



Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre

Masterarbeit

Petrographische Beschreibung von  
Gesteinen aus Westösterreich hinsichtlich  
ihrer Alkali-Reaktivität

Marco Dietmayer-Kräutler, BSc

November 2019



## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 02.08.2019

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marco Dietmayer-Kräutler', written over a horizontal line.

Unterschrift Verfasser/in  
Marco, Dietmayer-Kräutler  
Matrikelnummer: 00635150



# Petrographische Beschreibung von Gesteinen aus Westösterreich hinsichtlich ihrer Alkali-Reaktivität



Diplomarbeit

von Marco Dietmayer-Kräutler

Betreuer:

DI Sammer Georg

DI Murr Roland

ao.Univ.-Prof. Dr. Prochaska Walter

o.Univ.-Prof DDr. Bergmeister Konrad

Leoben, November 2019

## **Kurzfassung**

Anhand von verschiedenen Gesteinen aus Westösterreich wurde speziell nach einer mineralogisch ausgerichteten Möglichkeit gesucht, erste Erkenntnisse zu einer potentiellen Alkali-Kieselsäure-Reaktivität (AKR) der gewählten Gesteinstypen nach entsprechender Beaufschlagung mit Alkalien zu erfassen. Dabei wurde neben der Schwierigkeit der Zugänglichkeit von Probenmaterial darauf geachtet typische Vertreter der Lithologien in Form von Handstücken oder Fels-Bohrkernen aus den jeweiligen Formationen auszuwählen und zu untersuchen. Die Proben wurden makroskopisch und mikroskopisch beschrieben. Aus ausgewählten Stücken wurden Sandfraktionen hergestellt, die für nähere Erkenntnisse zu ihrer Alkali-Kieselsäure-Reaktivität mit Hilfe des Schnelltests nach ÖNORM B 3100 beprobt.

In einem zweiten Schritt wurde mit ausgewählten Sandfraktionen eine Modifikation des Schnelltests vorgenommen, in dem anstelle des Einheitszements eine Bindemittelkombination aus zwei Zementen mit einem wesentlichen Anteil an hydraulisch wirksamer Hochofenschlacke gewählt wurde, ansonsten jedoch keine Änderung in der Versuchsdurchführung vorgenommen wurde. Dabei wurde untersucht, ob eine potentielle AKR der Gesteinskörnung durch die Wahl des Bindemittels verändert werden kann. Dazu wurden nach der Versuchsdurchführung aus den Mörtelprismen ebenso Dünnschliffe gefertigt, um diese im Detail zu betrachten und Spuren einer möglichen AKR in Form von Rissbildungen oder Gelansammlungen zu finden. In letzter Instanz sind bei vereinzelt Proben Raster-Elektronen-Mikroskop Untersuchungen an Dünnschliffen alkaliebeaufschlagter Mörtelprismen AKR-Gelbildungen gesucht und als solche dieser Reaktion zugeordnet worden.

Eine generelle Zuordnung der Rissbildungen zu einer schädigenden AKR-Betonreaktion erwies sich aber meistens als nicht möglich. Eine Korrelation zwischen verschiedenen Einflussfaktoren und der Dehnung der Mörtelprismen konnte nicht bewiesen werden.

## **Abstract**

On the basis of various rocks from western Austria, a mineralogically oriented possibility was sought to obtain first insights into a potential alkali-silica reactivity (ASR) of the selected rock types after appropriate exposure to alkalis. In addition to the difficulty of accessibility of sample material, care was taken to select and examine typical representatives of the lithologies in the form of handpieces or rock cores from the respective formations. The samples were described macro- and microscopically. From selected pieces, sand fractions were prepared, which were sampled for further understanding of their alkali-silica reactivity by means of the rapid test according to ÖNORM B 3100.

In a second step, a modification of the rapid test was made with selected sand fractions, in which instead of the unit cement, a binder combination of two cements was selected with a significant proportion of hydraulically effective blast furnace slag with no further changes in the experimental procedure. It was examined whether a potential ASR of the aggregate can be changed by the choice of the binder. For this purpose, after the test procedure from the

mortar prisms also thin sections were made to look at these in detail and to find traces of a possible ASR in the form of cracks or gel collections. In the last instance, with the scanning electron microscopy some thin sections have been searched for ASR gel formations and assigned as such to this reaction.

However, a general classification of the crack formation to a damaging ASR concrete reaction proved to be mostly not possible. A correlation between different influencing factors and the elongation of the mortar prisms could not be proven.

# Inhaltsverzeichnis

<u>Kurzfassung</u> .....	2
<u>Abstract</u> .....	2
1. Einleitung.....	9
1.1 Grundlagen der chemischen Reaktion .....	10
1.2 Schädigungsmechanismus.....	13
1.3 Schadenscharakteristik.....	15
1.4 Mikroskopische Schadenbetrachtung .....	17
1.5 RILEM .....	20
Petrographischer Atlas der RILEM .....	20
1.6 Geographische Lage und geologischer Überblick.....	21
1.7 Ziel der Arbeit .....	23
2. Methodik zur petrographischen Bestimmung .....	24
2.1 Petrographische Beschreibung.....	24
2.2 Mikroskopie und Präparation.....	24
2.3 Klassifikationsschema .....	25
3. Gesteinsschnelltest AKR .....	26
3.1 AKR - Schnelltest nach ÖNORM B 3100.....	26
3.2 Nachweis der Reaktion mit Uranylacetat.....	26
3.3 Methodik zur Laugeneinlegung .....	26
3.4 Verwendete Bindemittelkombinationen.....	26
4. Probenbeschreibung .....	27
4.1 Untere Bündner Schiefer .....	29
4.1.1 Untere Bündner Schiefer Kernprobe 1.....	29
4.1.1.1 Makroskopische Betrachtung .....	29
4.1.1.2 Beschreibung der Dünnschliffe .....	30

4.1.1.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	32
4.1.2 Untere Bündner Schiefer Kernprobe 2.....	34
4.1.2.1 Makroskopische Betrachtung.....	34
4.1.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	35
4.1.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	37
4.1.2.4 Beschreibung der Mörtelprismen der Bindemittelkombination.....	38
4.1.2.5 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen.....	44
4.1.3 Untere Bündner Schiefer Kernprobe 3.....	47
4.1.3.1 Makroskopische Betrachtung.....	47
4.1.3.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	48
4.1.3.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	50
4.2 Mittlere Bündner Schiefer.....	51
4.2.1 Makroskopische Beschreibung.....	51
4.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	52
4.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	63
4.2.4 Beschreibung der Mörtelprismen der Bindemittelkombination.....	65
4.2.5 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen.....	68
4.3 Obere Bündner Schiefer.....	72
4.3.1 Obere Bündner Schiefer Kernprobe 1.....	72
4.3.1.1 Makroskopische Beschreibung.....	72
4.3.1.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	73
4.3.1.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	75
4.3.1.4 Beschreibung der Mörtelprismen der Bindemittelkombination.....	78
4.3.2.5 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen.....	82
4.3.2 Obere Bündner Schiefer Kernprobe 2.....	88
4.3.2.1 Makroskopische Beschreibung.....	88
4.3.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	89

4.3.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	91
4.3.2.4 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen .....	96
4.4 Hochstegenmarmor.....	99
4.4.1 Hochstegenmarmor Kernprobe 1.....	99
4.4.1.1 Makroskopische Beschreibung .....	99
4.4.1.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	100
4.4.1.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	102
4.4.1.4 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen .....	104
4.4.2 Hochstegenmarmor Kernprobe 2.....	107
4.4.2.1 Makroskopische Beschreibung .....	107
4.4.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	108
4.4.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	109
4.5 Kaserer Formation .....	112
4.5.1 Makroskopische Beschreibung .....	112
4.5.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	113
4.5.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	115
4.6 Brixner Granit .....	117
4.6.1 Makroskopische Beschreibung .....	117
4.6.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	118
4.6.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	120
4.7 Tonalit.....	122
4.7.1 Makroskopische Beschreibung .....	122
4.7.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	123
4.7.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	126
4.8 Augengneis .....	127
4.8.1 Makroskopische Beschreibung .....	127
4.8.2 Beschreibung der Dünnschliffe.....	128

4.8.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	130
4.9 Metagranit .....	134
4.9.1 Makroskopische Beschreibung .....	134
4.9.2 Beschreibung der Dünnschliffe .....	135
4.9.3 Beschreibung der Mörtelprismen.....	137
4.10 Ergebnis der Behandlung mit Uranylacetat .....	138
4.11 Auswirkungen des Brechvorganges zur Herstellung von Kornfraktionen, zum Beispiel für die Probenvorbereitung.....	140
5. Interpretation, Diskussion und Schlussfolgerung der Ergebnisse.....	145
5.1 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse.....	145
5.2 Schlussfolgerung .....	149
6. Literaturverzeichnis.....	150
7. Anhang.....	154

## Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Herrn DI Sammer Georg für die Idee zur Arbeit und der weiterführenden Unterstützung bedanken. Des Weiteren bei Herrn DI Murr Roland der diese Arbeit ebenso bis zum Schluss begleitet hat und mit Rat und Tat zur Seite stand.

Für die Durchführung der Schnelltests nach ÖNORM B 3100 möchte ich mich bei Frau Werner Bianca, tätig im Labor der Firma Pöyry in Straß im Zillertal bedanken. Für die Herstellung der Dünnschliffe der Mörtelprismen möchte ich mich bei Herrn Mühlhans Helmut bedanken.

Bei Herrn Dr. Saxer & Herrn MSc. Bader Tobias, der Universität Innsbruck, möchte ich mich für die Unterstützung bei den Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop bedanken.

Zum Abschluss möchte ich mich noch bei ao.Univ-Prof. Prochaska Walter, o.Univ.-Prof. Melcher Frank, Herrn Zimmermann Maik und Dr. mont Christina Atzenhofer für die Hilfe bei etwaigen Fragestellungen und bei o.Univ-Prof. Konrad Bergmeister für die Unterstützung der Arbeit und Bereitstellung von Ressourcen bedanken. Des Weiteren bedanke ich mich bei den Firmen Pöyry Austria GmbH und der BBT-SE die durch ihre Unterstützung dieses Projekt erst möglich gemacht haben.



# 1. Einleitung

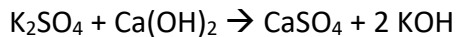
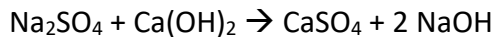
Man versteht unter der Alkali – Kieselsäure Reaktion (AKR) eine chemische Reaktion von verschiedenartigen Formen der Kieselsäure ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) aus den Gesteinskörnungen stammend mit den Alkalihydroxiden (NaOH, KOH), welche aus der Porenlösung des erhärteten Zementsteins kommen. Die Alkalihydroxide können in der Porenlösung vorhandensein oder auch von außen zugeführt werden. Zusammen bilden Kieselsäure und Alkalihydroxide das AKR-Gel, welches durch Volumens Vergrößerung aufgrund von Wasseraufnahme treibend wirkt. Durch dieses Treiben können Risse in den Gesteinskörnungen und im Beton auftreten, welche weiters zu Schäden im Betongefüge führen können.

Für den Ablauf einer AKR sind drei Grundvoraussetzungen notwendig, das Vorhandensein von Kieselsäure, Alkalien und Wasser. Fehlt eine dieser Komponenten findet keine AKR statt. Das Ausmaß der Reaktion hängt von vielen Faktoren wie beispielsweise der Menge der reaktiven Gesteinskörnung und deren Verteilung, dem Gehalt der Alkalihydroxide in der Porenlösung und den Feuchtigkeits- sowie Temperaturbedingungen ab. Die Menge an Alkalihydroxiden in der Porenlösung kann durch Zufuhr von außen erhöht werden.

Die Schäden einer AKR können auch noch nach Jahren bzw. Jahrzehnten auftreten. Es kann zu Ausblühungen an der Betonoberfläche, Gelausscheidungen, Ausplatzungen (Pop Outs) sowie strahlen- oder netzförmigen Rissen führen. Betonschadensbilder sind jedoch nicht immer eindeutig zuordenbar und eindeutig zu identifizieren. Ausplatzungen treten an alkaliempfindlichen Körnern nahe an der Betonoberfläche liegend auf können aber auch durch nicht ausreichende frostbeständige Körner entstehen. Die Rissbilder treten jedoch auch bei anderen Schädigungen durch Volumsänderungen von Beton auf. Diese können zum Beispiel bei Schwind- und Quellvorgängen, Frost-Tauwechsel und anderen Treibreaktionen auftreten. Des Weiteren sind in diesem Zusammenhang Frühschwindrisse infolge fehlender oder unzureichender Nachbehandlung zu nennen, welche ebenfalls ein zur AKR identes Schadensbild erzeugen. Die Komplexität der verschiedenen Schadensmöglichkeiten zeigt, dass umfangreiche Erfahrung und Untersuchung zum Nachweis einer AKR notwendig sind und dass sich die Schadensursachen oftmals überlagern.

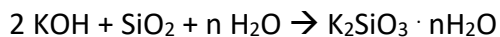
## 1.1 Grundlagen der chemischen Reaktion

Die Hauptklinkerphasen Alit und Belit reagieren durch Hydratation zu Calcium-Silicat-Hydrat Phasen (C-S-H Phasen) sowie Calciumhydroxid (Portlandit,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Währenddessen gehen die Alkalisulfate ebenfalls in Lösung aufgrund der guten Wasserlöslichkeit und reagieren zur Calciumsulfat und Alkalihydroxid (STARK & WICHT, 2013).



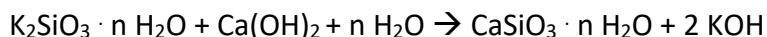
Aufgrund der Bildung der Alkalihydroxide steigt der pH – Wert an und kann bis ungefähr 13,9 reichen, was als Motor für die nachfolgenden Reaktionen entscheidend ist.

Die Bildung des AKR – Gels erfolgt durch die Reaktion von den Alkalihydroxiden mit dem reaktiven  $\text{SiO}_2$ . Dieses Gel kann nun mit Wasser- und Calcium-Aufnahme betonschädigende Quelldrücke aufbauen (STARK & WICHT, 2013).



Quelldruckmessungen unter MANSFELD, 2008 zeigen, dass CaO-freie Gele nicht quellförmig sind, sondern leicht löslich. Den größten Quelldruck erhielt man bei einem CaO – Gehalt von 10% im Gel. Ein weiterer Unterschied ergibt sich durch welches Alkalihydroxid eingebaut wird, da Na-haltige Gele stärker quellen als K-haltige (STARK, 2001; HÜB 1999).

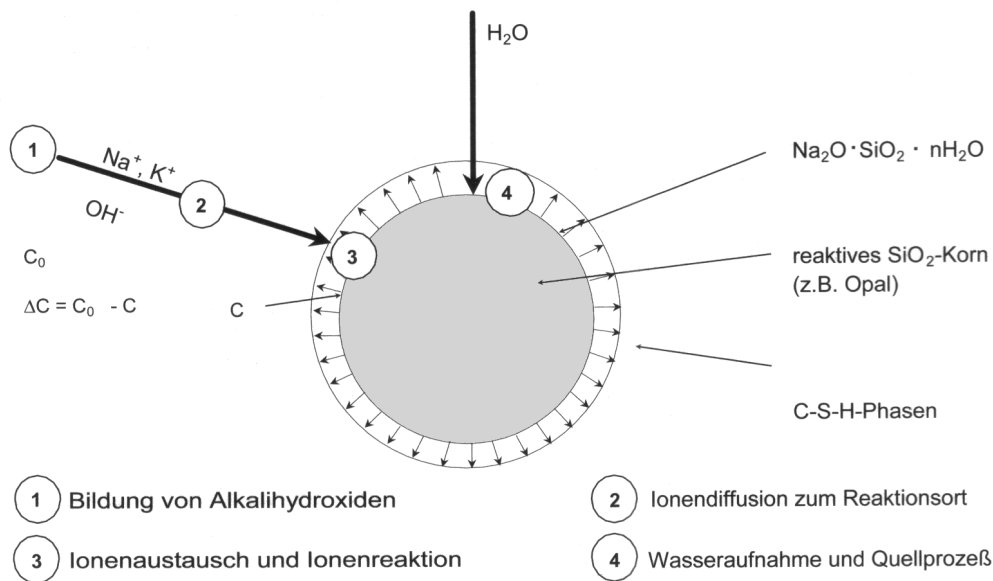
Die Alkalihydroxide können in Anwesenheit von Calciumhydroxid wieder aus dem AKR-Gel gelöst werden, welches sich in eine C-S-H Phase bildet.



Nach STARK & WICHT, 2013 kann die verfügbare Menge an Portlandit die begrenzende Zutat für das Abklingen der Reaktion bilden. Die Alkalihydroxide werden im Grenzfall immer freigesetzt.

Der Ablauf der Reaktion mit ihren Hauptkomponenten wird in Abbildung 1: Schematische Darstellung der AKR, STARK & WICHT 2013 veranschaulicht.

Nach STARK & WICHT, 2013 dringen die Alkalihydroxide semipermeabel in das Korn ein. Es erfolgt die Bildung des AKR – Gels. Das gebildete AKR Gel hingegen kann das Korn nicht verlassen was zur späteren Rissbildung im Korn führt.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung der AKR, STARK & WICHT 2013**

Die Löslichkeit des  $\text{SiO}_2$  ist abhängig von der Kristallinität der  $\text{SiO}_2$ -Modifikation, Temperatur und dem PH-Wert. Je größer die Störungen des Kristallgitters sind umso leichter geht das  $\text{SiO}_2$  in Lösung. Des Weiteren wird amorphes Silikat leichter gelöst als kristallines. Bei einem hohen pH-Wert wird die Löslichkeit ebenfalls erleichtert. Ab einem pH-Wert von ca. 12 beginnt die Löslichkeit des Silikats (BERNINGER, 2004).

Bei Opalen ist die Struktur der Si – O – Si Brücken durch den Einbau von Hydroxidgruppen gestört. Dies führt zur Bildung von Silanolgruppen ( $\text{SiOH}$  bzw.  $\text{Si}(\text{OH})_2$ ), welche anfälliger auf eine AKR sind. Ähnliches ist bei Chalcedon zu beobachten. Die stabileren Si – O – Si Ketten (Siloxane) sind als die wahren Bausteine der Siliziumverbindungen zu betrachten. (WANG & GILLOT, 1991). Die Zeit zum Aufbrechen der Silanolgruppen beträgt ungefähr 28 Tage was die Zuverlässigkeit der Schnelltests bezweifeln lässt. Abhilfe kann ein längerer Schnelltest über die Dauer von 2 - 3 Monaten bringen (LATIFEE, 2013).

Die Schwächung der Gesteinskörnung durch die Silanolgruppen wird durch den Ablauf einer AKR nach WANG & GILLOT, 1991 gut beschrieben (Abbildung 2). Durch die Anlagerung von Alkali- oder Calciumionen an der Gesteinskörnungsoberfläche wird die Reaktion in Gang gesetzt. Die  $\text{OH}^-$  Ionen greifen in weiterer Folge die inneren Si – O – Si Brücken an und brechen diese auf. Der Vernetzungsgrad des Korns wird reduziert und die negativ geladenen  $\text{SiO}^-$  Gruppen werden durch die eindringenden Alkali Ionen neutralisiert. Sofern der Nachschub an Alkalihydroxiden vorhanden ist schreitet die Reaktion voran bis zur Bildung eines AKR Gels.

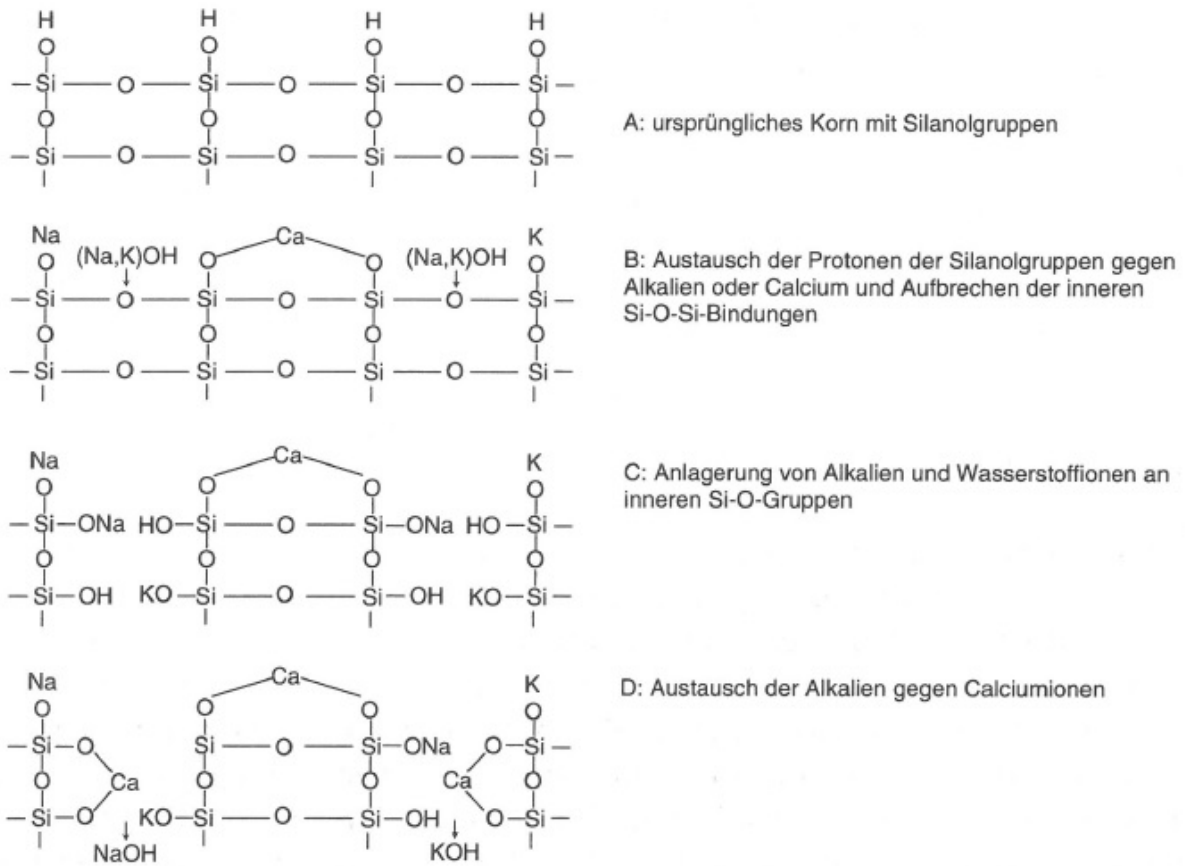


Abbildung 2: Reaktionsablauf nach WANG & GILLOT 1991

Nach Berechnungen von MTSCHEDLOW-PETROSJAN und BABUSCHKIN in BABUSCHKIN ET.AL., 1965 liegt die Kieselsäure in Form von  $\text{SiO}_3^{2-}$  in der Lösung vor. Bei zunehmenden pH – Wert steigt der gelöste Anteil. Aufgrund der vorhandenen Ca – Ionen kommt es nicht zur gewöhnlichen Polymerisation zu Kieselsäuretetraeder, sondern es folgt die Bildung von komplizierten Baugruppen in Form von SiO - Bändern, Schichten und Netzen. Die Quellfähigkeit eines Ca – haltigen AKR Gel könnte auf diese Baugruppen zurückzuführen sein (BELOV & MAMEDOV in BABUSCHKIN ET.AL., 1965).

