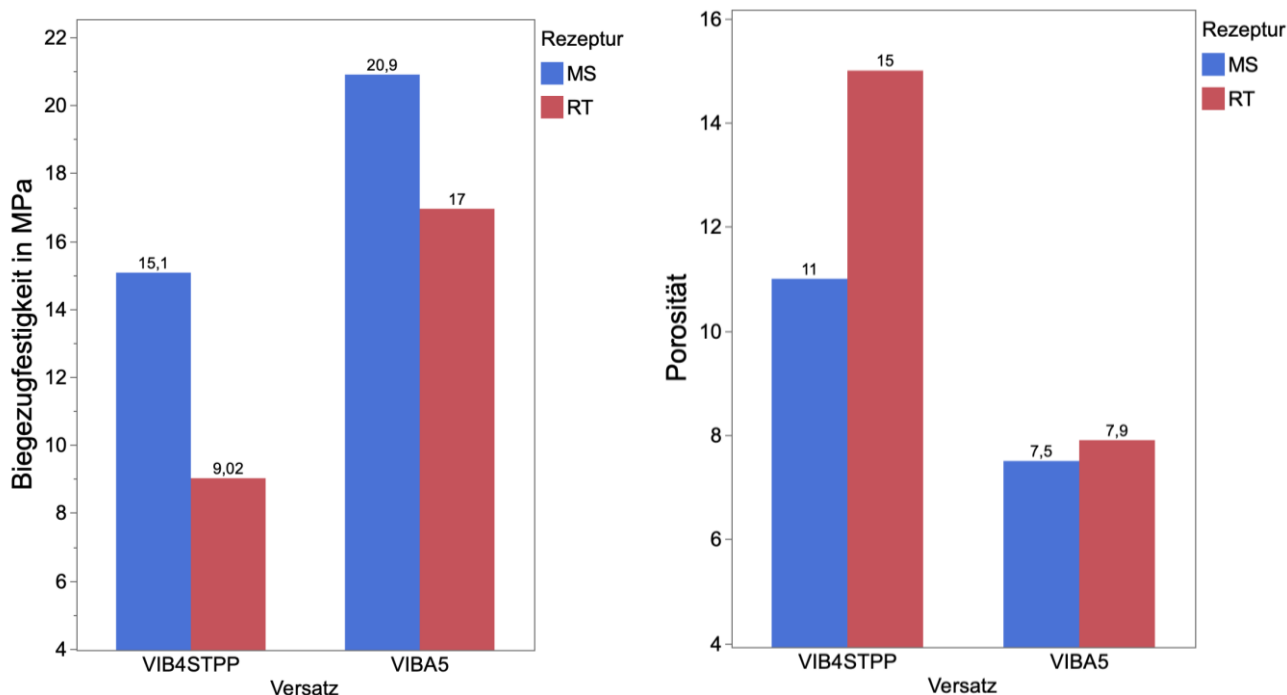


Abbildung 68: Kaltbiegefestigkeit bei 110 °C (links) und offene Porosität (rechts) von industriennahen Versätzen unter Standard-Vibration von 50 Hz und 0,25 mm.

Darüber hinaus zeigt VIBA5-MS (mittelkörniger Versatz) die höchste KBZF von 20 MPa und die niedrigste offene Porosität von 8 % im Mittelwert im Vergleich zu anderen Versätzen bei variierenden Vibrationsparametern. Dies lässt auf eine bemerkenswerte Stabilität schließen, die auf eine robuste Strukturbildung zurückzuführen ist. Zudem konnte eine positive Wirkung der Mikrosilikazugabe auf VIB4STPP\_MS festgestellt werden, obwohl bei zunehmender Beschleunigung ein Anstieg der offenen Porosität zu verzeichnen ist.

