

Einfluss der Art grober Gesteinskörnung auf Struktur und Eigenschaften von ultrahochfestem Beton

Abschlussbericht in Langfassung

Inhaltsverzeichnis

1	ALLGEMEINE ANGABEN	2
1.1	DFG-GESCHÄFTSZEICHEN	2
1.2	ANTRAGSTELLER	2
1.3	INSTITUT / LEHRSTUHL	2
1.4	THEMA	2
1.5	BERICHTSZEITRAUM, FÖRDERUNGSZEITRAUM INSGESAMT	2
1.6	LISTE DER PUBLIKATIONEN AUS DIESEM PROJEKT	2
2	ARBEITS- UND ERGEBNISBERICHT.....	3
2.1	DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN, ERGEBNISSE UND DISKUSSION	3
2.1.1	<i>Ziele des Projekts</i>	<i>3</i>
2.1.2	<i>Auswahl und Beschaffung von Gesteinskörnungen.....</i>	<i>3</i>
2.1.3	<i>Probenherstellung und Frischbetonkennwerte.....</i>	<i>7</i>
2.1.4	<i>Ergebnisse an den Gesteinen und Festbetonen außer der Mikroskopie</i> <i>und der Phasenanalyse.....</i>	<i>10</i>
2.1.5	<i>Phasenanalytische Ergebnisse an den Gesteinen und Festbetonen</i>	<i>24</i>
2.1.6	<i>Lichtmikroskopische Untersuchungen an den Gesteinen und Festbetonen</i>	<i>26</i>
2.1.7	<i>Rasterelektronenmikroskopische Ergebnisse an den Gesteinen und Festbetonen.....</i>	<i>28</i>
2.1.8	<i>Elektronenmikroskopische Ergebnisse an UHFB-Lamellen</i>	<i>36</i>
2.1.9	<i>Diskussion</i>	<i>46</i>
2.1.10	<i>Literatur.....</i>	<i>48</i>
2.2	WIRTSCHAFTLICHE VERWERTBARKEIT	50
2.3	WER HAT ZU DEN ERGEBNISSEN DES PROJEKTS BEIGETRAGEN?.....	50
2.4	QUALIFIKATION DES WISSENSCHAFTLICHEN NACHWUCHSES.....	50
3	ZUSAMMENFASSUNG	51

1 Allgemeine Angaben

1.1 DFG-Geschäftszeichen

SCHM 1473/34-1 und RI 1516/3-1

1.2 Antragsteller

Frank Schmidt-Döhl, Prof. Dr.-Ing.
Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie
Technische Universität Hamburg, B-3
Dienstadresse: Eißendorfer Straße 42, 21071 Hamburg
Tel: 040 30601 3021
schmidt-doehl@tuhh.de

Martin Ritter, Dr.-Ing.
Betriebseinheit Elektronenmikroskopie
Technische Universität Hamburg
Dienstadresse: Eißendorfer Straße 42, 21071 Hamburg
Tel: 040 30601 3543
ritter@tuhh.de

1.3 Institut / Lehrstuhl

Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie (B-3), Technische Universität Hamburg
Betriebseinheit Elektronenmikroskopie, Technische Universität Hamburg

1.4 Thema

Einfluss der Art grober Gesteinskörnung auf Struktur und Eigenschaften von ultrahochfestem Beton

1.5 Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

Berichtszeitraum: 01.10.2022 bis 31.09.2026
Förderungszeitraum: 01.10.2022 bis 31.05.2026

1.6 Liste der Publikationen aus diesem Projekt

a) Arbeiten in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung; Buchveröffentlichungen

S. Rybczyński, T. van der Horst, J. Lohmann, M. Ritter, F. Schmidt-Döhl: Effect of Coarse Aggregate Type on the Mechanical Response of Ultra-High Performance Concrete. Angenommen für: 1st International Symposia on Advances in Structural Engineering (ISASE 2026), Cape Town, 7–9 Sept 2026

b) Andere Veröffentlichungen

T. van der Horst, F. Schmidt-Döhl, S. Rybczynski, J. Lohmann: Experimental investigation of the effects of different coarse aggregates on the mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC). Angenommen für: 22nd International Conference on Building Materials (ibausil 2026), Weimar, 16.-18.9.2026

2 Arbeits- und Ergebnisbericht

2.1 Durchgeführte Arbeiten, Ergebnisse und Diskussion

2.1.1 Ziele des Projekts

Ziel des Forschungsprojektes war es, den Einfluss unterschiedlicher Arten von Gesteinskörnung auf die Strukturausbildung und das mechanische Verhalten von ultrahochfestem Beton (UHFB) systematisch zu untersuchen. Das Projekt konzentrierte sich dabei auf den Einfluss von Gesteinskörnung im Bereich mehrerer Millimeter Größe. Solche UHFB werden zur Reduzierung des Bindemittelgehaltes in der Praxis häufig eingesetzt. Dabei wurden Daten zum Einfluss der Gesteinskörnung auf die Druckfestigkeit, das Verformungsverhalten bei Druckbeanspruchung, die Biegezugfestigkeit und zum Verhalten bei stoßartiger Belastung gewonnen. Zum anderen war das Ziel, die zu beobachtenden Unterschiede durch Untersuchungen an den Gesteinskörnungen selbst, aber insbesondere durch Untersuchungen der Grenzflächen zwischen Gesteinskörnung und Bindemittel durch hochauflösende analytische Methoden auch zu verstehen. Das Projekt sollte sowohl die gängigen Körnungen, wie verschiedene Basalte untersuchen, als auch die Palette an Gesteinskörnungen verbreitern. Damit sollte eine Grundlage für eine bessere, gezieltere und wirtschaftlichere Anwendung von UHFB, mit einer breiteren Palette an Ausgangsstoffen geschaffen werden.

2.1.2 Auswahl und Beschaffung von Gesteinskörnungen

Die zu untersuchenden Typen von Gesteinskörnungen wurden bereits bei der Erarbeitung des Forschungsantrages ausgewählt und genannt. Nach Start des Projektes wurden geeignete Lagerstätten bzw. Lieferanten recherchiert und ausgewählt. Diese sind im Folgenden beschrieben.

Kalkstein

Für die Herstellung von Ultrahochfestem Beton (UHFB) sind, wenn überhaupt, nur porenarme Kalksteine geeignet. Untersucht wurde deshalb ein devonischer Massenkalk aus dem Steinbruch Elbingen der Fa. Fels Werke GmbH. Zur Herstellung von Proben für die Druckprüfung wurde grober gebrochener Kalkstein verwendet (für die Zuckerindustrie), zur Herstellung von plattenförmigen Proben wurde Vorbruchmaterial eingesetzt. Das gebrochene Material wurde mittels Steilkegelbrecher aufbereitet. Die Abholung erfolgte am 14.11.2022. Die Körnung 5-8 mm wurde von der Fa. Fels aus dem gleichen Material im Technikum gebrochen, da diese Körnung nicht kommerziell produziert wird und wurde am 16.3.2023 geliefert. Dieses Material wurde mit einem Labor-Backenbrecher nachgebrochen. Das zunächst angedachte Aussieben aus Material 2-8, das als Gesteinskörnung für Beton eingesetzt wird, wurde verworfen, da es sich bei der hergestellten Körnung 2-8 mm um eine Mischung handelt, deren Herkunft nicht genau einer Lokalität zugeordnet werden kann. Das Material zeigt keine Vorzugsrichtung.

Marmor

Als zweiter Kalkstein wurde Marmor der Fa. Geomin aus dem Werk Hammerunterwiesenthal verwendet. Dieses metamorphe Gestein wird im Tagebau und im Untertagebau gewonnen. Die eingesetzten Materialien entstammen aus dem Untertagebau. Zum Zeitpunkte der Probenentnahme am 8.2.2023 erfolgte ein Abbau auf der 4. bis 11. Sohle. Nach einem Prüfzeugnis handelt sich um einen mittelkristallinen Calcitmarmor aus der „Obermittweida-Formation der Keilberg-Gruppe des oberen Unterkambriums“. (Sächsische BauprÜf Edelman GmbH, 2021a). Nach eigenen Untersuchungen liegen aber auch hohe Anteile an Dolomit vor. Der Marmor ist tektonisch zerschert, weshalb er nicht zur Gewinnung von großen Blöcken eingesetzt werden kann. Er wird für Körnungen und als weißer Füllstoff für diverse technische Anwendungen aufbereitet. Die Körnung 5-8 wurde vom Unternehmen übergeben. Es handelt sich um Gesteinskörnung nach DIN EN 12620. Die größeren Steine wurden aus dem Vorbruch des Untertagebaus entnommen. Eingeschaltete dunklere Partien werden durch Sortierung separiert. Das Unternehmen setzt als Vorbrecher einen Backenbrecher ein. Die weitere Aufbereitung erfolgt mittels Hammermühle, Kugelmühle und/oder Walzenschüsselmühle. Die verwendete Körnung wurde mittels Walzenschüsselmühle weiter aufbereitet. Das Material zeigt keine Vorzugsrichtung.

Grauwacke

In dem Projekt wurde Harzer Grauwacke aus dem Steinbruch Rieder der Mitteldeutsche Baustoffe GmbH eingesetzt. Das Material zur Herstellung von Proben für die Druckprüfung und Prüfung der Bruchenergie wurde aus dem Vorbruch entnommen. Die Gesteinskörnung 5-8 mm wurde der Halde entnommen. Das Material wird mit einem Backenbrecher als Vorbrecher und einem Kegelbrecher als Hauptbrecher aufbereitet. Die Abholung erfolgte am 14.11.2022. Die Körnung 5-8 mm wird für die Herstellung von Asphalt eingesetzt. Die petrographische Beschreibung nach DIN EN 932-3 (BBN, 2022) der für Betonherstellung vorgesehenen Körnung liefert folgende Daten: „Sedimentgestein: Grauwacke aus dem Erdzeitalter des Oberdevons (Südharz-Selke-Grauwacke). Farbe: mittelgrau bis dunkelgrau, rötlich. Petrographische Interpretation: mäßig bis schwach sortierte Korngröße / äußerst schwach ausgeprägte Lagigkeit / keine Vorzugsorientierung der Minerale. Mineralinhalt: Das Material zeichnet sich durch einen Anteil an Feldspat (Plagioklas), Quarz und einer Matrix aus, die überwiegend aus Quarz oder Feldspat besteht, sowie aus Muskowit und etwas Biotit aufgebaut ist / 5 Vol.-% Gesteinsbruchstücke / 45 Vol.-% Feldspat / 30 Vol.-% Quarz / 15 Vol.-% Muskowit / 5 Vol.-% Kalzit. Alteration: keine Anzeichen.“ Das Material zeigt keine Vorzugsrichtung.

Basalt I (Basanit)

Einer der beiden untersuchten Basalte entstammt dem Steinbruch Billstein der F.C. Nüdling Natursteine GmbH + Co. KG östlich von Thaiden in der Rhön. Der Basalt gehört zur Frankenheimer Basaltdecke. Es handelt sich um einen Basanit aus dem Miozän. Die geologische und petrographische Beurteilung des Steinbruchs Billstein klassifiziert den Basalt als phonolithischer Basanit bis Andesit und als alkalischer Intraplattenbasalt (Günther-Plönes, 2021). Nach Schmeling (1991) liegen folgende chemische und mineralogische Daten vor: „Feldspat (Plagioklas) 20-30 %, Augit 30-40 %, Olivin 15-20 %, Erz 5-8 %, Apatit 0,5-3 %, Foide (Analcim, Nephelin) 3-5 %, vulkanisches Glas 0-15 %“. „Es können auch mehr als 10 % sekundäre Umwandlungsprodukte, aber auch Calcit (als Hohlraumfüllung) und Dunkelglimmer (bis zu 3 %) vorhanden sein.“ Das Material zur Herstellung von Proben für die Druckprüfung und Prüfung der Bruchenergie sowie die Körnung 5-8 wurde vom Hersteller entnommen und zur Verfügung gestellt. Abgesehen von der Körnung handelte es sich um großformatige Blöcke (Vorbruch). Die Körnung ist eine Gesteinskörnung nach DIN 12620. Das Material wird mit einem Backenbrecher als Vorbrecher und Kegelbrechern als Hauptbrecher aufbereitet. Die Abholung erfolgte am 5.12.2022. Das Material zeigt keine Vorzugsrichtung.

Basalt II (Alkaliolivinbasalt)

Als zweites basaltisches Material wurde ein Alkaliolivinbasalt (Pedall & Wessels, ohne Datum) aus der Lagerstätte Greifenstein Beilstein der Fa. Hermann Hoffmann eingesetzt. Der Basalt enthält demnach Hornblende, Olivin, Augit sowie Calcit, Heulandit, Natrolith als Hohlraumfüllungen. Hornblende konnte in den eigenen Untersuchungen nicht beobachtet werden. Der Basalt wird aufgrund seiner Zusammensetzung vor allem für die Herstellung von Fasermaterialien eingesetzt. Aber auch Gesteinskörnung für Beton u.a. wird produziert. Die Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620 4-8 mm wurde durch Absiebung auf 5-8 mm gebracht. Steine für die Druckfestigkeitsuntersuchung wurden aus größerem Material genommen, was für die Herstellung von Fasern eingesetzt wird. Steine für die Untersuchung der Bruchenergie wurden aus dem Vorbruch entnommen. Der Basalt aus dem hier relevanten neuen Steinbruch Reitelsberg zeigt eine plattige Absonderung. Die Aufbereitung der Körnung erfolgt mittels Backenbrecher (Vorbrecher) und Kreiselbrecher. Überkorn aus der Absiebung wurde im Labor mittels Backenbrecher nachgebrochen, da etwas zu wenig Material 5-8 mm vorlag. Die Abholung erfolgte am 24.3.2023. Das Gestein hat eine hohe Frostbeständigkeit, aber keine gute Beständigkeit bei Frost-/Tau-salzangriff.

Diabas

Es wurde der Diabas aus dem Diabaswerk Huneberg der Harzer Pflastersteinbrüche Telge & Eppers, Zweigniederlassung der KEMNA BAU Andreae GmbH & Co. KG verwendet. Von dem Unternehmen wurde Gesteinskörnung 5-8 mm, sowie gröberes Material zur Herstellung der Druckproben sowie zur Herstellung der plattenförmigen Probekörper zur Verfügung gestellt und am 19.12.2022 im Steinbruch

abgeholt. Das Unternehmen setzt als Vorbrecher Backenbrecher und ansonsten Kegelbrecher ein. Teilweise wird in dem Steinbruch auch kontaktmetamorpher Hornfels mit gewonnen. Zwei Gesteinsstücke, bei denen es sich um Hornfels handeln könnte wurden aussortiert und nicht verwendet. Das Gestein weist verheilte Klüfte auf und hat keine Vorzugsrichtung. Es handelt sich um eine Gesteinskörnung nach DIN EN 12620. Der unterkarbonische Diabas des Hunebergs enthält 48 Vol.-% Plagioklas, 39 Vol.-% Chlorit/Serpentinit, 26 Vol.-% Diopsid/Aktinolith, 1 Vol.-% Epidot/Titanit. 15 Vol.-% Prehnit/Pumpellyit, 1 Vol.-% Calcit und 5 Vol.-% Erz (Herrmann & Wedepohl, 1970 nach Mohr 1993). Auch Meyer & Schuster (1987) beschäftigen sich mit dem Steinbruch. Die eigene Phasenanalyse des Gesteins weicht davon ab.

Amphibolit

Es wurde Amphibolit aus dem Steinbruch Venusberg der Fa. ard Baustoffwerke eingesetzt. Nach Sächsische Baupr. Edelmann GmbH (2021b) handelt es sich um feinkörniges Gestein mit geringfügigen bandartigen Quarz- und Calcit-Einlagerungen, das vor allem Plagioklas, Chlorit und Hornblende enthält. Die Körnung 5-8 wurde der Halde entnommen, die größeren Steine dem Vorbruch. Die Abholung erfolgte am 7.2.2023. Als Vorbrecher setzt das Unternehmen einen Backenbrecher ein, als Hauptbrecher verschiedene Kegelbrecher. Es handelt sich um eine Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620.

Rhyolith

Die Lagerstätte und der Hersteller des Gesteins soll auf Wunsch des Lieferanten nicht genannt werden. „Der farbliche Gesamteindruck ist rötlich-grau. Das Gestein zeigt ein regelloses, porphyrisches Gefüge mit mittel- bis vereinzelt grobkristallinen Phänokristallen, die sich in einer rötlichgrauen, feinkörnigen Matrix befinden. Das Bild unter dem Mikroskop zeigt deutlich das porphyrisch ausgebildete, völlig regellose Gefüge des Materials. So "schwimmen" in einer feinkristallinen Grundmasse nahezu idiomorph ausgebildete, bis zu 3 mm große Plagioklase und bis zu einem mm große Quarz-Individuen. Ebenso sind Biotite und eine daraus resultierende Erzphase, die im Durchlicht opak ist, als Phänokristalle zu beobachten. Die Grundmasse besteht aus einem Gemenge aus Feldspat und Quarz.“ (persönliche Mitteilung) Das Material wurde vom Unternehmen zusammengestellt und per Spedition versandt. Die Körnung 5-8 mm wird als Gesteinskörnung für Asphalt nach DIN EN 13043 eingesetzt. Als Vorbrecher wurde ein Steilkegelbrecher eingesetzt, als Hauptbrecher ebenfalls ein Kegelbrecher.

Andesit

Die Lagerstätte und der Hersteller des Gesteins soll auf Wunsch des Lieferanten nicht genannt werden. „Das Gestein besitzt ein deutlich ausgebildetes, porphyrisches Gefüge und zeichnet sich durch einen ca. 10%igen Anteil von Phänokristallen und einem Anteil von ca. 90% Matrix aus. Sie besteht überwiegend aus Feldspäten (Plagioklas), Quarz, Biotit und etwas Pyroxen. Das Gestein kann somit nach der Einteilung von Streckeisen, der Unterteilung von Vulkaniten, hoher Gehalt an Plagioklas und Quarz als Andesit bezeichnet werden.“ (persönliche Mitteilung) Das Material wurde vom Unternehmen zusammengestellt und per Spedition versandt. Als Vorbrecher wurde ein Backenbrecher eingesetzt. Als Hauptbrecher ein Kegelbrecher.

Sandstein

Für das Projekt wurde ein Herdecker Ruhsandstein der Fa. Steinbruchbetriebe Grandi GmbH aus Herdecke eingesetzt. Es handelt sich dabei um einen mittel bis grobkörnigen Sandstein aus dem Oberkarbon, der durch eine kieselige Bindung und intensive Kornkontakte ausgezeichnet ist. Der Sandstein wird vorzugsweise zu Werksteinen, Pflastersteinen, Mauersteinen, Blockstufen und Wasserbausteinen nach DIN EN 13383 verarbeitet. (Grandi 2023) Ab Werk ist auch grobe Körnung lieferbar, die im Rahmen des Projektes mit einem Labor-Backenbrecher zu einer Körnung 5-8 mm gebrochen wurde. Dabei konnte allerdings nicht die notwendige Menge erreicht werden. Von dem Sandstein wurden daher etwas weniger UHFB-Proben hergestellt. Der Sandstein hat eine für diese Gesteinsart sehr hohen Druckfestigkeit. Diese liegt allerdings noch immer deutlich unter der Festigkeit von z.B. Basalten oder Quarziten und unter der üblichen Festigkeit von UHFB. Der Sandstein hat auch eine merkbare Porosität. Dies musste bei der Herstellung von UHFB berücksichtigt werden, da die Poren Anmachwasser aufsaugen und so zum Ansteifen des Betons führen können. Um dies zu vermeiden wurde analog zu anderen porigen

Gesteinskörnungen das Wassersaugen der Gesteinskörnung innerhalb von 10 Minuten ermittelt und diese Wassermenge bei der Herstellung zusätzlich hinzugegeben. Von Vorteil ist, dass das Porenwasser des Sandsteins als internes Wasserreservoir für den UHFB dient und somit größere Hydratationsgrade erreicht werden können. Die alternativ mögliche Vorsättigung mit Wasser und anschließende Rücktrocknung bis zum oberflächentrockenen Zustand wurde als zu ungenau verworfen. Das Material zeigt eine Schichtung und damit eine Vorzugsrichtung. Die Abholung des Gesteins erfolgte am 22.2.2023. Mauer-Setzsteine und Körnung wurden den Halden entnommen. Für das Brechen der Körnung wird vor Ort ein mobiler Backenbrecher eingesetzt.

Phonolith

Das Gestein Phonolith wurde aus dem Werk Bötzingen der Fa. Hans G. Hauri Mineralstoffwerke bezogen. Es handelt sich um einen zeolithhaltigen Phonolith aus dem Kaiserstuhl. Die Körnung 5 bis 8 mm wurde mittels Backenbrecher als Vorbrecher und Prallbrecher als Hauptbrecher aufbereitet. Das Unternehmen stellt eine Reihe von technischen Produkten aus dem Phonolith her. Diese werden zusätzlich mit einer Kombination aus Walzenschüsselmühlen und Kugelmühlen aufbereitet. Das Gestein zeigt keine Vorzugsrichtung.

Gneis

Das Gestein Gneis wurde von der Fa. Mineral Baustoff GmbH, aus dem Werk Görsdorf bezogen. Das Gestein wurde am 30.3.2023 abgeholt. Die Gesteinskörnung 5-8 mm wird als Verlege, Drainage- und Filtermaterial eingesetzt. Körnungen des Werkes werden auch als Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 eingesetzt. Es „ist ein mittel- bis feinkörniger Paragneis mit mehr als 20 Vol.-% Feldspat, > 10 Vol.-% Quarz und > 10 Vol.-% dunkle Minerale (Biotit) als Hauptbestandteile.“ (Ingenieurgesellschaft 2022). Zur Herstellung der Körnungen werden als Vorbrecher ein Backenbrecher und anschließend Kegelbrecher eingesetzt. Die Körnung wurde der Halde entnommen, die Steine dem Steinbruch.

Granulit

Der Granulit wurde von der Fa. Mineral Baustoff GmbH, aus dem Werk Hartmannsdorf bezogen. Das Gestein wurde am 30.3.2023 abgeholt. Bei der Körnung 5-8 mm handelt es sich um eine Gesteinskörnung nach DIN EN 12620. „Der Hartmannsdorfer Granulit ist ein graues, katazонаles kristallines Gestein an dessen Zusammensetzung folgende Minerale beteiligt sind: Quarz, Orthoklas, Plagioklas, Granat, Biotit, Disthen, Korund.“ (Ingenieurgesellschaft 2021). Zur Herstellung der Körnungen werden als Vorbrecher ein Backenbrecher und anschließend Kegelbrecher eingesetzt. Material aus Störungen in der Lagerstätte wird nicht für Beton eingesetzt. Die Körnung wurde der Halde entnommen, die Steine dem Steinbruch.

Granit

Für das Forschungsprojekt wurde der Granit der Fa. Natursteinwerk Mittweida GmbH verwendet, der eine hohe Druckfestigkeit aufweist. Es handelt sich um einen feinkörnigen Granit mit ca. 2 mm Größtkorn der Mineralien. Das Material wurde am 16.3.2023 im Werk abgeholt. Als Vorbrecher wird ein Backenbrecher eingesetzt. Nachgeschaltete Brecher sind Kegelbrecher. Das Material weist keine Vorzugsrichtung auf. Körnungen des Herstellers werden auch als Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 eingesetzt. Das Sägen der Proben für die Ermittlung der Bruchenergie wurde bei dem Granit Mittweida vom Hersteller vorgenommen. Das Überkorn der Korngruppe 5 bis 8 mm wurde im Labor des Instituts mittels Backenbrecher nachgebrochen, um mehr Material zur Verfügung zu haben.

Quarzit

Für das Projekt wurde ein Taunusquarzit aus dem Steinbruch Saalburg der Fa. Holcim eingesetzt. Es handelt sich dabei um einen Orthoquarzit aus dem Devon. Bei der Körnung 5-8 mm handelt es sich um Gesteinskörnung nach DIN EN 12620. Auch für die Asphaltherstellung wird das Gestein eingesetzt. Als Vorbrecher wird ein Backenbrecher eingesetzt. Die nachgeschalteten Brecher sind Kegelbrecher. Körnung und Steine entstammten dem gleichen Bereich des Steinbruchs (nordöstlicher Bereich, Sohle 0 auf -1). Das helle Gestein ist zum Teil massig und kompakt. Zum Teil zeigt es eine steilstehende Schichtung, die dann zu einer plattigen Form führt.

Dolomit

Genau wie bei Kalkstein kommt für UHFB nur ein sehr dichter Dolomitstein in Frage. Genutzt werden konnte der Dolomit der Fa. Hippert aus dem Steinbruch Schloss Thorn in Palzem. Bei der entnommenen Gesteinskörnung 4-8 mm handelt es sich um Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620. Durch Siebung wurde daraus Körnung 5-8 mm für das Projekt hergestellt. Die größeren Steine wurden aus dem Vorbruch entnommen. Körnungen werden vom Unternehmen mit hintereinander geschalteten Prallmühlen produziert, was die Kubizität des Korns verbessert. Das Dolomitgestein zeigt die für Sedimentgesteine typische Schichtung. Die Abholung erfolgte am 23.3.2023.

Gabbro

Die ursprünglich geplante Einbeziehung des Gesteins Gabbro in das Forschungsprojekt war nicht möglich. Als Ersatz wurde das Hartgestein Granulit einbezogen.

2.1.3 Probenherstellung und Frischbetonkennwerte

Einige Gesteinkörnungen konnten nicht in der angestrebten Kornklasse 5-8 mm beschafft werden. Der Sandstein wurde aus größerem Material im Labor gebrochen. Bei dem Granit Mittweida musste das Überkorn größer 8 mm gebrochen werden, um genug Material zu erhalten. Zum Brechen wurde ein Labor-Backenbrecher verwendet. Der Basalt Greifenstein Beilstein sowie der Dolomit, die in der Körnung 4 bis 8 mm entnommen wurden, wurden auf 5 bis 8 mm abgesiebt. Alle Gesteinskörnungen wurden im Labor trocken gesiebt, um das Unterkorn unter 5 mm und das Überkorn über 8 mm zu entfernen. Dann wurden die Gesteinskörnungen 24 h gewässert und auf dem 5 mm Sieb nass gereinigt, um abschlämmbare Bestandteile zu entfernen und anschließend durch freie Lagerung ins Feuchtegleichgewicht mit einer Tiefgarage gebracht.