## 1.2 Schädigungsmechanismus

Der Schädigungsmechanismus ist bis heute nicht exakt geklärt. Man kann die derzeit diskutierten Mechanismen in zwei Gruppen teilen. Zum einen die Mechanismen, welche durch Wasseraufnahme zum Quellen des AKR Gels führen. Andererseits gibt es Mechanismen der einseitigen Ionendiffusion, die zur Volumszunahme der reaktiven Körnern führt und in weiterer Folge ein Quelldruck aufgebaut wird.

Die Schädigung durch Wasseraufnahme des Gels, welches zum Quellprozess führt, wurde durch HANSEN, schon 1944 beschrieben. Diese Ansicht vertritt auch DENT GLASSER, 1979 und er gibt weiters an, dass die Gele eine gewisse Menge an Wasser aufnehmen können, ohne zu quellen aufgrund ihrer starren Struktur. In alkalischen Medien kommt es aber zur Auflockerung des Gitters durch die Anwesenheit von Hydroxidionen (DENT GLASSER, 1979; WANG & GILLOT, 1991).

Sehr umfassend hat sich POWERS & STEINOUR 1955 mit dem Thema auseinandergesetzt und ihre Hypothese ist, dass es je nach zur Verfügung stehender Menge an Kieselsäure (Opal), Calcium und Alkalien eine sichere oder unsichere Reaktion stattfindet. Bei der Reaktion der Porenlösung ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  und  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ) mit Opal bildet sich anfänglich ein C-N(K)-S-H Gel. Dieses Gel gilt als nicht expansiv und ist somit die sichere Reaktion. Die Reaktanten diffundieren in weiterer Folge durch dieses Gel hindurch Richtung Opal, welcher noch nicht reagiert hat. In Abhängigkeit vom Ca- Gehalt erfolgt nun die Bildung eines expansiven N(K)-S-H Gel was die unsichere Reaktion darstellt oder die sichere Reaktion zu einem C-S-N(K)-H Gel. Für die sichere Reaktion muss  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  heraus diffundieren damit Platz für die Gelbildung geschaffen wird. Die anderen Reaktanten müssen in den Reaktionsbereich hinein diffundieren. Weiters kann Ca mit dem N(K)-S-H Gel reagieren und weitere Alkalien freisetzen. Diese Idee wurde von HELMUTH & STARK, 1992 weiterverfolgt und es werden zwei Gelarten definiert. Einerseits ein nicht quellendes C-N(K)-S-H Gel sowie ein expansives N(K)-S-H Gel. Die Reaktionsprodukte sollen eine fixe Zusammensetzung aufweisen und die beobachteten Gele eine Mischung dieser beiden sein. Ab einem CaO – Gehalt von 53 % wird vermutet, dass kein Quellvorgang mehr stattfindet. Durch die Dehnung aufgrund der reagierenden Körnern kann eine Rissbildung durchaus stattfinden, der Hauptgrund sollte aber beim Quelldruck des Gels liegen.

Weitere Untersuchungen zwischen Ca- armen und Ca- reichen Reaktionsprodukten wurden unter HOU ET.AL., 2004 getroffen. Unter PREZZI ET.AL., 1997 & 1998 werden die Einflüsse der elektrostatisch geladenen Teilchen auf das Silika(gel)teilchen untersucht.

Den vorangegangenen Arbeiten, welche dem Calcium kein bzw. nur ein geringes Quellvermögen zusprechen, widersprechen Arbeiten die belegen, dass eine gewisse Grundmenge an Calcium für die Gelbildung notwendig ist oder auch die AKR bedingte Dehnung mit steigendem Calciumgehalt zunimmt (KAWAMURA & IWAHORI, 2004; WANG ET.AL., 2004). Somit werden andere Hypothesen benötigt, die den Schadensmechanismus besser erklären.

Untersuchungen von CHATTERJI ET.AL., 1986 & 1989 geben an, dass der einseitige Transport von Material in das Gesteinskorn die Ursache der Dehnung ist. Falls der Alkaligehalt in der Zementsteinmatrix aber gering ist, werden nur eine geringe Menge an Hydroxid, Calcium und Wasser in das Gesteinskorn diffundieren. Aufgrund des Ausfällens von C-S-H Phasen und der Größe des hydratisierten Calciumions wird eine weitere Penetration verhindert. Bei einem hohen Alkaligehalt in der Zementsteinmatrix können die kleineren hydratisierten N-Ionen mit Hydroxidionen und Wasser in das Gesteinskorn eindringen, ohne dass die Bildung eines unlöslichen Silikats stattfindet. Bei hohen Alkaligehalten und überschüssigem  $\text{Ca(OH)}_2$  kann nur eine begrenzte Menge der Alkalisilikakomplexe aus dem Gesteinskorn heraus diffundieren. Dies führt zu einem Anstieg des Quelldruckes. Sollte kein überschüssiges  $\text{Ca(OH)}_2$  vorhanden sein, sinkt die Rate der Diffusion von  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ , Ionen und Wasser in das Gesteinskorn während die Diffusionsrate von Alkalisilikakomplexen aus dem Gesteinskorn steigt und somit keine Quelldrücke aufgebaut werden.

Der Unterschied zu den Vorgängern ist trotz einiger Ähnlichkeiten, dass sich die Ionen von Orten mit geringerer Konzentration zu Orten mit höherer Konzentration hinbewegen. Erweitert wurde diese These durch neuere Erkenntnisse um die Bewegung der positiven Ionen zu den negativen Potentialquellen (CHATTERJI & THAULOW, 2000; CHATTERJI, 2005). Bei den Potentialquellen handelt es sich um die reaktiven Kieselsäurekörner und den Zementhydratationsprodukten. Die negative Quelle der reaktiven Kieselsäurekörner ist stärker im Vergleich zu den Zementhydratationsprodukten was zur Folge hat, dass die Kationen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) verstärkt zum Kieselsäurekorn wandern. Die höhere  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration im Gegensatz zur  $\text{Na}^+$ -Konzentration lässt sich aufgrund der doppelt positiven Ladung erklären.

Die Idee einer Calciumreichen Reaktionszone um die betroffenen Körner wurde ebenfalls von ICHIKAWA & MIURA, 2007 anhand der Analyse von Rissmustern und Härteverteilungen der AKR bedingter Schädigungen genauer betrachtet. Der Schadensmechanismus ist dadurch modifiziert worden, dass es sich bei der Reaktionszone um eine semipermeable Membran handelt. Dieser erlaubt keine Penetration des Alkalisilikagels, jedoch kann die alkalische Lösung durchdringen was in weiter Folge den Aufbau eines Quelldruckes im Korninneren bedingt.

### 1.3 Schadenscharakteristik

Die Schädigungen aufgrund einer AKR sind durch einige verschiedene Merkmale gekennzeichnet. Sehr bekannt ist eine Schädigung in Form von feinen netzartigen Rissen oder auch „Map Cracking“ (Abbildung 3a & Abbildung 3b) genannt (SHRIMER, 2005; KNAUTE, 2008; STARK & WICHT, 2013). Diese treten in dieser Form vorrangig bei unbewehrten Bauwerken auf, bei bewehrten Bauwerken verlaufen die Risse meist als Längsrisse entlang der Bewehrung (STARK D., 1991).



Abbildung 3: Beispiele für vernetzte Risse oder auch „Map Cracking“ a) An einem Brückenpfeiler SHRIMER 2005 b) Bauwerksaussenseite, KNAUTE 2008

Des Weiteren ist in Folge der Schädigung sehr häufig Ausscheidungen in Form einer Gelbildung im geschädigten Bereich erkennbar, welche in manchen Fällen bis zur Bildung von Geltropfen (Abbildung 4a) voranschreitet (HILL 2004; FERNANDES ET. AL., 2004). Aufgrund von Regenfällen kann es sein, dass kein Gel sichtbar ist, nichtsdestotrotz sind jedoch häufig Verfärbungen entlang der Rissflanken (Abbildung 4b) zu beobachten (PALMER ET. AL., 1992; MERZ & HAMMERSCHLAG, 2000). In einem Tunnel sollte aufgrund des nicht vorhandenen Regenwassers eine Gelbildung großflächig sichtbar sein (Abbildung 5a & Abbildung 5b), wodurch das Gel nicht abgewaschen werden sollte. Diese Merkmale sind makroskopisch oft nicht sofort sichtbar, wodurch eine Untersuchung mikroskopisch für die Früherkennung Abhilfe schaffen kann. Hier ist besser erkennbar, welche Mechanismen zur Schädigung geführt haben und ob eine AKR involviert ist oder ein anderer Schädigungsmechanismus die Schuld trägt (FREYBURG, 1997; FREYBURG & ERFURT, 2007).

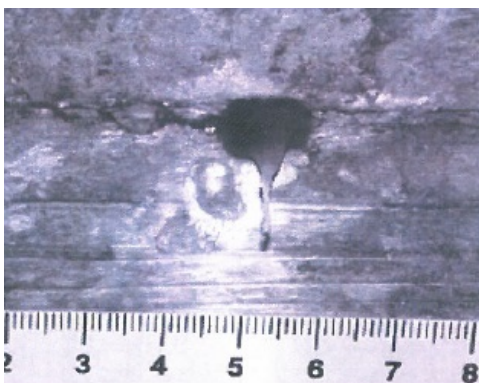
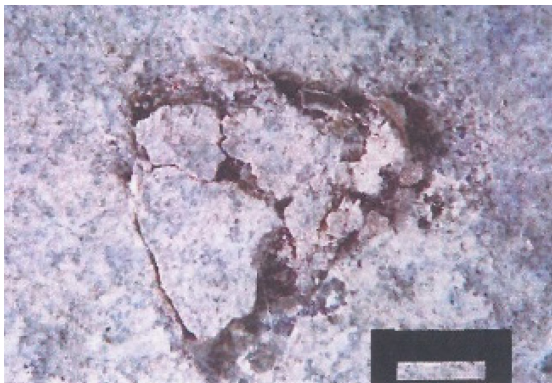


Abbildung 4: Schädigungsmerkmale: a) Bildung eines Geltropfen, FERNANDES ET.AL., 2004 b) Verfärbung der Rissflanken, PALMER FRENCH ET.AL., 1992



**Abbildung 5: a) Gelprodukte an der Tunnelwand b) Feuteaustritte mit Gelprodukten an der Tunnelwand, FREYBURG & ERFURT 2007**

Ein anderes Phänomen der Schädigung sind oberflächige Ausbrüche oder aber auch kreis-trichterförmige Ausplatzungen sogenannte „Pop Outs“ (Abbildung 6) (FERNANDES ET. AL., 2007; STARK & WICHT 2013).



**Abbildung 6: Pop Out bzw. Abplatzung vom Beton, Marke 2,5 mm, Stark & Wicht, 2013**

Sehr häufig tritt die AKR in Verbindung mit anderen Schädigungsmechanismen auf, z.B. mit Ettringit. Durch die Auflockerung aufgrund der AKR kann es zur Bildung von sekundärem Ettringit kommen. Weiters sind die Einflüsse von Frost-Tauwechsel, thermische Spannungen oder auch Einflüsse durch den Verkehr wichtig, welche ebenfalls zur einer Auflockerung des Betons führen können und somit die Türen für schädigende Mechanismen öffnen (STARK & WICHT, 2013). Ebenso ist zu erwähnen, dass das Schadensbild auch für die Schwindrissbildung in Zusammenhang mit unzureichender Nachbehandlung, bei Entmischungserscheinungen oder ungünstiger Betonzusammensetzung auftritt. Sehr häufig lässt sich die Ursache nicht einem Typus alleine zuordnen. Um eine korrekte Identifizierung der Schadensursache zu ermöglichen ist man auf die Hilfe von Probennahmen und Laboruntersuchungen angewiesen (PALMER FRENCH ET.AL., 1992).



## 1.4 Mikroskopische Schadenbetrachtung

Ein AKR induzierter Schadensfall lässt sich sehr gut mit Hilfe der Mikroskopie bestimmen. Die Mikrorisse können zu den verursachenden Gesteinskörner zurückverfolgt werden. Häufig sind Risse durch reaktive Körner beobachtbar, welche in weiterer Folge sich strahlenförmig in die Zementsteinmatrix ausdehnen. Im Vergleich dazu verläuft eine Ettringitschädigung so, dass sich ein System aus Rissen um das Korn bildet (STARK & WICHT, 2013). Des Weiteren treten AKR-bedingte Risse meist in Oberflächennähe auf und dringen häufig von der Oberfläche in den Zementstein ein. Der schematische Verlauf ist in den Abbildung 7a & Abbildung 7b ersichtlich welche die unterschiedlichen Verläufe der AKR Schädigung darstellen sollten (PALMER FRENCH ET.AL., 1992).

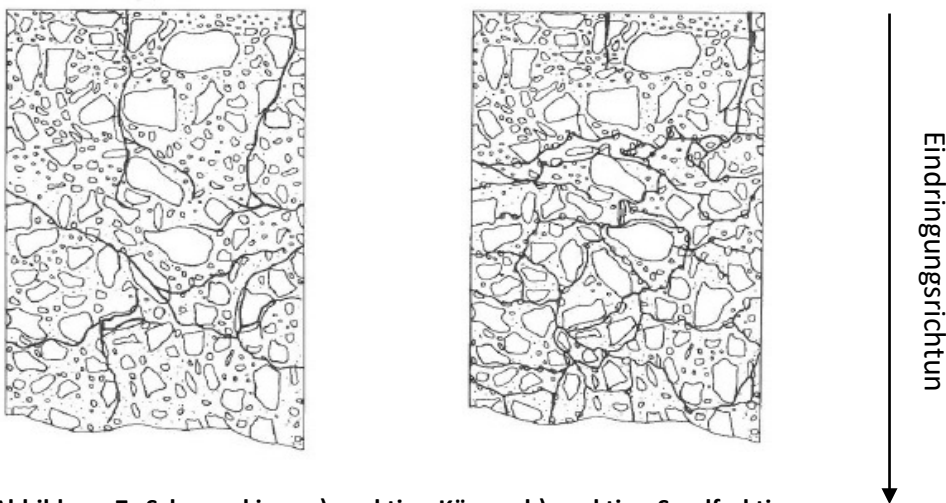


Abbildung 7: Schemaskizze a) reaktive Körner b) reaktive Sandfraktion, PALMER FRENCH ET.AL., 1992

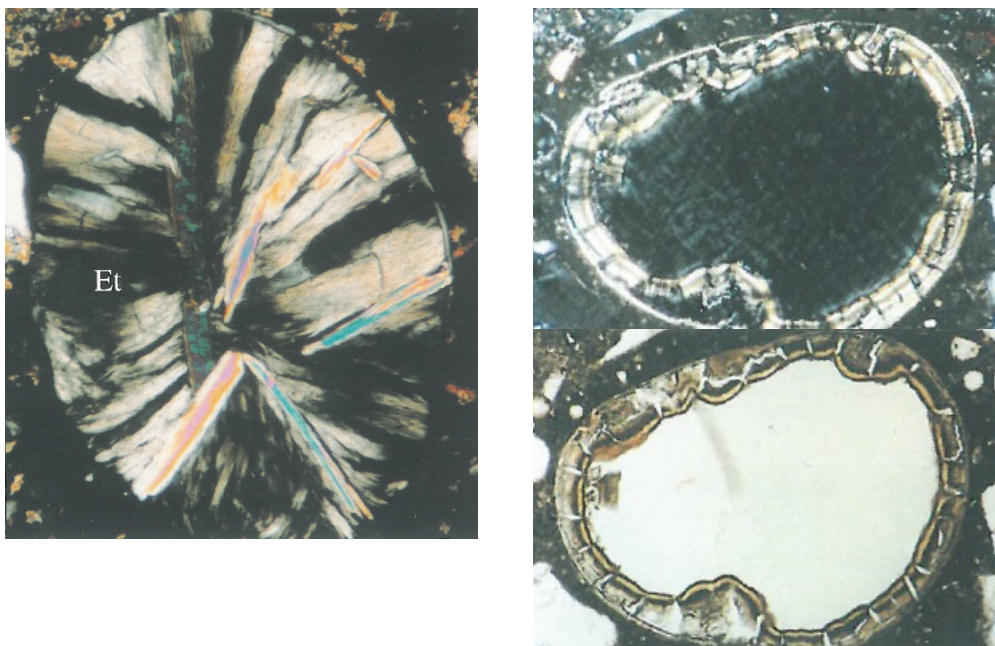
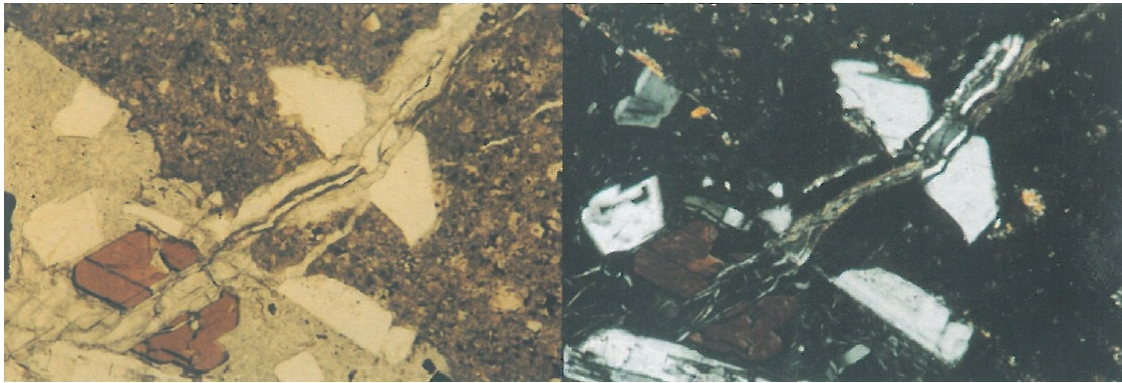
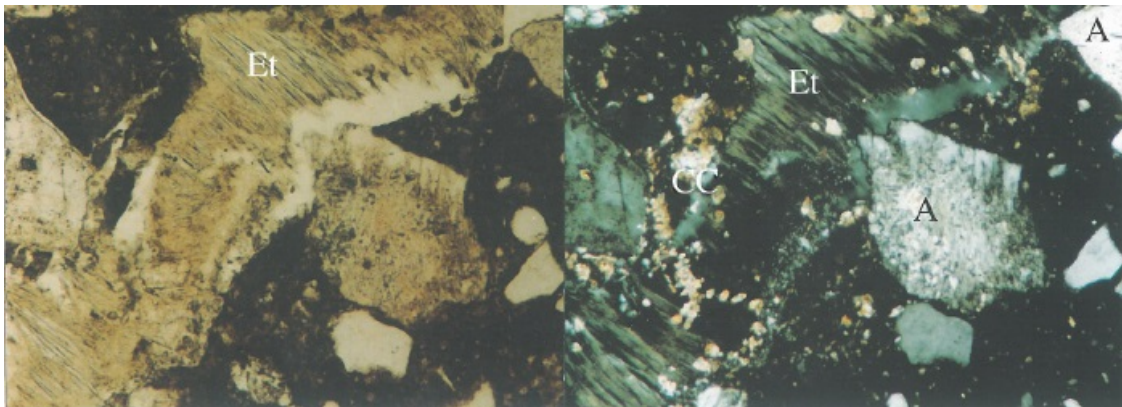


Abbildung 8: a) Luftpore gefüllt mit Ettringit, BB: 0,9 mm  
b) Luftpore mit AKR-Gel gefüllt, oberes Bild mit gekreuzten Polarisatoren, unteres Bild mit ausgeklappten Polarisatoren, BB: 1,4 mm, ST.JOHN ET.AL., 1998



**Abbildung 9: AKR Gel in einem Riss einer 60 Jahre alten Brücke, linkes Bild mit ausgeklappten-, rechtes Bild mit gekreuzten Polarisatoren, BB: 1,4 mm, ST. JOHN ET.AL., 1998**



**Abbildung 10: Etringitbildung in Rissen des 80 Jahre alten Lady Evelyn Lake Dam, linkes Bild mit ausgeklappten-, rechtes Bild mit gekreuzten Polarisatoren, BB: 0,9 mm, ST. JOHN. ET.AL., 1998**

Bei reaktiven Körnern sind meist die Rissbildungen vom Korn ausgehend die deutlich erkennbaren Erscheinungen. Die Bildung eines Reaktionsssaumes ist wesentlich subtiler und kann häufig nicht eindeutig zugeordnet werden. Anlösungserscheinungen ermöglichen es ebenso eine verdächtige AKR zu identifizieren (ST. JOHN, ET. AL., 1998; STARK, 2008). Färbemethoden unterstützen die Sichtbarkeit einer AKR deutlich (ST. JOHN, ET. AL., 1998; INGHAM 2011). Gelbildungen können im Falle einer AKR in den Dünnschliffen nachgewiesen werden, sofern es nicht zur Auswaschung bei der Herstellung des Dünnschliffes kommt. Produkte die während der schädigenden Reaktion gebildet werden sind häufig in den Luftporen anzutreffen (Abbildung 8), da hier freier Raum zur Verfügung steht. Das gebildete Gel kann im Kontakt mit der Zementsteinmatrix etwas verdunkelt sein wie in Abbildung 9a zu erkennen ist (ST. JOHN ET.AL., 1998). Im Unterschied zur Gelbildung bei der AKR bilden sich bei Etringit nadelige Kristalle aus was in Abbildung 10a & Abbildung 10b ersichtlich ist.

Eine Alternative zu den durchlichtmikroskopischen Untersuchungen ist die Verwendung von stereo- bzw. auflichtmikroskopischen Untersuchungen von Anschliffen. Diese Methode hat den Vorteil, dass ein größerer Bereich schnell untersucht werden kann. Interessante Bereiche werden identifiziert und später im Detail mit der Durchlichtmikroskopie betrachtet (PALMER FRENCH ET.AL., 1992; DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON, 2003). Für die Unterscheidung zwischen einer AKR und einem sekundärem Etringit sind die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) sehr hilfreich.