Insgesamt bestätigen diese Ergebnisse, dass die Kombination aus mittlerem Kornaufbau und Mikrosilika den kritischsten Einflussfaktor, nämlich die übermäßige Verdichtungsenergie, weitgehend kompensieren kann. Feine, Mikrosilika-freie Systeme hingegen zeigen erhöhte Anfälligkeit und sollten unter kontrollierten Vibrationsbedingungen verarbeitet werden.

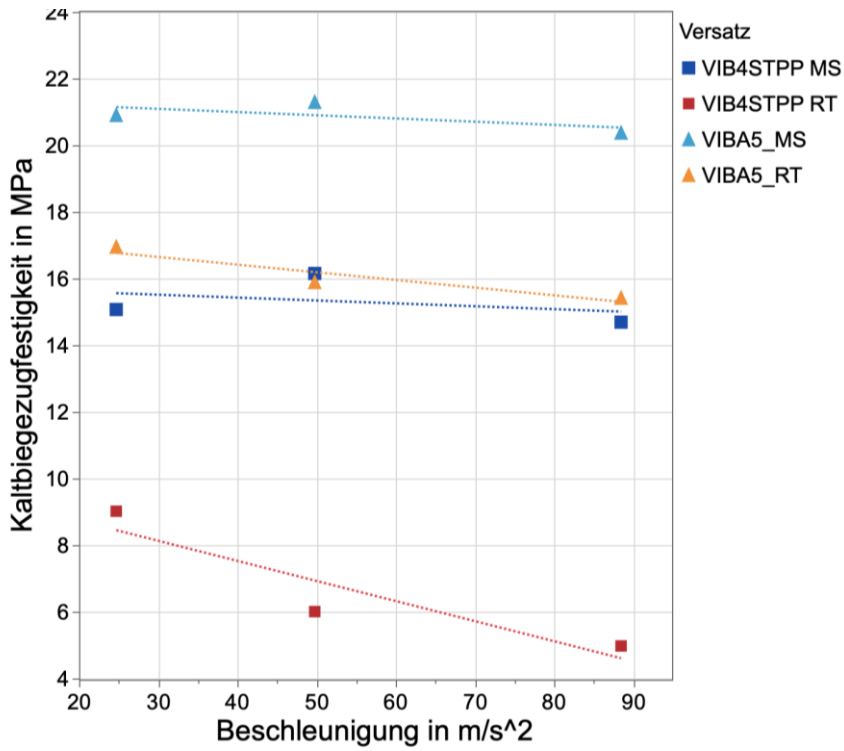


Abbildung 69: Kaltbiegezugfestigkeit für vier Versätze, die unter verschiedene Vibrationsbeschleunigungen farblich von Blau (niedrigste) bis Rot (höchste) dargestellt sind.