Von den Gesteinen wurden je 10 Zylinder mit 5 cm Durchmesser und 5 cm Höhe mit geschliffenen Belastungsflächen für die Prüfung der Druckfestigkeit hergestellt. Bei anisotropen Gesteinen wurde die Belastungsrichtung senkrecht zur Anisotropiefläche gewählt. Die Herstellung und Trocknung erfolgte nach DIN EN 1926. In Einzelfällen konnten einzelne Zylinder nicht für die Prüfung verwendet werden, so dass dann weniger als 10 Zylinder zur Verfügung standen.

Des Weiteren wurden von den Gesteinen durch die Fa. Naturstein Wolf je 6 quadratische Platten mit 20 cm Kantenlänge und 3 cm Höhe zur Prüfung der Bruchenergie gesägt, von denen jedoch einige Fehlstellen aufwiesen. Bei anisotropen Gesteinen wurde die Belastungsrichtung senkrecht zur Anisotropiefläche gelegt. Die Herstellung der Proben aus Granit Mittweida erfolgte durch den Steinbruchbetrieb. Die Herstellung und Trocknung erfolgte nach DIN EN 14158.

Ausgangspunkt für die Herstellung der UHFB Proben war die UHPC-Referenzrezeptur des DFG-Schwerpunktprogramms 2020. Dieser wurde 30 Vol. % Gesteinskörnung der jeweiligen Gesteine hinzugefügt. Als Dichte der Gesteine wurde die Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis ρ_{ssd} verwendet. Der Sandstein wurde aufgrund der Porosität wie rezyklierte Gesteinskörnung behandelt und zusätzliches Wasser, ermittelt über das Wassersaugen innerhalb von 10 Minuten, hinzugefügt. Die Fließmittelmenge wurde nicht angepasst, um eine gleichmäßigere Konsistenz zu erreichen, so dass die unterschiedliche grobe Gesteinskörnung auch Einfluss auf die Konsistenz nimmt. Die folgende Tabelle zeigt die Rezepturen der einzelnen UHFB.

Tab. 1: Rezepturen der einzelnen UHFB in kg/m³. Zusätzlich ist die Rezeptur des UHFB mit Basalt Oelberg angegeben, der zur Ermittlung des Einflusses der Porosität des Frischbetons auf die Festigkeit genutzt wurde. Im Vergleich dazu ist die Referenzrezeptur ohne Gesteinskörnung 5 – 8 mm angegeben (Rybczynski et al. 2022). Beim Sandstein ist auch die zusätzliche Wasserzugabe zum Ausgleich des Wassersaugens innerhalb von 10 Minuten angegeben.

Gestein	CEM I 52,5 R- SR3 (na)	Wasser	Silikastaub Silicoll P un- kompaktiert	BASF Ma- ser Gle- nium ACE 394	Quarzmehl W12	Quarzsand H33	Gestein
Basanit	553,82	128,28	117,39	19,39	138,14	676,09	900,88
Alkalioli- vinbasalt	551,19	127,67	116,83	19,30	137,48	672,87	878,66
Mas- senkalk	541,83	125,50	114,85	18,97	135,15	661,45	793,24
Marmor	549,13	127,19	116,40	19,22	136,97	670,36	830,72
Diabas	538,79	124,80	114,21	18,86	134,39	657,74	847,21
Phono- lith	541,92	125,52	114,87	18,97	135,17	661,56	716,97
Rhyolith	541,52	125,43	114,79	18,96	135,07	661,07	775,16
Andesit	549,08	127,18	116,39	19,22	136,96	670,31	803,86
Granulit	547,26	126,76	116,00	19,16	136,50	668,07	795,24
Granit	545,13	126,27	115,55	19,08	135,97	665,48	768,51
Dolomit	549,34	127,24	116,44	19,23	137,03	670,62	825,09
Sand- stein	554,79	128,50 + 14,98	117,60	19,42	138,38	677,27	749,03
Grau- wacke	547,70	126,86	116,09	19,17	136,61	668,61	789,95
Quarzit	545,14	126,27	115,55	19,08	135,98	665,49	771,48
Gneis	549,54	127,29	116,49	19,24	137,07	670,86	807,50
Amphib- olit	544,90	126,21	115,50	19,08	135,92	665,20	833,19
Basalt Oelberg	548,32	127,01	116,23	19,20	136,77	669,38	874,10
UHPC aus dem DFG SPP2020							
Refer- enz- UHPC	795,4	187,9	168,6	27,8	198,4	971,0	-

Die folgende Tabelle zeigt die Mischreihenfolge. Im Falle der Grauwacke und des Granits wurden die Mischzeiten zur besseren Durchmischung erhöht. Während des gesamten Zeitraums wurde gemischt, also auch bei der Zugabe der Komponenten.

Tab. 2: Mischreihenfolge der UHFB. In Klammern sind die Mischzeiten der Grauwacke und des Granits angegeben. Im Falle des UHFB mit Basalt Oelberg wurde die letzte Mischzeit ebenfalls verlängert. Auch für die Herstellung der Normmörtelprismen wurden im Falle des Granits und der Grauwacke deutlich längere Mischzeiten verwendet.

Mischreihenfolge	Mischreihendauer [s]
Vormischen Zement + Microsilica	0 – 30
Zugabe Quarzmehl + Quarzsand	30 – 60
Mischen	60 – 90
Zugabe Wasser + Fließmittel (getrennt)	90 – 120
Mischen	120 – 360
Zugabe Gestein	360 – 390 (420)
Mischen	390 (420) – 660 (780)

Es wurden in der Regel jeweils 24 Zylinder mit 180 mm Höhe und 60 mm Durchmesser, 6 quadratische Platten mit 20 cm Kantenlänge und 3 cm Dicke sowie 6 Normmörtelprismen 4 cm x 4 cm x 16 cm hergestellt. Die Proben lagerten 24 h in der Form bei 20 °C und mindestens 90 % r.F und anschließend bis zur Prüfung mindestens 55 Tage unter Wasser (Alter entsprechend mindestens 56 Tage). Die Zylinderproben wurden mit größerer Länge hergestellt und dann auf 180 mm Höhe abgesägt und geschliffen.

Bei der Herstellung wurden jeweils folgende Frischbetonkennwerte bestimmt: Setzfließmaß (ohne Blockierring) nach DIN EN 1015-6, Frischbetontemperatur, Frischbetonrohddichte nach DIN EN 1015-6 verdichtet mit dem Schockverfahren und Gehalt an Verdichtungs-poren, gemessen mit dem Lp-Topf für Mörtel, nach DIN EN 1015-7. Die Festbetonrohddichte wurde am Mörtelprisma vor Ermittlung der Biegezug- und Druckfestigkeit ermittelt. Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Das sehr niedrige Setzfließmaß des UHFB mit Phonolith ist sicherlich auf die merkbare Wasseraufnahme dieses Gesteins zurückzuführen, wobei sich dies bei der Grauwacke, dem Dolomit und dem Alkaliolivinbasalt nicht entsprechend bemerkbar gemacht hat, die ebenfalls eine merkbare Wasseraufnahme besitzen (s. Tab. 4). Bei dem Phonolith ist deshalb ggf. mit einer Beeinflussung (Erniedrigung) des effektiven Wasserserzementwertes im Bindemittel zu rechnen. Trotz des geringen Setzfließmaßes ließen sich die Proben des UHFB mit Phonolith gut herstellen. Bei dem Sandstein wurde das Wassersaugen innerhalb von 10 Minuten als zusätzliche Wassermenge hinzugegeben. Hier hat sich die merkbare Wasseraufnahme entsprechend kaum im Setzfließmaß bemerkbar gemacht.

Tab. 3: Frischbetonkennwerte der einzelnen UHFB, sowie Festbetonrohddichte.

Gestein	Setzfließmaß [mm]	Frischbet- ontemperatur [°C]	Frischbet- onrohddichte [kg/m³]	Gehalt an Ver- dichtungs- sporen [Vol.-%]	Festbet- onrohddichte [kg/m³]
Basanit	541,5	28,6-28,7	2534	2,7	2518
Alkaliolivin- basalt	533,5	26,8-29,3	2504	2,9	2478
Massenkalk	388,5	26,6	2391	3,1	2439
Marmor	490	27,9	2450	3,0	2452
Diabas	420	26,7	2436	3,4	2474
Phonolith	255	26,8	2315	3,5	2320
Rhyolith	490	27,2	2372	3,2	2481
Andesit	423	25,5	2423	3,1	2428
Granulit	413	26,1	2409	3,3	2406
Granit	491	27,5	2376	3,1	2420
Dolomit	410	27,1	2445	3,9	2431
Sandstein	417,5	28,0	2385	3,0	2386
Grauwacke	496	27,8	2405	2,8	2444
Quarzit	437	27,1-29,5	2379	3,2	2376
Gneis	529,5	27,2-27,8	2428	3,0	2426
Amphibolit	505	25,4	2440	3,0	2435

Die Präparation von Proben erfolgte mittels wassergekühlter Diamantsägen und wassergekühlter Schleifprozesse. Proben für die Elektronenmikroskopie wurden mit Kohlenstoff bedampft.

2.1.4 Ergebnisse an den Gesteinen und Festbetonen außer der Mikroskopie und der Phasenanalyse

Die Bestimmung der Trockenrohddichte, der Rohddichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis, der scheinbaren Rohddichte und der Wasseraufnahme der Gesteine erfolgte nach DIN EN 1097-6. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse. Die Wasseraufnahme des Sandsteins innerhalb von 10 Minuten, ausgehend vom luftgetrockneten Zustand (65 % r.F.) betrug 2,0 M.-%. Diese Wasseraufnahme wurde bei der Herstellung des entsprechenden UHFB berücksichtigt.

Tab. 4: Trockenrohdichte, Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis, scheinbare Rohdichte und Wasseraufnahme der Gesteine

Gestein	Trocken- rohdichte [kg/m ³]	Rohdichte auf wassergesät- tigter und oberflächen- trockener Ba- sis [g/cm ³]	Scheinbare Rohdichte [g/cm ³]	Wasserauf- nahme [Gew.-%]	Offene Po- rosität [Vol.-%]
Basanit	3023 ± 7	3,00	3,06	1,0	2,9
Alkaliolivin- basalt	2946 ± 23	2,94	3,07	2,2	6,4
Massenkalk	2695 ± 8	2,70	2,71	0,2	0,7
Marmor	2759 ± 40	2,79	2,79	0,1	0,2
Diabas	2963 ± 64	2,90	2,93	0,4	1,2
Phonolith	2401 ± 94	2,44	2,53	2,4	5,7
Rhyolith	2601 ± 21	2,64	2,67	0,8	2,1
Andesit	2691 ± 45	2,70	2,73	0,5	1,4
Granulit	2697 ± 23	2,68	2,69	0,2	0,5
Granit	2597 ± 10	2,60	2,64	0,8	2,1
Dolomit	2748 ± 8	2,77	2,86	1,8	4,9
Sandstein Trocknung 65 % r.F.	2489 ± 12	2,55 2,55	2,67 2,65	2,9 2,4	7,1 6,1
Grauwacke	2684 ± 23	2,66	2,74	1,5	4,1
Quarzit	2629 ± 8	2,61	2,65	1,0	2,5
Gneis	2705 ± 15	2,71	2,73	0,6	1,5
Amphibolit	2674 ± 66	2,82	2,84	0,5	1,5

Die Ermittlung der chemischen Elementzusammensetzung erfolgte mittels Röntgenfluoreszenzanalyse mit einem Gerät Horiba XGT 7200 und Auswertung mittels Fundamentalparametermethode. Als Standard wurde der NIST Standard 1885a verwendet, ein Zement. Teilweise wurden Punktmessungen mit einer 1,2 mm Kappillare eingesetzt, meistens jedoch Flächenmessungen mittels Mapping. Die Messungen erfolgten mit 50 kV Anregungsspannung ohne Filter. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse. Teilweise sind auch noch andere Elemente nachweisbar als angegeben, jedoch wenn dann nur in sehr geringer Konzentration. Im Falle der carbonatischen Gesteine Kalkstein, Dolomit und Marmor liegen Magnesium und Calcium in Form der Carbonate vor. Die chemische Elementzusammensetzung der Gesteine zeigt keine Auffälligkeiten. Der Marmor ist ein dolomitischer Marmor.

Tab. 5: Chemische Elementzusammensetzung der Gesteine in M.-%.

Gestein	Na ₂ O	MgO/ MgCO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO/ CaCO ₃	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SrO
Basanit	2,89	8,58	14,77	49,99	0,02	1,36	9,56	1,94	0,18	10,48	0,08
Alkali- olivin- basalt	3,14	7,75	14,91	48,93	0,01	0,76	10,77	2,22	0,19	11,14	0,08
Mas- senkalk	0,29	0,54	0,35	1,10	0,03	0,05	97,48	0,01	0,01	0,11	0,02
Marmor	0,74	25,61	1,16	5,78	0,03	0,10	66,17	0,04	0,03	0,32	0,02
Diabas	1,17	5,94	15,70	54,12	0,13	1,27	9,22	1,71	0,15	10,48	0,05
Phono- lith	6,18	0,31	19,18	57,52	0,14	4,07	7,26	0,41	0,32	4,03	0,44
Rhyo- lith	2,21	0,31	14,91	74,01	0,04	4,65	1,01	0,45	0,03	2,32	0,01
Andesit	1,12	1,52	15,91	65,34	0,04	3,43	4,46	1,19	0,14	6,78	0,01
Granu- lit	0,88	0,60	13,65	76,51	0,13	3,67	1,55	0,33	0,04	2,61	0,01
Granit	2,20	0,41	14,62	73,09	0,08	5,48	0,87	0,49	0,03	2,59	0,05
Dolomit	0,00	30,57	3,77	12,73	0,20	0,86	50,41	0,12	0,10	1,22	0,01
Sand- stein	2,53	0,37	10,65	82,28	0,06	2,22	0,22	0,27	0,03	1,35	0,01
Grau- wacke	2,02	2,06	15,14	67,56	0,20	2,53	3,61	0,89	0,13	5,76	0,03
Quarzit	0,00	0,23	5,11	92,99	0,00	1,07	0,00	0,22	0,00	0,34	0,00
Gneis	1,51	1,79	15,46	69,53	0,24	4,02	1,41	0,82	0,07	5,08	0,02
Am- phibolit	0,42	6,69	17,44	49,83	0,12	1,66	10,56	1,26	0,27	11,62	0,03

Die folgende Tabelle zeigt die Druckfestigkeiten der Gesteine ermittelt an je zehn Zylindern mit geschliffenen Belastungsflächen nach DIN EN 1926 sowie die Ergebnisse zur Bruchenergie bei stoßartiger Belastung ermittelt an quadratischen Platten mit 20 cm Kantenlänge und 3 cm Dicke nach DIN EN 14158. Hier konnten leider i.d.R. nur weniger als 6 Proben untersucht werden. Abweichend von DIN EN 1926 wurden die Prüfungen der Druckfestigkeit nicht innerhalb von 24 Stunden nach Abschluss der Trocknung durchgeführt. Die Grauwacke und der Granit wurden stattdessen luftdicht verschlossen bis zur Prüfung gelagert. Die Daten zur Bruchenergie beruhen auf Daten aus Grotheer (2026).

Tab. 6: Druckfestigkeiten (Zylinder h:d: 1:1, kraftgeregelt) und Bruchenergien der Gesteine.

Gestein	Druckfestigkeit [N/mm ²]		Bruchenergie [J]
Basanit	308 ± 60	Spannweite 259,1 bis 453,9	5,0 ± 0,0
Alkaliolivinbasalt	211 ± 29	Spannweite 172,3 bis 271,0	4,2 ± 0,9
Massenkalk	143 ± 31	Spannweite 95,0 bis 201,5	3,5 ± 0,6
Marmor	120 ± 27	Spannweite 59,9 bis 150,0	4,1 ± 0,2
Diabas	291 ± 64	Spannweite 163 bis 381	5,2 ± 0,3
Phonolith	180 ± 49	Spannweite 102,4 bis 257,1	3,7 ± 0,3
Rhyolith	165 ± 30	Spannweite 132 bis 217	4,9 ± 0,3
Andesit	265 ± 46	Spannweite 200,2 bis 331,3	4,8 ± 0,5
Granulit	239 ± 57	Spannweite 124,9 bis 307,3	4,4 ± 1,0
Granit	185 ± 25	Spannweite 156,8 bis 240,7	4,8 ± 0,2
Dolomit	235 ± 52	Spannweite 143,1 bis 304,9	3,5 ± 0,4
Sandstein	170 ± 8	Spannweite 152,8 bis 180,7	8,4 ± 0,8
Grauwacke	163 ± 23	Spannweite 121,3 bis 206,2	3,2 ± 0,2
Quarzit	189 ± 28	Spannweite 118,3 bis 220,6	5,0 ± 0,5
Gneis	154 ± 25	Spannweite 125,2 bis 209,8	5,8 ± 0,2
Amphibolit	77 ± 14	Spannweite 50,7 bis 97,2	7,0 ± 0,5

Die folgende Tabelle zeigt für die UHFB die Zylinderdruckfestigkeiten nach DIN EN 12390-3, den Druck-E-Modul nach DIN EN 12390-13, Verfahren B gemessen in der Regel an je 10 Zylindern (Vorbelastung 20 MN, gehalten über 20 Sekunden), die Bruchenergie bei stoßartiger Belastung an i.d.R. je 6 quadratischen Platten mit 20 cm Kantenlänge und 3 cm Dicke nach DIN EN 14158 und die Ergebnisse von Biegezug- und Druckfestigkeitsermittlungen an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1. Die Verformungsmessungen an den Zylindern wurden mit 3 Wegaufnehmern, angeordnet im 120 Grad Winkel durchgeführt. Die Versuche zur Bestimmung der Bruchenergie wurden an der glatten Unterseite der UHFB-Platten durchgeführt. Enthalten sind auch Druckfestigkeitsdaten der mehrmaligen Herstellung von UHFB mit Diabas, mit dem Ziel Alterseinflüsse des Zementes auf die Ergebnisse zu erfassen sowie Daten der UHFB mit Granit und Grauwacke um Alterseinflüsse der Proben auf die Ergebnisse zu erfassen. Versuche mit dem Basalt Oelberg wurden zur Ermittlung der Festigkeit als Funktion der Porosität des Frischbetons benutzt. Für diesen UHPC sind ebenfalls Festigkeitsdaten angegeben, sowie zum Vergleich Daten für den Referenz-UHPC des DFG-SPP 2020. Dieser diente als Ausgangspunkt für die hier untersuchten Rezepturen und entspricht den hier verwendeten UHFB ohne grobe Gesteinskörnung. Schließlich ist zum Vergleich auch die Festigkeit des Bindemittels des Referenz-UHPC des DFG-SPP 2020 angegeben. Diese Proben entsprechen dem Referenz-UHPC ohne den Quarzsand H33.

Man kann feststellen, dass in den meisten Fällen die messbare Druckfestigkeit nach vorhergehender Belastung zur Ermittlung des E-Moduls größer ist. Die große Differenz im Falle des UHFB mit Kalkstein zwischen der Druckfestigkeit ohne vorhergehende Belastung und mit vorhergehender Belastung zur Ermittlung des E-Moduls konnte nicht aufgeklärt werden. Ein Zusammenhang mit Fehlstellen der Proben besteht nachweislich nicht. Es ist wahrscheinlich, dass bei der Ermittlung der größere Wert die Realität abbildet, da auch die Druckfestigkeit ermittelt an Normmörtelprismen groß ist. Ebenfalls nicht geklärt werden konnte die große Differenz zwischen den Zylinderdruckfestigkeiten und den deutlich höheren Prismendruckfestigkeiten im Falle der UHFB mit Dolomitstein und mit Quarzit. Diese deuten darauf hin, dass mit diesen Gesteinen höhere Festigkeiten möglich sind.

Einen Alterseinfluss des verwendeten Zementes, untersucht mit UHFB-Proben mit dem Gestein Diabas, konnte innerhalb der Streuung nicht beobachtet werden. Man kann an den UHFB-Proben mit Granit und Grauwacke allerdings sehen, dass mit zunehmendem Alter der Zylinderproben noch eine Zunahme der Festigkeit erkennbar ist (Nacherhärtung). Da die Regelproben jedoch alle in einem vergleichbaren Alter der Zylinder geprüft wurden, hat dies keinen Einfluss auf den Vergleich der UHFB mit verschiedener grober Gesteinskörnung.

Tab. 7: Druckfestigkeiten und Druck-E-Modul am Zylinder (h:d: 3:1, weggeregelt, Abweichungen bei der Probenanzahl sind angegeben), Bruchenergien, Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit am Mörtelprisma der UHFB. Zusätzlich sind Festigkeitsdaten von speziellen Probenserien angegeben, sowie zum Vergleich Daten des Referenz-UHPC des DFG-SPP 2020 ohne grobe Gesteinskörnung und Daten des Bindemittels des Referenz-UHPCs ohne den Quarzsand H33. Die gleichen Zylinderdruckfestigkeiten des Amphibolits mit und ohne vorhergehende E-Modul Prüfung entsprechen der Realität und sind Zufall.

Gestein	Zylinderdruckfestigkeit [N/mm ²]	Druck-E-Modul [N/mm ²]	Zylinderdruckfestigkeit, gemessen an den E-Modul-Proben [N/mm ²]	Bruchenergie [J]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit ermittelt am Normmörtelprisma [N/mm ²]
Basanit	170 ± 7	63059 ± 1421	173 ± 4	3,7 ± 0,2	19,9 ± 1,3	174 ± 4
Alkaliolivinbasalt	161 ± 15	58825 ± 1672	165 ± 11	3,7 ± 0,2	17,7 ± 1,1	169 ± 5
Mas-senkalk	158 ± 5 3 Proben	57014 ± 2368	150 ± 12	3,4 ± 0,2	18,5 ± 2,0	156 ± 6
Marmor	135 ± 5	57222 ± 1465	135 ± 10	3,2 ± 0,2	17,3 ± 1,0	133 ± 8
Diabas	156 ± 15	56799 ± 1504	168 ± 11	4,2 ± 0,4	19,9 ± 1,7	158 ± 8
Diabas	160 ± 5	Hergestellt mit 2 Jahre und 7 Monate gelagertem Zement				
Phonolith	160 ± 16	55054 ± 1816	164 ± 15	3,7 ± 0,2	17,4 ± 0,8	151 ± 7
Rhyolith	152 ± 6	52114 ± 1741	147 ± 15	3,4 ± 0,2	18,6 ± 1,3	160 ± 10
Andesit	163 ± 12	54955 ± 1663	170 ± 11	3,3 ± 0,4	21,3 ± 1,6	169 ± 5
Granulit	153 ± 21	57749 ± 1427	158 ± 15	3,3 ± 0,4	18,1 ± 1,3	160 ± 8
Granit	153 ± 7	51976 ± 1049	159 ± 5	3,6 ± 0,5	18,8 ± 0,9	163 ± 8
Granit	170 ± 6	Geprüft im Alter von 731 Tagen, statt 57 Tagen				
Dolomit	123 ± 6 3 Proben	47594 ± 1084	126 ± 10	3,6 ± 0,2	16,1 ± 0,9	159 ± 4
Sandstein	127 ± 5	43275 ± 1418	124 ± 7	3,4 ± 0,4	13,3 ± 1,0	133 ± 6
Grauwacke	135 ± 6	49209 ± 566	136 ± 4	3,3 ± 0,2	17,2 ± 0,8	144 ± 7
Grauwacke	144 ± 3	Geprüft im Alter von 737 Tagen, statt 57 bzw. 58 Tagen				
Quarzit	127 ± 3 4 Proben	48066 ± 1435	143 ± 11	4,2 ± 0,2	17,8 ± 0,7	166 ± 6
Gneis	157 ± 5 3 Proben	54249 ± 883	155 ± 5	3,8 ± 0,2	18,3 ± 1,7	152 ± 9
Amphibolit	114 ± 4	51891 ± 1075	114 ± 4	4,2 ± 0,2	16,8 ± 1,4	113 ± 5
Basalt Oelberg	170 ± 9	UHFB mit 30 Vol. % des Basalts Oelberg. Dieser wurde für die Ermittlung der Festigkeit als Funktion der Porosität des Frischbetons benutzt.				
Referenz-UHPC	195 ± 4	Referenz-UHPC aus dem DFG SPP 2020. Entspricht den hier verwendeten UHFB ohne grobe Gesteinskörnung				
Bindemittel des Referenz-UHPC	165 ± 7	Bindemittel des Referenz-UHPC aus dem DFG SPP 2020. Entspricht dem Referenz-UHPC ohne Quarzsand				

Die folgenden Diagramme zeigen die Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB-Proben im weggeregelten Druckversuch. Sie entstammen verschiedenen Quellen und sind daher nicht gleichartig formatiert. Die Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB mit allen untersuchten Gesteinsarten als grobe Gesteinskörnung zeigen den typischen Verlauf von UHFB ohne Fasern - einen fast linearen Anstieg bis zum Bruch, ohne ausgeprägtes Nachbruchverhalten. Eine merkbare Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Linie im Anstieg, die bei diesen Werkstoffen auf gewisse plastische Verformungsanteile vor dem Bruch hindeutet, ist lediglich bei den UHFB mit Basalt, mit Diabas (einem metamorphen Basalt), mit Marmor und bei dem UHFB mit dem Gneis zu erkennen.