## Stressquarz

Ein Stressquarz entsteht durch tektonische Beanspruchung unter hohen Drücken und Temperaturen. Aufgrund der metamorphen Überprägung kann es beim Quarz zur dynamischen Rekristallisation kommen und dadurch auch zur Bildung von Subkörnern die untereinander leicht verdreht zueinander liegen. Dadurch kommt es zur undulösen Auslöschung in der Betrachtung unter dem Mikroskop im gekreuzten polarisierten Licht.

Nach FREYBURG & BERNINGER, 2000 kommen diese in reaktiven Gesteinen wie Grauwacken, Opalstein, Quarzite, Glimmerschiefer und Gneis vor jedoch auch in großen Einzelkörnern in Kiesen. Mit den Versuchen von Mörtelschnelltests und Nebelkammerlagerungen (FREYBURG & SCHLIFFKOWITZ, 2006) kommt man zum Ergebnis, dass die Stressquarze zu der Gruppe der slow/late reaktiven Minerale gehört und auch innerhalb dieser Gruppe als relativ reaktionsträge zu betrachten sind. Des Weiteren gelten Stressquarze als prinzipiell reaktiv.

Es wurden mehrere Versuche gestartet die Stressquarze zu charakterisieren (FREYBURG & BERNINGER, 2000; SCHLIFFKOWITZ, 2005; FREYBURG & SCHLIFFKOWITZ, 2006) wobei die letzte Arbeit mit der Klasseneinteilung (Abbildung 11), die wahrscheinlich bedeutendere ist. Die Stressquarze können in sechs Klassen unterteilt werden je nach Schädigungsgrad. Klasse I soll kaum Einflüsse aufgrund der AKR besitzen in Form von Rissen und Anlöseerscheinungen, während die anderen Gruppen daran beteiligt sind (FREYBURG & SCHLIFFKOWITZ, 2006).

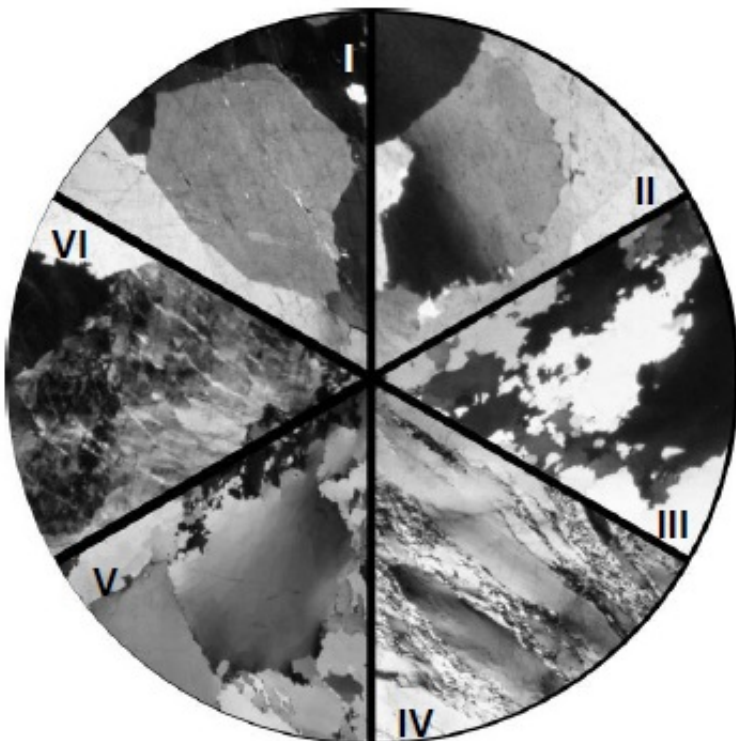


Abbildung 11: Klassifizierungsschema nach FREYBURG & SCHLIFFKOWITZ, 2006

## **1.5 RILEM**

Die RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) wurde 1947 gegründet, mit dem Ziel der wissenschaftlichen Zusammenarbeit im Bereich Baumaterialien und Baustrukturen. Derzeit sind Laboratorien und Wissenschaftler in über 70 Ländern Mitglieder der RILEM. Diese Mitglieder haben das Ziel, das Wissen in diesem Bereich zu verfeinern und verbessern. Hierfür werden auch Arbeitsanweisungen und Verbesserungen älterer Testmethoden ausgearbeitet.

Für die AKR wurden ebenfalls Vorschläge eingebracht, welche unter den spezifischen Kürzeln AAR- (Alkali-Aggregat Reaction) zu finden sind. Die Vorschläge z. B. zu Testmethoden sind unter AAR – 1 bis AAR – 5 ersichtlich. Des Weiteren ist die RILEM versucht die alkalireaktiven Gesteine weltweit zu erfassen und daraus einen Katalog bzw. Atlas zu erstellen (RILEM, 2015).

### **Petrographischer Atlas der RILEM**

Der petrographische Atlas und die Methodik dahinter ist in der RILEM Recommended Test Method AAR – 1 zu finden. In Tabellen sind verschiedenste Gesteinstypen und ihr Verhalten bezüglich der Alkalireaktivität aufgelistet sowie deren Herkunftsländer erfasst. Des Weiteren wird eine Unterteilung in drei Klassen mit Unterklassen durchgeführt und die Gesteine werden denjenigen zugeteilt (RILEM, 2003). Der petrographische Atlas wird laufend erweitert mit der letzten „unedited Version“ von FERNANDES ET.AL., 2016 in RILEM ACS-219. Die untersuchten Gesteine sind im Dünnschliff abgebildet mit der Vermutung, welches Gesteinskorn für die AKR verantwortlich ist.

Die untersuchten Gesteine sind nicht im RILEM Atlas angeführt. Eine Übernahme von Ergebnissen und Erkenntnissen aus den untersuchten Gesteinen in das Schema des RILEM Atlas wäre zu befürworten, erfordert aber zusätzliche vertiefte Untersuchungen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit waren.



## **1.6 Geographische Lage und geologischer Überblick**

Die Proben wurden aus dem geographischen Gebiet der Tuxer und Zillertaler Alpen entnommen, die Probenahme wird noch genauer in Kapitel 4 beschrieben. Ein Überblick über das Gebiet ist in Abbildung 12 dargestellt.

Die Tunneltrasse verläuft durch den Zentralbereich des Ostalpin und durchschneidet das westliche Tauernfenster in der Nähe der westlich gelegenen Brennerabschiebung (Abbildung 12). Um den Kern des Tauernfensters, bestehend aus subpenninischen Einheiten des Venediger Deckenkomplexes, liegen die Einheiten des Ultrapenninikum und Penninikum. Nach Norden begrenzt das Probengebiet der Innsbrucker Quarzphyllit, welcher jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen ist. Im Süden auf italienischer Seite wird das Gebiet durch den Brixner Granit begrenzt. Geologisch befindet man sich nach Überschreiten der Periadriatischen Naht (PN) in Richtung Süden auf dem Südalpin (BRANDNER ET. AL., 2008).

Durch das Probengebiet verlaufen einige große Störungssysteme bzw. begrenzen es (Abbildung 12). Im Norden geschieht dies durch die Inntalstörung deren Seitenäste auch weiter südlich anzutreffen sind. Parallel mit gleicher Orientierung verlaufen durch das Tauernfenster die Olpererstörung und die Greinerstörung. Nach Westen begrenzt durch die Brennerabschiebung und der Wipptalstörung. Im Süden befindet sich die Deckengrenze zwischen Ost- und Südalpin mit der PN, hier die Pustertalstörung (BRANDNER ET. AL., 2008). Die Störungssysteme stehen in sehr großer Wahrscheinlichkeit mit der Hebung des Tauernfensters in Verbindung (HÖGGERL, 2001).

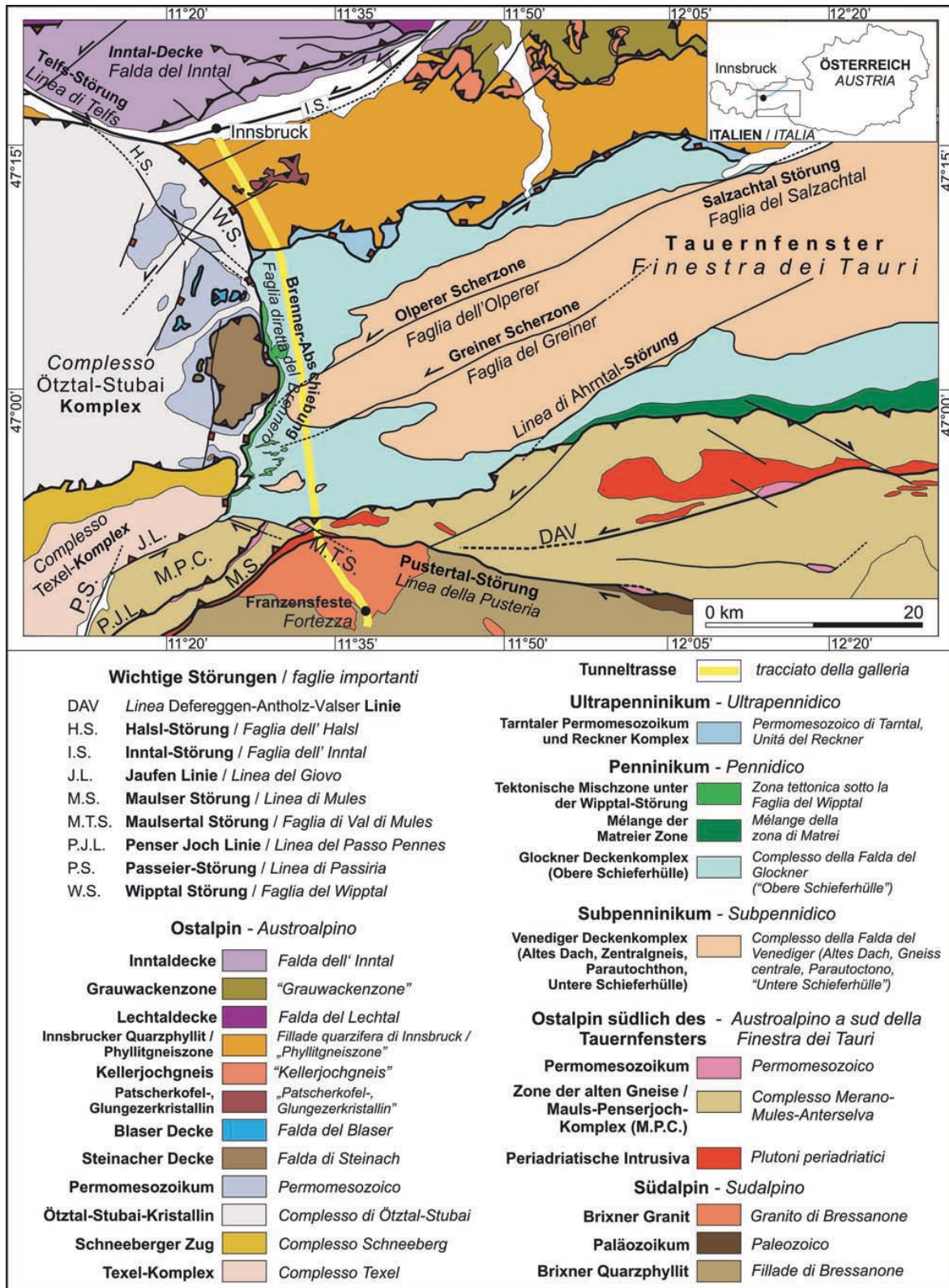


Abbildung 12: Geologischer Überblick über das Probengebiet, BRANDNER ET.AL., 2008

## **1.7 Ziel der Arbeit**

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, für unterschiedliche Gesteine ein Verfahren zur Beurteilung einer stattfindenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion auszuarbeiten. Hierfür wird vorerst ein kurzer Überblick über die derzeit verwendeten Methoden erstellt und der derzeitige Stand der Technik erfasst.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der petrographischen Beschreibung der untersuchten Gesteinsproben. Diese erfolgt durch die Beschreibung der Handstücke und Fels-Bohrkerne makroskopisch und mikroskopisch im Dünnschliff. Ein weiterer wichtiger Punkt war das Auffinden und Identifizieren von möglichen, wahrscheinlichen und eindeutig zuordenbaren AK-Reaktionen, da in Österreich bis dato diese Thematik nicht mit der notwendigen Offenheit und Realitätsbetrachtung angegangen und behandelt wurde.

Für die Initiierung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion werden im Rahmen dieser Arbeit aus dem Probenmaterial Mörtelprismen nach ÖNORM B 3100 Ausgabe 2008 hergestellt und geprüft. Im Anschluss werden aus Mörtelprismensegmenten Dünnschliffe hergestellt, um eine Reaktion unter dem Mikroskop zu untersuchen. Falls eine Reaktion unter dem Mikroskop vermutet oder festgestellt wurde, erfolgte eine vertiefte Untersuchung mit Hilfe des Raster-Elektronenmikroskops zur Verifizierung der vermuteten Alkalikieselsäurereaktion (AKR).

Als Verifikation der vorangegangenen Ergebnisse und deren Interpretationen wird als weiteres, anerkanntes Nachweisverfahren die Möglichkeit der Schnelltest-Prüfung durch Bestreichen von vorbelasteten Prismen mit Uranylacetat untersucht.

Um die Dokumentation zu standardisieren, wird ein Formular in Anlehnung an die Applied Petrographie Group SR2 (EDEN, 2010) erstellt. Ziel ist es, eine Korrelation zwischen der AKR in den Dünnschliffen der Mörtelprismen zu jenen des Probenmaterials herzustellen, um eine bessere Vorhersage der Ursache der Reaktion zu erwirken. Im Rahmen der Arbeit wird auch überprüft ob eine Reaktion zustande kommt, indem man nur das Probenmaterial (Gesteinskörnung) unter den Bedingungen des ÖNORM Schnelltest in Natronlauge einlegt. Zusätzlich wird bei ausgewählten Gesteinsproben die Möglichkeit untersucht, einer AKR durch gezielte Wahl einer Bindemittelkombination vorzubeugen.

## 2. Methodik zur petrographischen Bestimmung

### 2.1 Petrographische Beschreibung

Die Beschreibung der Gesteine erfolgt durch die makroskopische Betrachtung des Probenmaterials (Felskerne und Steine) und anschließender mikroskopischer Untersuchung. Sollten durch diese Beobachtungen die Gesteine nicht identifiziert werden können, muss als weitere Methoden auf eine RFA, XRD zurückgegriffen werden. Zur verbesserten Dokumentation werden alle Proben fotografisch festgehalten.

### 2.2 Mikroskopie und Präparation

Die Herstellung der petrographischen Dünnschliffe erfolgt durch das Zuschneiden der Bohrkerne und Steine an einer Gesteinskreissäge mit einem Kunstdiamanten besetzten Sägeblatt zu passenden Klötzchen. Die Klötzchen werden an einem Glasplättchen (25 x 50 mm) festgeklebt und anschließend abgetrennt wodurch man einen ca. 50µm dicken Dünnschliff erhält. Als Kleber wird Epoxidharz Araldit DBF und als Härter REN HY 956 verwendet im Verhältnis 5:1. Anschließend wurden die Dünnschliffe geläppt mit den Schleifstufen 12 µm, 9 µm, 3 µm und teilweise auch 1 µm. Als Läppmittel wurde eine Diamantsuspension verwendet. Die Dünnschliffdicke bei Fertigstellung beträgt ca. 30 µm.

Die Dünnschliffe der Mörtelprismen folgen einem ähnlichen Herstellungsmuster, wobei die Klötzchen aus dem Zentrum der Prismen entnommen wurden. Als Kühlmittel während des Schneidens wurde eine Ethanollösung (Herba Ethanol S96% VG1%, UN 1170) verwendet. Die Ethanollösung wurde verwendet, um die Zufuhr von Wasser bei der Herstellung der Dünnschliffe zu verhindern damit keine zusätzliche AKR hervorgerufen wird. Als Endstufe beim Läppen wurde als Schleifmittel eine Diamantsuspension von 1µm verwendet. Anstatt von Wasser wurde ebenfalls eine Ethanollösung während des Läppens verwendet.

Die erstellten Fotos der Dünnschliffe besitzen eine Bildbreite (BB) von:

Vergrößerungsfaktor	Bildbreite
2,5	4 mm
5	2 mm
10	1 mm
20	0,5 mm
50	0,2 mm

Tabelle 1: Übersicht der einzelnen Bildbreiten aufgrund der Vergrößerungsfaktoren



Weitere verwendete Bezeichnungen:

xN... Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren

IIN... Durchlicht, ausgeklappte Polarisatoren

AL... Auflicht, ausgeklappte Polarisatoren

xAL... Auflicht, gekreuzten Polarisatoren

Die Dünnschliffe werden zur Sicherheit in einer Holzbox mit Silikagelkügelchen aufbewahrt, um eine Feuchtigkeitzufuhr zu vermindern.

### **2.3 Klassifikationsschema**

Die Dünnschliffe werden in ihrem Modalbestand erfasst und das jeweilige Gestein identifiziert. Des Weiteren wird im Besonderen auf den Stressquarz geachtet; dafür wird die Undulösität betrachtet mit den Abweichungsstufen gering (0 - 20%), mittel (20 - 40%) und stark (40 - 60%). Ein weiteres Augenmerk liegt auf die Korngrenzen und Druckrisse im Gestein. Zuletzt wird noch die Korngröße der Quarze dokumentiert.

### **3. Gesteinsschnelltest AKR**

#### **3.1 AKR - Schnelltest nach ÖNORM B 3100**

Die Durchführung der Schnelltests erfolgt nach ÖNORM B 3100 Ausgabe 2008. Das Probenmaterial wurde mit Hilfe eines Laborbrecher der Montanuniversität Leoben zerkleinert um das notwendige Material nach Kapitel 5.3 Tabelle 2, der Norm zu erhalten.

Die Prismen wurden im Labor der Materialprüfanstalt Strass, Pöyry Infra GmbH., Strass im Zillertal hergestellt. Abweichend zur Norm wurden nur 2 statt 3 Prismen aus dem Probenmaterial gefertigt und getestet, um die große Anzahl der Proben in einem überschaubaren Zeitraum bearbeiten zu können.

Allgemein gilt, dass sich eine Dehnung von Mörtelprismen aus verschiedenen Einflussfaktoren zusammensetzt. Die in diesem Zusammenhang wichtigsten Einflussfaktoren sind schädigende Reaktionen im Zementstein wie die AKR – Gelbildung, Ettringitbildung, Volumenänderung zufolge der Hydratation des Bindemittels, sowie die Porosität der Zementsteinmatrix.

#### **3.2 Nachweis der Reaktion mit Uranylacetat**

Der Nachweis der Reaktion erfolgt nach der Methodik des „Laboratoire central des ponts et chaussées“ (GUDEON, ET.AL., 1993). Um den Versuch in den Laboratorien der Montanuniversität durchzuführen wird die ursprüngliche Zusammensetzung der Lösung von 95 ml Wasser, 5 ml 30% Essigsäure und 10 mg Uranylacetat verändert. Die verwendete Lösung enthält nur 5 mg Uranylacetat, um deutlich unter den Grenzwerten der Strahlenschutzverordnung zu bleiben.

Die Durchführung des Versuches durch Bestreichen der Proben mit dem Lösungsmittel erfolgt unter Anwesenheit des Strahlenschutzbeauftragten der Universität Leoben. Nach 5 Minuten Einwirkzeit wird das Lösungsmittel wieder von der Probe entfernt und anschließend erfolgt der Nachweis der Reaktion in einem abgedunkelten Raum mit einer UV-Lampe, mit einer Wellenlänge von 254 nm.

#### **3.3 Methodik zur Laugeneinlegung**

Die Einlagerung der Prismen erfolgte nach ÖNORM B 3100.

Ergänzend dazu sei noch erwähnt, dass auch reine Gesteinsklötzchen aus der Dünnschliffpräparation, ohne Bindemittel, in Natronlauge eingelagert wurden. Es konnten dabei keine Reaktionen am Gestein beobachtet werden.

#### **3.4 Verwendete Bindemittelkombinationen**

Abweichend zum Ö-Normentest wurde anstelle des CEM I 42,5 R die alternative Bindemittelkombination CEM I 42,5 R C3A frei mit CEM III B 32,5 N SR im Mischungsverhältnis 1 zu 2 eingesetzt.

## 4. Probenbeschreibung

Die untersuchten Proben wurden einerseits aus Felsbohrkernen entnommen. Die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 13 & Abbildung 14 ersichtlich. Die Felsbohrkernproben des Brixner Granits und des Tonalits stammen aus dem italienischen Bereich (Abbildung 14) der Bohrung Mu - B 04/05 S. Das S bei den Bohrungen steht für eine Schrägbohrung.

Andererseits wurden für die Untersuchung der mittleren Bündner Schiefer auch Sammelproben aus einem zugänglichen Haufwerk herangezogen.