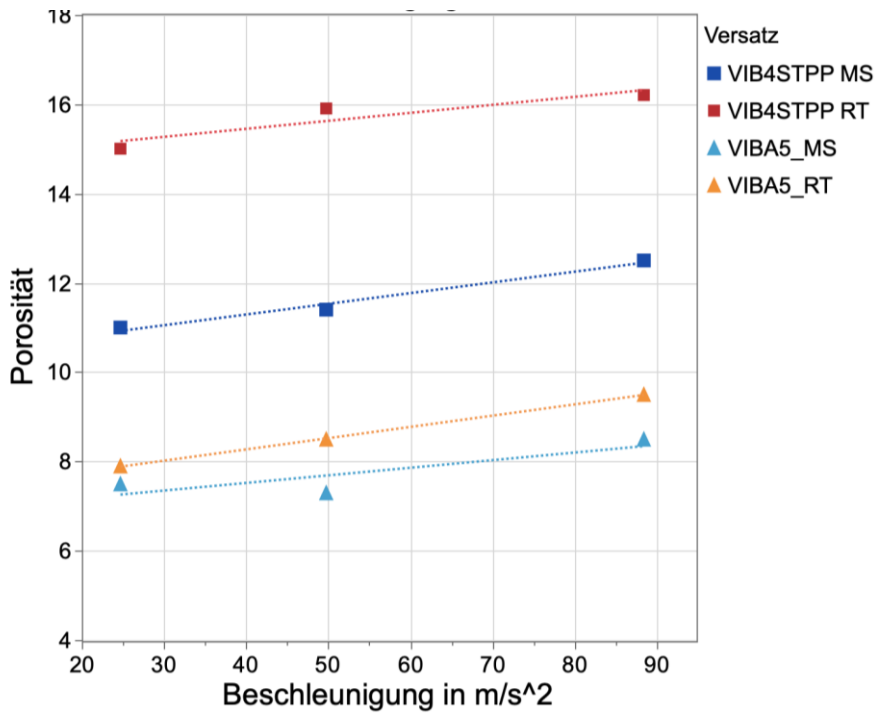


Abbildung 70: Die offene Porosität für vier industriennahe Versätze bei verschiedenen Vibrationsbeschleunigungen von der niedrigsten (blau) bis zur höchsten (rot) Beschleunigung.

## 7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das IGF-Forschungsvorhaben 01IF23074N untersuchte den Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften von Vibrationsfeuerbetonen und ihrer Verarbeitbarkeit und Einsatzereigenschaften. Dazu wurden die Einflüsse mehrerer Schlüsselp Parameter, insbesondere der Korngrößenverteilung, Vibrationsamplitude, Vibrationsfrequenz und Auszugsscherrate, auf die Temperaturwechselbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Feuerbetonen beleuchtet. Anhand der Untersuchungen konnten Handlungsempfehlungen formuliert und an industrienahen Feuerbetonen überprüft werden.

Die gezielte Abstimmung von Vibrationsparametern und Kornstruktur bietet ein hohes Potenzial zur Optimierung des Einbauverhaltens von Vibrationsfeuerbetonen in der industriellen Praxis bei gleichzeitiger Verringerung von Entmischungsrisiken und Festigkeitsverlusten.

Die rheologischen Untersuchungen der Modellvibrationsfeuerbetone zeigen, dass die Korngrößenverteilung ( $q$ -Werte), die Vibrationsamplitude und -frequenz und die Auszugsscherrate signifikante Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften des Materials haben. Im Hinblick auf die Korngrößenverteilung wurde festgestellt, dass kleine  $q$ -Werte (feineres Korn) bei niedrigen Scherraten besser fließen, während größere  $q$ -Werte (gröberes Korn) bei höheren Scherraten besser fließen. Dies zeigt, dass die rheologischen Eigenschaften des Feuerbetons von der Scherrate abhängen, wobei bei größeren Scherraten gröbere Korngrößen vorteilhafter sind, da sie die Fließfähigkeit erhöhen und somit eine bessere Verdichtung ermöglichen.

Die Untersuchungen mit Hilfe des 3D-Ausbreitmaßes an Modell- und industrienahen Vibrationsfeuerbetonen zeigen, dass das rheologische und mechanische Verhalten in hohem Maße durch die Korngrößenverteilung sowie durch die gewählten Vibrationsparameter bestimmt wird. Hinsichtlich des Fließverhaltens konnte nachgewiesen werden, dass das 3D-Ausbreitmaß mit zunehmendem  $q$ -Wert zunächst ansteigt, bei mittleren Verteilungen ( $q \approx 0,31$ ) ein Maximum erreicht und bei größeren Korngefügen ( $q = 0,34$ ) keine weiteren signifikanten Zuwächse zeigt. Ergänzende statistische Modellanalysen zeigen zudem, dass neben der Korngrößenverteilung insbesondere die Vibrationsfrequenz einen signifikanten Einfluss auf das Fließverhalten ausübt, während die Amplitude nur einen moderaten Beitrag leistet. Optimale Bedingungen für eine gesteigerte Verarbeitbarkeit wurden in einem Parameterbereich ab etwa 60 Hz und Amplituden zwischen 0,30 und 0,35 mm identifiziert. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass sich das rheologische Verhalten von Vibrationsfeuerbetonen gezielt über die Einstellung der Korngrößenverteilung sowie durch die Anpassung der Vibrationstechnik steuern lässt. Insbesondere gröbere Versätze reagieren empfindlicher auf eine Erhöhung der Vibrationsenergie und profitieren stärker von optimierten Frequenz-Amplituden-Kombinationen. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse wurde durch die vergleichenden Untersuchungen an industrienahen Versätzen bestätigt, was die Relevanz der Erkenntnisse für die praxisorientierte Verarbeitung und Formgebung unter industriellen Bedingungen unterstreicht. Generell deutet sich auch an, dass die Vibrationsparameter nicht wie normativ gefordert (ISO 1927-4) konstant gehalten werden sollten, sondern an die Feuerbetonrezepturen angepasst werden sollten, um optimale Verarbeitungseigenschaften zu erzielen.