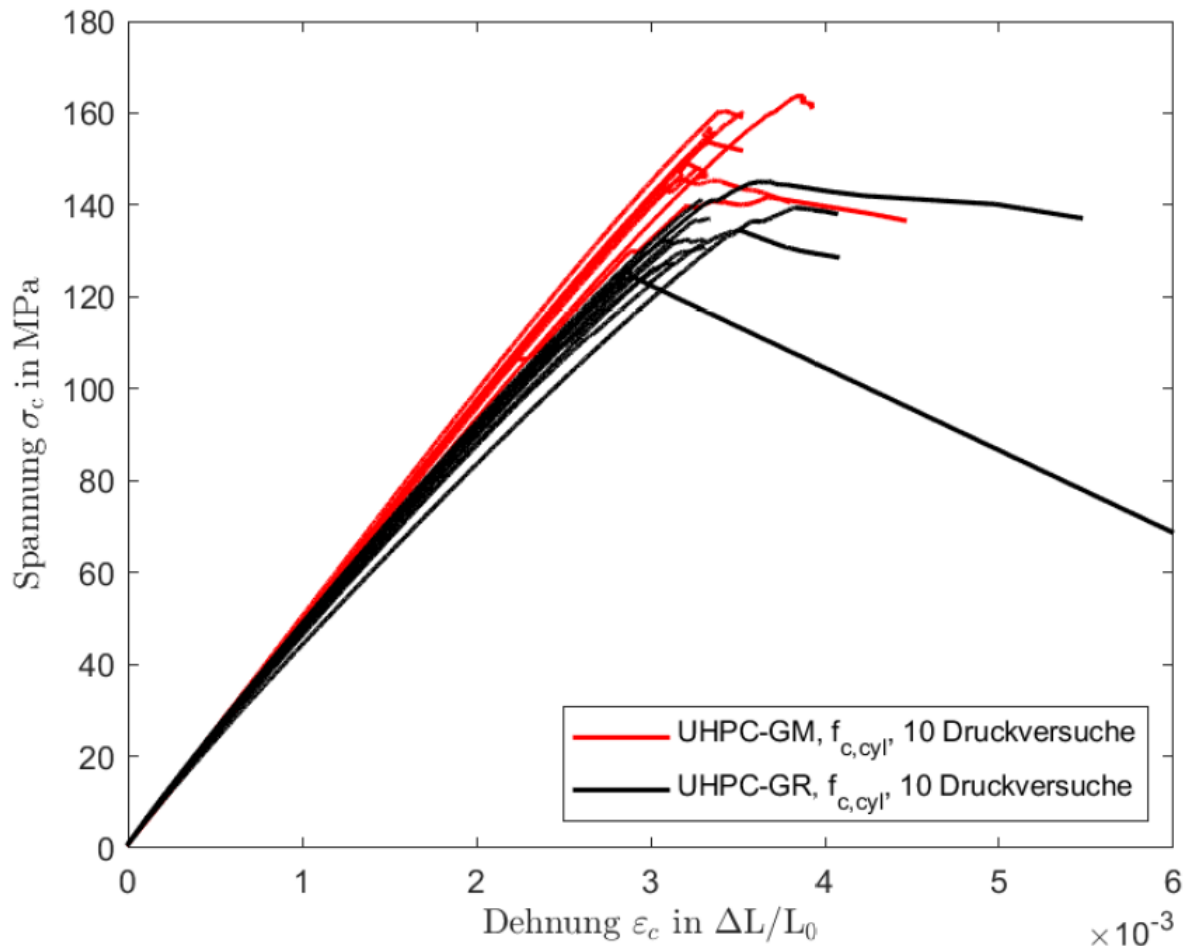


Abb. 1: Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB-Proben mit Granit (rot) und Grauwacke (schwarz) im statischen, weggeregelten Druckversuch (Deden, 2024).

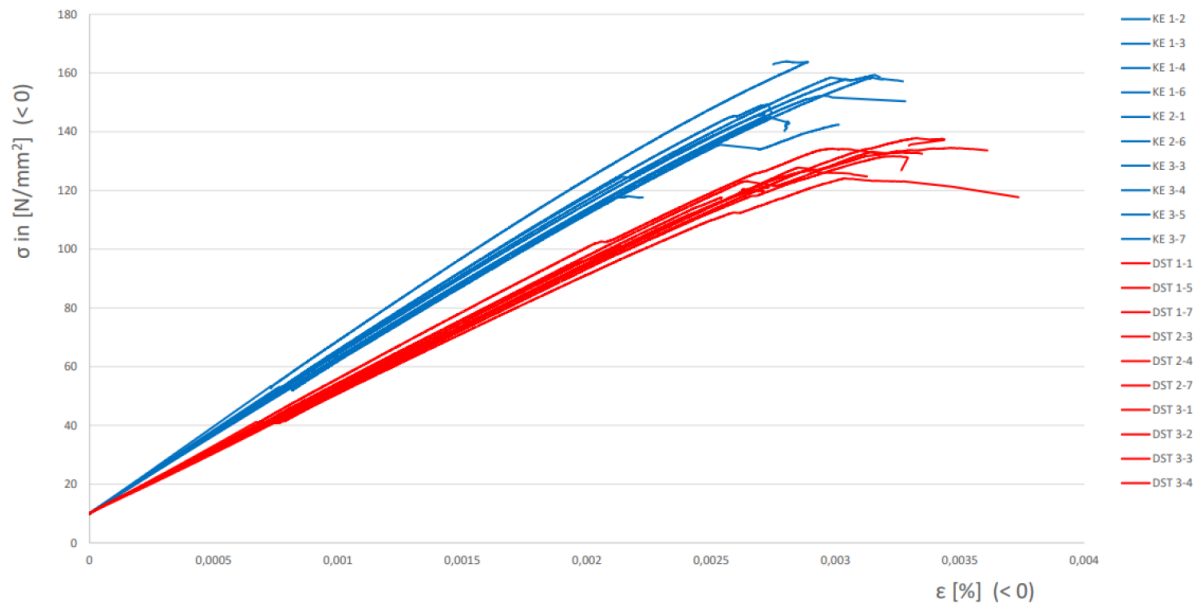


Abb. 2: Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB-Proben mit Kalkstein (blau) und Dolomit (rot) im statischen, weggeregelten Druckversuch. Aus Schneid (2024). Die Dehnungsachse ist entgegen der Angabe nicht in Prozent.

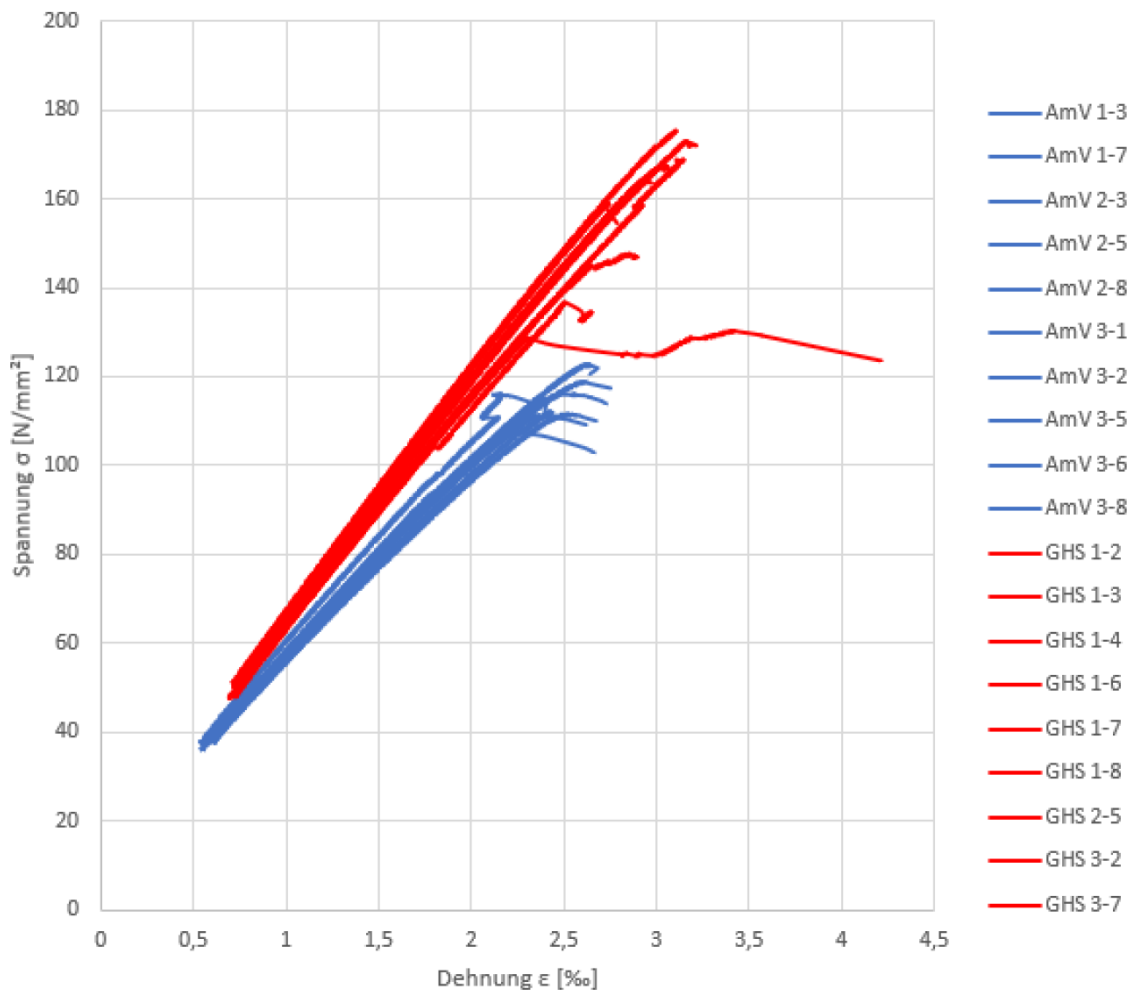


Abb. 3: Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB-Proben mit Amphibolit (blau) und Granulit (rot) im statischen, weggeregelten Druckversuch. (Savelev, 2025)

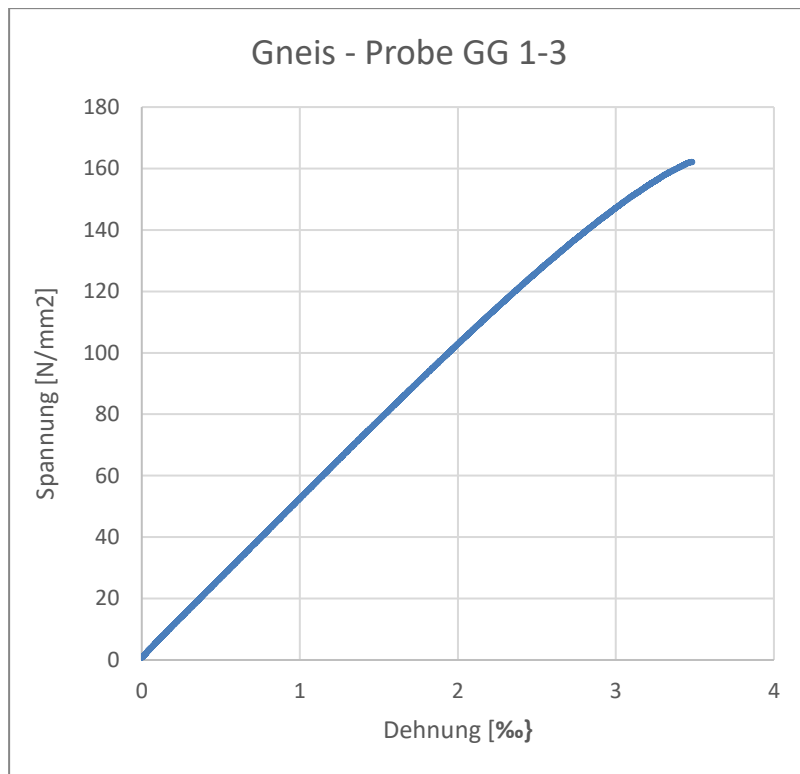


Abb. 4: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Linie der UHFB-Proben mit Gneis im statischen, weggeregelten Druckversuch.

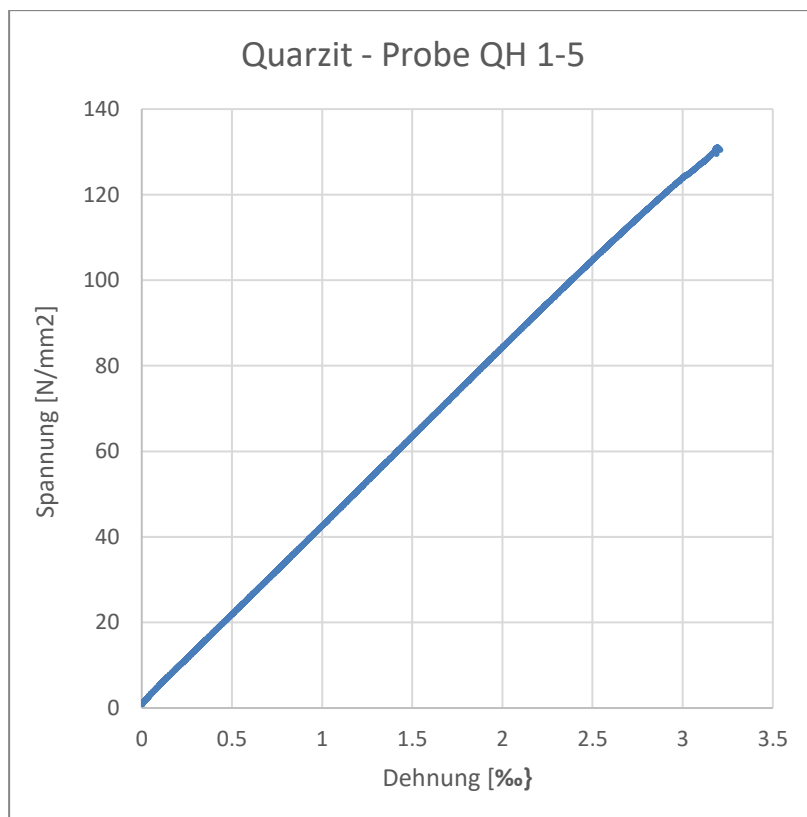


Abb. 5: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Linie der UHFB-Proben mit Quarzit im statischen, weggeregelten Druckversuch.

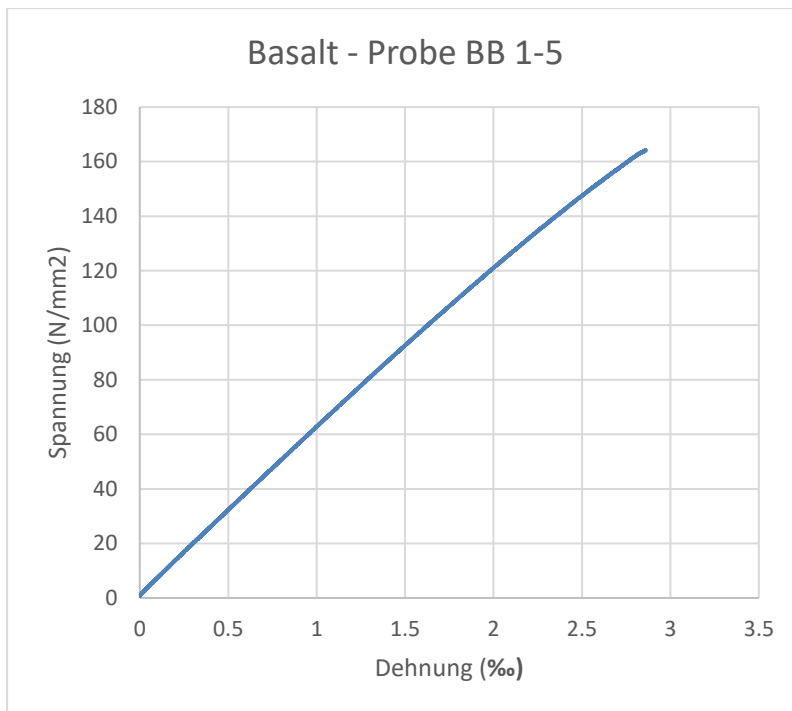


Abb. 6: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Linie der UHFB-Proben mit Basanit im statischen, weggeregelten Druckversuch.

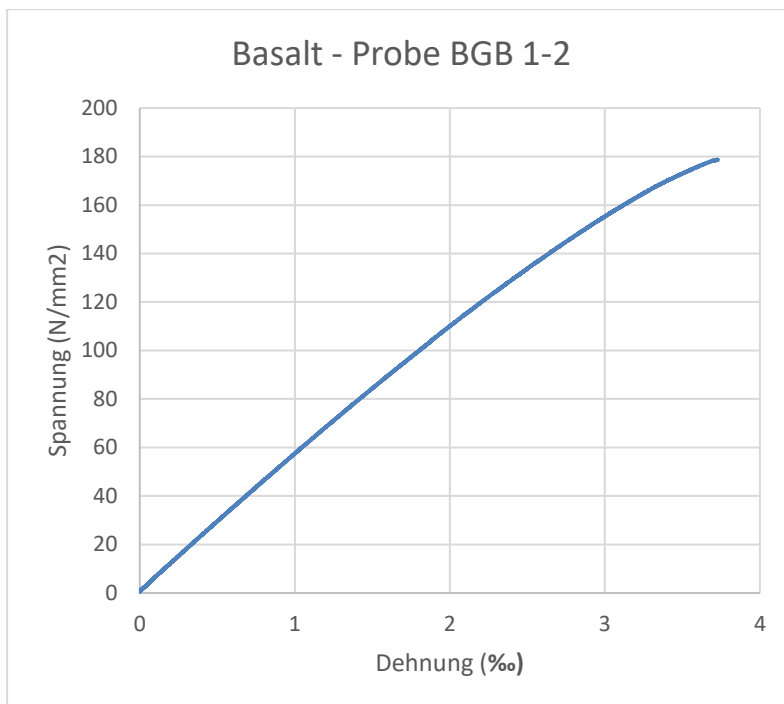


Abb. 7: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Linie der UHFB-Proben mit Alkaliolivinbasalt im statischen, weggeregelten Druckversuch.

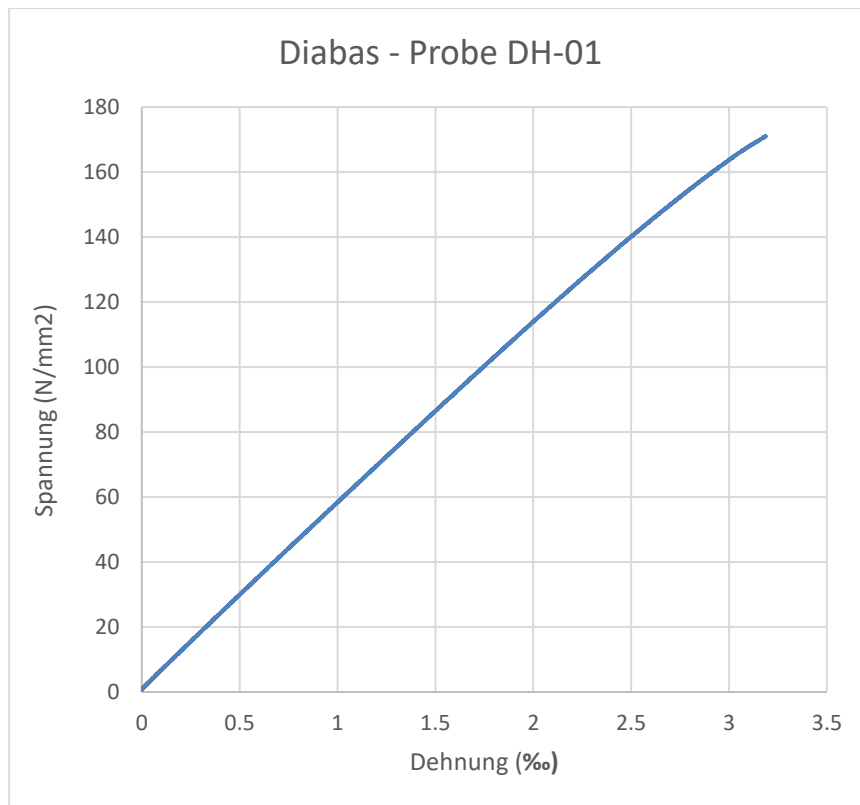


Abb. 8: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Linie der UHFB-Proben mit Diabas im statischen, weggeregelten Druckversuch.

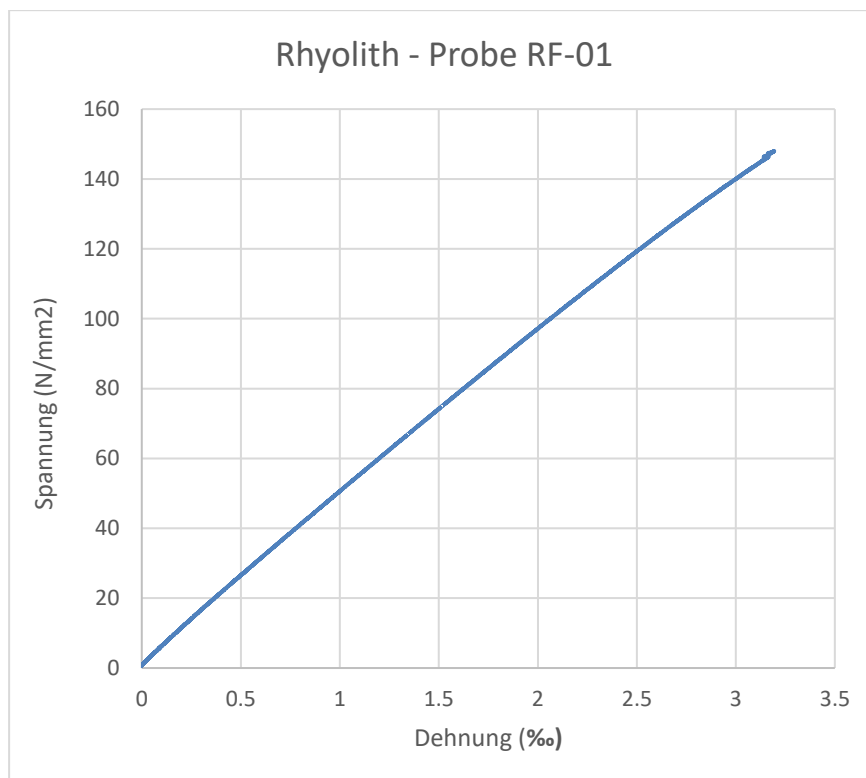


Abb. 9: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Linie der UHFB-Proben mit Rhyolith im statischen, weggeregelten Druckversuch.

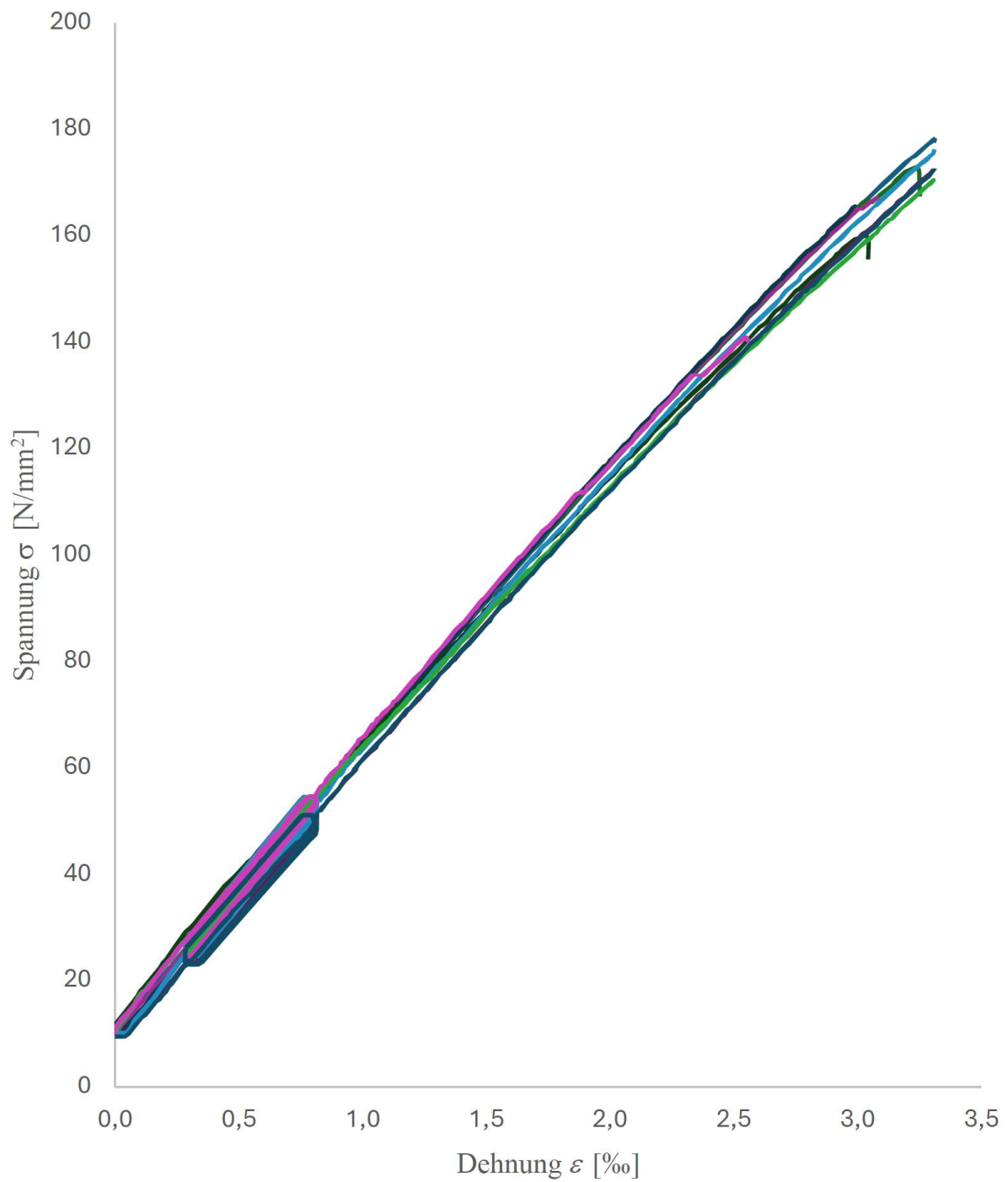


Abb. 10: Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB-Proben mit Andesit im E-Modul-Versuch, mit anschließender Prüfung der Druckfestigkeit. (Ejupi, 2025)