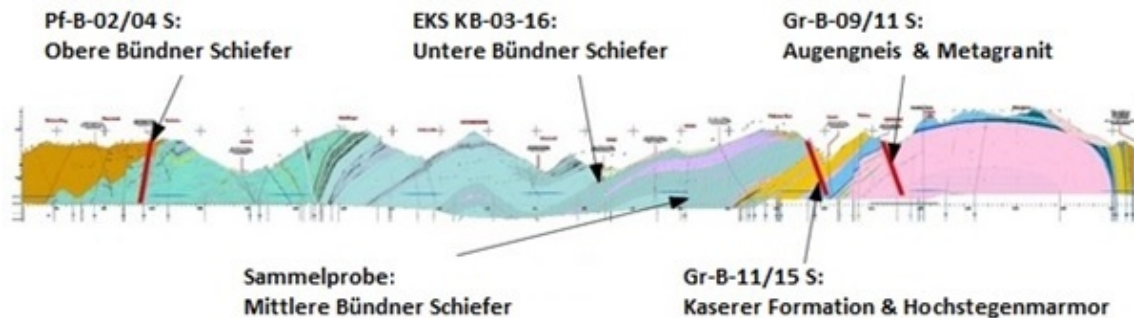


Abbildung 13: Lage der Probenorte auf der österreichischen Seite, BRANDNER ET.AL., 2008

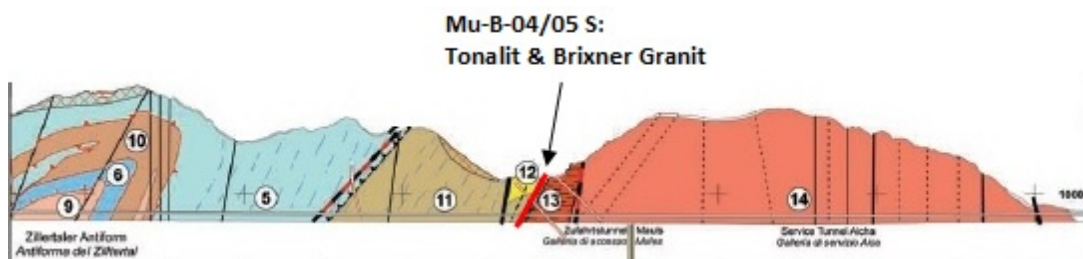


Abbildung 14: Lage der Probenorte auf der italienischer Seite, BRANDNER ET.AL., 2008

Ein guter Überblick über die durchgeführten Arbeiten liefert Tabelle 2:

<u>Probenname</u>	<u>Gefertigte Dünnschliffe</u>	<u>Anzahl der Mörtelprismen Einlagerung in Natronlauge gemäß ÖNORM B 3100</u>	<u>Dünnschliffe nach ÖNORM B 3100</u>	<u>Dünnschliffe an Prismen der Bindemittelkombination</u>	<u>untersuchte Dünnschliffe mit dem REM</u>
UBS_1	3	4 + 2 BMK	8		
UBS_2	3	2 + 2 BMK	5	1	2
UBS_3	3	2 + 2 BMK	6		
MBS_1	8	2 + 2 BMK	5	1	3
OBS_1	3	2 + 2 BMK	2	1	1
OBS_2	3	4 + 2 BMK	4		2
MG	2	2	2		
KF	2	2 + 2 BMK	2		
BG	2	2	2		
HM_1	2	4	2		1
HM_2	3	4	2		
AG	2	4	2		
TO	2	2	0		
Gesamt	38	46	42	3	9

**Tabelle 2: Übersicht über die erstellten Dünnschliffe, Mörtelprismen sowie der Untersuchung mit dem REM**

Erklärung der Abkürzungen:

UBS... untere Bündner Schiefer

MBS... mittlere Bündner Schiefer

OBS... obere Bündner Schiefer

MG... Metagranit

KF... Kaserer Formation

BG... Brixner Granit

HM... Hochstegenmarmor

AG... Augengneis

TO... Tonalit

BMK... Prismen der Bindemittelkombination

REM... Rasterelektronenmikroskop

## **4.1 Untere Bündner Schiefer**

### **4.1.1 Untere Bündner Schiefer Kernprobe 1**

#### **4.1.1.1 Makroskopische Betrachtung**

Das Probenmaterial der Kernproben wird in weiterer Folge mit UBS 1 bezeichnet. Bei der Kernprobe (Abbildung 15) handelt es sich um ein geschiefertes Gestein mit mehreren unterschiedlich mächtigen Quarzgängen und kleineren Quarzknauer. Die Festigkeit des Gesteins ist relativ hoch, was an der Intaktheit längerer Kernstücke zu erkennen ist. Die relativ hohe Festigkeit für einen Schiefer stammt sehr wahrscheinlich durch die Verkittung mit Karbonat (Kalzit). Im Unterschied zur Kernprobe UBS 2 ist ein geringerer Quarzgehalt sichtbar. Der Hellglimmeranteil scheint in einem ähnlichen Bereich zu liegen. Pyrite sind ebenfalls zu erkennen und häufig zerschert. Der Graphitanteil liegt nach Aufbereitungsergebnissen <1%.

Die Kernauslage erfolgt willkürlich, da kein Foto von der Kernlagerung in der Kiste vorhanden ist. Die Kernlänge beträgt ca. 4 x 0,5 m.



**Abbildung 15: Kernmaterial UBS 1, Dünnschliffe wurden aus dem rot umrandeten Bereich hergestellt.**

#### 4.1.1.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung der Probe wurden drei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptgemengteil ist Quarz mit 67,7%. Als Nebengemengteil tritt Karbonat (Kalzit) mit 17,3% und Muskovit mit 13,7% auf. Accessorien sind Pyrit (1,4%) und Graphit <1%.

Im Vergleich zu UBS 2 ist hier der Anteil an Karbonaten und Muskovit erhöht und es treten vermehrt Pyrite auf. In dieser Gesteinsprobe ist zu erkennen, dass die Korngrenzen der Quarze sehr häufig suturiert sind (Abbildung 16, Abbildung 17 & Abbildung 18). In den Zwischenräumen tritt ähnlich wie zuvor Muskovit und Karbonat auf. Eine Einregelung der Muskovite erfolgt scheinbar NW-SO.

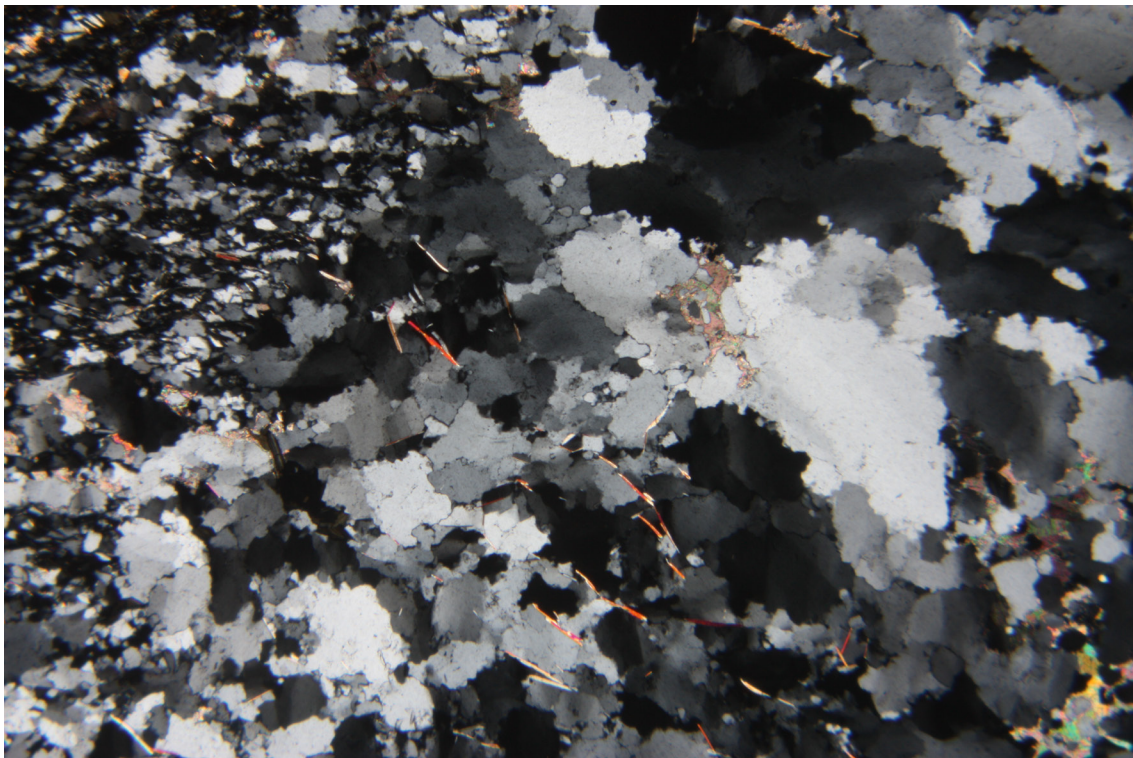
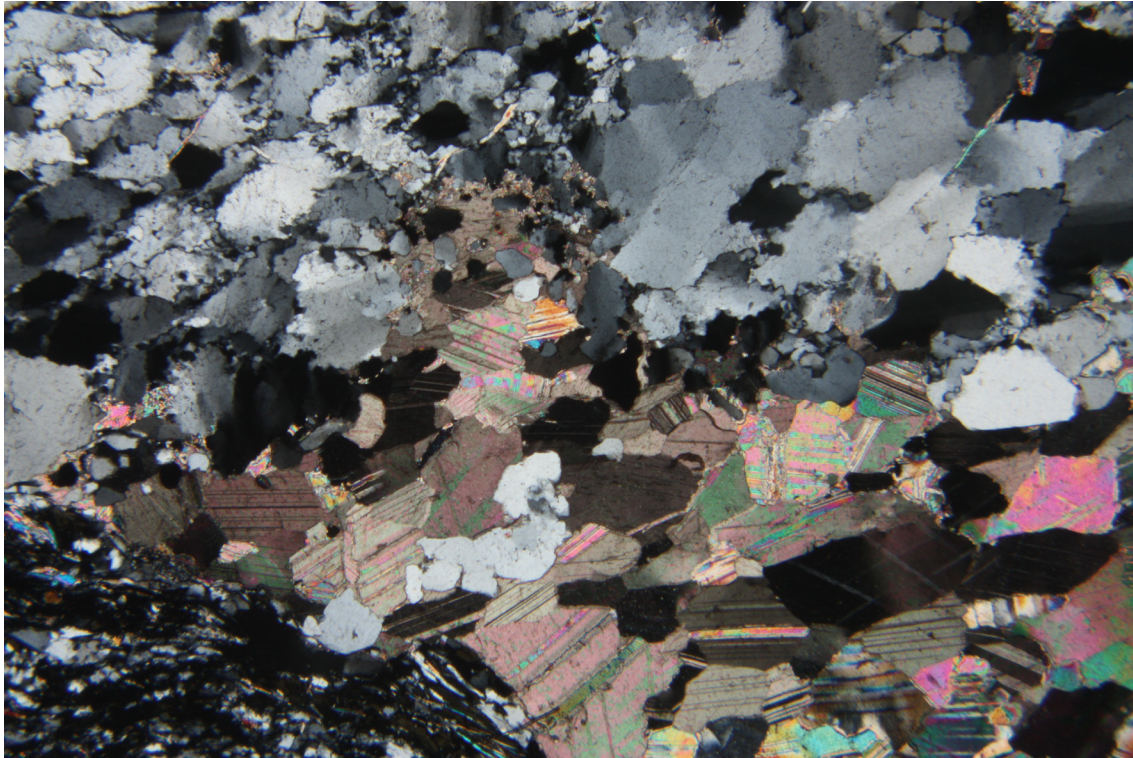


Abbildung 16: Suturierte Korngrenzen der Quarze, Muskovite und Karbonate fein verteilt, BB: 4mm

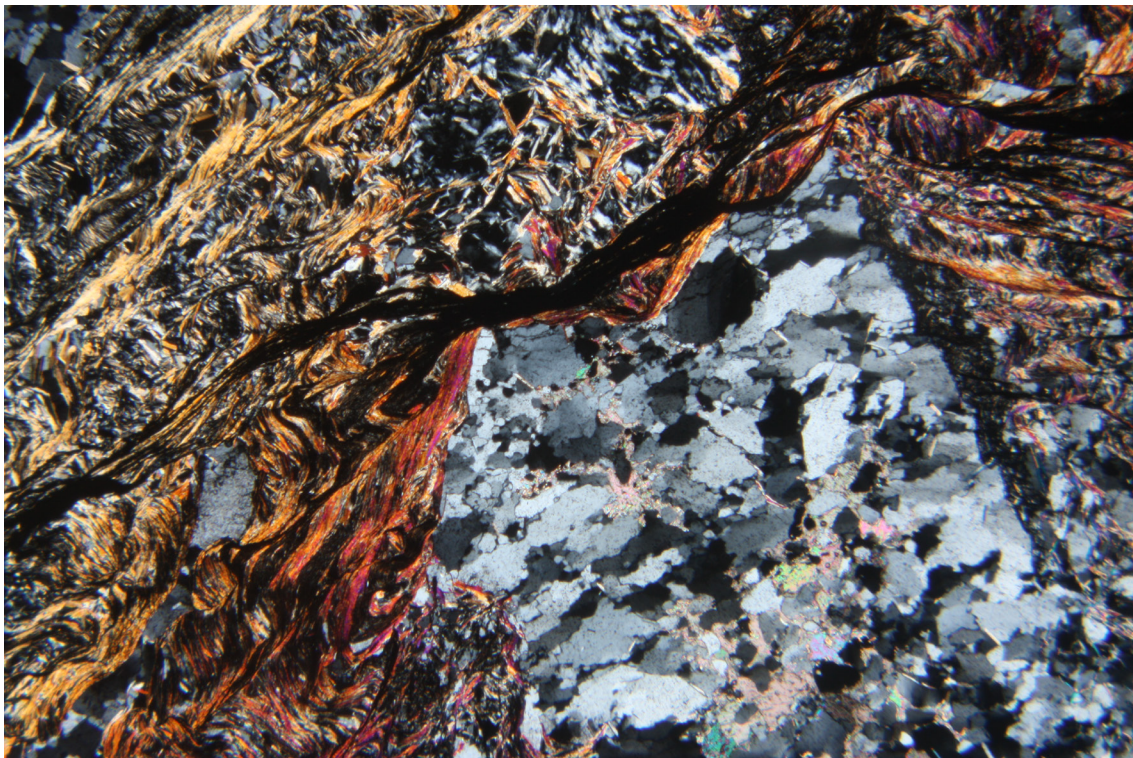
Generell kann man wieder unterschiedliche Korngrößen beobachten (Abbildung 16 & Abbildung 17). Bei den kleineren Quarzen kann es sich auch um Rekristallisate handeln. Die Karbonate können in den Klüften auftreten oder auch deutliche Kristallformen bilden (Abbildung 17). Die Quarze mit einer Größe von ca. 0,1 – 0,5mm neigen auch hier eher zu einer mittleren Undulösität, während die kleineren eher zu einer geringen Undulösität neigen.





**Abbildung 17: Suturierte Quarze, Karbonatkristalle, BB: 4mm**

Große Quarzkristalle wurden durch die Scher- Druckbeanspruchung deformiert und bilden Subkristalle, teilweise kommt es zur Abtrennung von Mineralbruchstücken (Abbildung 18). In den frei gewordenen Zwischenräumen kann die Bildung von Karbonaten erfolgen.



**Abbildung 18: Großer Quarz in Scherzone, BB: 4mm**



#### 4.1.1.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Wie schon erwähnt, ist ein ähnliches Verhalten der UBS Dünnschliffe zu beobachten, bei einer dieser Proben ist jedoch die strukturelle Schädigung eines Quarzes hervorragend ersichtlich. In Abbildung 19 ist zu sehen, dass der Quarz durch dunklere Lamellen durchzogen ist, was einem netzähnlichen Muster entspricht. Des Weiteren ist in der rechten Hälfte des Quarzes ein größerer Riss durch das Korn ersichtlich.

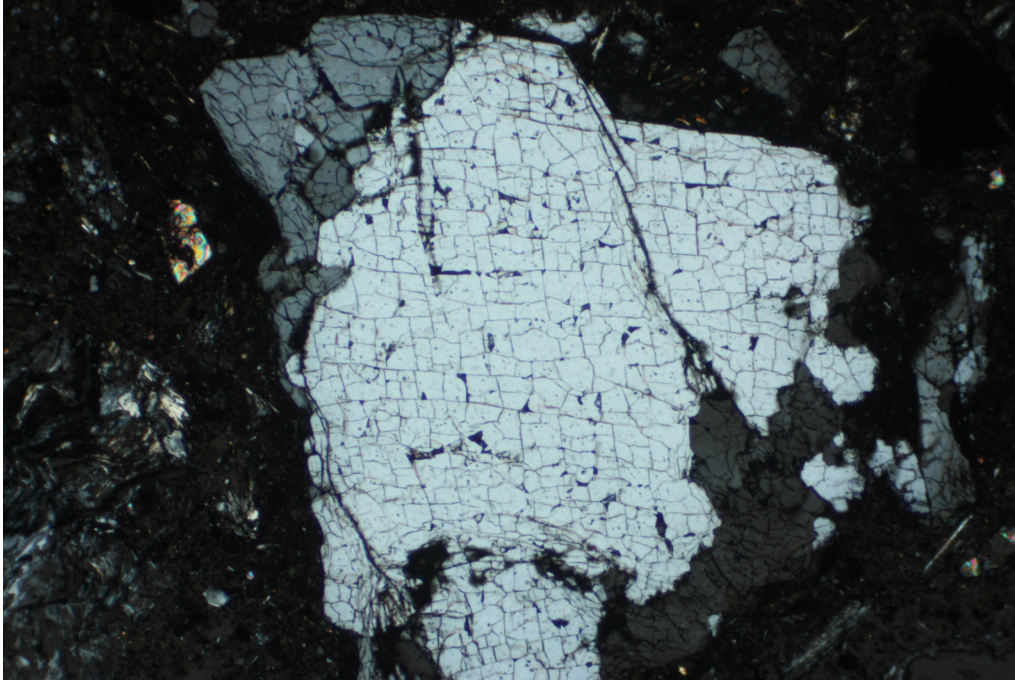


Abbildung 19: Quarz durch netzartiges Rissmuster beschädigt, größere Risse in den Randbereichen, x5, xN

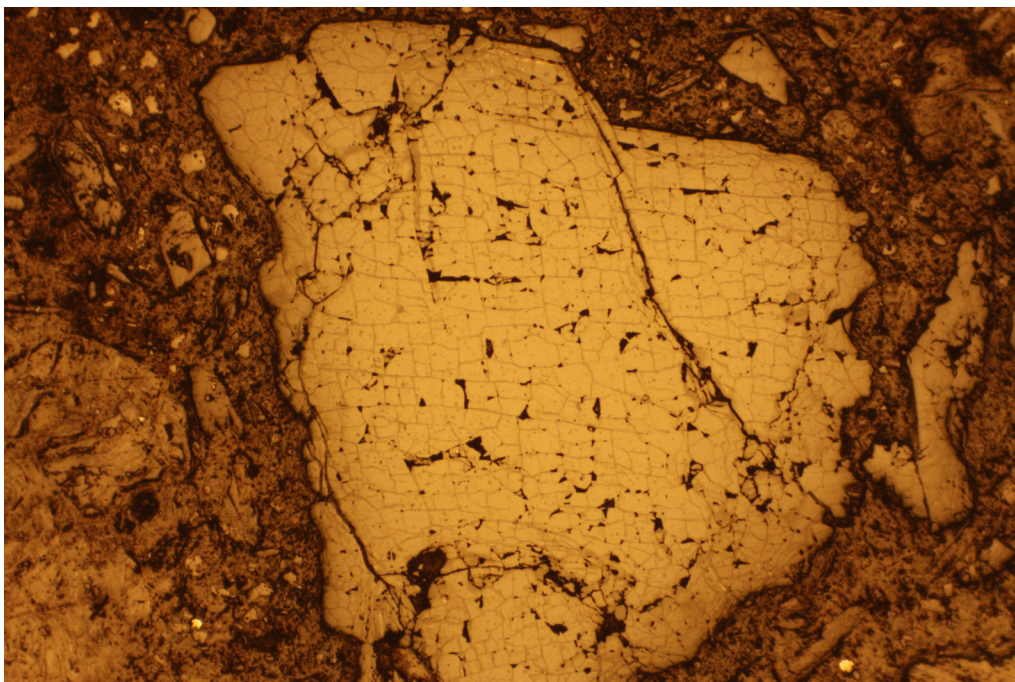
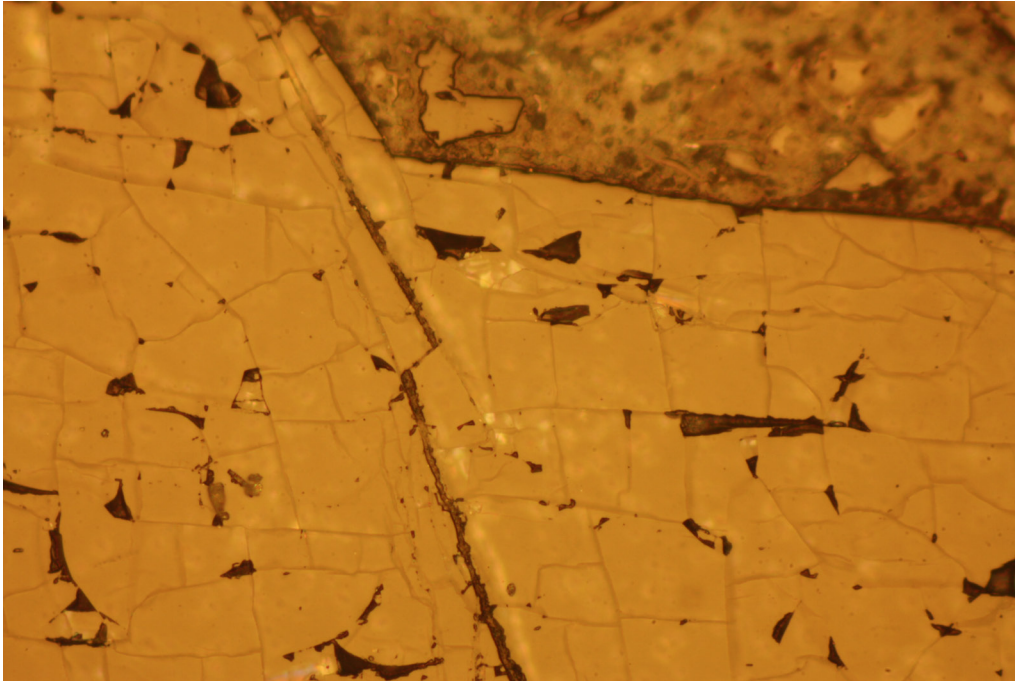


Abbildung 20: Bessere Sichtbarkeit der Schädigung, x5, AL



Im Auflicht (Abbildung 20) ist die Beschädigung besser sichtbar und die Korngrenzen besser einsehbar. Die umliegenden Körner sind ebenfalls leicht beschädigt. Eine Besonderheit hier ist die Schädigung eines großen Quarzkorns. In der Detailansicht in Abbildung 21 sind die versteckten Risse besser ersichtlich, welche erst mit Hilfe der REM Betrachtung eindeutig als Risse zu erkennen sind. Im Riss kann eine Gelfüllung vermutet werden.



**Abbildung 21: Detailansicht des beginnenden Risses in rechter Mitte sowie bessere Sichtbarkeit der Schädigung des Quarzes, x20, AL**

## 4.1.2 Untere Bündner Schiefer Kernprobe 2

### 4.1.2.1 Makroskopische Betrachtung

Das Probenmaterial wird in weiterer Folge mit UBS 2 angesprochen. Wie in Abbildung 22 ersichtlich ist, besteht das Material zu 2/3 aus geschiefertem Gestein und zu 1/3 sekundärer Quarzgänge. Die graue Färbung ist auf den Graphit zurückzuführen, welcher nach Aufbereitungsergebnissen unter 1% liegt. Der Quarzgehalt dominiert auch im übrigen Gestein, was einen großen Unterschied im Vergleich zu den Proben der MBS darstellt. Das Gestein bricht bevorzugt entlang der Schieferungsflächen. Es befinden sich vorrangig zerschernte Pyrite in den Klufflächen und zerstreut sind intakte Pyrite sichtbar. Im geschieferten Bereich ist der Anteil an Hellglimmer größer im Vergleich zum Quarzgang. Biotit ist nicht erkennbar.