Für das Auszugsviskosimeter zeigte sich als ein weiterer wichtiger Parameter die Vibrationsamplitude und Frequenz. Der Vergleich zwischen Standardvibration (0,25 mm, 50 Hz) und Maximalvibration (0,45 mm, 80 Hz) zeigte, dass stärkere Vibrationen tendenziell zu einer Verringerung der dynamischen Viskosität und weniger dilatantem Verhalten führten. Dabei ist die Effektgröße der Frequenz besonders hoch, während die Amplitude nur eine geringere Wirkung zeigt. Der Einfluss einer erhöhten Vibration beruht auf der Reduktion der inneren Reibung zwischen den Feststoffpartikeln.

Eine stärkere Vibration (mit höherer Amplitude und Frequenz) bewirkt, dass mehr Wasser zwischen die Partikel gelangt und somit die Viskosität verringert wird.

Die systematische Analyse der Grüneigenschaften zeigt, dass feinere Korngrößenverteilungen im Bereich eines  $q$ -Werts von 0,28 bis 0,31 tendenziell mit höheren Kaltbiegefestigkeiten und einer geringeren offenen Porosität einhergehen. Dieses Verhalten ist auf eine dichtere Partikelpackung und eine verbesserte Gefügeausbildung im Frischzustand zurückzuführen. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Vibrationsbeschleunigung bei nahezu allen Versätzen zu einem leichten Anstieg der offenen Porosität sowie einem Rückgang der Festigkeit führt. Diese Trends bestätigen, dass die mechanischen Eigenschaften empfindlich auf zu hohe Vibrationseinwirkung reagieren können. Auffällig ist dabei insbesondere der Versatz VIB4STPP-RT, der im Vergleich zu den Modellfeuerbetonen eine deutlich stärkere Abnahme der Kaltbiegefestigkeit bei steigender Beschleunigung aufweist. Diese überproportionale Verschlechterung lässt sich wahrscheinlich auf ein ungünstiges Zusammenspiel von Additiven, Wassergehalt und Korngrößenverteilung zurückführen, welches unter Vibration zu einer strukturellen Schwächung führt. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass eine gezielte Abstimmung der Vibrationsparameter bei grobkörnigen Systemen notwendig ist, um die positiven Effekte auf die Verarbeitbarkeit nicht durch nachteilige Auswirkungen auf die Gefügestabilität zu konterkarieren.

In Bezug auf die Temperaturwechselbeständigkeit zeigte sich, dass die stärkere Vibration die Verdichtung des Materials und die Dichte der Porenstruktur beeinflusste, was zu einer leichten Veränderung der Temperaturwechselbeständigkeit führen konnte. Jedoch waren diese Unterschiede so gering, dass sie in der Praxis keine signifikanten Auswirkungen auf die Leistung des Feuerbetons in wechselnden Temperaturbedingungen haben dürften. Auch die Untersuchung der Korngrößenverteilung und der Vibrationsparameter ergab keine signifikanten Unterschiede in der Temperaturwechselbeständigkeit, was darauf hinweist, dass diese rheologischen Veränderungen keinen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des Materials bei hohen Temperaturen haben.