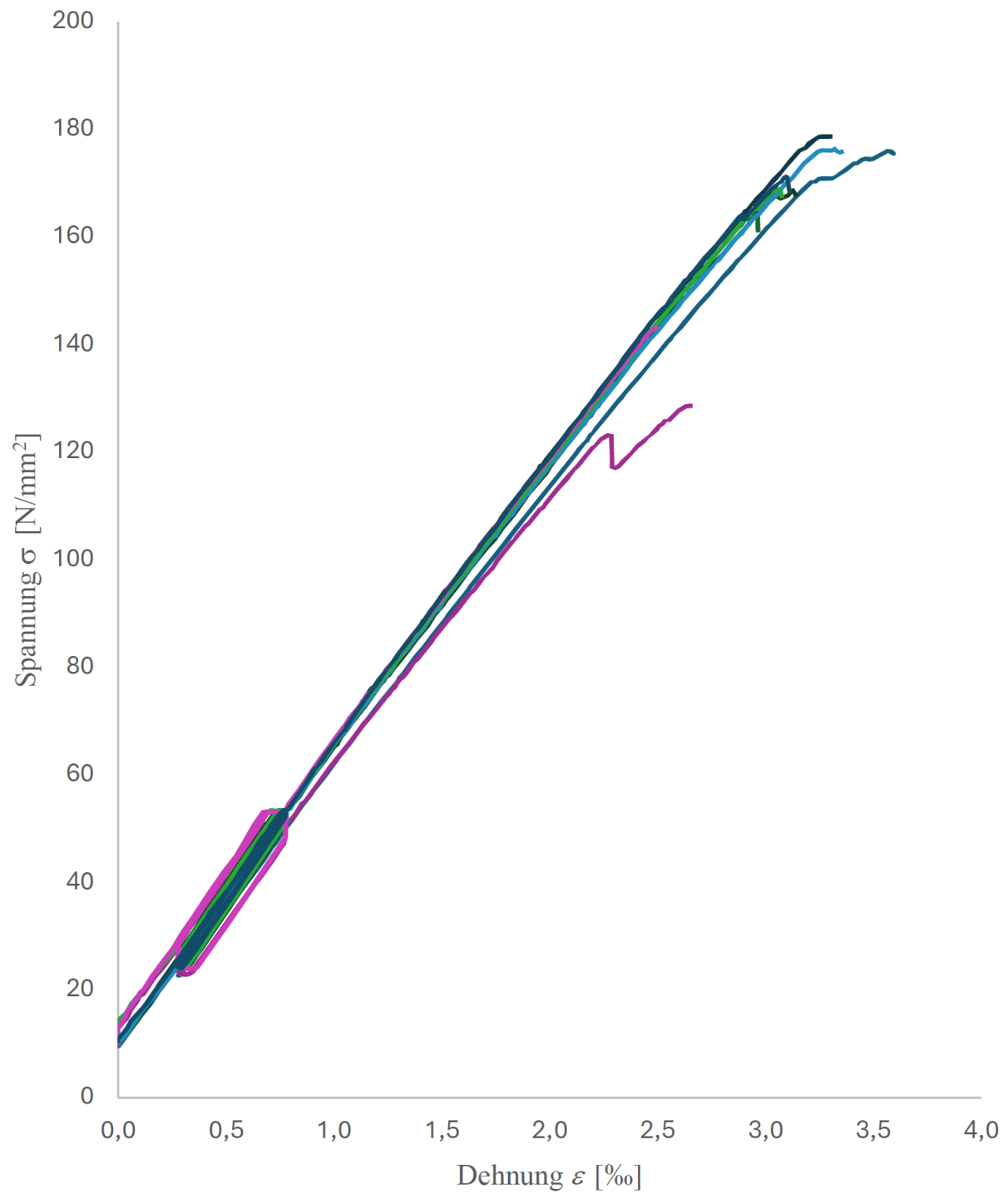


Abb. 11: Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB-Proben mit Phonolith im E-Modul-Versuch, mit anschließender Prüfung der Druckfestigkeit. (Ejupi, 2025)

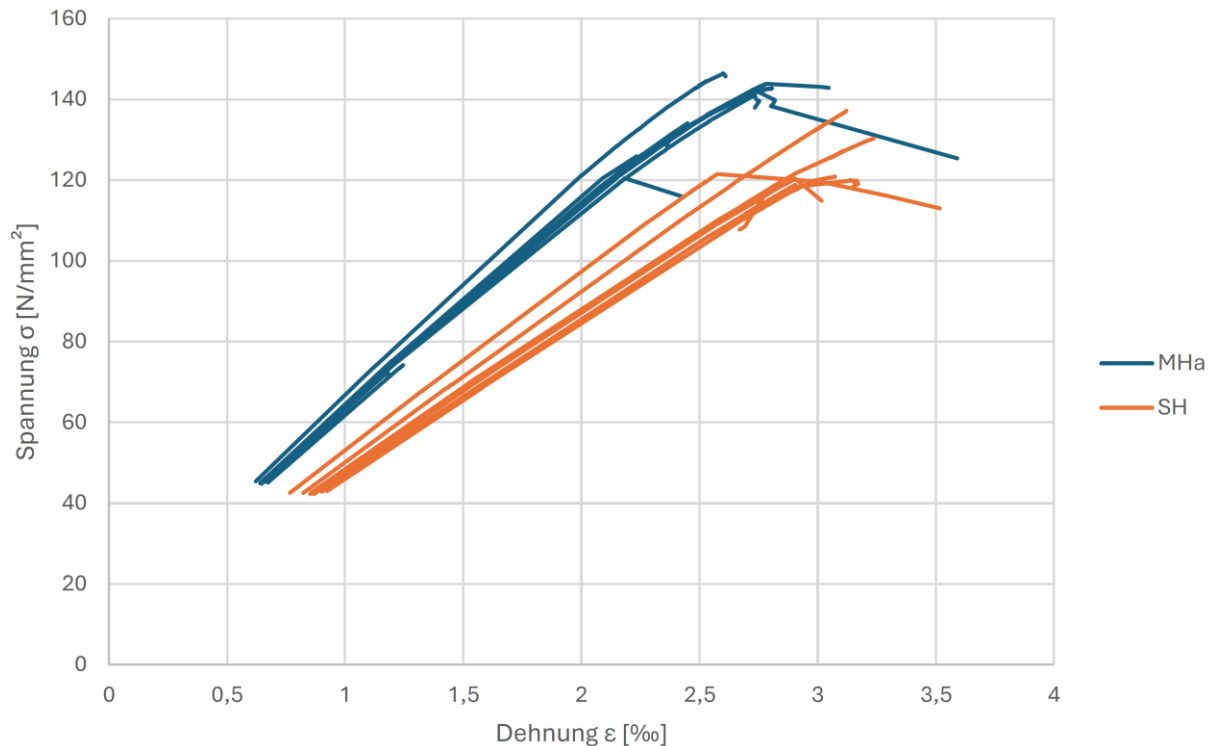


Abb. 12: Spannungs-Dehnungs-Linien der UHFB Proben mit Marmor (dunkel) und Sandstein (orange) im statischen, weggeregelter Druckversuch. (Grundmann, 2025)

Unterschiedliche Gehalte an Verdichtungs-poren erzeugen Unterschiede in der Druckfestigkeit. Um diesen Einfluss zu erfassen und zu korrigieren wurde der Porengehalt im Frischbeton mit dem sogenannten Luftporengerät ermittelt. Verwendet wurde dazu das Luftporengerät für Mörtel nach DIN EN 1015-7, nicht das größere Luftporengerät für Beton. Das kleinere Gerät für Mörtel ist für UHFB mit vergleichsweise geringem Größtkorn und eher honigartiger Rheologie besser geeignet. Zu beachten ist, dass man bei Betonen ohne Zugabe von Luftporenbildner, wie sie hier vorliegen, mit dem Luftporengerät ausschließlich die Verdichtungs-porosität misst. Um Verwechslungen mit künstlich eingebrachten Luftporen zu vermeiden, wird hier von Verdichtungs-porosität gesprochen. Diese Untersuchungen wurden mit UHFB mit 30 Vol.-% grober Gesteinskörnung 5 - 8 mm des Basalts Oelberg durchgeführt. Die Vorgehensweise entsprach der generellen Vorgehensweise in dem Projekt. Es wurden Proben mit verschiedener Verdichtung hergestellt und die Verdichtungs-porosität sowie die entsprechende Druckfestigkeit ermittelt. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse. Die Druckfestigkeit wurde wieder an geschliffenen Zylindern mit 180 mm Höhe und 60 mm Durchmesser, in diesem Fall im Alter von 102 Tagen ermittelt.

Tab. 8: Einfluss verschiedener Verdichtungsporosität auf die Druckfestigkeiten, erzielt mit UHFB mit grober Gesteinskörnung des Basalts Oelberg. Daten aus Khan (2024).

Verdichtungsporosität [Vol.-%]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Festbetonrohddichte [kg/m ³]
3,5	149 ± 11	2506 ± 6
2,4	135 ± 21	2525 ± 14
2,0	152 ± 14	2537 ± 9
1,8	160 ± 16	2545 ± 7

Aus den Ergebnissen wurde durch lineare Regression folgende Funktion zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Verdichtungsporosität und Zylinderdruckfestigkeit für die Proben abgeleitet:

$$\text{Druckfestigkeit [N/mm}^2\text{]} = \text{Verdichtungsporosität [Vol.-%]} \times (-4,515) + 159,9 \quad (1)$$

Die folgende Abbildung zeigt die Daten mit der Standardabweichung der Druckfestigkeit sowie die ermittelte Regressionsgerade. Auffällig ist der nicht gleichförmige Verlauf der Kurve der experimentellen Daten. Die gleichförmige Abfolge der Verdichtungsporosität und der Festbetonrohddichte zeigt, dass die Messungen grundsätzlich richtig sind. Wahrscheinlich sind die Festigkeiten der Probe mit 2,4 Vol.-% Porosität im Frischbeton zu niedrig, was sich auch in den großen Streuungen dieser Daten ausdrückt, ohne dass hier eindeutige Ausreißer erkennbar sind. Daher wurden alle Daten für die Ermittlung einer Regressionsgerade herangezogen. Es ist erkennbar, dass die Regressionsgerade im Bereich der einfachen Standardabweichung der Druckfestigkeitswerte liegt. Die Steigung von Gleichung 1 wurde daher zur Korrektur der Festigkeitswerte verwendet, indem die Festigkeitswerte auf eine gleiche Verdichtungsporosität von 3,0 Vol.-% umgerechnet wurden. Der Achsenabschnitt (Druckfestigkeit bei Porosität gleich 0) wurde für jede Rezeptur individuell aus den experimentell ermittelten Verdichtungsporositäten und den Mittelwerten der Druckfestigkeiten über die folgende Gleichung bestimmt:

$$\text{Druckfest. bei Porosität 0 [N/mm}^2\text{]} = \text{Druckfest. [N/mm}^2\text{]} - \text{Verdichtungsporosität [Vol.-%]} \times (-4,515) \quad (2)$$

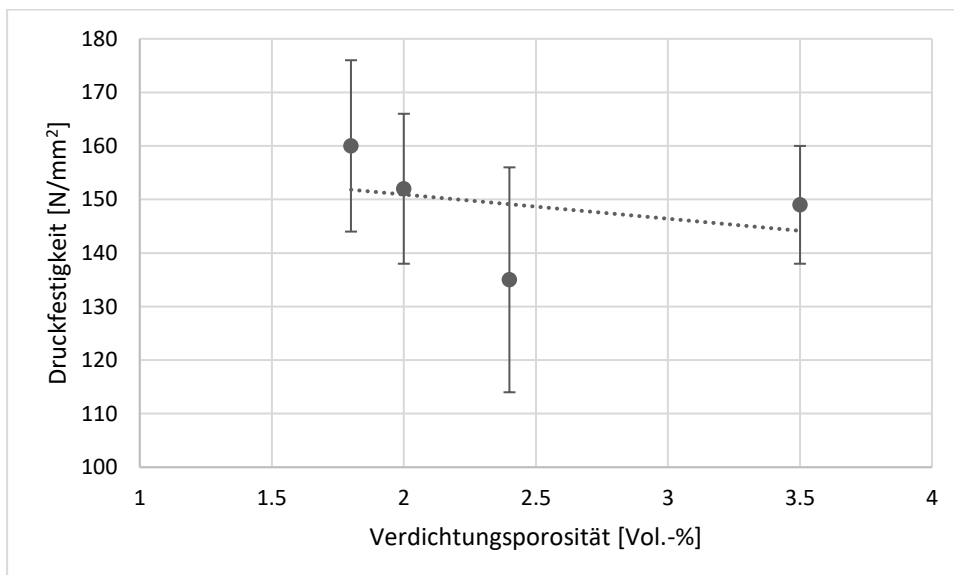


Abb. 13: Einfluss der Verdichtungsporosität auf die Festigkeit. Messwerte mit Standardabweichung der Druckfestigkeit und Ergebnis der linearen Regression für die UHFB Rezeptur mit Basalt Oelberg.

Die folgende Tabelle zeigt die so korrigierten Druckfestigkeiten, bezogen auf eine Verdichtungsporosität von 3 Vol. %. Man kann erkennen, dass der Einfluss unterschiedlicher Verdichtungsporositäten auf die

Ergebnisse nur gering ist. Die korrigierten Ergebnisse liegen alle deutlich innerhalb der Standardabweichung der Messergebnisse. Daher wurden die weiteren Auswertungen, wie Untersuchungen von Korrelationen verschiedener Ergebnisse, mit den unkorrigierten Festigkeitsdaten durchgeführt.

Tab. 9: Korrigierte Druckfestigkeiten der UHFB, bezogen auf eine Verdichtungsporosität von 3,0 Vol. %.

Gestein	Zylinderdruckfestigkeit [N/mm ²]	Verdichtungs- porosität [Vol.-%]	Zylinderdruckfestigkeit [Nmm ²], korrigiert auf eine Verdichtungsporosität von 3 Vol.-%
Basanit	170 ± 8	2,7	169
Alkaliolivinbasalt	165 ± 11	2,9	165
Massenkalk	158 ± 6	3,1	158
Marmor	135 ± 6	3,0	135
Diabas	156 ± 16	3,4	158
Phonolith	160 ± 16	3,5	162
Rhyolith	152 ± 7	3,2	153
Andesit	163 ± 12	3,1	163
Granulit	153 ± 21	3,3	154
Granit	153 ± 7	3,1	153
Dolomit	123 ± 7	3,9	127
Sandstein	127 ± 5	3,0	127
Grauwacke	134 ± 6	2,8	133
Quarzit	127 ± 4	3,2	128
Gneis	157 ± 6	3,0	157
Amphibolit	114 ± 4	3,0	114

2.1.5 Phasenanalytische Ergebnisse an den Gesteinen und Festbetonen

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebniss der Phasenanalytik der Gesteine mittels Röntgenpulverdiffraktometrie, Rasterelektronenmikroskopie sowie Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen der UHFB. Die Ermittlung des Phasenbestandes mittels Röntgenphasenanalyse erfolgte mit einem Gerät Philips X-Pert MPD-Pro. Die Messbedingungen waren: Probendurchmesser 20 mm, 3-70 Grad 2 θ , Schrittweite 0,02 2 θ , 4 Sekunden Messzeit pro Schritt. Die Einbindung der Gesteine in die Matrix ist auf der Ebene der Lichtmikroskopie generell sehr gut. Der von Ejupi (2025) in der Phasenanalyse von Phonolith und Andesit vorgeschlagene Granat wäre sehr ungewöhnlich und ist daher sehr unwahrscheinlich. Da die Phasenanalyse im Elektronenmikroskop auf der Kornform und der chemischen Zusammensetzung beruht, besteht hier durchaus Verwechslungsgefahr mit anderen Phasen. Mittels Röntgenpulverdiffraktometrie und Lichtmikroskopie konnte kein Granat festgestellt werden.

Tab. 10: Ergebnisse der Phasenanalytik der Gesteine.

Gestein	Elektronenmikroskopie	Röntgenpulverdiffraktometrie	Lichtmikroskopie
Basanit	Albit, Anorthit, Apatit, Augit, Olivin, Nephelin, Titanomagnetit	Albit, Anorthit, Apatit, Augit, Olivin, Illmenit, Kaolinit, Muscovit, Nephelin, Pyrit, Titanomagnetit	Für ein vulkanisches Gestein ausgesprochen kristallin, Feldspäte, Olivin, Pyroxen, Nephelin
Alkali-olivin-basalt	Albit, Anorthit, Apatit, Augit, Olivin, Titanomagnetit	Albit, Anorthit, Apatit, Augit, Olivin, Illmenit, Kaolinit, Muscovit, Nephelin, Pyrit, Titanomagnetit	Feldspat, Olivin, Nephelin, Pyroxen

Mas-senkalk	Calcit, Quarz, Pyrit, Muscovit, TiO ₂	Calcit, Quarz	Sehr feinkörniger Calcit, dazwischen grobkristalline Partien
Marmor	Dolomit, Calcit, Quarz, Serpentin, Muscovit, Titanit, Diopsit, Apatit	Dolomit, Calcit, Illit	Grobkristalliner Calcit bzw. Dolomit
Diabas	Anorthit, Albit, Biotit, Orthoklas, Ilmenit, Augit, Quarz, Apatit	Anorthit, Apatit, Anorthit, Albit, Orthoklas, Quarz, Mikroklin (Albit), Ilmenit, Augit	Biotit, Feldspäte (stark zersetzt), Quarz, Ilmenit, Pyroxen, die Gesteinskörnung enthält auch geringe Mengen anderer Gesteine wie Carbonatgestein, Sandstein und Tonstein
Phonolith	Albit, Sanidin, Oligoklas, Aegirin-Augit, Augit, Wollastonit, Titanit, Andradit (wäre als Granat sehr ungewöhnlich), Baryt	Sanidin, Nephelin, Aegirin, Apatit, Nosean, Leucit, Baryt, Wollastonit	Pyroxen, Feldspat, Nephelin, Wollastonit
Rhyolith	Orthoklas, Apatit, Albit, Biotit, Quarz, Rutil, Muscovit, Illit	Rutil, Quarz, Orthoklas, Muscovit, Illit, Anorthit, Albit	Quarz, Feldspat, Muscovit, Einsprenglinge in sehr feiner Grundmasse
Andesit	Quarz, Sanidin, Ilmenit, Calcit, Magnetit, Granat (wäre sehr ungewöhnlich in Andesit)	Albit, Augit, Magnetit, Hornblende, Biotit, Quarz, Calcit, Kaolinit	Feldspat stark zersetzt, Quarz, Erz, Pyroxen
Granulit	Feldspat, Quarz, Almandin, Pyrop, Rutil, Biotit, Hercynit, Sillimanit, Calcit (sekundär)	Feldspat, Biotit, Quarz, Almandin, Rutil	Quarz, Feldspat, Biotit, Granat, Rutil
Granit	Quarz, Orthoklas, Biotit, Spinell, Aluminiumsilikat, Albit, Illit, Hämatit, Zirkon	Quarz, Orthoklas, Hämatit, Anorthit, Biotit, Albit, Kaolinit	Biotit, Quarz, Feldspat, opake Minerale
Dolomit	Dolomit, Quarz, Pyrit, Apatit, Hämatit, Glimmer	Dolomit, Calcit, Quarz, Pyrit, Glimmer	Dolomit bzw. Calcit, Quarz, Erz
Sandstein	Quarz, Plagioklas, Orthoklas, Muscovit, Hämatit, Chlorit, Rutil, Apatit	Quarz, Albit	Quarz, Feldspat, Gesteinsbruchstücke, Erz, Glimmer, sehr rauhe Oberfläche mit intensive Verzahnung mit dem Bindemittel
Grauwacke	Quarz, Feldspat, Tonminerale, Pyrit, Glimmer, Calcit	Quarz, Muscovit, Kaolinit, Dolomit, Calcit, Feldspäte	Feinkörniger Quarz, Feldspäte, Carbonate, Muscovit, opake Minerale, Gesteinsbruchstücke
Quarzit	Quarz, Muscovit, Titandioxid	Quarz, Muscovit	Quarz, Muscovit
Gneis	Quarz, Muscovit, Feldspäte, Biotit, Eisensilikat	Quarz, Muscovit, Albit, Orthoklas, Biotit	Quarz, Feldspat, Biotit, Muscovit
Amphibolit	Magnetit, Ilmenit, Calcit, Titanit, Aktinolith, Feldspat, Epidot, Chlorit	Aktinolith, Feldspat, Biotit, Calcit, Klinozoisit, Garronit (ein Zeolith, vermutlich sekundär), Quarz	Quarz, Feldspat, Erz, Calcit, Chlorit, Amphibol, Epidot, sehr inhomogene Verteilung der Minerale, flaserige Strukturen

2.1.6 Lichtmikroskopische Untersuchungen an den Gesteinen und Festbetonen

Von allen UHFB wurden je ein Dünnschliff im ungeschädigten und ein Dünnschliff im geschädigten Zustand (nach mechanischer Belastung bis zum Bruch) hergestellt. Dargestellt werden nur Auffälligkeiten, die ggf. Einfluss auf das mechanische Verhalten nehmen können. Ansonsten zeigen die Gesteine in den Dünnschliffen der UHFB ein gewöhnliches Aussehen. Die vorhandenen Phasen wurden bereits weiter oben beschrieben. Wie bereits erwähnt war die Einbindung aller Gesteinskörnungen auf der Ebene der Lichtmikroskopie mit einer Auflösung im Bereich von Mikrometern sehr gut.

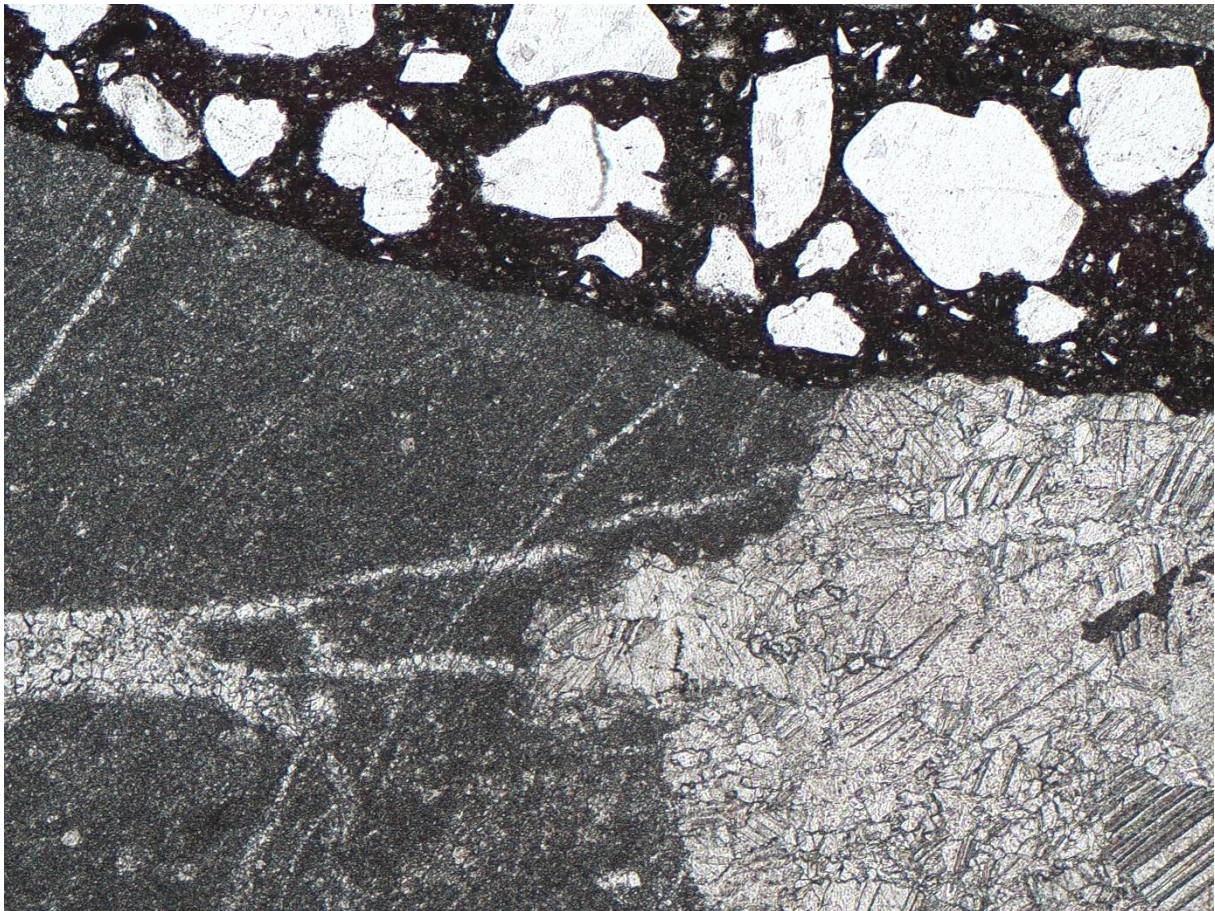


Abb. 14: Petrographischer Dünnschliff des ungeschädigten UHFB mit Kalkstein (Massenkalk, unten) und Bindemittelmatrix mit Quarzmehl (oben). Das Kalkgestein zeigt unterschiedliche Bereiche mit deutlich unterschiedlicher Korngröße. Die größten Kristalle erreichen bis 2 mm Größe. Linear polarisiertes Licht. Bildbreite 2,45 mm.

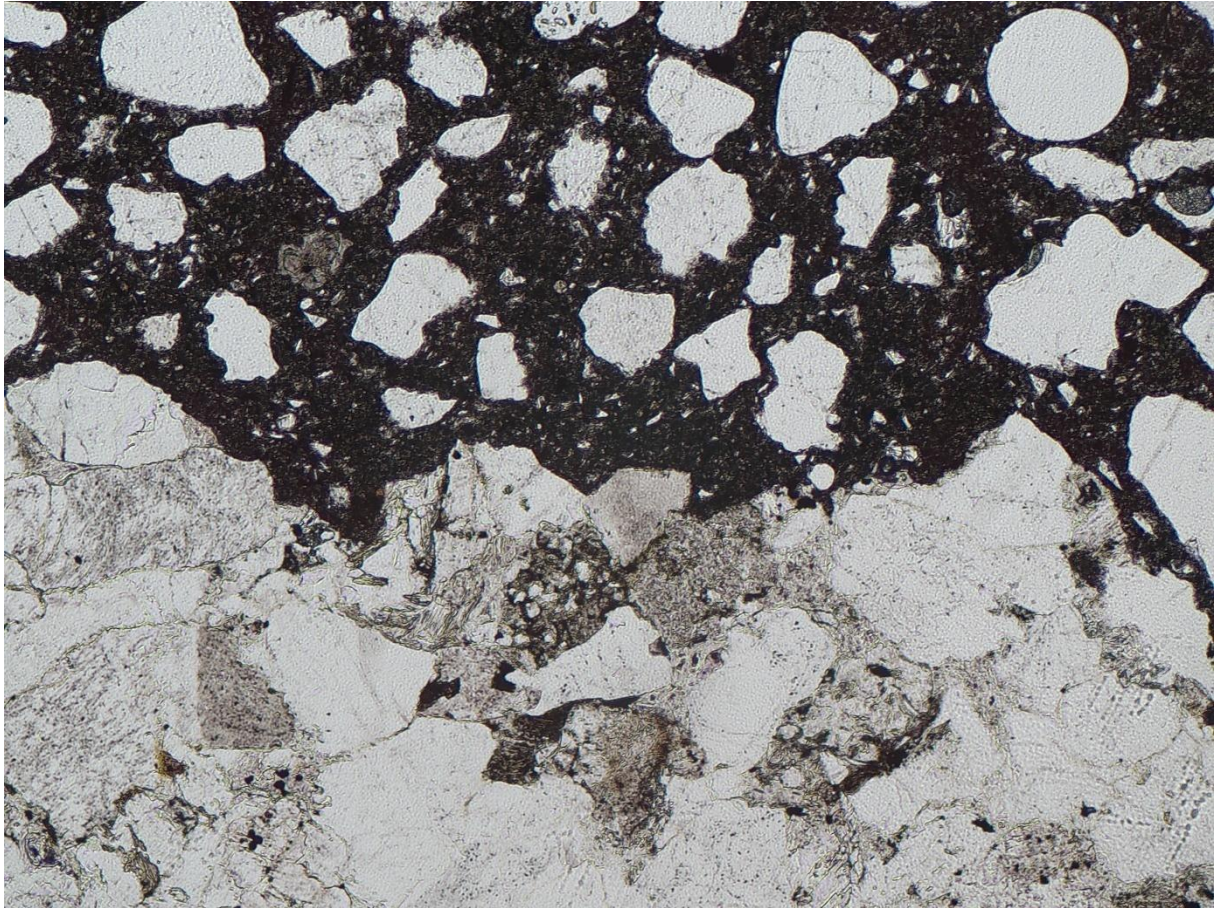


Abb. 15: Petrographischer Dünnschliff des ungeschädigten UHFB mit Sandstein (unten) und Bindemittelmatrix mit Quarzmehl (oben). Der Sandstein zeigt partiell eine sehr rauhe Oberfläche und eine interne Porosität. Einzelne Kristalle erreichen bis 1 mm Größe. Linear polarisiertes Licht. Bildbreite 2,45 mm.