Für die weitere Untersuchung hat der geschieferte Bereich des Kernes Vorrang, weswegen die Dünnschliffe zweimalig zum geschieferten Bereich und einmal zum Übergangsbereich des Quarzanges hergestellt wurden. Die Probenahme erfolgte willkürlich und nicht gezielt. Die Gesamtlänge beträgt ca. 1,5 m.

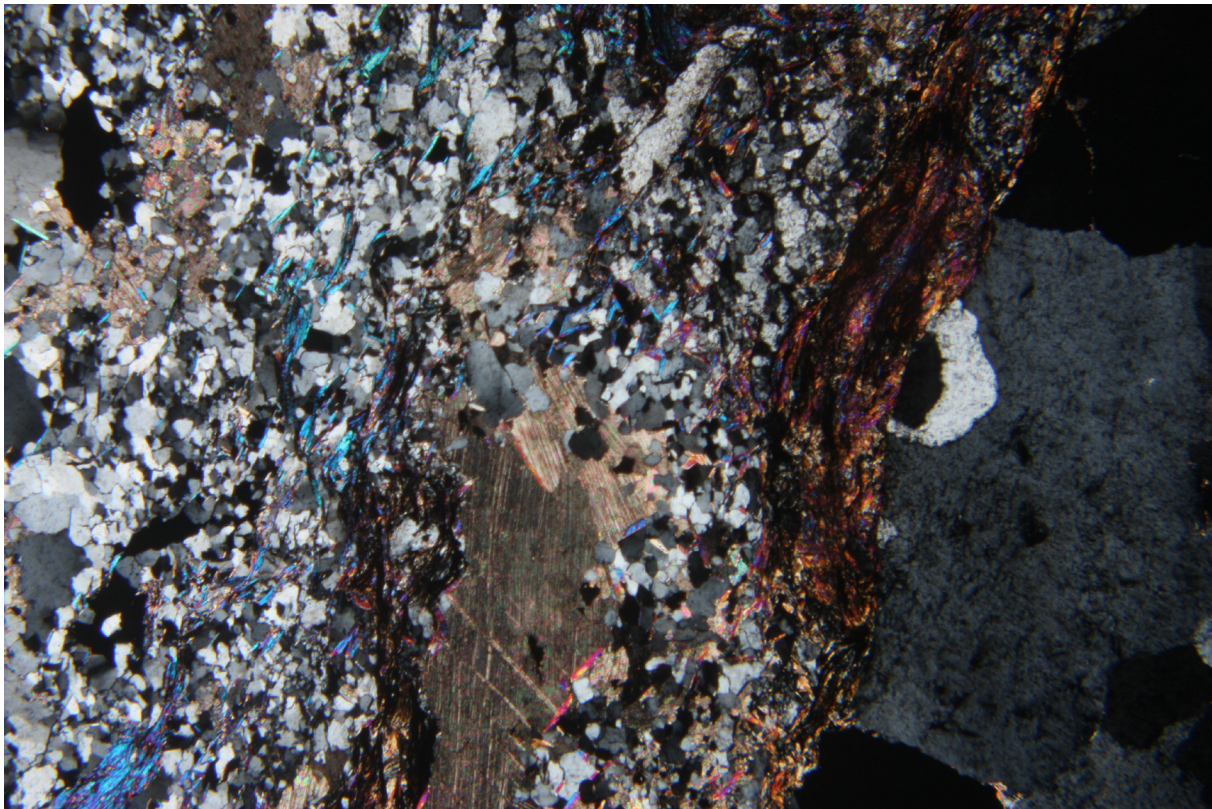


Abbildung 22: Kernmaterial UBS 2, Dünnschliffe wurden aus dem rot umrandeten Bereich hergestellt.

#### 4.1.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung der Probe wurden drei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptgemengteil ist Quarz mit 85%. Als Nebengemengteil tritt Muskovit mit 10,3% auf. Accessorien sind Karbonate (Kalzit) mit 3,7% und ebenso Pyrit und Graphit zu je <1%.

In den Dünnschliffen sind sehr große Quarze sichtbar, die Mehrheit bilden jedoch die fein verteilten kleineren Quarze. In den Zwischenräumen kommt es zur Bildung von Karbonat und Muskovit, wobei der Muskovit durch die Vielzahl an Scherbahnen häufiger zu sein scheint. Große Karbonate wie in Abbildung 23 stellen eine Ausnahme dar.



**Abbildung 23: Fein verteilter Quarz + großer Quarz im rechten Bildrand, Karbonat und Muskovit in den Zwischenräumen, BB: 4mm**

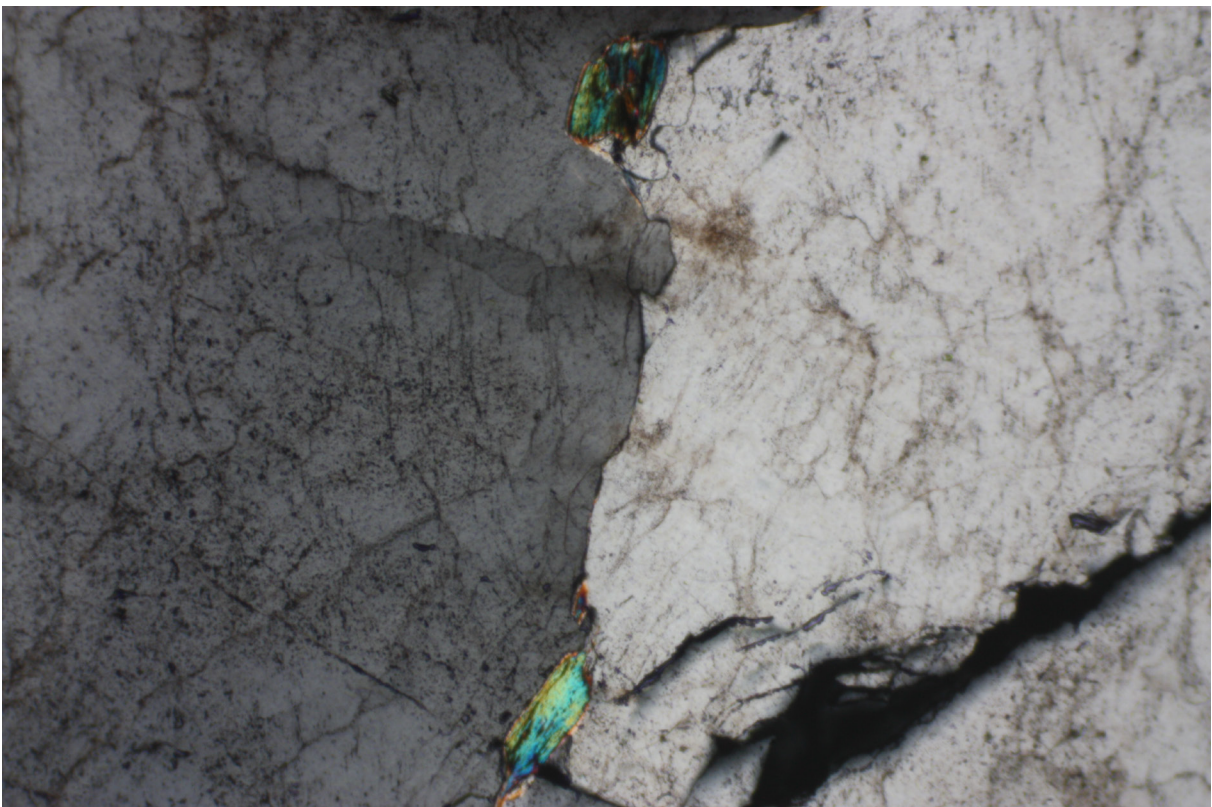
Die generelle Situation im Gestein wird durch Abbildung 24 abgerundet, da sich beide Varianten ungefähr die Waage halten. Zu sehen ist feinkörniger Quarz mit vielen Scherbändern, in welchen sich vorrangig Muskovit bildet. Die Muskovite konzentrieren sich auf die Scherbänder, treten aber auch diffus verteilt auf. Karbonate sind nahezu nicht zu erkennen. Die Quarze mit mittlerer Größe (0,1 – 0,5mm) neigen zu einer mittleren Undulösität während die kleinen und sehr großen Quarzkörner eine eher geringe Undulösität aufweisen.





**Abbildung 24: Feinkörniger Quarz mit Scherbänder, BB: 4mm**

In den Zwischenräumen von großen Quarzen (Abbildung 25) kann es zur Bildung von Muskoviten kommen, diese können auch einen Reaktionssaum haben. Die Quarze zeigen viele kleinere Mikrorisse aufgrund der Druckwirkung. Diese erhöhen die Wegigkeit im Korn, was eine AKR unterstützen könnte. Auflockerungen in den Quarzen aufgrund des Druckes sind zu beobachten und weist auf stärkere Schädigungen schon vor dem Brechvorgang hin.



**Abbildung 25: Quarze mit Muskovit zwischen den Korngrenzen, Druckrisse in großen Quarze erkennbar, BB: 2mm**



### 4.1.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Die Proben der UBS 2 verhalten sich alle annähernd ähnlich, wodurch nur die jeweiligen Besonderheiten dokumentiert werden. In Abbildung 26 ist ein großes Quarzkorn ersichtlich, welches durch mehrere Risse durchzogen ist. Die Struktur des Kornes bleibt aber bestehen. In den umliegenden Gesteinskörnern sind kaum Risse zu erkennen, in der Zementsteinmatrix ebenso nicht. Der Großteil des Bildausschnittes, ausgenommen dem Quarzkorn, zeigt keine Schädigung.

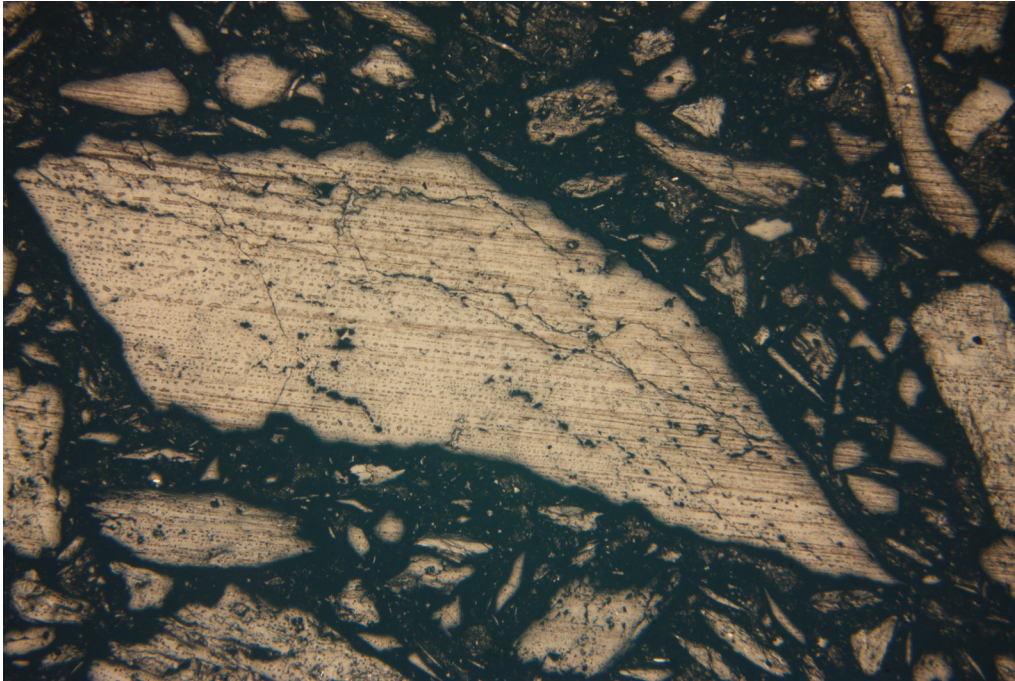


Abbildung 26: Quarzkorn mit mehreren Rissen, umliegende Körner kaum betroffen, keine Risse in der Zementsteinmatrix erkennbar; AL, BB: 4mm

#### 4.1.2.4 Beschreibung der Mörtelprismen der Bindemittelkombination

Die Untersuchung der Dünnschliffe ergibt, dass im Prisma eine AKR stattgefunden haben könnte (Abbildung 34 & Abbildung 38). Es tritt auch ein längerer Riss aufgrund einer vermuteten AKR auf, welcher eine Länge von ca. 1cm aufweist und auch sehr wahrscheinlich mit Gel gefüllt ist (Abbildung 34 & Abbildung 38). Sonderbar in dieser Probe sind auch Risse die durch die AKR indiziert sein könnten, welche durch Pyrite verlaufen. Eine genauere Untersuchung ob es sich bei diesen Rissen nicht um Ettringit handelt oder eine andere Ursache besitzt wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht gemacht. Die wahrscheinlich AKR bedingten Risse verlaufen vorrangig durch Quarz- und Glimmerkristalle und auch durch die Zementsteinmatrix. Im Großen und Ganzen zeigt das Prisma eine relativ geringe Porosität mit ca. 0,6%.

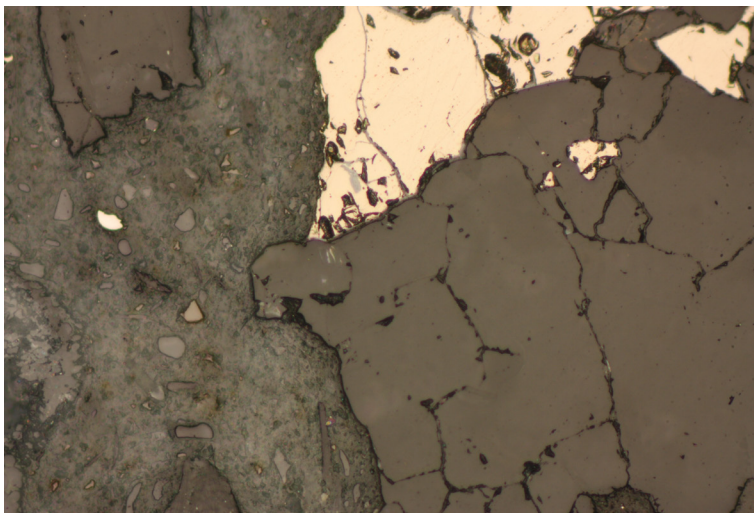


Abbildung 27: Risse in Pyrit und Quarz, x20, AL

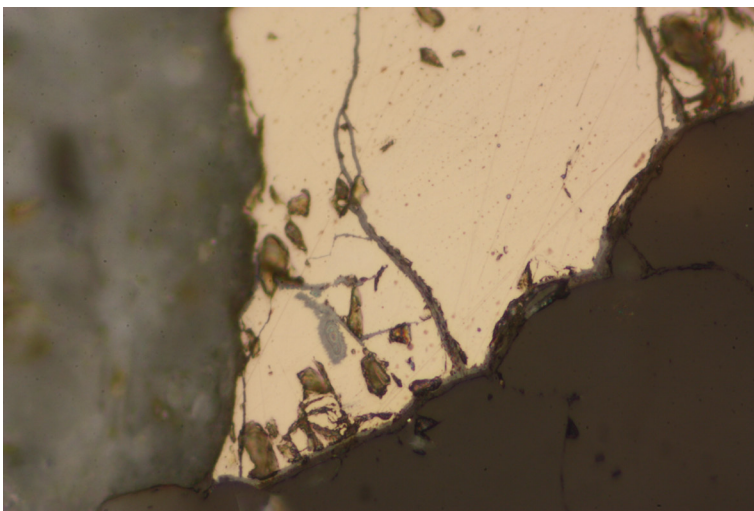
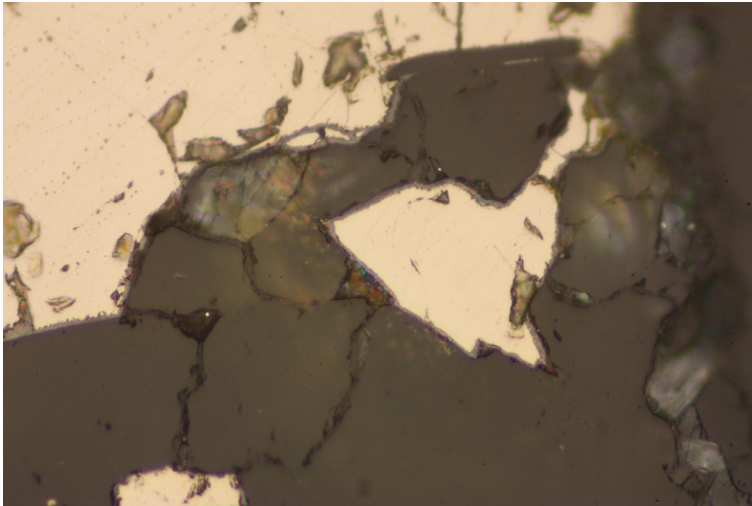


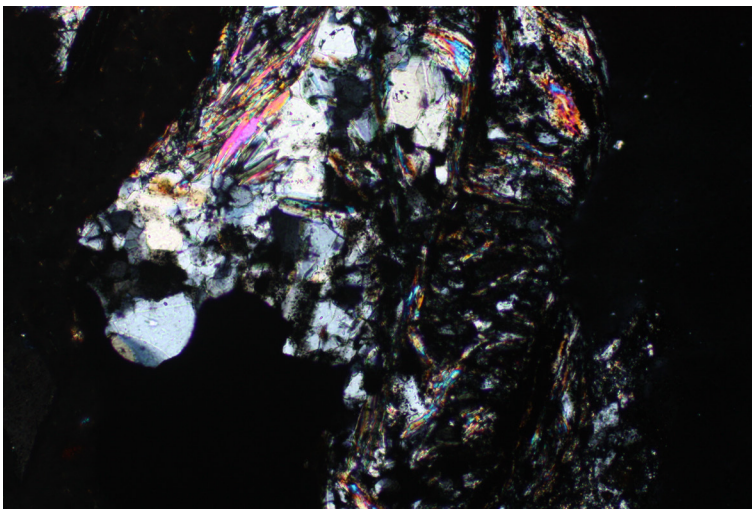
Abbildung 28: Risse in Pyrit + Reaktionssaum, x50, AL

In Abbildung 27, Abbildung 28 & Abbildung 29 sind die vorher erwähnten unnatürlichen Risse im Pyrit erkennbar. Weiters ist in der Detailansicht unter Abbildung 28 & Abbildung 29 auch ein Reaktionssaum ähnliches Merkmal an der Grenze von Pyrit und Quarz erkennbar. Am Übergang zur Zementsteinmatrix ist dies nicht der Fall.



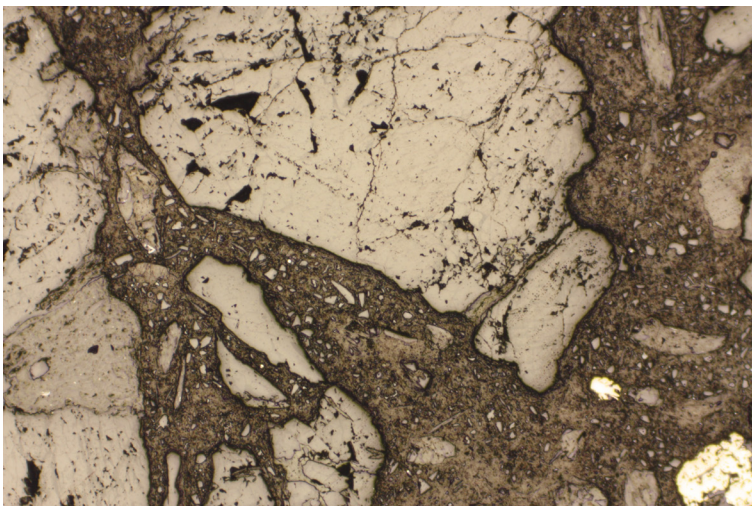


**Abbildung 29: Risse im Pyrit + Reaktionssaum, x50, AL**

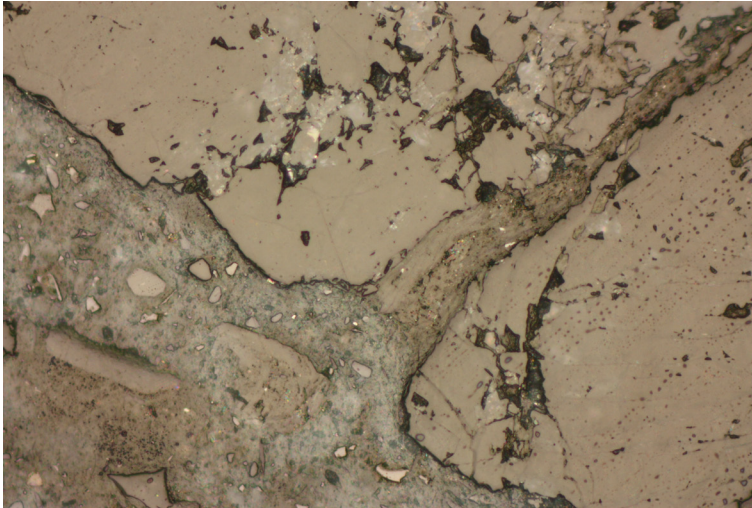


**Abbildung 30: Mischkristall aus Quarz und Glimmer, x10, xN,**

In Abbildung 30 ist ein Mischkristall aus Quarz und Glimmer erkennbar und in der linken unteren Hälfte der Pyrit als opaker Kristall. In Abbildung 31 ist ein größerer Riss im Quarzkristall zu erkennen. Dieser Riss zeigt in der Detailansicht (Abbildung 32) mehrere Verästelungen in Form von feinen Rissen. Neben dem großen Riss sind auch mehrere kleinere Risse im Kristall und in den umgebenden Kristallen erkennbar. Eine Fortsetzung des großen Risses in der Zementsteinmatrix ist nicht erkennbar.