Bei der Korrosionsbeständigkeit ist die Wirkung der Schlüsselparameter ebenfalls marginal. Die Korrosionsbeständigkeit des Feuerbetons, sowohl bei den FBq-RT als auch bei den FBq-MS Proben, zeigte nur leichte Veränderungen in Bezug auf die Korngrößenverteilung und die Vibrationsbedingungen. Bei FBq-MS bedingt sich das durch eine Überlagerung des Mikrosilikaanteils der bei unterschiedlichen  $q$ -Werten unterschiedlich hoch war und die Korrosionsbeständigkeit bestimmte. Bei FBq-RT konnte eine leichte Verschlechterung der Korrosionsbeständigkeit bei Maximalvibration beobachtet werden. Dies bedingte sich durch eine Walzbewegung der innerhalb der Proben.

Die starke Vibration führt durch die kleine Probengeometrie teilweise zu einer Walzbewegung der Feuerbetone. Dabei nehmen die Feuerbetonmassen neue Luft auf, statt verdichtet zu werden.

Bei der Überprüfung der Handlungsempfehlungen mit dem Kugelauszugviskosimeter an industrienahe Versätzen führte dies zudem zu einer Verzerrung der Messergebnisse. Die Handlungsempfehlungen wurden daher mit Hilfe des 3D-Ausbreimaßes überprüft.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die angewandten Methoden, insbesondere das Kugelauszugviskosimeter, geeignet waren, um die rheologischen Kennwerte von Vibrationsfeuerbetonen unter definierten Scher- und Vibrationsbedingungen systematisch zu erfassen. Trotz vereinzelter Überlagerungseffekte durch die Auszugsscherrate konnten belastbare Aussagen zu den Wirkmechanismen zentraler Parameter getroffen und der rheologische Charakter erfasst werden. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine fundierte Anpassung von Rezepturen und Prozessparametern zur gezielten Steuerung der Verarbeitbarkeit und Verdichtungseigenschaften im industriellen Maßstab. Die

Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Kornstruktur (q-Wert) und die Frequenz die dominanten Stellgrößen zur Steuerung der rheologischen Eigenschaften in Vibrationsfeuerbetonen sind. Während grobkörnigere Versätze eine gute Fließfähigkeit begünstigen, sind die mechanischen Grüneigenschaften im Rahmen eines Zielkonflikts zwischen Verarbeitbarkeit und Festigkeit auszubalancieren, da überhöhte Vibrationsbeanspruchung die Festigkeit beeinträchtigen kann. Ein optimierter q-Wert im Bereich von 0,31–0,32 in Kombination mit moderat erhöhter Frequenz (60–70 Hz) und einer Amplitude von 0,30–0,35 mm stellt einen robusten Parameterbereich dar, um sowohl ein gutes Fließverhalten als auch ausreichende Grüneigenschaften sicherzustellen.