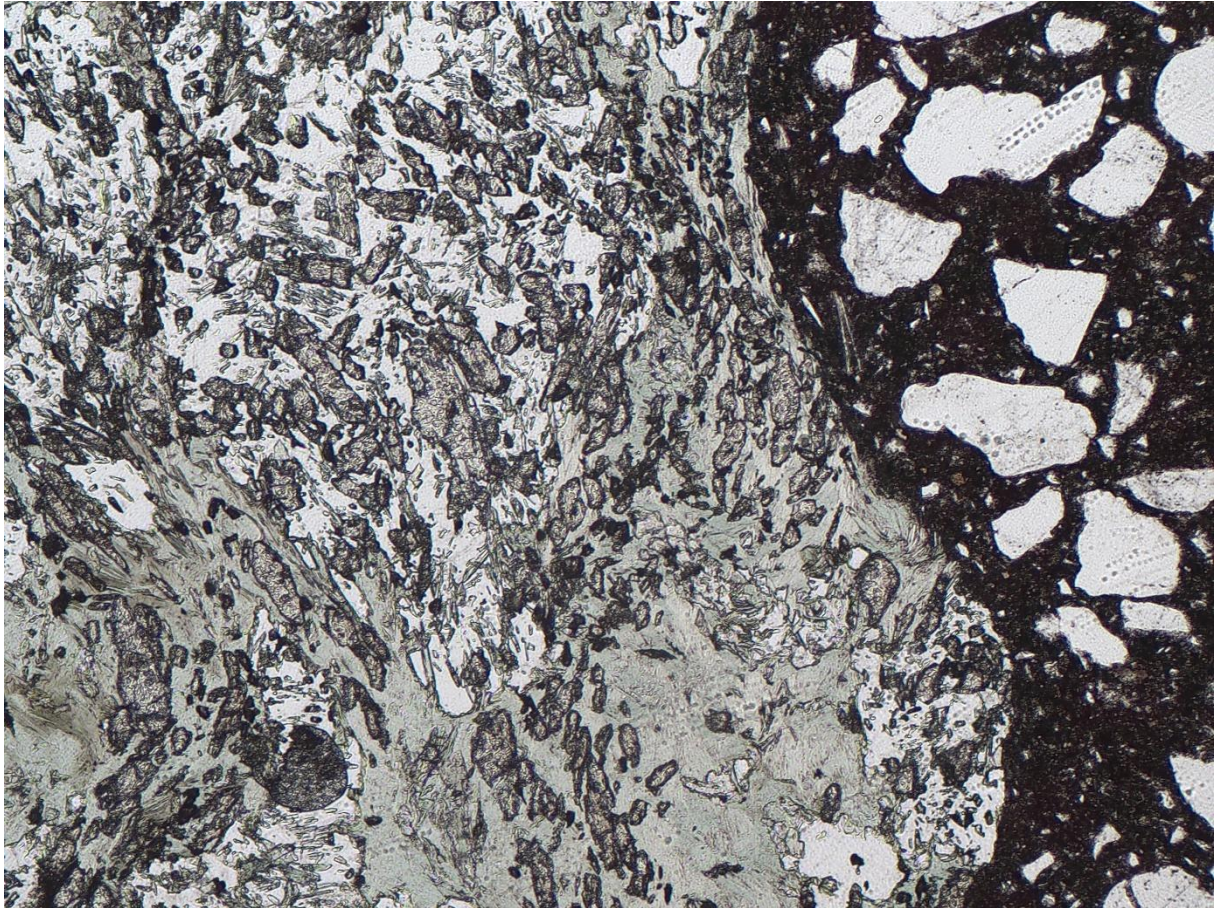


Abb. 16: Petrographischer Dünnschliff des ungeschädigten UHFB mit Amphibolit (links) und Bindemittelmatrix mit Quarzmehl (rechts). Der Amphibolit zeigt eine sehr inhomogene flaserige Struktur. Einzelne Kristalle erreichen bis 2 mm Größe. Linear polarisiertes Licht. Bildbreite 2,45 mm.

Der Dolomit hat Kristalle bis 0,2 mm Größe, Diabas und Phonolith zeigen Kristalle bis etwa 0,5 mm Größe, die Grauwacke bis 0,7 mm, der Gneis und der Marmor bis 1 mm, der Granulit hat Kristalle bis 1,5 mm Größe, der Quarzit bis 2 mm, der Granit bis 2,5 mm Größe. Der Rhyolith zeigt typische Einsprenglinge bis 1,5 mm Größe in einer feinkörnigen Matrix, ebenso der Andesit mit Einsprenglingen bis 0,9 mm Größe und die beiden Basalte mit Einsprenglingen bis 1 mm Größe.

2.1.7 Rasterelektronenmikroskopische Ergebnisse an den Gesteinen und Festbetonen

Die folgenden Abbildungen zeigen wesentliche Beobachtungen aus elektronenmikroskopischen Untersuchungen der verschiedenen UHFB, zusammen mit den jeweiligen Schlussfolgerungen. Dargestellt sind nur Auffälligkeiten. Wenn solche nicht beobachtet werden konnten, sind keine Darstellungen eingefügt. Generell ist zu bemerken, dass in den dargestellten Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgrund des angelegten Hochvakuums Schwindrisse in der Zementsteinmatrix auftreten. Die Phasenanalyse im REM beruht auf der Kornform und der chemischen Analyse mittels energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX).

Alkaliolivinbasalt

UHFB mit dem Alkaliolivinbasalt aus dem Steinbruch Greifenstein-Billstein als grobe Gesteinskörnung zeigt im ungeschädigten Zustand ungewöhnlich viele Rissbildungen im Olivin, die auch in die Bindemittelmatrix ausstrahlen. Diese Gefügeschädigungen können Auswirkungen auf die Festigkeit des UHFB haben. Der gleiche UHFB zeigt nach Belastung auch augenscheinlich ungewöhnlich viele Risse in der Grenzfläche grobe Gesteinskörnung – Bindemittelmatrix.

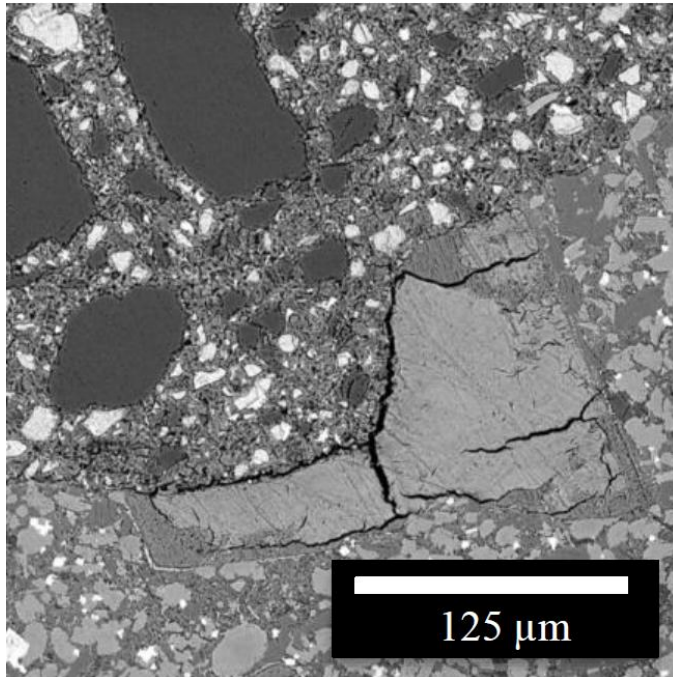


Abb. 17: Elektronenmikroskopisches Bild des ungeschädigten UHFB mit grober Gesteinskörnung Alkaliolivinbasalt (Brauch 2024).

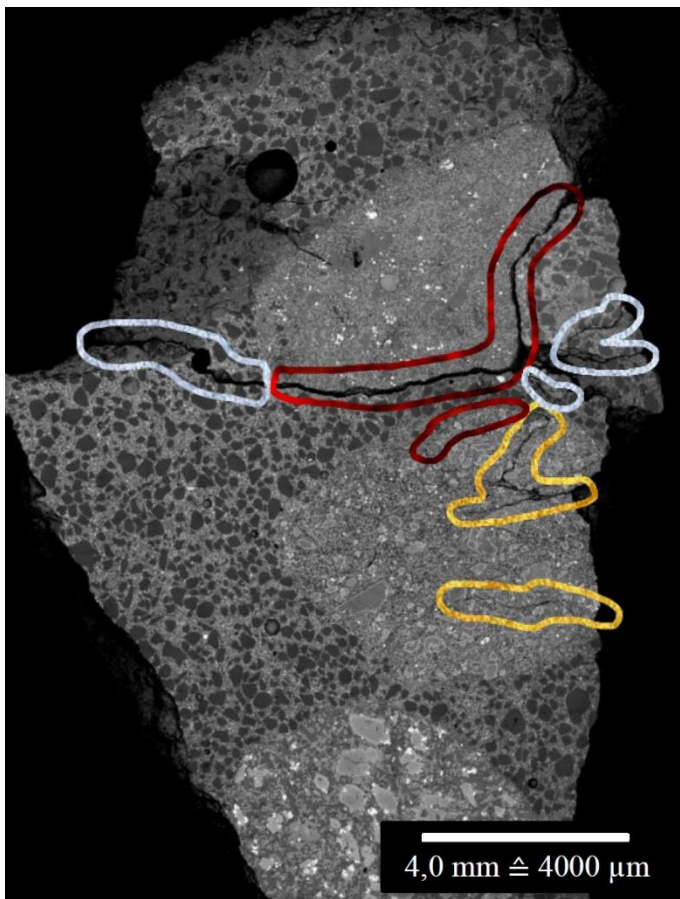


Abb. 18: Elektronenmikroskopisches Bild des geschädigten UHFB mit grober Gesteinskörnung Alkaliolivinbasalt. Rot: Risse in der Grenzfläche grobe Gesteinskörnung – Bindemittel, Gelb: Risse in der Gesteinskörnung, Weiß: Risse in der Bindemittelmatrix. (Brauch 2024)

Diabas

UHFB mit Diabas zeigte nach Belastung andeutungsweise eine verstärkte Rissbildung in der Grenzfläche zwischen grober Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix in Bereichen mit Biotit (Zone 4.3. in der folgenden Abbildung). Einen Zusammenhang dieser Rissbildung mit dem Quarzgehalt der Gesteinskörnung konnte nicht beobachtet werden. Die starke Rissbildung im Bereich 4.1. ist auf ein wasserhaltiges Mineral in der Gesteinskörnung zurückzuführen, das im Hochvakuum des REM schwindet.

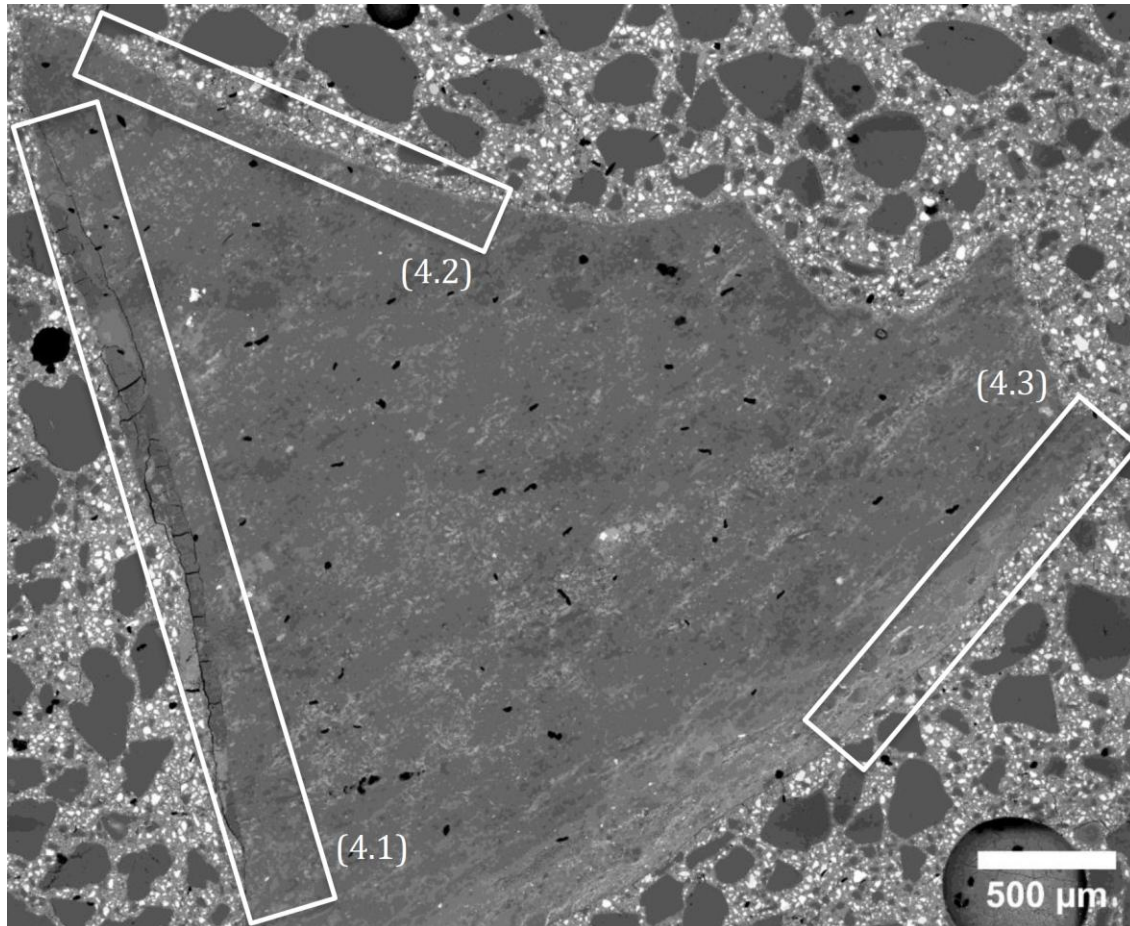


Abb. 19: Elektronenmikroskopisches Bild des UHFB mit Gestein grober Gesteinskörnung Diabas (Haase, 2023).

Rhyolith

UHFB mit Rhyolith enthält bereits im ungeschädigten Zustand größere Rissbildungen in den Gesteinskörnern. Dies wird aus dem folgenden Bild deutlich. Der bevorzugte Verlauf dieser Risse ist in Bereichen mit Muscovit und Illit. Dagegen waren bei geschädigten Proben kaum Rissbildungen in der Grenzfläche Gesteinskörnung – Bindemittelmatrix erkennbar.

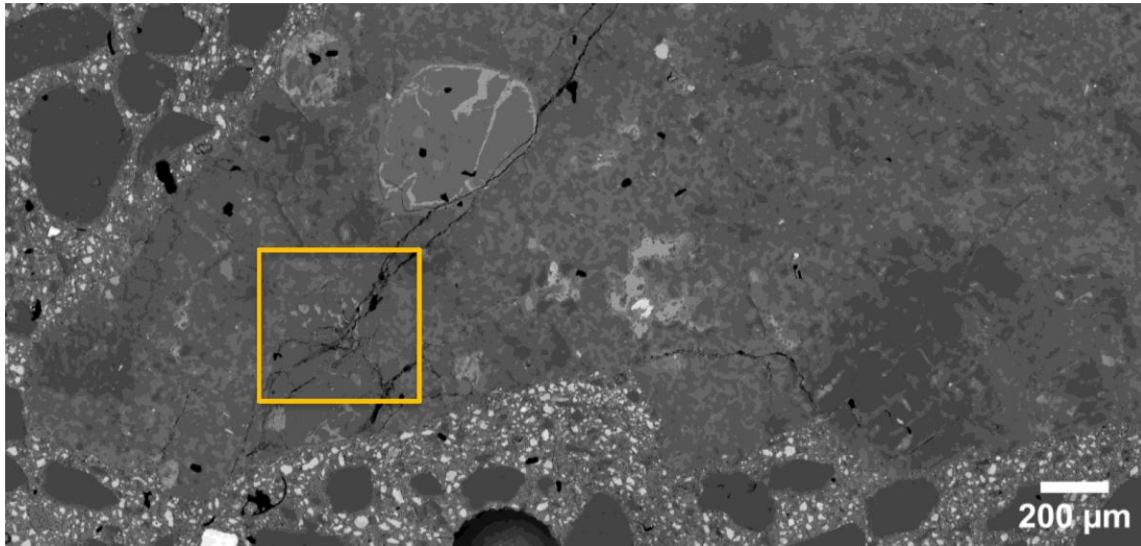


Abb. 20: Elektronenmikroskopisches Bild des ungeschädigten UHFB mit grober Gesteinskörnung Rhyolith. Rissbildung in der groben Gesteinskörnung. (Haase, 2023)

Granit

UHFB mit Granit zeigt eine bessere Einbettung in die Bindemittelmatrix der Glimmer als der Feldspäte.

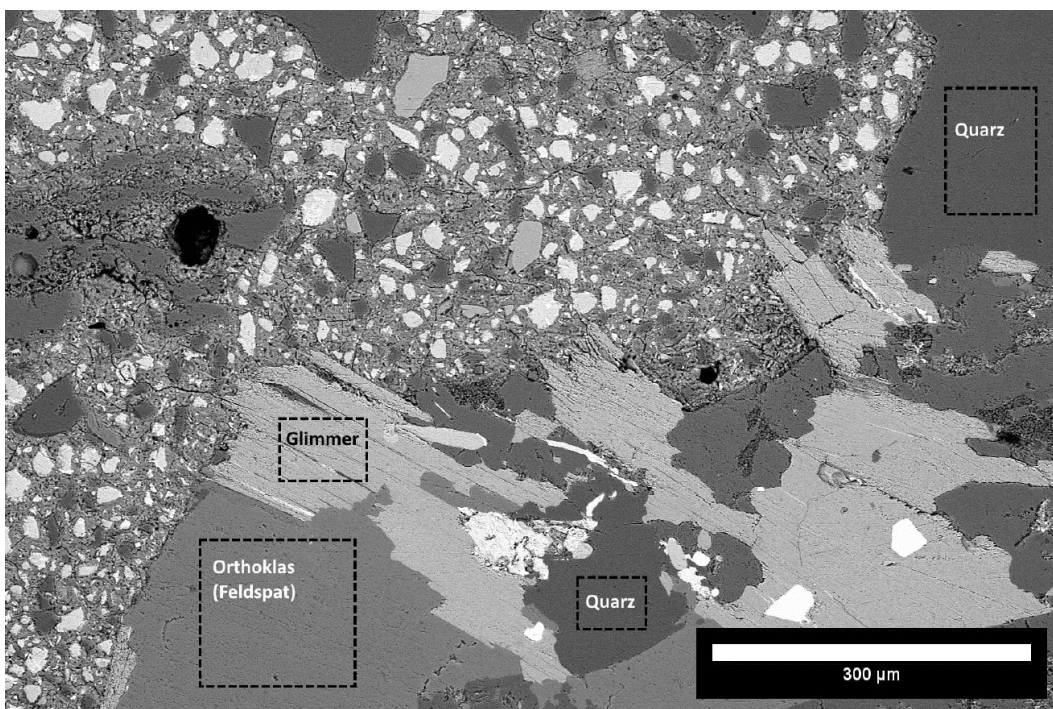


Abb. 21: Elektronenmikroskopisches Bild des ungeschädigten UHFB mit grober Gesteinskörnung Granit. (Deden 2024)

Nach der Druckbelastung sind insbesondere in den Feldspäten des Granits zahlreiche Fehlstellen sichtbar.

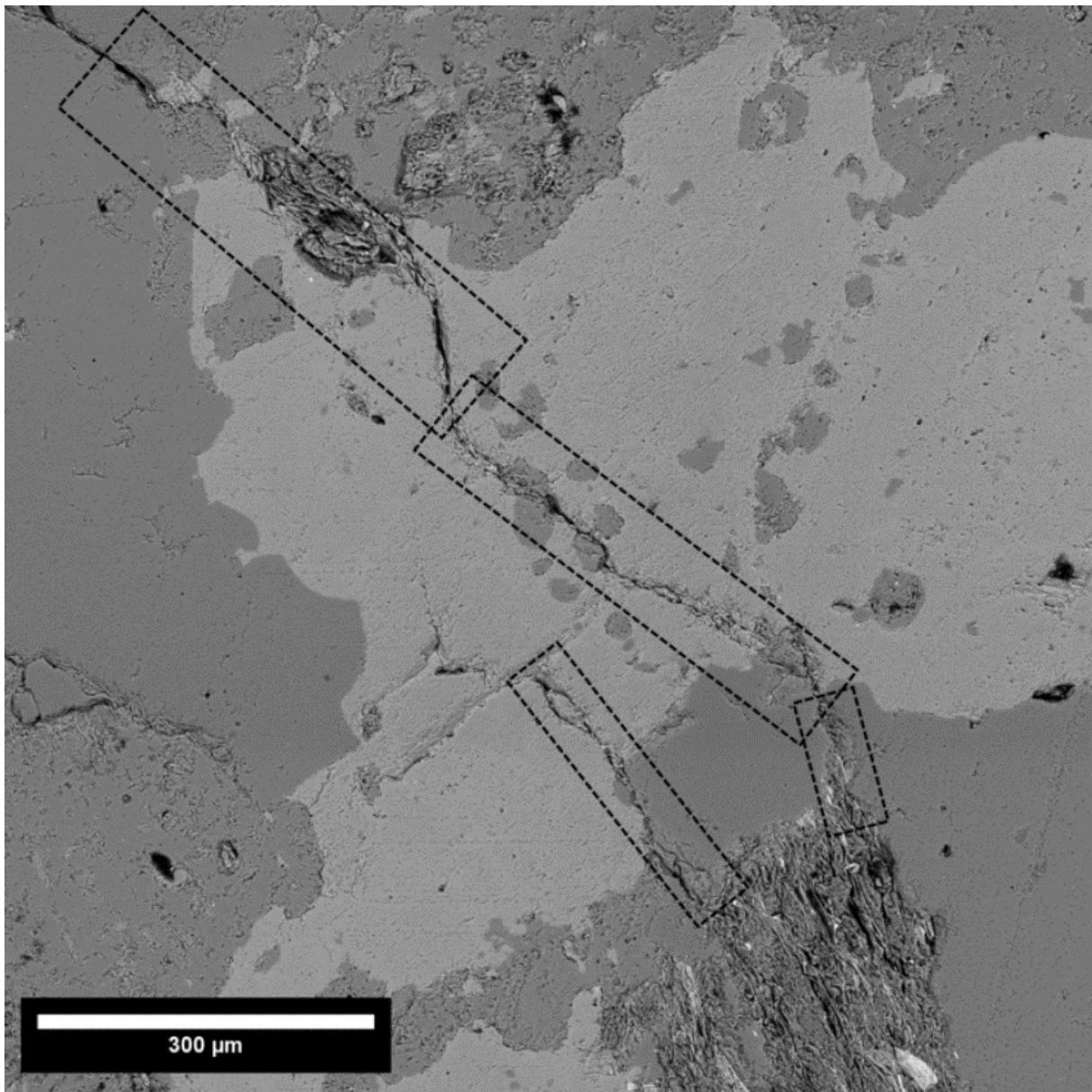


Abb. 22: Elektronenmikroskopisches Bild des geschädigten UHFB mit grober Gesteinskörnung Granit mit Rissen in den Feldspäten des Granits. (Deden 2024)

Grauwanke

UHFB mit Grauwanke als grobe Gesteinskörnung zeigt bereits ohne Belastung Rissbildungen in der groben Gesteinskörnung. Diese Risse greifen nach Druckbelastung auch in die Bindemittelmatrix über.