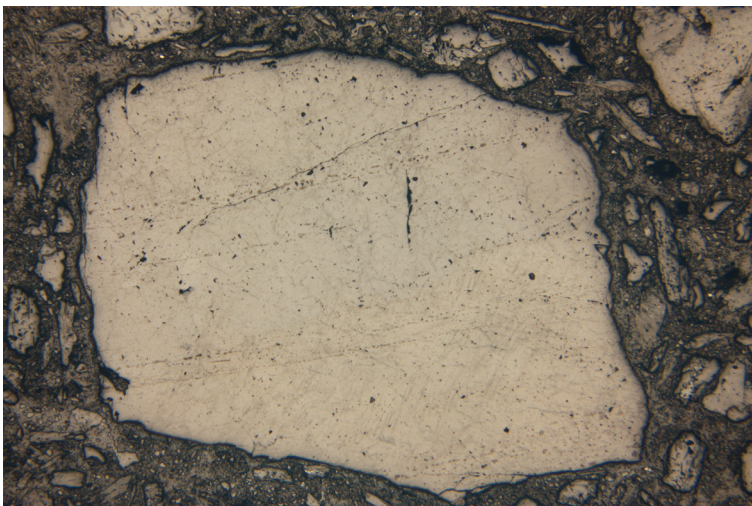


**Abbildung 31: Quarzkristall mit großem Riss + Verästelungen, x5, AL**

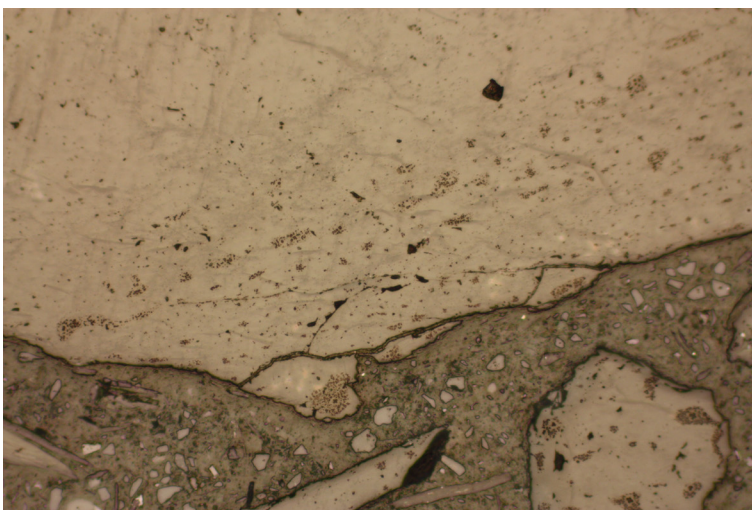


**Abbildung 32: Detailansicht großer Riss, x20, AL**

Im Gegensatz zu Abbildung 31 ist in Abbildung 33 ein relativ unversehrter großer Quarzkristall zu beobachten. In diesem Korn (Abbildung 33) verläuft im oberen Drittel ein sehr feiner, eventuell AKR-bedingter Riss und an der unteren Korngrenze ist die Abspaltung eines kleinen Kornes möglicherweise AKR-bedingt sichtbar. Eine bessere Ansicht des abgetrennten Kornstückes bietet Abbildung 34.



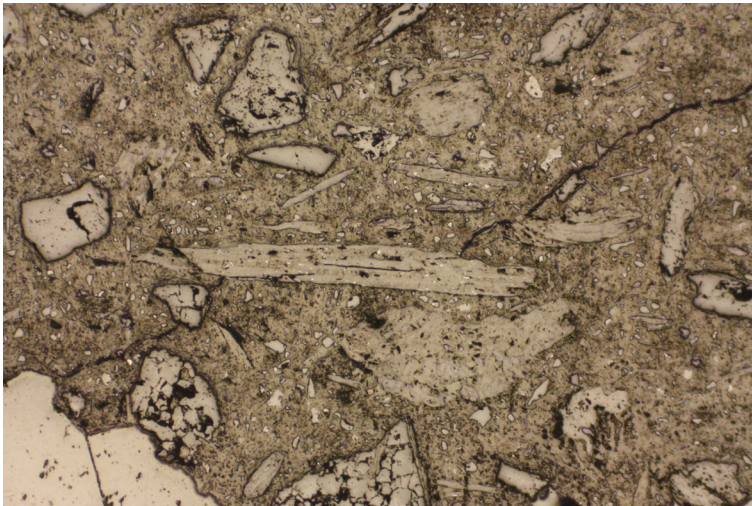
**Abbildung 33: Nahezu unbeschädigter Quarzkristall, feiner Riss im oberen Drittel erkennbar, x2,5, AL**



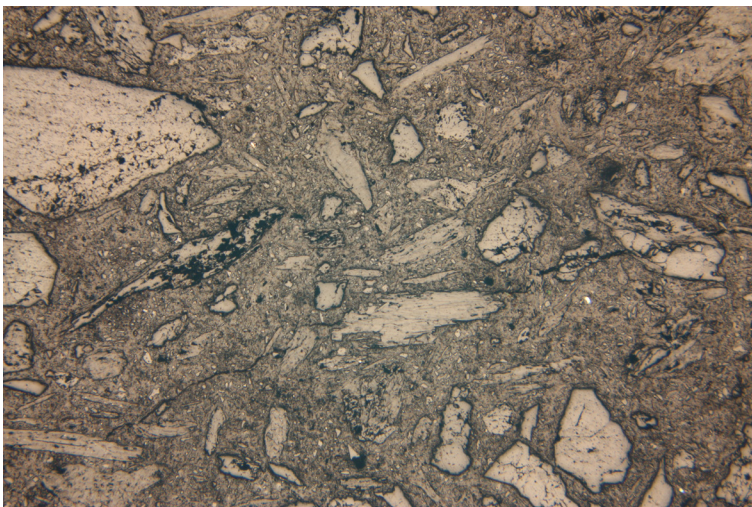
**Abbildung 34: Abspaltung wahrscheinlich durch AKR, x10, AL**



In der folgenden Bildserie ist einer der längsten vermutlich durch AKR bedingten Risse im Probenmaterial ersichtlich. Der Riss erstreckt sich über einen Zentimeter und verläuft durch Quarz- und Glimmerkristalle sowie durch die Zementsteinmatrix. Die Rissbreite variiert von gut sichtbar bis nahezu verschwunden. Eine Rissfüllung ist im gut sichtbaren Bereich erkennbar. In Abbildung 35 ist der Beginn des Risses an der Grenze des Dünnschliffes im linken unteren Ende erkennbar. Im Verlauf nach rechts werden Quarz- und Glimmerkristalle durchschlagen.

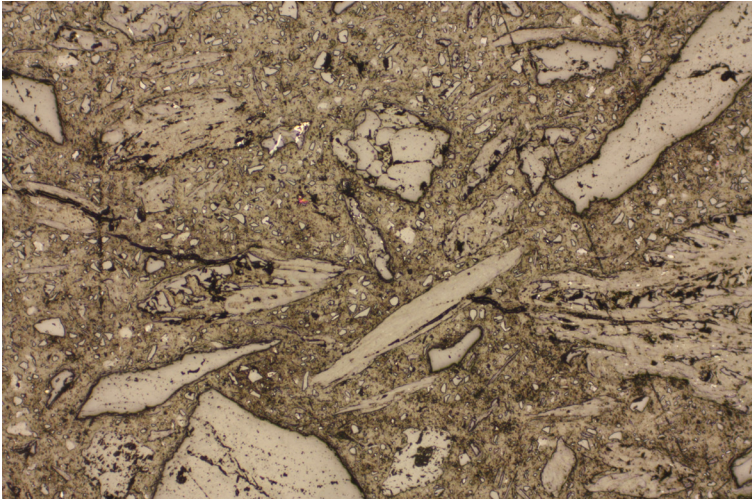


**Abbildung 35: Rissbeginn und Verlauf durch mehrere Kristalle, x5, AL**



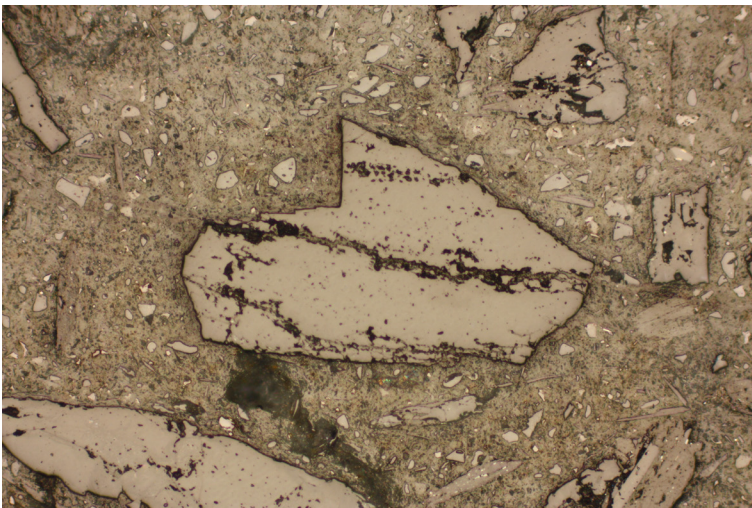
**Abbildung 36: Weiterer Verlauf des Risses, x2,5, AL**

In Abbildung 36 ist der weitere Verlauf erkennbar beginnend vom Glimmermineral in der linken unteren Hälfte bis zum durchschlagenen Quarzkristall in der rechten Bildmitte. Weiters sind in Abbildung 37 weitere durchtrennte Kristalle erkennbar wobei der Muskovit nicht erkennbar durchtrennt wird. Das Ende des Risses befindet sich in einem Mischkristall bestehend aus Quarz und Glimmermineralen. Weitere kleinere eventuell AKR bedingte Risse sind in den umgebenden Kristallen erkennbar.



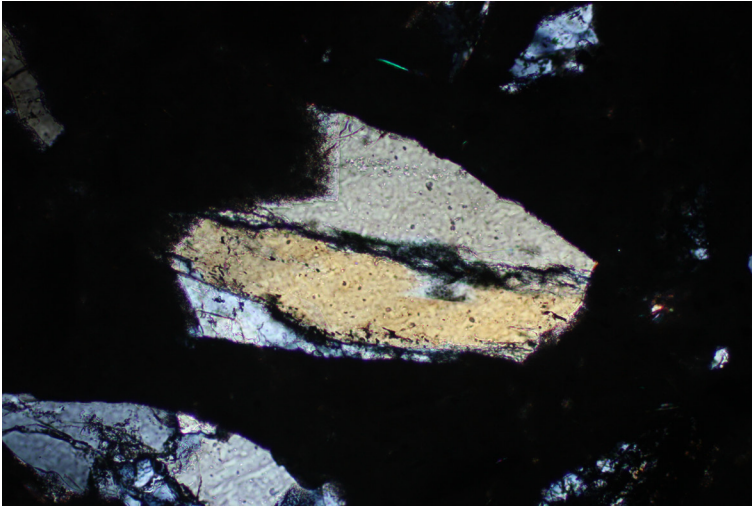
**Abbildung 37: Ende des Risses im Mischkristall, x5, AL**

In Abbildung 38 & Abbildung 39 ist ein Riss durch einen Quarzkristall erkennbar, welcher relativ groß ist und in der Detailbetrachtung auch durch die Zementsteinmatrix weiterverfolgt werden kann. Weiters ist in Abbildung 39 sehr gut zu beobachten, dass die Risse entlang der Kristallgrenzen des polykristallinen Quarzes verlaufen, die umgebende Zementsteinmatrix ist nahezu opak. Mit Hilfe der Betrachtung im gekreuzten Auflicht ist der Verlauf des Risses in der Zementsteinmatrix relativ gut erkennbar sowie auch ein vermeintlicher Reaktionssaum an der Kristallgrenze von Quarz zu Zementsteinmatrix in der linken oberen Hälfte des Kristalls.

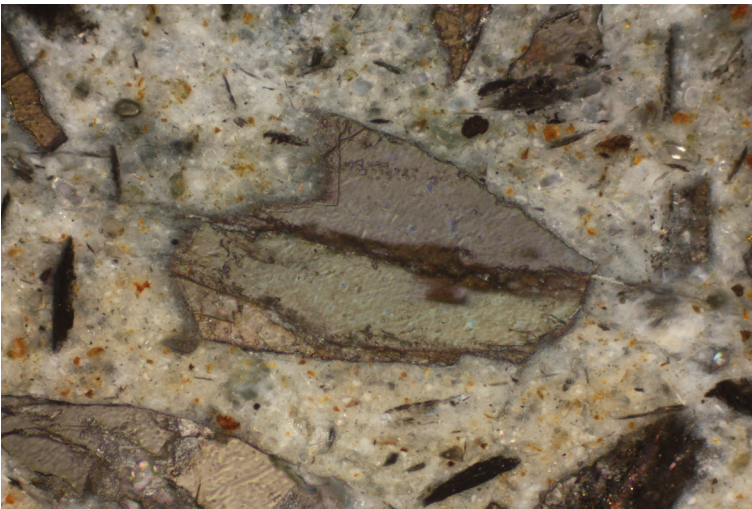


**Abbildung 38: Riss durch Quarzkristall, x10, AL**





**Abbildung 39: Polykristalliner Quarz mit Rissen, x10, xN**

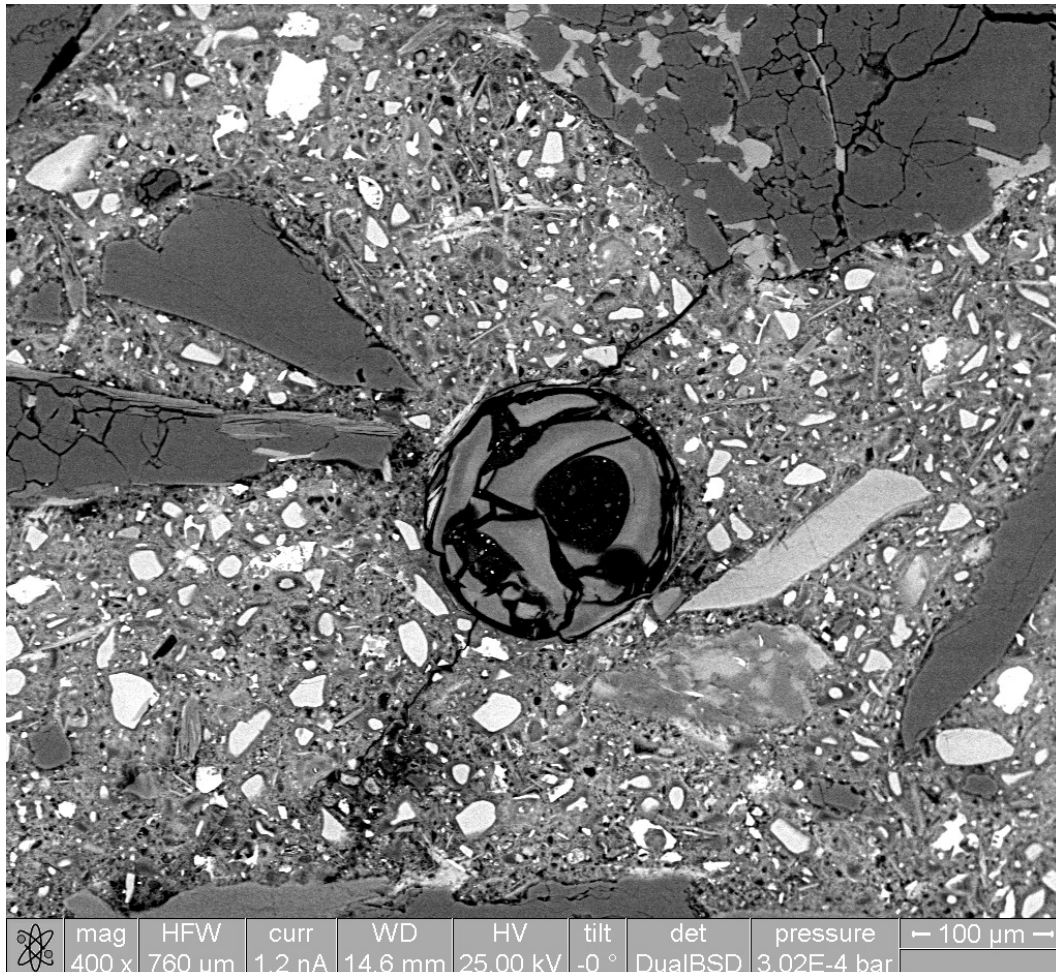


**Abbildung 40: Rissverlauf durch Zementstein und Kristall + Reaktionssaum, x10, xAL**

Das Vorhandensein eines so deutlich sichtbaren Rissbildes das eventuell einer AKR zugeordnet werden kann, ist sehr widersprüchlich zu den sehr guten Ergebnissen im Schnelltest. Es handelt sich bei diesem Prisma um eines der am stärksten beschädigten im Vergleich zum Rest des gesichteten Materials.

#### 4.1.2.5 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen

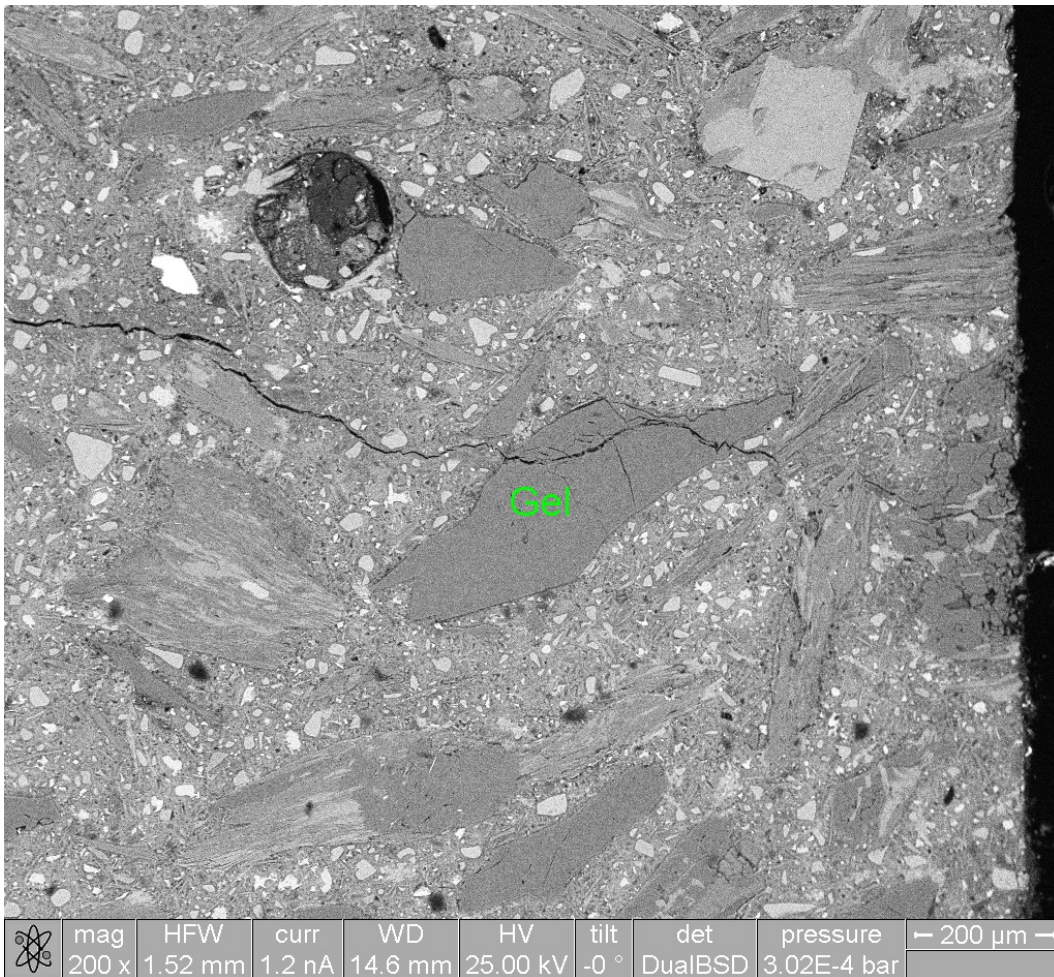
In den Dünnschliffen der UBS 2 Mörtelprismen sind mehrere größere Risse durch Korn und Zementsteinmatrix erkennbar. Einige Quarzkristalle sind in ihrer Struktur durch eine vermutete AKR stark gestört, während hingegen andere direkt daneben nahezu unbeschädigt bleiben. Durch die Mikroskopie kann keine ausreichende Begründung erfolgen. In einigen der größeren Luftporen (Abbildung 41) sind Reste eines AKR Gels zu finden.



**Abbildung 41: AKR Gel in Luftpore, Risse zu angrenzenden Quarzen (dunkelgrau)**

In Abbildung 41 sind gut erhaltene Reste eines AKR-Gels sichtbar. Das Gel ist reich an Natrium und Calcium. Gut erkennbar sind weitere Rissbildungen in der Zementsteinmatrix, die zu angrenzenden Kalksilikaten reichen. Bei diesen Kalksilikaten dominieren Quarze, bei welchen auch kleinere Risse in den Kristallen sichtbar sind. Gut erkennbar sind auch zwei nahezu unbeschädigte Quarze links und rechts von der Luftpore. Diese Quarze enthalten nur sehr feine Risse im Kristall, welche erst bei genauerer Betrachtung sichtbar werden.

In Abbildung 42 ist ein längerer Riss durch das Prisma erkennbar. Konträr zu Abbildung 41 sind die Quarze im Bild kaum beschädigt, die einzige Ausnahme ist im rechten Bildrand zu sehen. Die Rissbreite beträgt ca. 5 µm und AKR-Gel konnte nachgewiesen werden, welches in Abbildung 43 besser zu sehen ist. Die Zementsteinmatrix scheint unbeschädigt, in der Luftpore konnte kein Gel nachgewiesen werden.



**Abbildung 42: Langer Riss durch Zementsteinmatrix mit AKR Gel**

Das gefundene Gel (grau auf schwarzem Hintergrund) ist deutlich sichtbar in Abbildung 43 und scheint an Natrium angereichert zu sein. Das Gel im Quer-Riss ist angereichert mit den Alkalien (Na, K, Ca). Der Kornsaum des Quarzes ist angereichert an Natrium und Calcium. Die schwarzen Bereiche weisen auf eine Auswaschung des Gels durch die Präparation hin. Weitere kleinere Risse zweigen im Quarzkristall vom Hauptriss ab, dies kann bei längerer Testdauer zu einer fortschreitenden Rissbildung des Quarzes führen.