## 8 Literaturverzeichnis

1. Ferraris CF, Obla KH, Hill R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001;31:245–55. doi:10.1016/S0008-8846(00)00454-3.
2. Hu C, Wang K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. *Construction and Building Materials*. 2011;1196–204.
3. Silva AP, Segadães AM, Pinto DG, Oliveira LA, Devezas TC. Effect of particle size distribution and calcium aluminate cement on the rheological behaviour of all-alumina refractory castables. *Powder Technology*. 2012;226:107–13. doi:10.1016/j.powtec.2012.04.028.
4. Erdem TK, Khayat KH, Yahia A. Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar. *MJ* 2009. doi:10.14359/56462.
5. Evangelista PC, Parr C, Revais C. Control of formulation and optimization of self-flow castables based on pure calcium aluminates. In: Alafar, editor; 2000.
6. Bonadia P, Studart AR, Pileggi RG. Applying MPT principle to high-alumina castables. *Ind.Heat*. 1999;66:57–60.
7. Innocentini MDM, Pileggi RG, Ramal jr. FT, Pandolfelli VC. PSD-Designed-Refractory Castables. *American Ceramic Society Bulletin*. 2003:9401–6.
8. Andreasen AHM. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). *Kolloid-Zeitschrift*. 1930;50:217–28. doi:10.1007/BF01422986.
9. Ke J, Shui Z, Gao X, Qi X, Zheng Z, Zhang S. Effect of Vibration Procedure on Particle Distribution of Cement Paste. *Materials (Basel)* 2023. doi:10.3390/ma16072600.
10. Chai M, Hu C, Cheng M. Study on the Effect of Vibrating Process on the Compactness of Slip-form Concrete. *Applied Sciences*. 2023;13:8421. doi:10.3390/app13148421.
11. Li L, Wu J, Zhang Y, Li K, Liu Y, Liu L, Chen Y. Research Progress of concrete Vibratory Technology. *AJST*. 2022;3:71–7. doi:10.54097/ajst.v3i2.2095.
12. Li J, Tian Z, Sun X, Ma Y, Liu H, Lu H. Modeling vibration energy transfer of fresh concrete and energy distribution visualization system. *Construction and Building Materials*. 2022;354:129210. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129210.
13. Gehm L, editor. *Rheologie: Praxisorientierte Grundlagen und Glossar*. Hannover: Vincentz; 1998.
14. Bastian M, Dannert, C., Pokhrel, A., Krause, O., Kakavand, M., Linden C. Entwicklung neuer praxisnaher Methoden zur Messung der scherratenabhängigen dynamischen Viskosität für die Ermittlung des Einflusses der Zusammensetzung und des Mischprozesses auf die rheologischen Eigenschaften von Feuerbetonen: Schlussbericht zu IFG-Vorhaben Nr. 21830 N; 2023.
15. Pivinskii YE. Refractory concretes of a new generation: Vibrorheology. *Vibration methods of compacting and forming. Refractories and Industrial Ceramics*. 1994;35(7):211–220. doi:10.1007/BF02310375.
16. da Luz AP, Braulio MAL, Pandolfelli VC. *Refractory Castable Engineering*. Baden-Baden (DE): Göller Verlag GmbH; 2015. (F.I.R.E. Compendium Series; Vol. 1).
17. Schnabel M, Buhr A, Dutton J. Rheology of high performance alumina and spinel castables. *refractories WORLDFORUM*. 2012;4(2):95–100.
18. ACI Committee 238. *ACI 238.1R-08: Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete*. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2008.
19. Kim JH, Park M. Visualization of concrete slump flow using the Kinect sensor. *Sensors (Basel)*. 2018;18(3):771. doi:10.3390/s18030771.

20. Pereira JB, Maciel GF. Automated slump test: An effective alternative in predicting rheological properties and an efficient tool for providing the quality control of materials. *Measurement*. 2021;178:109384. doi:10.1016/j.measurement.2021.109384.
21. Baudez JC, Chabot F, Coussot P. Rheological interpretation of the slump test. *Applied Rheology*. 2002;12(3):133–141. doi:10.1515/arh-2002-0008.
22. Saak AW, Jennings HM, Shah SP. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(3):363–371. doi:10.1016/j.cemconres.2003.08.005.
23. Kakavand M, Krause O, Ibarra Plata LT, Zoch J. Enhanced rheological characterisation of vibratable castables: a comparative study between conventional slump tests and 3D spread flow measurements. In: 66th International Colloquium on Refractories (ICR); 2024. p. 158–161.
24. Mezger, Thomas G.: *Das Rheologie-Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. 5., Hannover: Vincentz Network, 2016. ISBN 978-3-74860-012-1.
25. Mandal R, Panda SK, Nayak S. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future prospectives. *Construction and Building Materials*. Volume 392. 2023. 132007,ISSN 0950-0618,