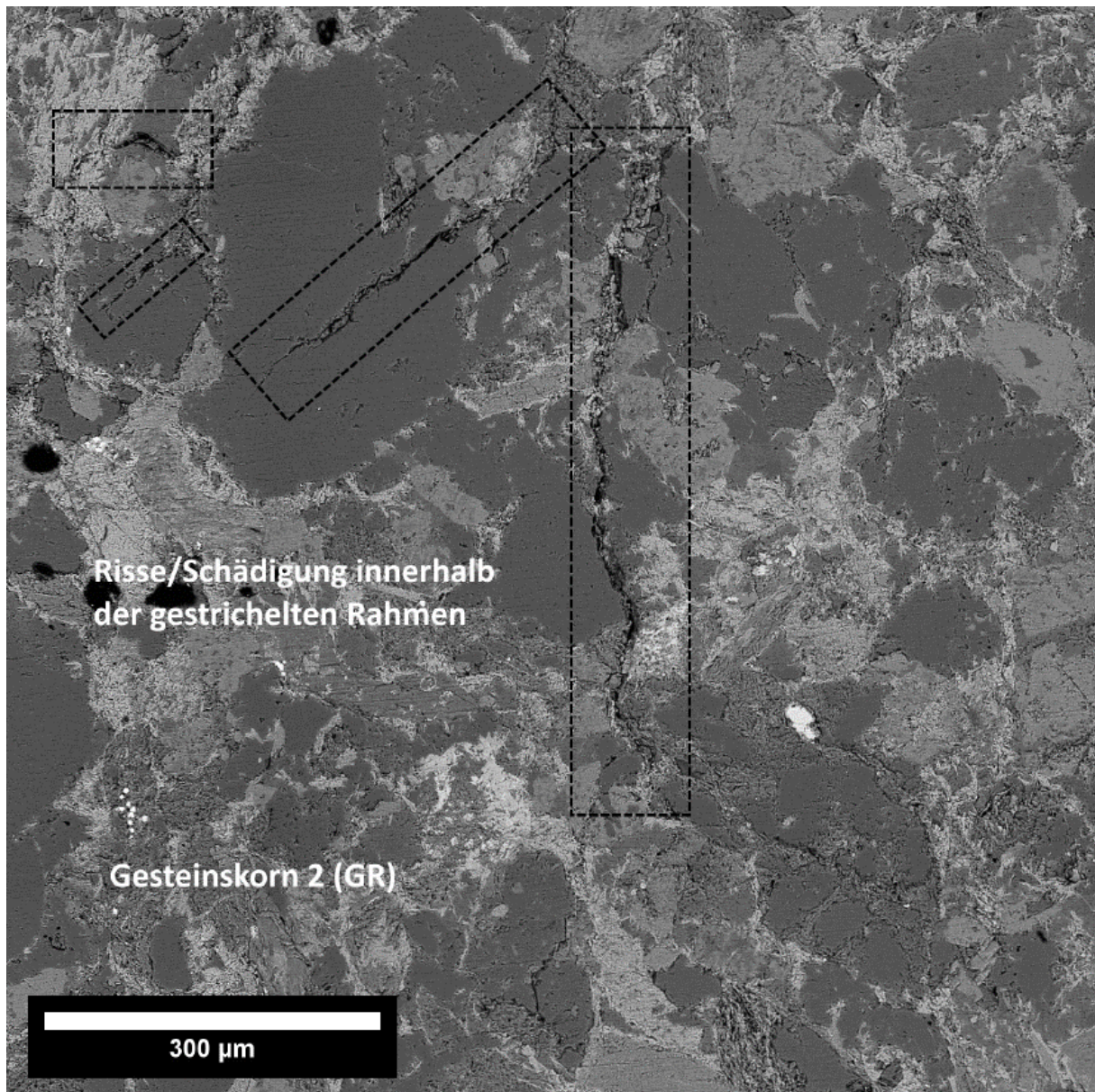


Abb. 23: Elektronenmikroskopisches Bild des ungeschädigten UHFB mit Grauwanke als grobe Gesteinskörnung. Rissbildung innerhalb der Gesteinskörnung. (Deden 2024)

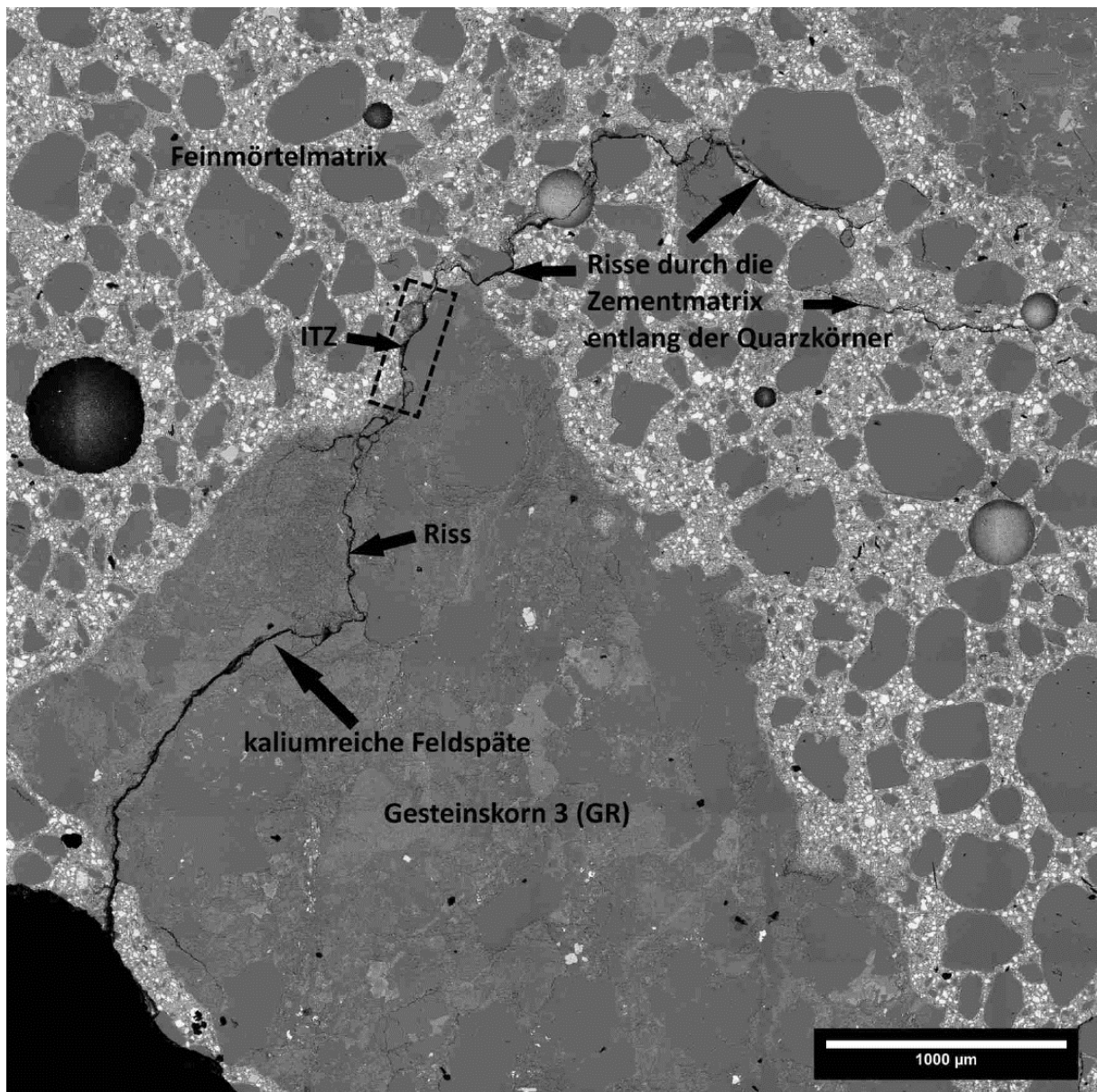


Abb. 24: Elektronenmikroskopisches Bild des geschädigten UHFB mit Grauwacke als grobe Gesteinskörnung nach Druckbelastung. Rissbildung innerhalb der Gesteinskörnung, mit Fortsetzung in die Bindemittelmatrix. (Deden 2024)

Quarzit

Der weitgehend monomineralische Quarzit enthält dagegen durchaus eine Porosität in Form von rissähnlichen Gebilden.

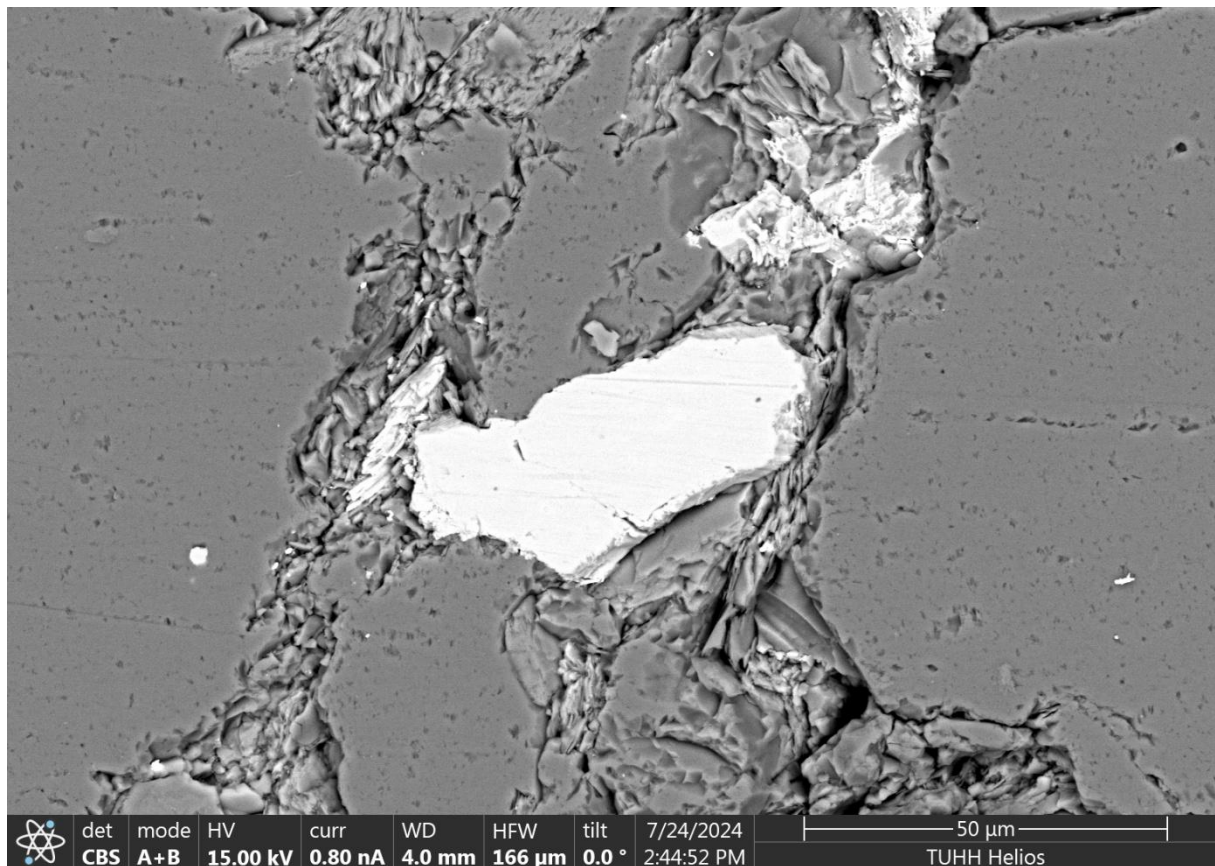


Abb. 25: Elektronenmikroskopisches Bild des Quarzits mit Quarz, Muscovit zwischen den Quarzkörnern und Titandioxid (hell). (Daten von Zechel 2024)

Dolomitstein

Der Dolomit zeigt im elektronenmikroskopischen Bild eine relative hohe Porosität.

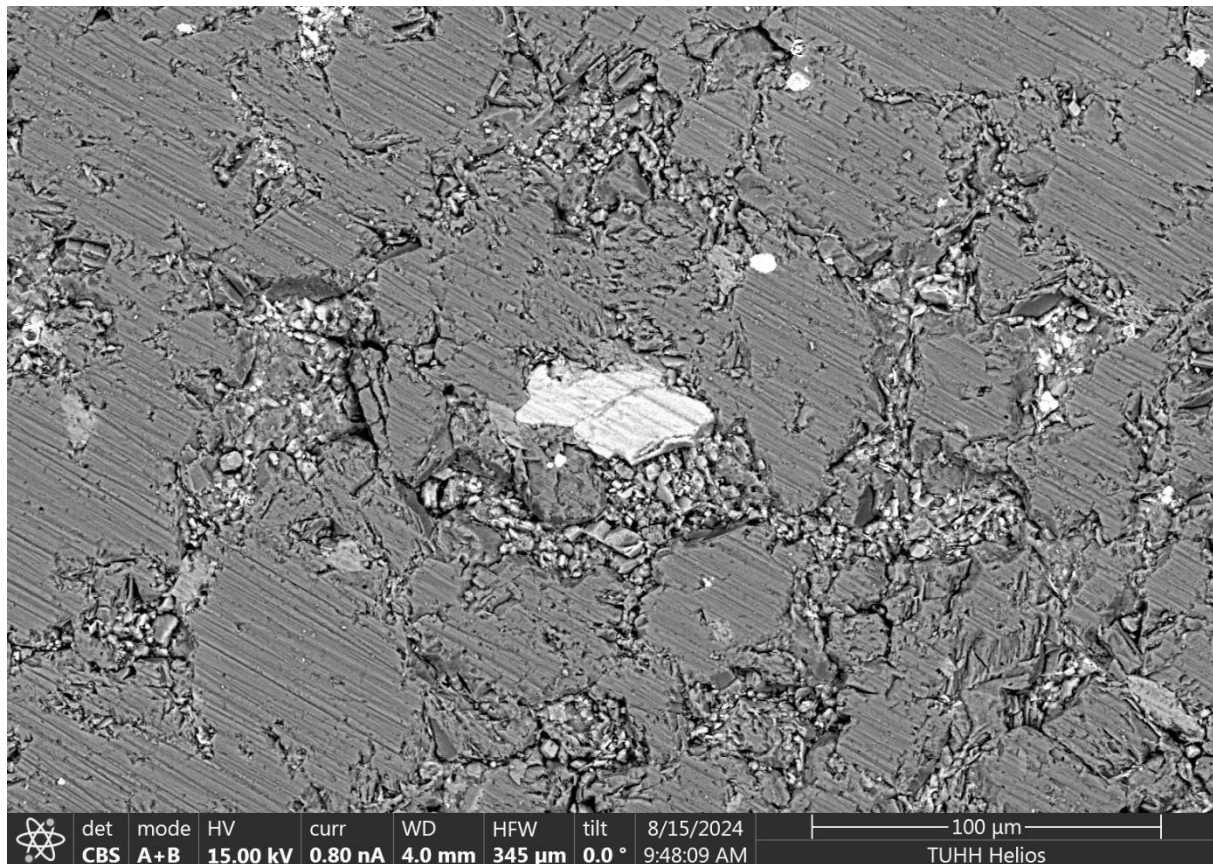


Abb. 26: Elektronenmikroskopisches Bild des Dolomitsteins mit dem Mineral Dolomit (Hauptmasse), Apatit (in der Mitte) und Eisenoxid (versprengte helle Bereiche).

Der Gneis zeigt ein sehr dichtes polymineralisches Gefüge, ohne besondere Auffälligkeiten. Der Andesit, der Phonolith, der Marmor, der Sandstein, der Amphibolit, der Kalkstein und der Granulit zeigen im elektronenmikroskopischen Bild keine Auffälligkeiten.

2.1.8 Elektronenmikroskopische Ergebnisse an UHFB-Lamellen

Um mögliche Grenzflächenreaktionen oder Ionenmigration zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskorn zu untersuchen, wurden an ausgewählten UHFB-Proben mittels Focused Ion Beam (FIB) Lamellen präpariert. Die Lamellen wiesen eine finale Dicke von ca. 200 nm auf. Über die gesamte Lamelle wurden flächige EDX-Messungen durchgeführt. Die geringe Dicke ermöglicht dabei eine Messung der Elementkonzentrationen mit möglichst geringem Einfluss schräg liegender Grenzflächen. Außerdem ist die Anregungsbirne bei EDX-Messungen an Lamellen kaum ausgeprägt, was zu einer wesentlich besseren Ortsauflösung führt, als bei Analysen an üblichen Volumenproben.

Die EDX-Messungen wurden bei 5 kV und 0,1 nA durchgeführt. Pro Messung wurden jeweils 2000 Frames aufgenommen, was einer gesamten Messdauer von ca. 5–6 Stunden entspricht. Die geringen Strahlströme wurden gewählt, da die Hydratphasen unter dem Elektronenstrahl sichtbare Veränderungen und Schädigungen zeigten. Die Untersuchungen wurden daher im Gegensatz zu dem Antrag i.W. nicht im Transmissionselektronenmikroskop (TEM), sondern direkt im FEI Helios Nanolab G3 UC durch-

geführt. Es handelt sich dabei um ein Dual Beam Gerät, das eine FIB mit einem REM kombiniert. Testweise wurden auch Untersuchungen im TEM durchgeführt. Es traten jedoch bereits nach wenigen Minuten starke Schäden an der Probe auf.

Man kann davon ausgehen, dass sich gleiche Minerale in unterschiedlichen Gesteinen in Kontakt mit der UHFB-Bindemittelmatrix gleichartig verhalten. Deshalb konzentrierte sich die Untersuchung an Lamellen auf das Verhalten einzelner Minerale im Kontakt mit der UHFB-Bindemittelmatrix, nicht so sehr auf das Verhalten der Gesteine. Dazu wäre auch das Messfeld, also die Größe der Lamellen, viel zu klein. Folgende Minerale, jeweils in Kontakt mit der Bindemittelmatrix, wurden untersucht:

- Albit, entnommen aus dem UHFB mit Alkaliolivinbasalt sowie Diabas
- Biotit, entnommen aus dem UHFB mit Rhyolith
- Sanidin, entnommen aus dem UHFB mit Phonolith
- Dolomit, entnommen aus dem UHFB mit Dolomitstein
- Olivin, entnommen aus dem UHFB mit Basanit
- Pyroxen, entnommen aus dem UHFB mit Basanit
- Amphibol, entnommen aus dem UHFB mit Amphibolit

Alle untersuchten Lamellen zeigten während der Präparation stellenweise Risse entlang der Grenzfläche. Ob es sich dabei um Schwindrisse infolge der Vakuumumgebung, durch den Ionenstrahl induzierte Risse oder bereits zuvor vorhandene Risse handelt, kann nicht abschließend bestimmt werden.

Die Auswertung erfolgte über die Grauwertbestimmung der Elementverteilungskarten. Hierzu wurde ein Messbereich ausgewählt, der möglichst orthogonal zur Grenzfläche orientiert war. Dabei wurde eine Stelle mit möglichst geringer Rissbreite zwischen Korn und Matrix sowie mit großem Abstand zu Quarzkörnern innerhalb der Matrix gewählt. Der ausgewertete Bereich betrug ca. 100 bis 150 Pixel in der Länge und 20 bis 50 Pixel in der Breite.

In den Abbildungen sind die Lagen der Grenzflächen jeweils durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Dass sich keine vollständig scharfe Grenze abzeichnet, sondern stets ein kleiner Übergangsbereich vorhanden ist, kann mehrere Ursachen haben. Zum einen wurde der Auswertebereich händisch und möglichst orthogonal zur Grenzfläche eingezeichnet, während die Grenzfläche innerhalb der Lamelle nicht vollkommen gerade verläuft. Darüber hinaus besitzt die Lamelle zwar nur eine Dicke von ca. 200 nm, dennoch kann das Gesteinskorn leicht schräg in der Lamelle liegen, sodass auch Signale unterhalb der Oberfläche detektiert werden. Schließlich kann während der Messungen ein leichter Probendrift auftreten, wodurch die Grenzfläche zusätzlich verbreitert beziehungsweise verschmiert erscheint.

Zu beachten ist, dass die Richtung der Elementprofile nicht immer mit der Richtung der Pfeile in den Abbildungen der Lamellen übereinstimmt. Teilweise sind die Abbildungen der Elementprofile entgegengesetzt dargestellt.

Die Na-Feldspäte zeigten Veränderungen der Elementkonzentrationen innerhalb des Gesteinskorns. Um zu überprüfen, ob diese Migration strahlinduziert ist, wurden insgesamt drei Lamellen an Albit-Zementsteinmatrix-Grenzflächen hergestellt. Die folgende Abbildung zeigt eine Lamelle aus dem UHFB mit Alkaliolivinbasalt.

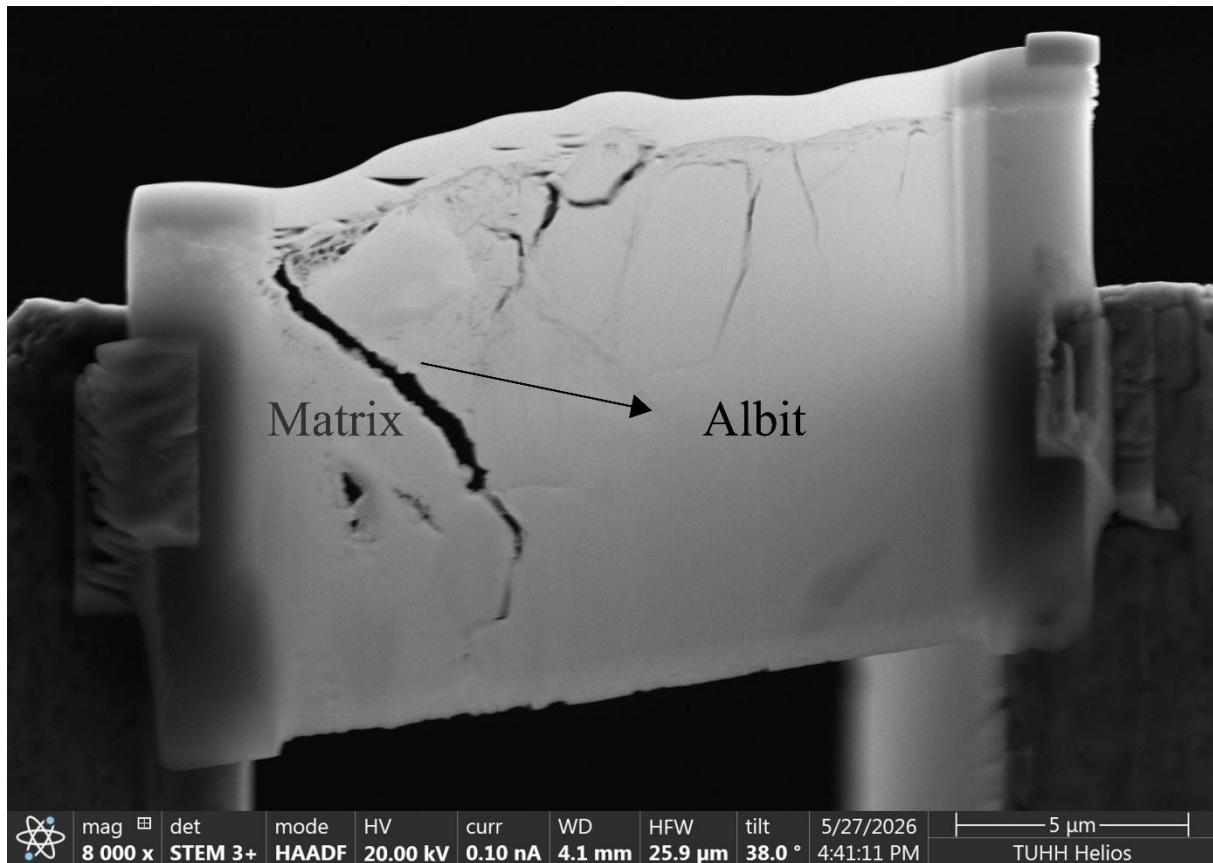


Abb. 27: Lamelle aus dem UHFV mit Alkaliolivinbasalt. Grenzfläche Albit - Zementsteinmatrix. Der Pfeil markiert den Auswertebereich.

Die zeitabhängige Untersuchung in der folgenden Abbildung zeigt, dass die Natriumkonzentration mit zunehmender Messzeit in Richtung des Gesteinskorns wandert.

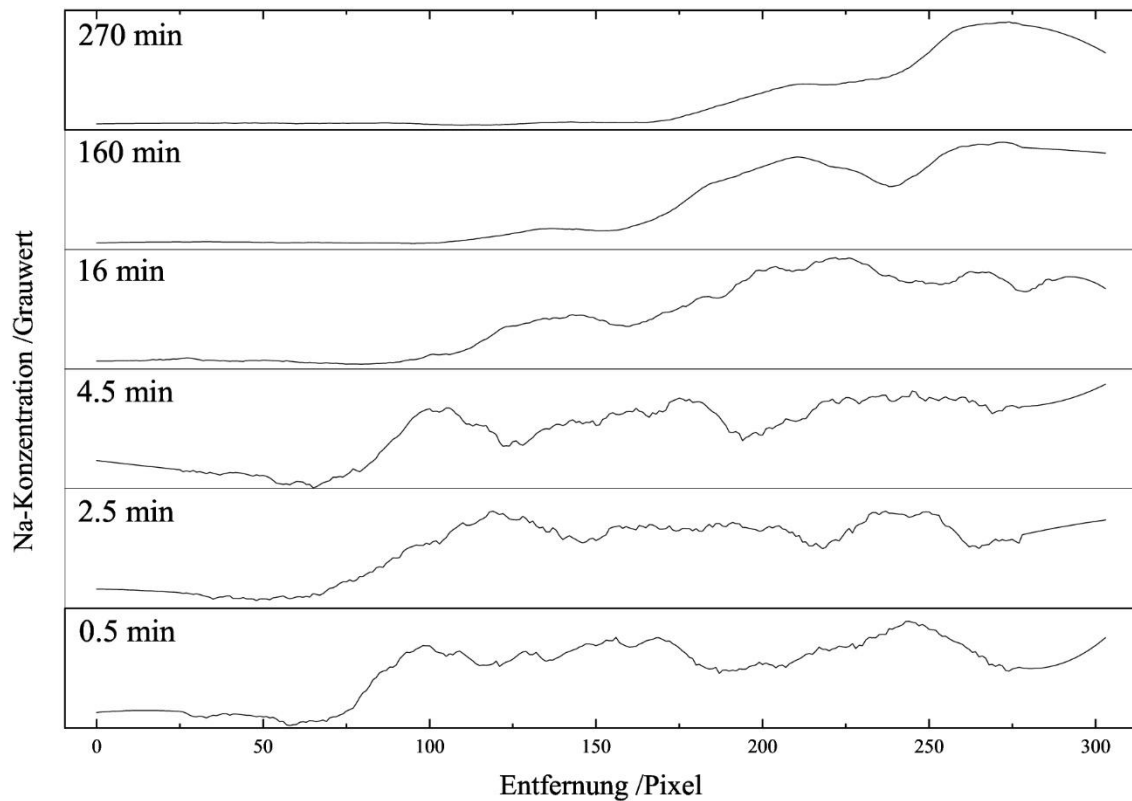


Abb. 28: Zeitabhängige Na-Konzentration im Albit. Natrium wandert von der Grenzfläche ins Gesteinskorn.

Biotit zeigt ein Wanderungsverhalten sowohl für Na als auch für K. Beide Elemente reichern sich durch die Untersuchung jedoch an der Grenzfläche an. Die folgende Abbildung zeigt zunächst eine Lamelle aus dem UHFB mit Rhyolith, die dann folgende Abbildung die Elementkonzentrationen im oberen Bereich der Biotit-Grenzfläche. Na und K lagern sich entlang der Korngrenze an. Im oberen Bereich der Biotit-Lamelle ist die Grenzfläche durch einen breiteren Riss gekennzeichnet. Dieser Riss zeigt sich in der Elementverteilung als etwa 10 Pixel breiter Bereich, in dem keine Elemente nachgewiesen wurden. Eine Migration über den Riss hinaus ist nicht erkennbar. Dies spricht ebenfalls für eine strahlinduzierte Veränderung der Elementverteilung. Die nächste Abbildung zeigt die Verteilung von Na, K, Ca und Mg im mittleren Bereich der Lamelle, wo ein besserer Kontakt zwischen Biotit und Bindemittelmatrix vorliegt. Hier reichern sich Na und K strahlinduziert mit der Zeit in der Grenzfläche an. Ca und Mg zeigen keine Reaktion zwischen Biotit und Zementstein. Die höhere Calciumkonzentration zeigt jeweils die Lage des Zementsteins an, die höhere Magnesiumkonzentration die Lage des Biotits. Diese ist in den beiden Abbildungen nicht gleich.