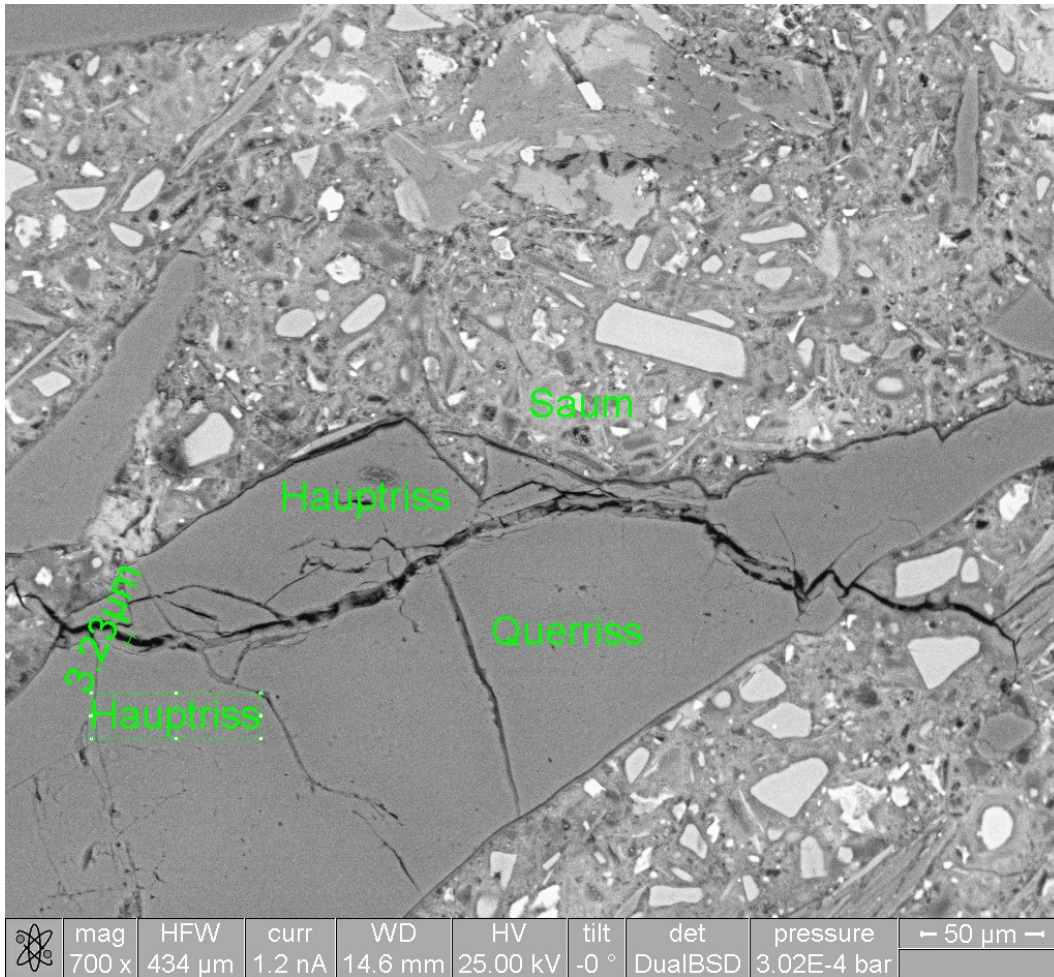


Abbildung 43: Detailansicht des langen Risses mit besserer Sichtbarkeit des AKR Gels

### 4.1.3 Untere Bündner Schiefer Kernprobe 3

#### 4.1.3.1 Makroskopische Betrachtung

Bei der Kernprobe 3 (UBS 3) handelt es sich um ein geschiefertes Gestein mit einem Quarzknauer auf der linken Seite und mehreren kleineren Quarzgängen (Abbildung 44). Das Gestein besteht Großteils aus Quarz und untergeordnet aus Karbonat (Kalzit) und Muskovit. Die Pyrite befinden sich vorrangig in der Nähe der Scherflächen und sind auch meist zerschert. Das Kernmaterial zeigt eine relativ gute Festigkeit. Der Graphitanteil liegt nach Aufbereitungsergebnissen unter 1% und ist wahrscheinlich für den leicht fettigen Griff des Gesteins verantwortlich. Mit Hilfe des Salzsäuretests kann angenommen werden, dass der Karbonatgehalt geringer ist im Vergleich zu UBS 1.

Die Probenahme erfolgte willkürlich und nicht einem System folgend. Die Kernlänge beträgt ca. 4 x 0,5m.



Abbildung 44: Kernmaterial UBS 3, Dünnschliffe wurden aus den rot umrandeten Bereichen hergestellt.



#### 4.1.3.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung der Probe wurden drei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptgemengteil ist Quarz mit 83,3 %, die Nebengemengteile sind Muskovit mit 8 % und Karbonat (Kalzit) mit 6 %. Accessorien sind Pyrit (2,7%) und Graphit unter 1%.

Bei diesem Proben ist einer der größten Unterschiede, dass keine großen Mineralfragmente erkennbar sind, außer sehr großen Pyriten. Das Gestein ist durch Scherbänder durchzogen und die Quarze zeigen suturierte Kontakte (Abbildung 45). In den Scherbänder befindet sich bevorzugt Muskovit. Es können zwei Scherrichtungen vermutet werden, O-W und schwächer ausgebildet N-S.

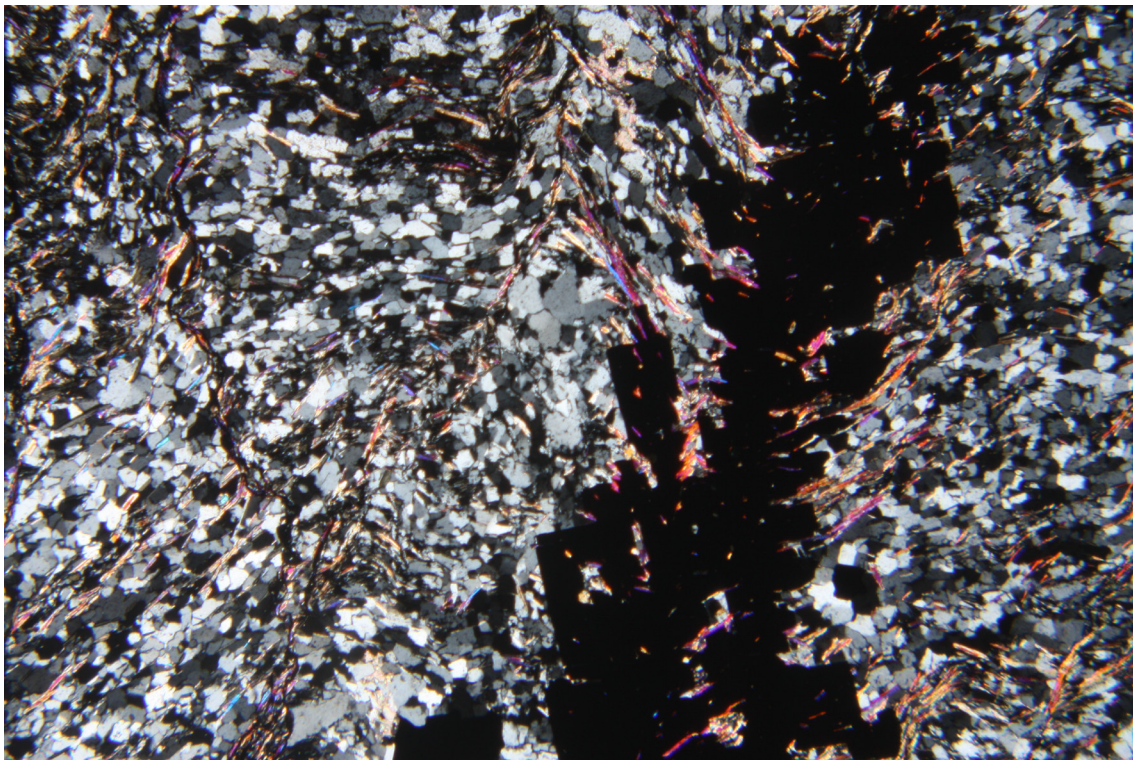


Abbildung 45: Feinkörniger Quarz mit sichtbarer Ausrichtung, BB: 4mm

Es können unterschiedliche Bereiche des Gesteines festgestellt werden. Zum einen sind Scherbänder mit deutlichem Muskovit zu erkennen, zum anderen gibt es Bereiche wo sich alte deformierte Quarze befinden und kaum Muskovit anzutreffen ist (Abbildung 46). Je kleiner die Quarze sind umso eher neigen sie zu einer geringen Undulösität. Die Quarze mit einer Größe von ca. 0,1 mm neigen eher zu einer mittleren Undulösität. Falls die Kornkontakte gut erhalten sind zeigen auch die größeren Quarze nur eine geringe Undulösität.



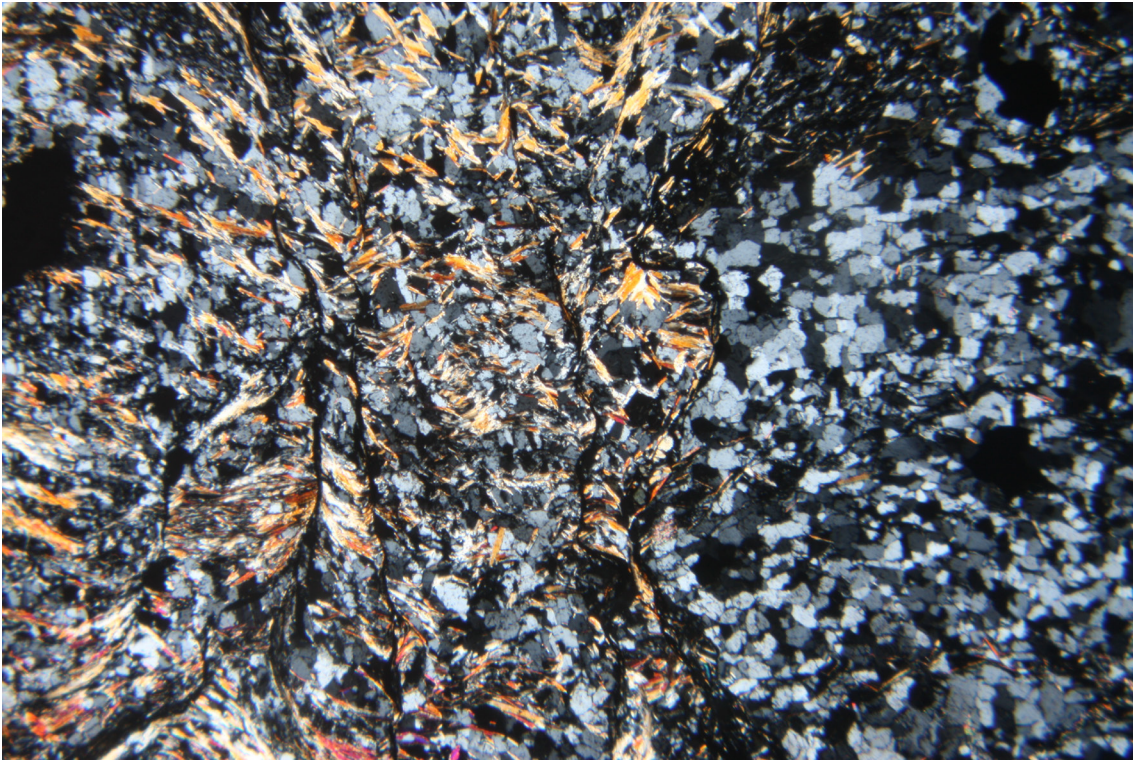


Abbildung 46: Scherzone auf der linken Seite, deformierter Quarz auf der rechten Bildhälfte, BB: 4mm

In den Scherzonen ist eine Krenulationsschieferung deutlich erkennbar. Die Quarze in der Umgebung zeigen suturierte Kornkontakte (Abbildung 47).

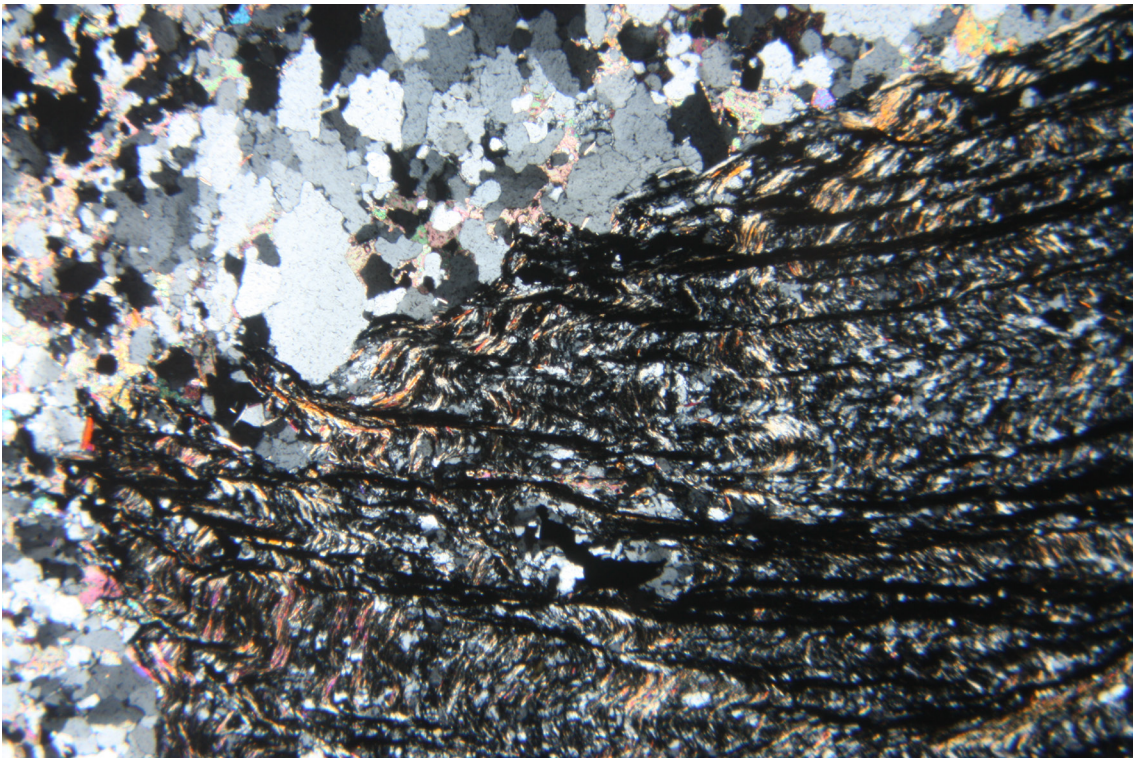


Abbildung 47: Suturierte Kornkontakte bei Quarzen, Scherzone mit Krenulation, BB: 4mm



### 4.1.3.3 Beschreibung der Mörtelprismen

In Abbildung 48 sieht man eine kompakte Zementsteinmatrix ohne erkennbare Risse. Die Körner im Bild weisen ebenfalls keine Risse auf. Bei dem verbindenden Riss in Bildmitte

handelt es sich um ein „Artefakt“ und nicht um einen Riss. Im Dünnschliff sind nahezu keine schädigenden Reaktionen erkennbar. Nur in Abbildung 49 konnte ein Hinweis auf eine Schädigung erkannt werden, wobei diese nur im Korn auftritt und nicht weiter in der Zementsteinmatrix verläuft.

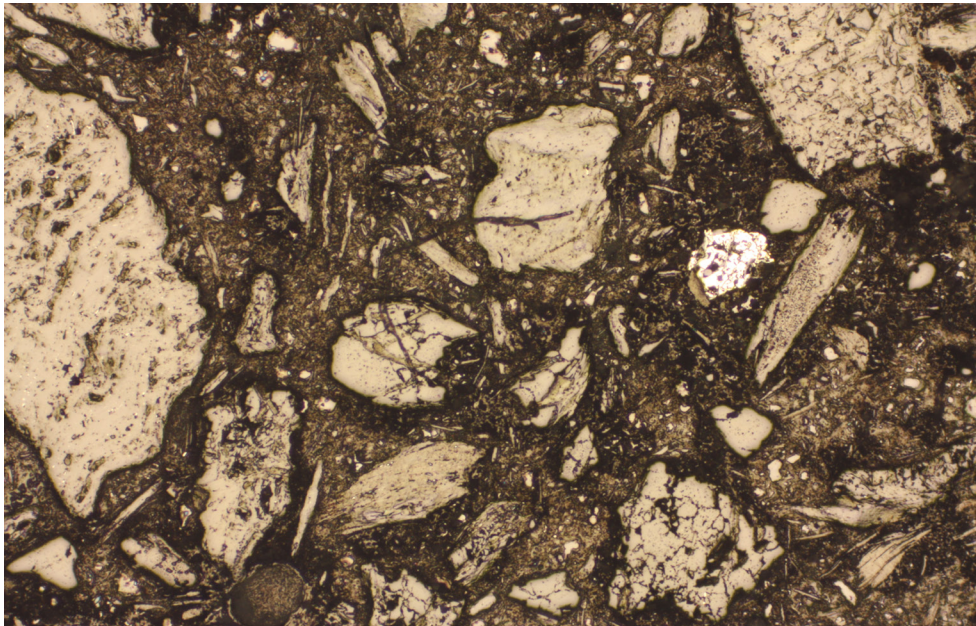


Abbildung 48: Ungestörte Zementsteinmatrix, Auflicht, BB: 2mm

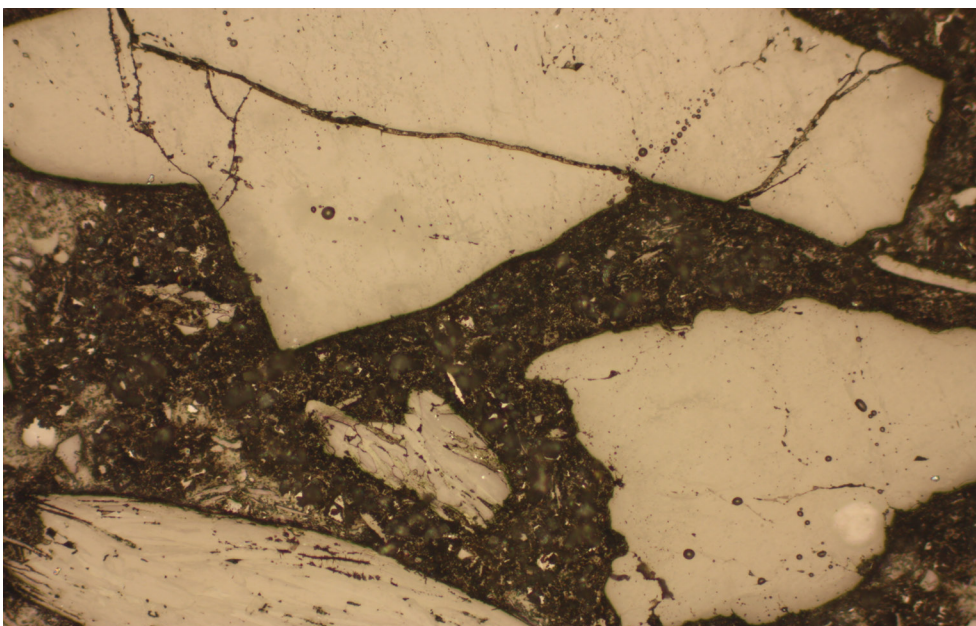


Abbildung 49: Riss im oberen Korn, Auflicht, BB: 1mm

## 4.2 Mittlere Bündner Schiefer

Die Proben des mittleren Bündner Schiefer (MBS) wurden als ca. 20 Handstücke entnommen, welche möglichst repräsentativ ausgewählt wurden. Aus diesen Handstücken wurden insgesamt acht Dünnschliffe zur Charakterisierung dieser hergestellt (mit der Bezeichnung MBS 1 bis MBS 8). Des Weiteren wurden zur Untersuchung hinsichtlich der AKR vier Dünnschliffe aus Mörtelprismen des Normtests und ein Dünnschliff aus einem Mörtelprisma mit der Prüfung mit Bindemittelkombination hergestellt.

### 4.2.1 Makroskopische Beschreibung

Bei den Proben (Abbildung 50) handelt es sich um ein dunkelgraues Gestein. Der Anteil des Karbonats (Kalzit) überwiegt generell gegenüber dem Quarzanteil. Der Quarzanteil tritt meist in Gangform auf bzw. bei MBS 8 als Quarzknauer auf. Die dunkle Färbung ist auf den Graphitanteil zurückzuführen, welcher nach Aufbereitungsergebnissen den Wert von 1% nicht überschreitet und auch so in der Dünnschliffbetrachtung miteinbezogen wurde. Bei den Proben ist eine deutliche Schieferung erkennbar, welche ein klarer Hinweis auf die einwirkenden Kräfte während der Alpenbildung sind. Das Gestein ist entlang der Schieferungsflächen nicht so leicht zu trennen. Des Weiteren besitzen ein Großteil der Proben einen leicht fettigen Griff wie man ihn von Talk gewohnt ist, dies dürfte auf den Graphitanteil zurückzuführen sein. Zerscherte Pyrite sind vorrangig in den Gleitflächen zu sehen, selten sind diese unversehrt.

Die feinkristalline Probe MBS 2 und der feinkristalline Anteil bei MBS 6 führten zu einigen Schwierigkeiten bei der Dünnschliffherstellung.

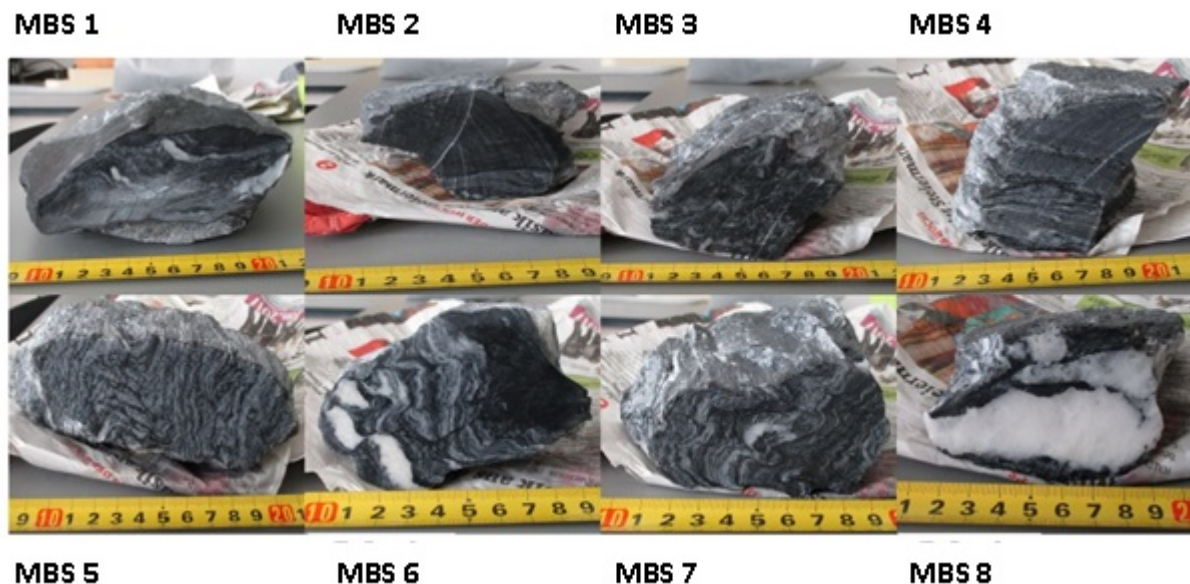


Abbildung 50: Ausgewählte Handstücke der MBS, welche zur Dünnschliffherstellung verwendet wurden



## 4.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe

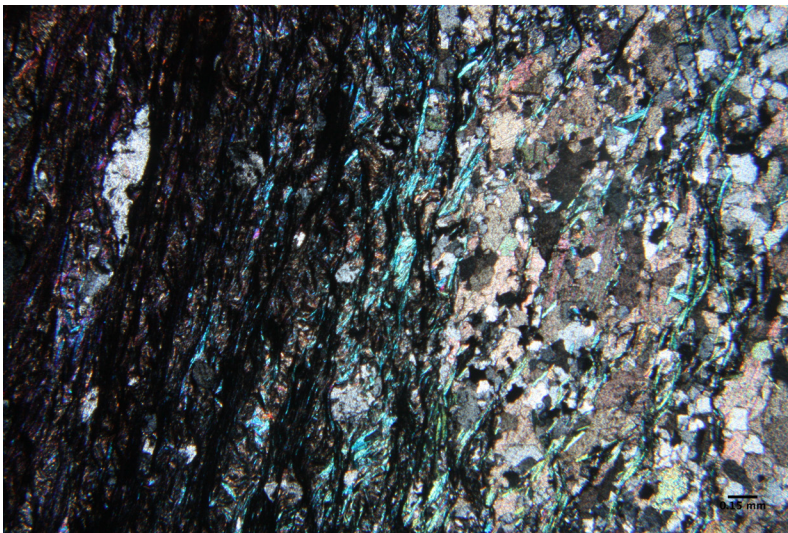
Proben der mittleren Bünderschiefer werden mit MBS 1 – MBS 8 bezeichnet. Bei allen Proben sind die Hauptgemengteile Karbonat (Kalzit) und Quarz, als Nebengemengteil tritt Muskovit auf. Als opakes Mineral wurde Pyrit identifiziert, welcher in nahezu allen Schliffen vorhanden ist. Bei den schwarzen Schlieren entlang der Schieferung handelt es sich um Graphit, welcher nicht explizit angeführt wurde. Als Accessoirmineral tritt Turmalin in manchen Dünnschliffen auf.