## 9 Anhang

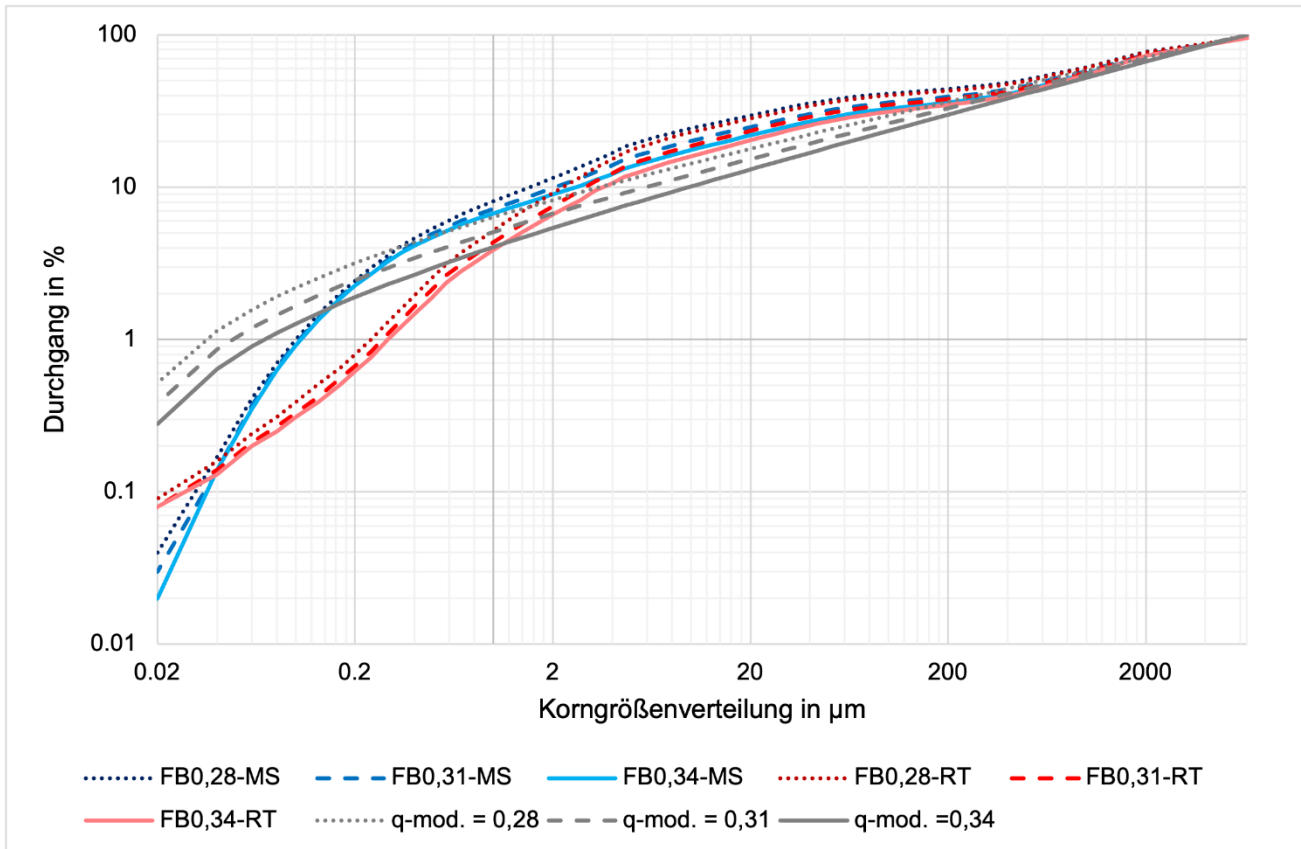


Abbildung 71: Korngrößenverteilung der Modellvibrationsfeuerbetone FBq-RT und FBq-MS. In Grau sind die theoretischen q-Werte dargestellt. Es wird ein modifizierter q-Wert dargestellt, der Berücksichtigt, dass bei niedrigen Korngrößen keine lineare Verteilung gibt. Erstellt mit der Software EMMA.