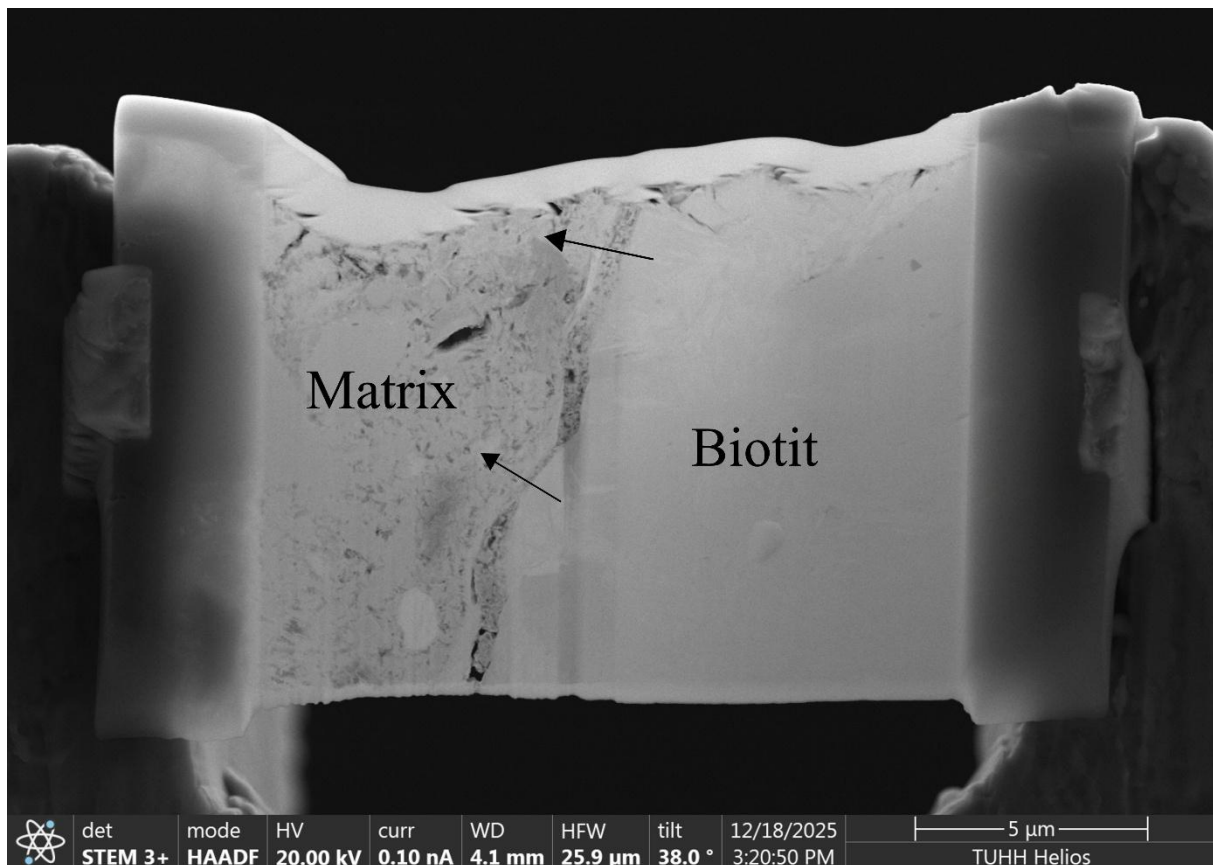


Abb. 29: Lamelle aus dem UHFB mit Rhyolith. Grenzfläche Biotit - Zementsteinmatrix.

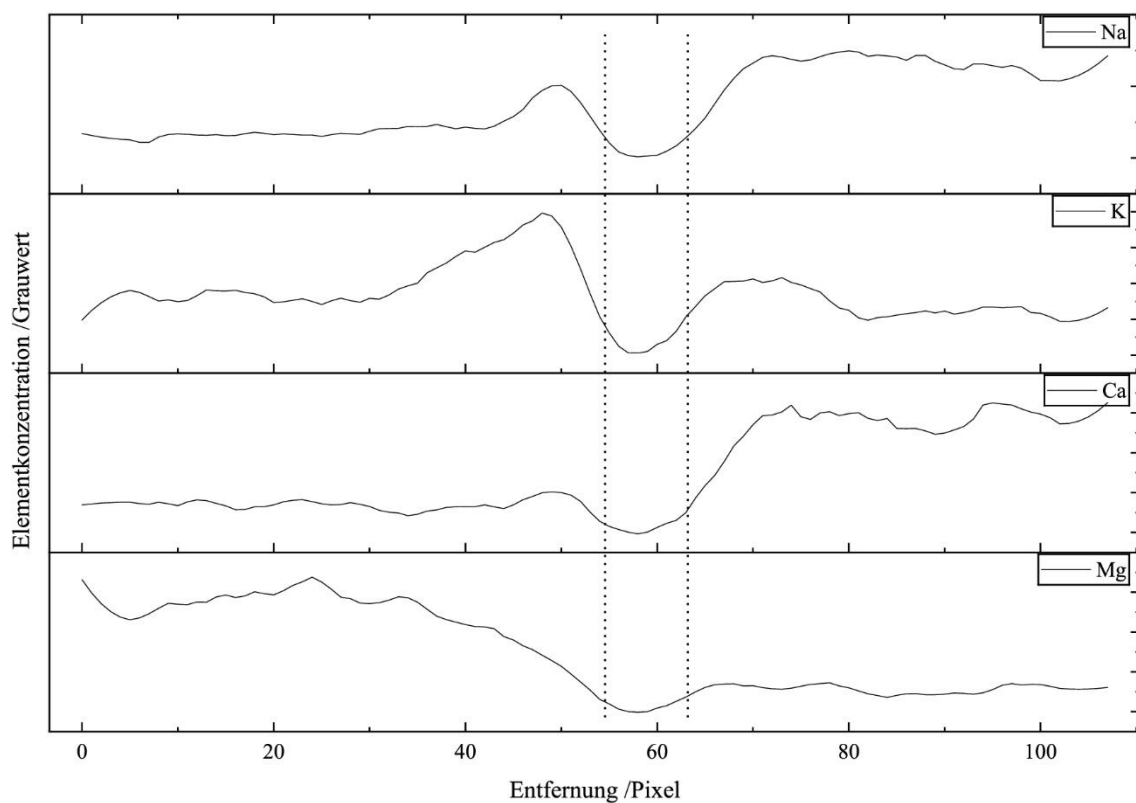


Abb. 30: Elementkonzentration an der Grenzfläche Biotit-Zementstein, oberer Auswertebereich. Der Bereich zwischen den Linien markiert den Rissbereich.

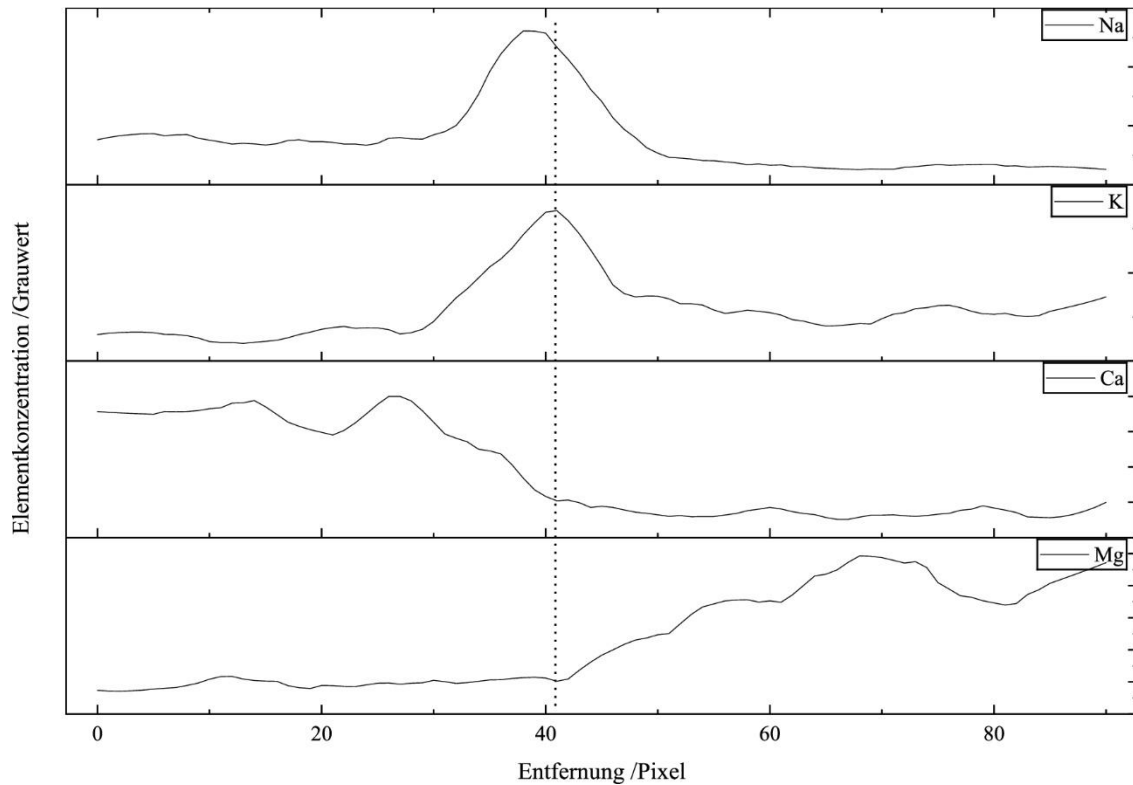


Abb. 31: Elementkonzentration an der Grenzfläche Biotit-Zementstein, mittlerer Auswertebereich. Na und K lagern sich an der Korngrenzfläche an.

Sanidin zeigt dieses Verhalten nicht. Als Hochtemperaturmodifikation von Orthoklas sind die Elemente in diesem Mineral möglicherweise fester gebunden. Eine eindeutige Abgrenzung zu Orthoklas ist anhand der chemischen Zusammensetzung jedoch schwierig. Die Zuordnung zu Sanidin erfolgt aufgrund des neben K ebenfalls vorhandenen nennenswerten Na-Gehalts im Mineral. Die folgende Abbildung zeigt zunächst wieder die untersuchte Lamelle, in diesem Fall aus dem UHFB mit Phonolith. Die darauf folgende Abbildung zeigt die Elementkonzentrationen von Ca, K und Na im Bereich der Grenzfläche Sanidin-Zementstein. Auch hier ist keine Reaktion zwischen dem Feldspat und der Zementsteinmatrix erkennbar.

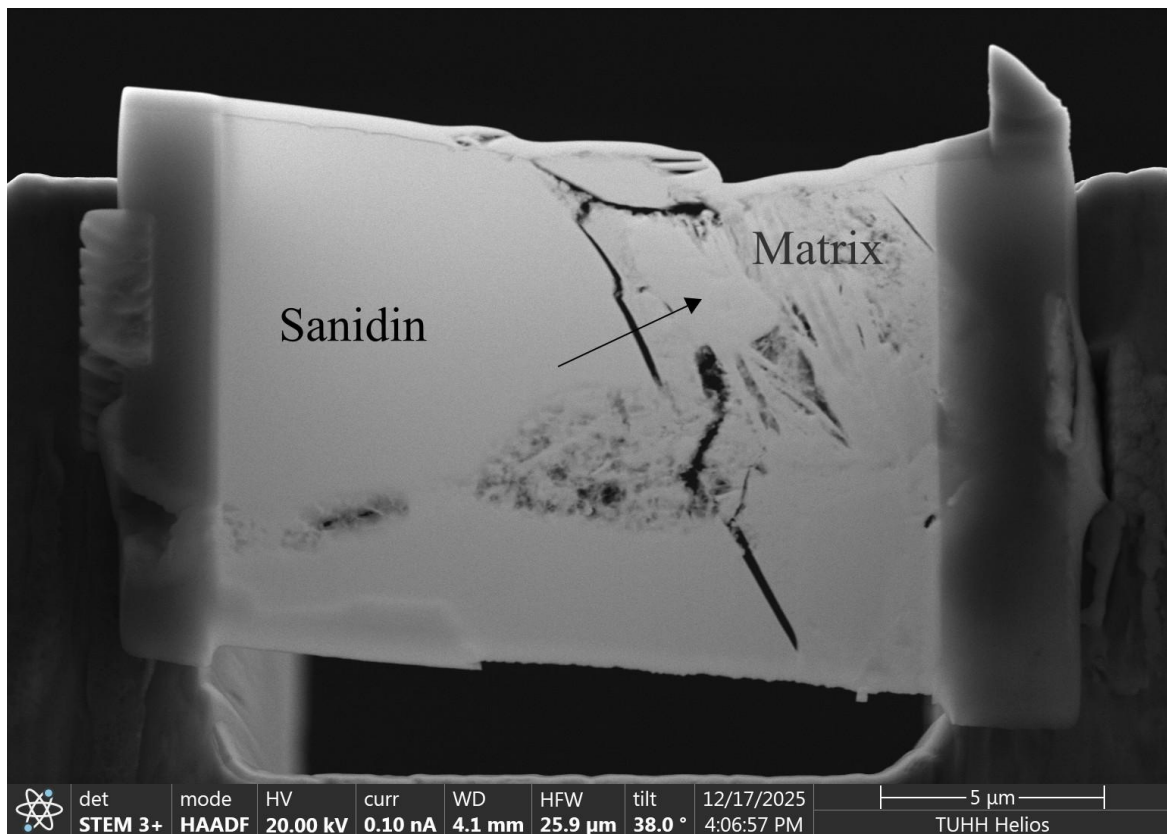


Abb. 32: Lamelle aus dem UHFB mit Phonolith. Grenzfläche Sanidin - Zementsteinmatrix.

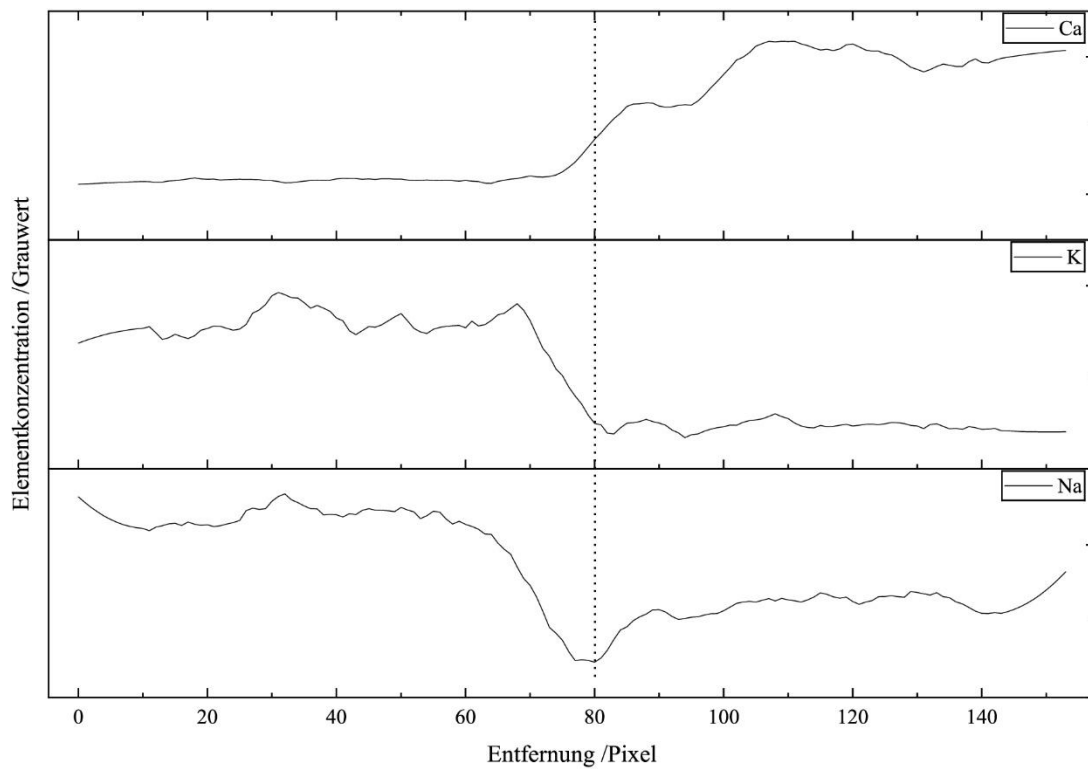


Abb. 33: Elementkonzentration an der Grenzfläche Sanidin-Zementsteinmatrix. K und Na sind homogen im Korn verteilt.

Auch beim UHFB mit Dolomitstein ist keine Reaktion mit einer Wanderung von Ca oder Mg über die Grenzfläche Zementstein Dolomit hinweg zu erkennen, wie die folgende Abbildung zeigt.

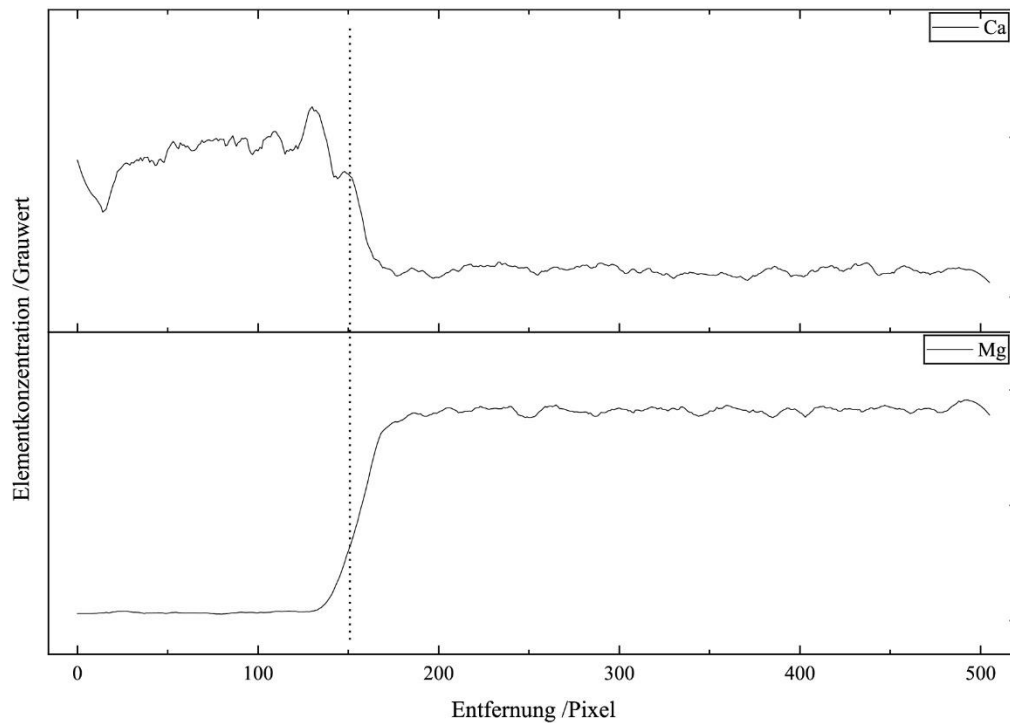


Abb. 34: Elementkonzentration an der Grenzfläche Dolomit-Zementstein in einer Lamelle aus UHFB mit Dolomitstein. Es wird keine Mg-Migration in die Matrix beobachtet. Die Lage des Dolomits ist durch den hohen Magnesiumgehalt gekennzeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt eine Lamelle aus dem UHFB mit Basanit. Es liegt eine Grenzfläche zwischen Olivin und Zementsteinmatrix vor. Die dann folgende Abbildung zeigt die Calcium- und Magnesiumkonzentration an der Grenzfläche. Es ergeben sich keine klaren Hinweise auf eine Elementmigration.

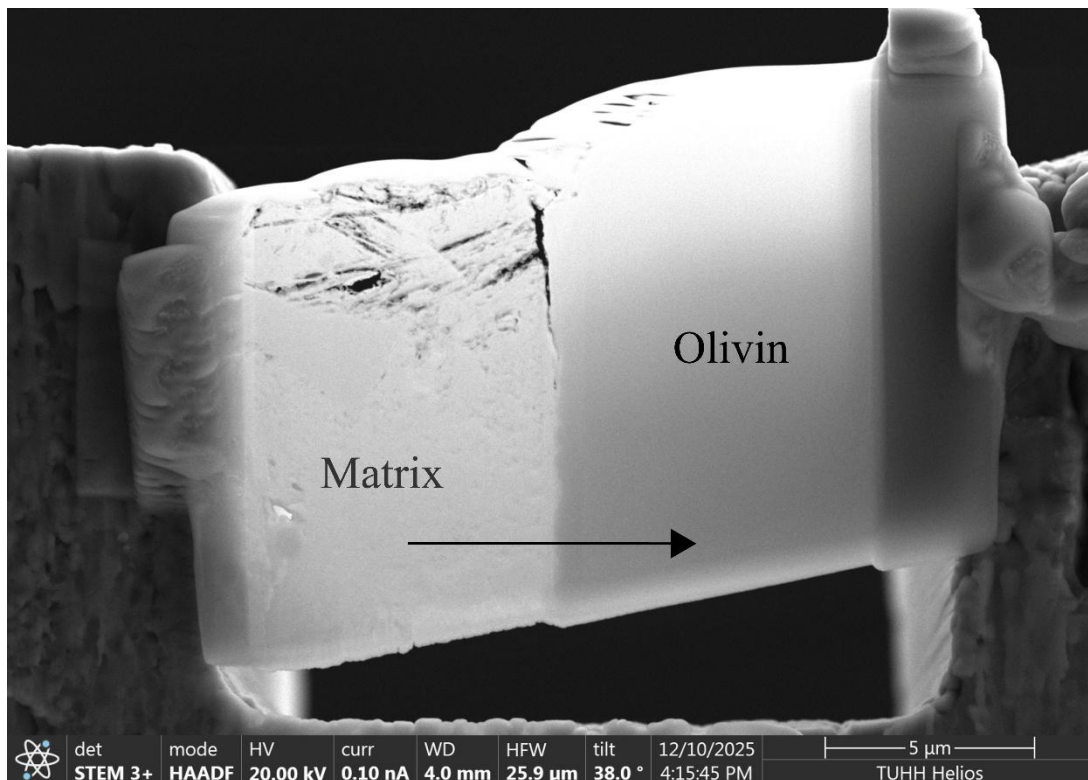


Abb. 35: Lamelle aus dem UHFB mit Basanit. Grenzfläche Olivin - Zementsteinmatrix.

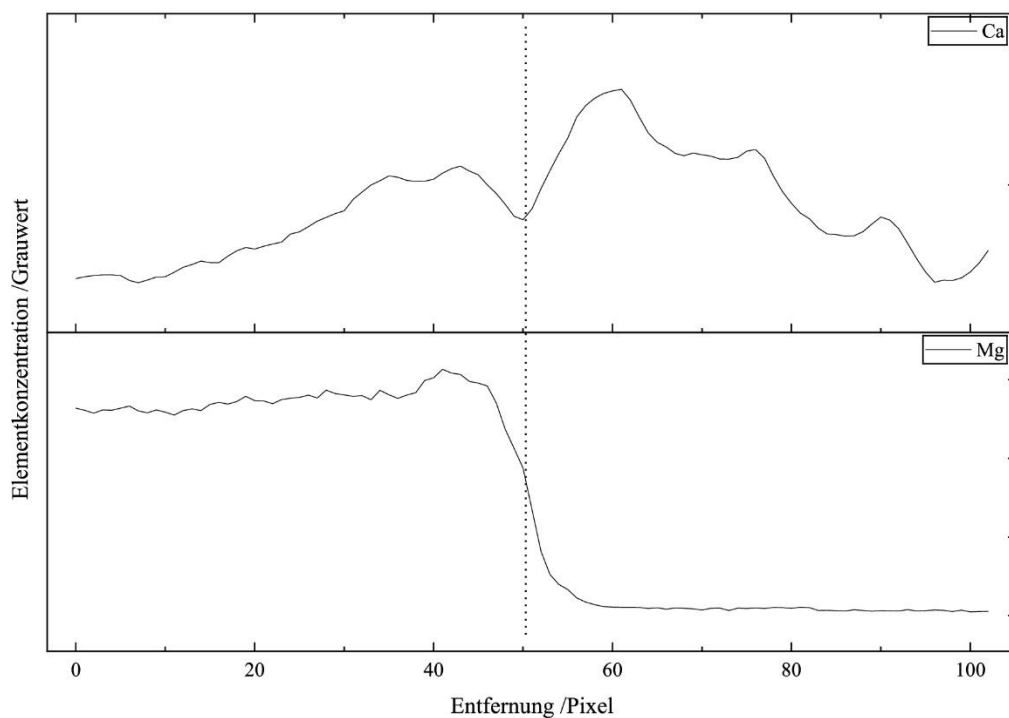


Abb. 36: Elementkonzentrationen an der Olivin-Zementstein Grenzfläche. Die Schwankungen im Ca-Gehalt resultieren aus möglichen Überlagerungen der Matrix mit dem (schrägliegenden) Gesteinskorn. Der hohe Magnesiumgehalt kennzeichnet die Lage des Olivins.

Schließlich zeigen die beiden folgenden Abbildungen Elementprofile an der Grenzfläche von Pyroxen und Zementstein in einer Lamelle aus dem UHFB mit Basanit sowie von Amphibol mit Zementstein aus einer Lamelle aus dem UHFB mit Amphibolit.

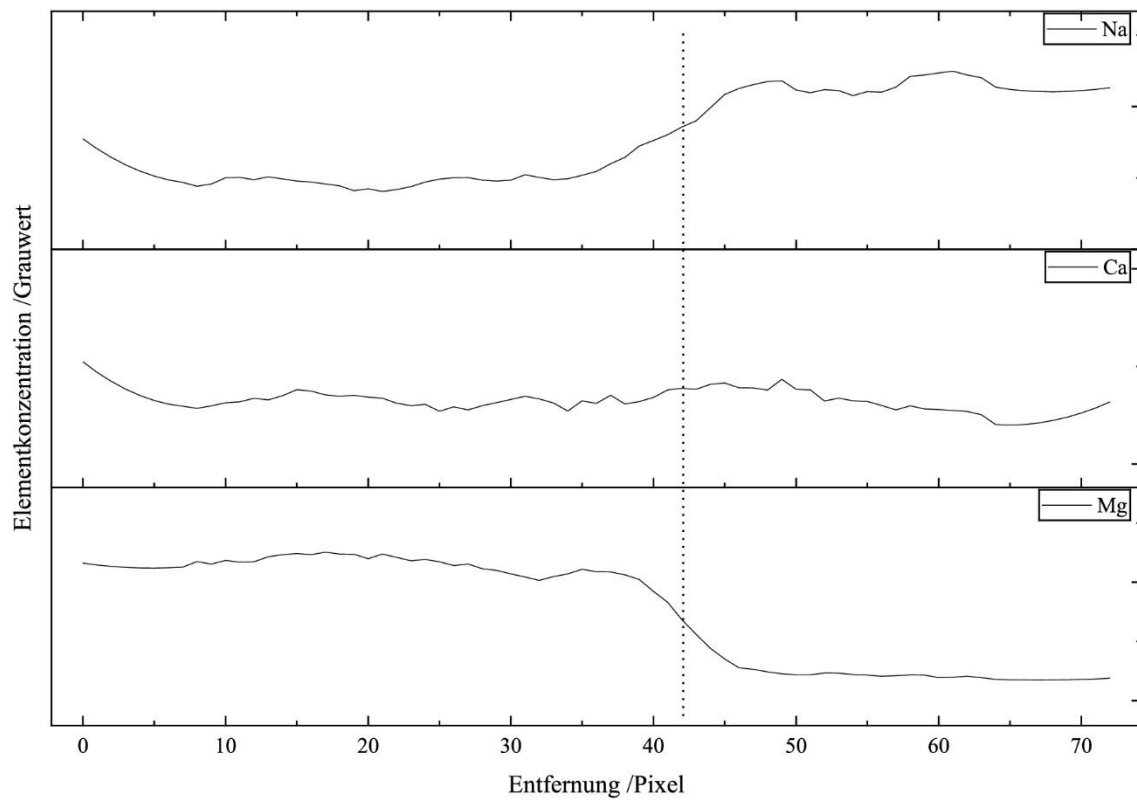


Abb. 37: Elementkonzentration an der Grenzfläche Pyroxen (Augit) – Zementstein in einer Lamelle aus dem UHFB mit Basanit. Der hohe Magnesiumgehalt kennzeichnet den Augit.

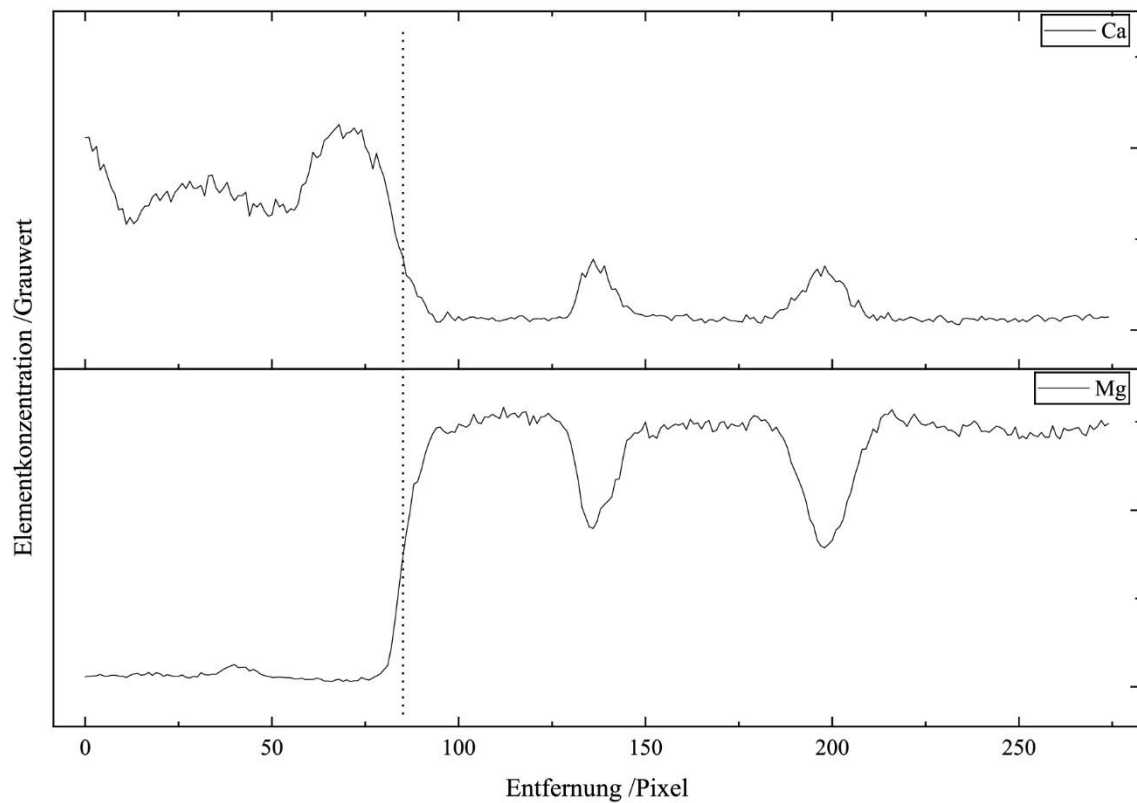


Abb. 38: Elementkonzentration an der Grenzfläche Amphibol Zementstein in einer Lamelle aus UHFB mit Amphibolit. Der hohe Magnesiumgehalt kennzeichnet das Amphibol. Die Ausschläge bei ca. 130 und 200 sind auf Risse im Mineral zurückzuführen, die mit Zementsteinmatrix gefüllt sind.

Die folgende Abbildung zeigt Mg- und Ca-Elementmaps über die Lamelle aus UHFB mit Amphibolit. Deutlich zu erkennen sind darin die beiden mit Zementstein gefüllten Risse im Amphibol, die die Einbrüche in der Magnesiumkonzentration des Amphibols in der vorhergehenden Abbildung bedingen.

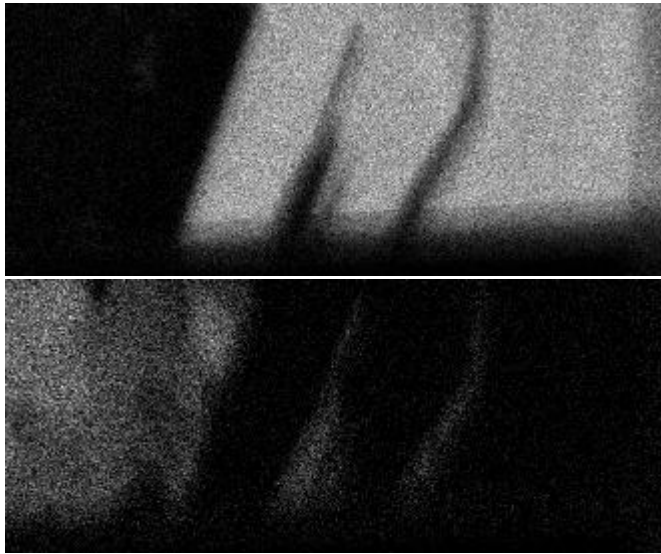


Abb. 39: Elementmaps einer Lamelle aus dem UHFB mit Amphibolit. Oben: Mg, Unten: Ca. Links befindet sich Zementstein, rechts ein Amphibol.

Ein Austausch von Na, K oder Mg durch Ca aus der Zementsteinmatrix konnte in keiner Probe nachgewiesen werden. Ebenso waren keine weiteren Grenzflächenreaktionen erkennbar. Die Grenzflächen zeigten bei allen untersuchten Proben insgesamt vergleichsweise scharfe Übergänge.

Die Grenzfläche zwischen dem Mineral Quarz und der Bindemittelmatrix wurde hier nicht untersucht, da während der sehr umfangreichen TEM-Untersuchungen im Rahmen des DFG-SPP 2020 keinerlei Reaktionen zwischen dem Quarz und dem Bindemittel des Referenz-UHPC des SPP festgestellt werden konnten.

Die im Antrag genannten Untersuchungen mittels FIB-Tomographie konnten im Rahmen des Projektes leider nicht mehr durchgeführt werden.

2.1.9 Diskussion

Betrachtet man die absoluten Werte der in diesem Projekt erzielten Druckfestigkeiten stellt man fest, dass das Hinzufügen von 30 Vol.-% grober Gesteinskörnung zu dem Referenz-UHPC des DFG-Schwerpunktprogramms 2020 in allen Fällen zu einer Erniedrigung der erzielten Festigkeit geführt hat. Dies ist erfahrungsgemäß auf die Bildung von Spannungskonzentrationen aufgrund von Steifigkeitsunterschieden zwischen der Bindemittelmatrix und diesen vergleichsweise großen Körnern zurückzuführen.

Allerdings ergeben sich große Unterschiede zwischen den ansonsten gleichen UHFB mit verschiedenen Gesteinsarten als grobe Gesteinskörnung. Die untersuchten Basalte, ein Basanit und ein Alkaliolivinbasalt ergeben dabei die größten Druckfestigkeiten. Unterstützt wird dieses Ergebnis durch ältere Messergebnisse mit dem Basalt Ölberg und gleicher Rezeptur. Es zeigt sich aber, dass auch andere Gesteine, mit zum Teil völlig anderer Genese vergleichbare Festigkeitswerte ergeben. Dazu gehört dichter Kalkstein (Massenkalk), ein Sedimentgestein, die vulkanischen Gesteine Phonolith, Rhyolith und Andesit, der mit Basalt verwandte Diabas, das magmatische Gestein Granit, sowie die metamorphen Gesteine Granulit und Gneis. Beim Kalkstein und insbesondere beim Phonolith trat bei gleichem

Fließmittelgehalt allerdings eine deutliche Abnahme des Setzfließmaßes auf, was die Herstellung gut verarbeitbarer UHFB erschwert, aber nicht unmöglich macht.

Im Vergleich dazu hat der hier eingesetzte Quarzit keine hohe Zylinderdruckfestigkeit des UHFB ergeben, obwohl diesem Gestein häufig eine ähnlich hohe Qualität zur Herstellung von UHFB zugeschrieben wird wie Basalt. Warum der UHFB mit dem Quarzit und mit Dolomit eine deutlich höhere Prismendruckfestigkeit als Zylinderdruckfestigkeit erreicht hat, konnte nicht geklärt werden. Wie unten beschrieben, kann man eine klare Korrelation zwischen der Gesteinsfestigkeit und der UHFB-Festigkeit beobachten. Leider ist die Ermittlung und Dokumentation der Gesteinsfestigkeit nicht in den entsprechenden Normen für Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton vorgeschrieben. Eigene Untersuchungen der Betonhersteller sind daher notwendig.

Die Korrelationen zwischen den verschiedenen gemessenen mechanischen Eigenschaften sind in der Publikation von van der Horst et al. (2026) graphisch beschrieben. Die Abbildungen werden hier nicht noch einmal wiedergegeben, sondern die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zwischen der Druckfestigkeit der groben Gesteinskörnung und der Druckfestigkeit der entsprechenden UHFB zeigt sich ein linearer Zusammenhang, der sich durch die Gleichung

$$\text{Druckfestigkeit UHFB [N/mm}^2\text{]} = 0,148 \times \text{Druckfestigkeit Gestein [N/mm}^2\text{]} + 118 \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

beschreiben läßt. Dies bedeutet, dass bei einer Festigkeit der groben Gesteinskörnung von Null (30 Vol.-% grobe Porosität) noch eine Festigkeit des UHFB von 118 N/mm² zu erwarten wäre. Dabei handelt es sich natürlich um einen theoretischen Wert. Die Druckfestigkeit des UHFB mit Amphibolit von 114 N/mm² zeigt, dass in einem solchen Fall in der Praxis auch niedrigere Werte auftreten würden. Sicherlich könnte man aber bei einer Porosität von 30 Vol.-% noch eine Druckfestigkeit um 100 N/mm² erreichen. Der Marmor, der Kalkstein und der Gneis ergeben mit vergleichsweise geringer Gesteinsfestigkeit eine vergleichsweise hohe Druckfestigkeit des UHFB. Auf der anderen Seite spiegelt sich die vergleichsweise hohe Druckfestigkeit des Dolomitsteins nicht in einer hohen Druckfestigkeit des UHFB wider, wobei mit diesem UHFB jedoch eine deutlich größere Prismendruckfestigkeit erreicht werden konnte.

- Es zeigt sich jedoch wie bei Betonen üblich eine klare lineare Korrelation zwischen dem E-Modul und der Zylinderdruckfestigkeit der UHFB. Größere Druckfestigkeit führt auch zu einem größeren E-Modul.
- Nur sehr schwach zeigt sich eine Korrelation zwischen der Druckfestigkeit der Gesteine und dem E-Modul des UHFB. Es gibt durchaus eine Reihe von Gesteinen mit vergleichsweise niedriger Druckfestigkeit, die im UHFB einen hohen E-Modul erzeugen und umgekehrt. Es zeigt sich, dass es ein Nachteil war, dass in dem Projekt der E-Modul der Gesteine nicht bestimmt wurde.
- Auch die Biegezugfestigkeit der UHFB zeigt wie zu erwarten eine lineare Korrelation mit der Druckfestigkeit der UHFB und der Druckfestigkeit der Gesteine. Im Falle der Biegezugfestigkeit zeigt der UHFB mit Andesit den größten Wert.
- Bei den Gesteinen selbst ist eine sehr schwach ausgebildete lineare Korrelation zwischen der Bruchenergie und der Druckfestigkeit feststellbar. Je größer die Druckfestigkeit ist, umso größer ist i.d.R. auch die Bruchenergie. Abweichend davon zeigen der Gneis und insbesondere der Amphibolit und der Sandstein sehr hohe Bruchenergien.
- Die Bruchenergien der Gesteine und der UHFB sind deutlich linear korreliert. Eine Ausnahme bildet hier der Sandstein, bei dem die hohe Bruchenergie des Gesteins sich nicht im UHFB widerspiegelt. Im Falle der UHFB ist die Bandbreite gemessener Bruchenergien allerdings sehr viel kleiner als bei den Gesteinen.
- Im Falle der UHFB ist keine Korrelation zwischen den beiden Größen Bruchenergie und Druckfestigkeit des UHFB ersichtlich. Eine hohe Bruchenergie des UHFB führt nicht zwangsläufig zu einer hohen Druckfestigkeit des entsprechenden UHFB.

Die Untersuchung der Grenzflächen zwischen den Mineralen sowie dem Zementstein, insbesondere mittels Elektronenmikroskopie, hat keine klaren Anhaltspunkte für das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Gesteine ergeben. Insbesondere konnten keine Reaktionen zwischen Mineralen der groben Gesteinskörnung und der Bindemittelmatrix festgestellt werden, auch nicht bei sehr hoher Auflösung. Solche Reaktionen waren insbesondere für den Dolomitstein erwartet worden. Es scheint so, dass in dem UHFB nach sehr kurzer Zeit der Wassergehalt so gering ist, dass kaum chemische Reaktionen der Gesteinskörnung mit der Bindemittelmatrix ablaufen können.

Wie oben beschrieben ist die Festigkeit der groben Gesteinskörnung eine überaus wichtige Größe, die die Festigkeit eines UHFB mit dieser Gesteinskörnung bestimmt. Dabei gibt es keinen Schwellenwert der Gesteinsfestigkeit, bei dessen Unterschreitung die UHFB-Festigkeit sinkt, sondern je weniger fest die Gesteinskörnung ist, umso weniger fest ist der UHFB.

Sieht man sich die graphische Darstellung 4(a) aus van der Horst et al. (2026) an, die die Korrelation zwischen der Gesteinsfestigkeit und UHFB-Festigkeit zeigt, stellt man fest, dass es Gesteine gibt, die bezogen auf die Gesteinsfestigkeit eine sehr hohe UHFB-Festigkeit ergeben. Dazu gehören: der untersuchte Kalkstein, der Gneis, der Phonolit, der Granit, der Rhyolith, der Alkaliolivinbasalt und der Marmor. Diese Gesteine sind grob gekennzeichnet durch die Minerale Feldspat, Calcit, Pyroxen oder Olivin. Es ist daher durchaus denkbar, dass sich hier ein gewisser Einfluss der Mineralogie abbildet. Diese Aussage ist allerdings hoch spekulativ und auf der Basis der vorliegenden Daten nicht beweisbar. Sie spricht im Übrigen auch nicht gegen die Verwendung von Quarzsand oder Quarzmehl in UHFB. Quarzsand und Quarzmehl sind in der Regel einkristalline Körner. Diese verhalten sich mechanisch ganz anders als ein Gestein, also ein Mineralaggregat.

Ein Zusammenhang zwischen der typischen Korngröße des Gesteins und der erzielbaren UHFB-Festigkeit ist nicht erkennbar. Es gibt sehr feinkörnige Gesteine, wie die Basalte, die hohe Festigkeiten im UHFB erzielen. Aber auch sehr viel grobkörnigere Gesteine wie der Granit mit Korngrößen bis etwa 2,5 mm oder auch der Granulit und der Gneis erzielen hohe UHFB-Festigkeiten.

Die Kornform, Rauigkeit und Porosität der Gesteinskörnung nimmt zusätzlich großen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit.

2.1.10 Literatur

- BBN GmbH: Prüfbericht nach DIN EN 12620, Gesteinskörnungen für Beton. Prüfbericht Nr.: 50029/10062-C/22 vom 17.6.2022
- Brauch, C.: Untersuchungen zum Einfluss von Basalt als grobe Gesteinskörnung in ultrahochfestem Beton. Masterarbeit, TU Hamburg, 2025
- Deden, S.: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss grober Gesteinskörnung in ultrahochfestem Beton. Masterarbeit, TU Hamburg, 2024
- DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, November 2016
- DIN EN 932-3: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrographischen Beschreibung, August 2022
- DIN EN 1015-6: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel, Mai 2007
- DIN EN 1015-7: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel, Dezember 1998
- DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Mai 2022
- DIN EN 1926: Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit, März 2007
- DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Oktober 2019
- DIN EN 12390-13: Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul), September 2021

DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton, Juli 2008

DIN EN 13043: Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen, Dezember 2002

DIN EN 13383: Wasserbausteine - Teil 1: Produktnorm, Juni 2021

DIN EN 14158: Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Bruchenergie, Juni 2004

Ejupi, F.: Untersuchungen zum Einfluss von Andesit und Phonolith als grobe Gesteinskörnung in ultrahochfestem Beton. Bachelorarbeit, TU Hamburg 2025

Grandi www.grandi-steinbruchbetriebe.de, abgerufen am 13.2.2023

Grotheer, T.: Messung der Bruchenergie von Werkstoffen. Studienarbeit, TU Hamburg, 2026

Grundmann, E.: Untersuchungen zum Einfluss von Sandstein und Marmor als grobe Gesteinskörnung in ultrahochfestem Beton. Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2026

Günther-Plönes, A.: Geologische und petrographische Beurteilung des Steinbruchs Billstein. F.C. Nüdling GmbH + Co. KG, 2021

Haase, T.: Untersuchung verschiedener Gesteine zum Einsatz als Gesteinskörnung in ultrahochfestem Beton. Masterarbeit, TU Hamburg, 2023

Herrmann, A.G.; Wedepohl, K.H.: Untersuchungen an spilitischen Gesteinen der variskischen Geosynklinale in Nordwestdeutschland. Beitr. Min. Petrol., Bd. 29, S. 255-274, 1970

Ingenieurgesellschaft Baustoffe und Umwelt Weimar mbH: Prüfzeugnis Nr. NF-WBS/1075-1/12/21/6 vom 17.12.2021

Ingenieurgesellschaft Baustoffe und Umwelt Weimar mbH: Prüfzeugnis Nr. NF-WBS/1298-1-21/02/22/4 vom 1.2.2022

Khan, M.: Einfluss des Gehaltes an Verdichtungsstellen auf die Festigkeit von ultrahochfestem Beton. Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2024

Meyer, Th.; Schuster, A.K.: Geologie und Mineralien des Diabas-Steinbruches Huneberg im Harz. Emser Hefte, Bd. 8, Heft 3, S. 49-56, 1987

Mohr, K.: Geologie und Minerallagerstätten des Harzes, 2. Aufl., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 1993

Pedall, S.; Wessels, S.: Erweiterung eines Basaltsteinbruches durch einen Neuaufschluss Projektteil Geologische Erkundung. Betriebsbezogene Projektarbeit, Technische Fachhochschule Georg Agricola, Bochum, Studiengang Rohstoffe und Geotechnik, Studienrichtung Steine und Erden/Tagebautechnik, Aufbereitung und Veredelung

Rybczynski, S.; Dosta, M.; Schaan, G.; Ritter, M.; Schmidt-Döhl, F.: Numerical study on the mechanical behaviour of ultra-high performance concrete using a three-phase DEM model. Structural concrete, Bd. 23, S. 548-563. 2022, DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202000435>

Rybczynski, S.; van der Horst, T.; Lohmann, J.; Ritter, M.; Schmidt-Döhl, F.: Effect of Coarse Aggregate Type on the Mechanical Response of Ultra-High Performance Concrete. Angenommen für: 1st International Symposia on Advances in Structural Engineering (ISASE 2026), Cape Town, 7–9 Sept 2026

Sächsische Bauprüg Edelman GmbH 2021a: Prüfzeugnis M1-2020-130.1-1564.1 vom 18.1.2021

Sächsische Bauprüg Edelman GmbH 2021b: Prüfzeugnis M1-2021-063.1-0083.1 vom 5.8.2021

Savelev, P.: Untersuchung zum Einfluss von Amphibolit und Granulit als grobe Gesteinskörnung in Ultrahochfestem Beton. Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2025

Schmeling, S.: Geologische und petrographische-chemische Untersuchungen an Basalten und Phonolithen der Steinbrüche Billstein, Suhl und Rupsroth (Rhön), TU Clausthal, unveröffentlicht, 1991

Schneid, S.: Untersuchungen zum Einfluss von Dolomit und Kalkstein als grobe Gesteinskörnung in ultrahochfestem Beton. Bachelorarbeit TU Hamburg, 2024

van der Horst, T.; Schmidt-Döhl, F.; Rybczynski, S.; Lohmann, J.: Experimental investigation of the effects of different coarse aggregates on the mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC). Angenommen für: 22nd International Conference on Building Materials (ibautil 2026), Weimar, 16.-18.9.2026

2.2 Wirtschaftliche Verwertbarkeit

Die Ergebnisse gestatten Planern und Herstellern von Ultrahochfesten Betonen eine breitere Basis von Gesteinskörnungen zur zielgerichteten Herstellung solcher Werkstoffe zu nutzen.

2.3 Wer hat zu den Ergebnissen des Projekts beigetragen?

Die Antragsteller Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt-Döhl und Dr.-Ing. Martin Ritter. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter/in Jessica Lohmann, Dr.-Ing. Sebastian Rybczynski, Timo van der Horst und Dr. Gunnar Schaan. Die Laborleiterin Sabine Opeldus. Die/der technische/n Mitarbeiter/in Franziska Tralow, Uwe Nowotnik und Jens Oppermann. Die im folgenden Kapitel genannten Studierenden.

2.4 Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter/in Jessica Lohmann, Dr.-Ing. Sebastian Rybczynski, Timo van der Horst und Dr. Gunnar Schaan waren an dem Projekt beteiligt und haben wesentliche Ergebnisse in den beiden Publikationen Rybczynski et al. (2026) und van der Horst et al. (2026) zusammengefasst.

Die folgenden studentischen Arbeiten sind in Zusammenhang mit dem Projekt entstanden:

Brauch, C.: Masterarbeit, TU Hamburg, 2025
Deden, S.: Masterarbeit, TU Hamburg, 2024
Ejupi, F.: Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2025
Grotheer, T.: Studienarbeit, TU Hamburg, 2026
Grundmann, E.: Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2025
Haase, T.: Masterarbeit, TU Hamburg, 2023
Khan, M.: Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2024
Savelev, P.: Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2025
Schneid, S.: Bachelorarbeit, TU Hamburg, 2024
Zechel, J.: Bachelorarbeit (abgebrochen), TU Hamburg, 2024

3 Zusammenfassung

Das Hinzufügen grober Gesteinskörnung ist eine Möglichkeit, den hohen Zementgehalt von ultrahochfestem Beton (UHFB) zu senken. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde einem sehr feinkörnigen Referenz-UHFB 30 Vol.-% grobe Gesteinskörnung mit 5-8 mm Korngröße aus insgesamt 16 verschiedenen Gesteinen hinzugefügt. Die untersuchten Gesteine decken einen Großteil der in Deutschland erhältlichen hochfesten Gesteinsarten ab. Sowohl die Gesteine, als auch die hergestellten UHFB wurden anschließend umfangreich untersucht. Dabei standen die mechanischen Eigenschaften im Vordergrund, aber auch phasen- und gefügeanalytische Untersuchungen, um die beobachteten Unterschiede zu erklären. Als wichtigste Ergebnisse lässt sich feststellen, dass es eine ganze Reihe von hochfesten Gesteinen gibt, mit denen UHFB hergestellt werden kann, auch wenn das Hinzufügen grober Gesteinskörnung in allen Fällen zu einer Erniedrigung der Festigkeit geführt hat. Neben Basalten haben sich auch andere feinkörnige und porenarme vulkanische Gesteine bewährt, aber auch deutlich grobkörniger plutonischer Granit sowie metamorpher Granulit und Gneis. Auch mit Massenkalk, als sehr porenarmen Sedimentgestein, lässt sich UHFB herstellen. Grobkörniger metamorpher Marmor, Sandstein (trotz für das Gestein sehr hoher Festigkeit) und sandsteinartiges Gestein wie Grauwacke, sowie metamorpher Amphibolit haben sich nicht bewährt. Dolomitstein und der untersuchte Quarzit ergaben widersprüchliche Ergebnisse. Zwischen der Druckfestigkeit der groben Gesteinskörnung und der Druckfestigkeit der entsprechenden UHFB zeigt sich ein klarer linearer Zusammenhang. Dabei gibt es keinen Schwellenwert der Gesteinsfestigkeit, bei dessen Unterschreitung die UHFB-Festigkeit sinkt, sondern je weniger fest die Gesteinskörnung ist, umso weniger fest ist der UHFB. Ein Zusammenhang zwischen der typischen Korngröße des Gesteins und der erzielbaren UHFB-Festigkeit ist nicht erkennbar. In keinem Fall konnte eine chemische Reaktion zwischen der Bindemittelmatrix und den Mineralen der Gesteinskörnung festgestellt werden, auch nicht mit sehr hoher örtlicher analytischer Auflösung. Es scheint so, dass in dem UHFB nach sehr kurzer Zeit der Wassergehalt so gering ist, dass kaum chemische Reaktionen der Gesteinskörnung mit der Bindemittelmatrix ablaufen können. Alle Gesteinskörnungen waren sehr gut in die Bindemittelmatrix eingebettet, wobei es deutliche Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit gibt, was zusammen mit der Porosität auch Einfluss nimmt auf die Verarbeitbarkeit.