Mit Ausnahmen der Proben MBS 3 und MBS 8 handelt es sich bei den Proben um einen graphitischen Kalkphyllit/Kalkglimmerschiefer. MBS 3 ist aufgrund des erhöhten Quarzgehaltes ein Quarz-Glimmerschiefer und bei der Probe MBS 8 handelt es sich um eine Probe aus dem Übergang von Quarzknauer zu Kalkglimmerschiefer.

Der Modalbestand wurde nach eigenem Ermessen nach Betrachtung des Dünnschliffes geschätzt und in Prozent (%) angegeben. Die Glimmerminerale sind Muskovite und kleiner 0,1 mm werden sie als Serizite bezeichnet. Für die Skalierung der Bildbreite ist ein Maßstab von 0,15 mm im unteren rechten Eck eingefügt worden. Die Korngröße sinkt mit der Größe der Scherbeanspruchung der Gesteine.

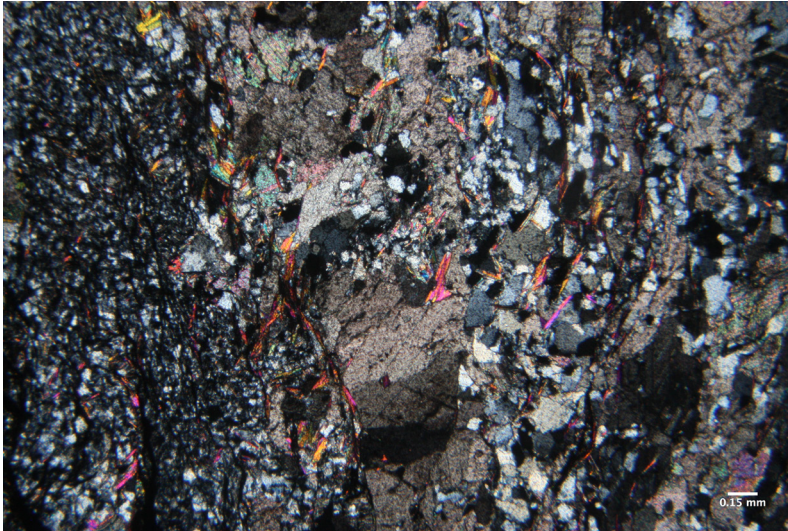
### MBS 1:

Probe MBS 1 besteht vorrangig aus Kalzit (70%), Quarz (20%), Glimmer (9%), opake Minerale (1%). Es handelt sich um einen Kalkglimmerschiefer.



**Abbildung 51: MBS 1, Schieferung mit eingeregeltm Glimmer und zerschernten Quarz**

In Abbildung 51 sieht man im linken Bereich eines von mehreren Scherbändern, welche im Dünnschliff sichtbar sind. Die Muskovite erfahren ihre Einregelung generell in Scherrichtung, ältere Minerale werden in den Scherbändern deformiert und in weiterer Folge zerstört. Die kalzitreichen Lagen werden vereinzelt mit Glimmern durchzogen. Die Kalzite erreichen durchschnittlich eine Größe von ca. 0,2 mm und die Quarze ca. 0,1 mm.

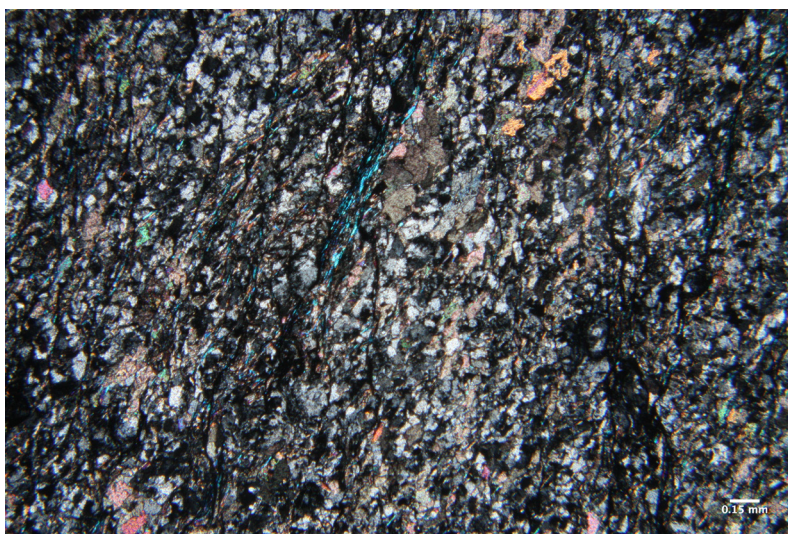


**Abbildung 52: MBS 1, Feinkristalline Quarze, in Nähe der Scherbänder mit größeren Kalziten**

In Abbildung 52 sieht man feinkristalline Quarze mit Korngrößen von ca. 0,05 mm in der Nähe des Scherbandes und gröbere Quarzkristalle mit ca. 0,15 mm in Entfernung zur Deformation. Die Kalzitkristalle erreichen eine Größe von bis zu 0,6 mm und zeigen teilweise Zwillingslamellen. Die Kalzite sind wahrscheinlich später gebildet und umwachsen teilweise die Quarzkristalle. Trotz der Scherbeanspruchung zeigt der Quarz eine geringe Undulösität.

### **MBS 2:**

Bei der Probe MBS 2 handelt es sich ebenfalls um einen Kalkglimmerschiefer. Die Hauptgemengteile sind ebenfalls Kalzit (54%) & Quarz (40%). Nebengemengteil ist Muskovit (4%), Feldspat < 1% und ca. 1% opake Minerale, vorrangig Pyrit. Die Kalzitkristalle sind etwas größer gewachsen im Vergleich zu den Quarzen. In Abbildung 53 zeigen sich feinere Scherbänder entlang des Gesteins. Die Muskovite sind entlang der Scherrichtung eingeregelt treten jedoch nicht so häufig auf wie in Probe MBS 1. Die Quarze (Abbildung 54) zeigen kaum undulöses Verhalten und sind hypidiomorph bis xenomorph ausgebildet. Die Serizite treten entlang der feinen Scherbahnen auf.



**Abbildung 53: MBS 2, Kalkglimmerschiefer**



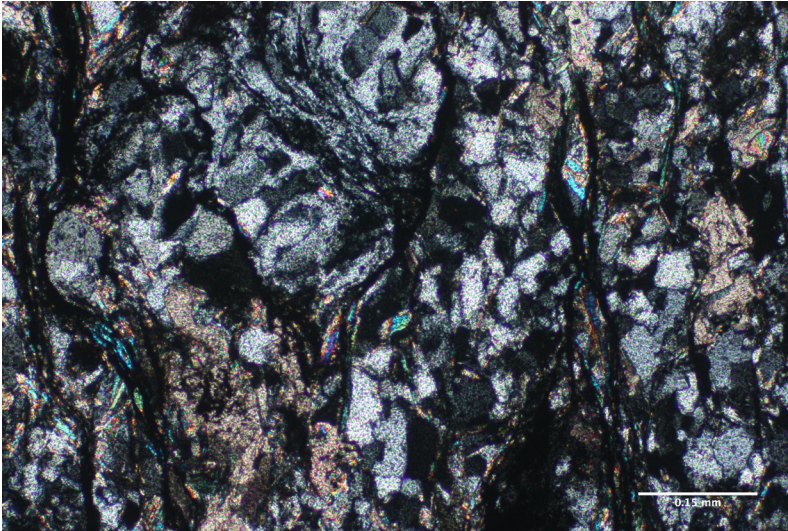


Abbildung 54: MBS 2, Hypidiomorphe Quarze mit Seriziten entlang der Scherbänder

### **MBS 3:**

Hier handelt es sich um einen Glimmerschiefer mit ungefähr 55% Quarz, 23% Kalzit, 20% Muskovit und ca. 2% opake Minerale. Diese Probe zeigt wieder größere Scherbahnen (Abbildung 55 & Abbildung 56) und ist stärker verfaltet. Deformationserscheinungen treten an den Mineralen auf. Die Muskovite sind vorrangig in den Scherbahnen eingeregelt, teilweise treten sie auch abseits der Scherzonen auf, meistens in der Nähe der Kalzite. Bei dem opaken Mineral in der Scherzone handelt es sich sehr wahrscheinlich um einen Pyrit, der durch die Deformation zerschert wurde.

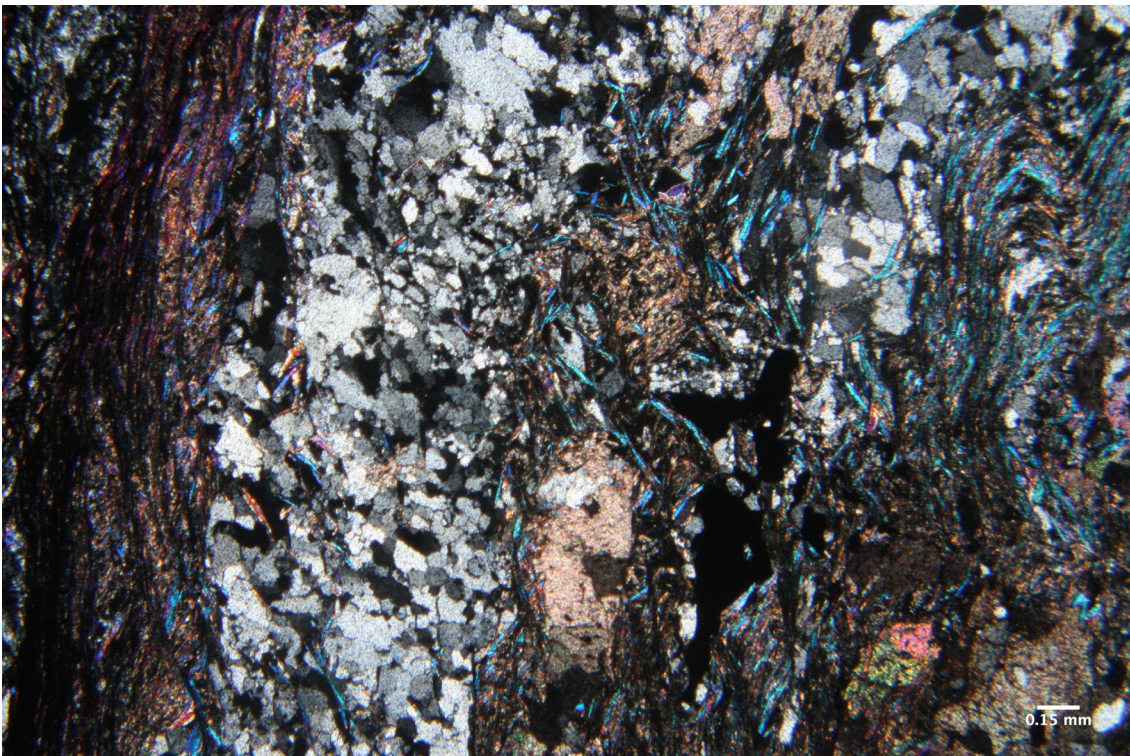


Abbildung 55: MBS 3, verfalteter Quarz Glimmerschiefer





Abbildung 56: MBS 3, verfalteter Quarz Glimmerschiefer, II N

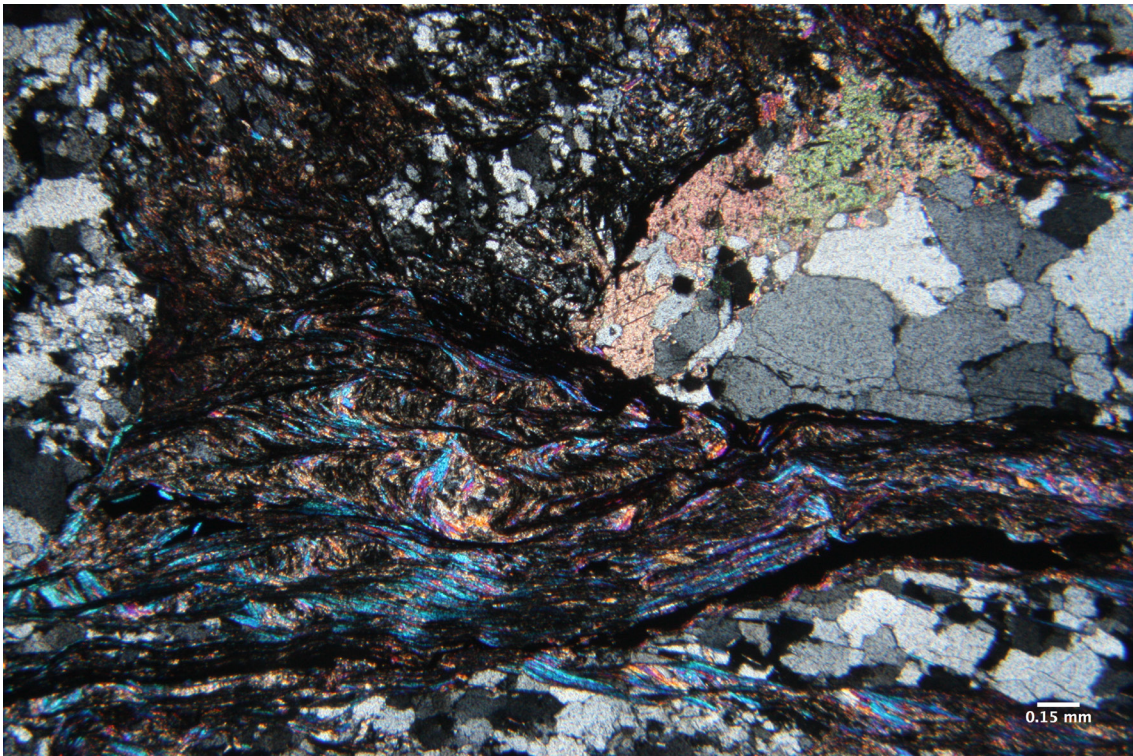
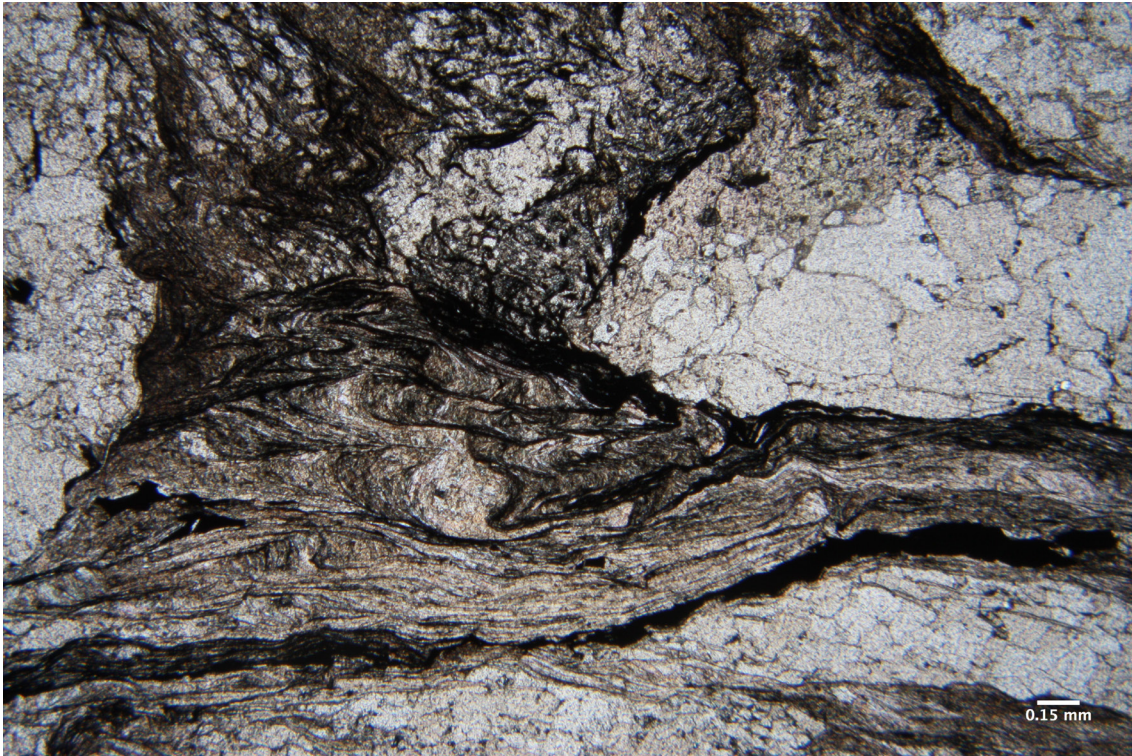


Abbildung 57: MBS 3, Quarz Glimmerschiefer mit Scherbänder und größeren Muskoviten





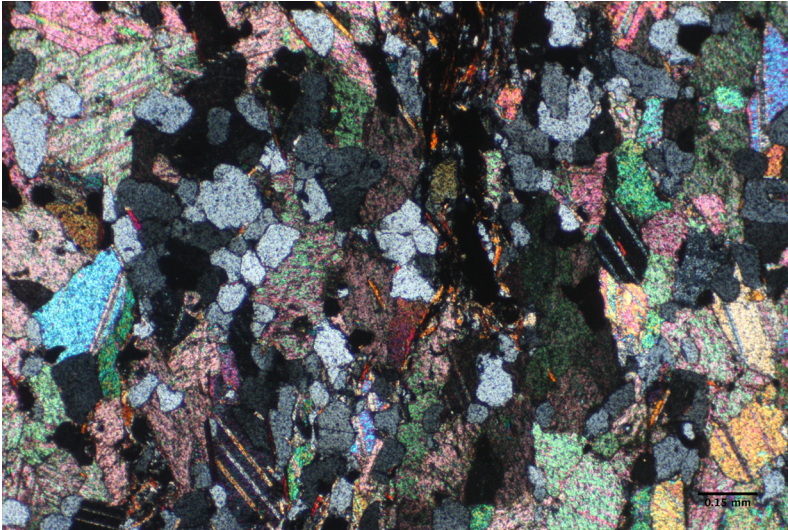
**Abbildung 58: MBS 3, Quarz Glimmerschiefer mit Scherbänder und größeren Muskoviten, II N**

In Abbildung 57 & Abbildung 58 wird die Deformation des Gesteins nochmal deutlich erkennbar. Die Quarze können in dieser Probe eine Größe von 0,4 mm erreichen und die größeren sind idiomorph ausgebildet. Die kleineren Quarze in der Nähe der Scherbahnen hingegen befinden sich eher in Auflösung und weisen keine scharfen Korngrenzen auf, sondern besitzen suturierte Korngrenzen aufgrund des Druckes. Der Kalzit wird auch deutlich durch die Scherbeanspruchung zerstört und weitere Pyrite werden zerschert. Muskovite können bis zu 0,3 mm groß werden. Die kleineren Quarze zeigen durch die Beanspruchung eine mittlere Undulösität.

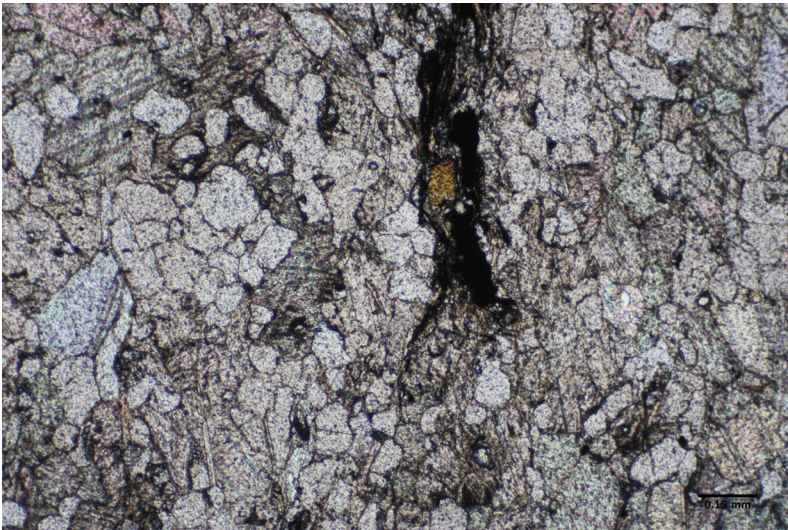
#### **MBS 4:**

Bei der Probe MBS 4 handelt es sich ebenfalls um einen Kalkglimmerschiefer. Bei dem Modalbestand überwiegt der Kalzitanteil mit ca. 60%, Quarz (30%) und Muskovit (8%) und ca. 2% opake Minerale (Pyrit) und ein weiteres akzessorisches Mineral ist Turmalin. Die Kristalle in den Scherbahnen sind eingeregelt, abseits der Scherbahnen (Abbildung 59 & Abbildung 60) nicht. Die Glimmer bilden sich außerhalb der Scherbahnen nahezu nicht aus. Die Quarze wirken überwachsen von den Kalziten und besitzen eine geringe Undulösität.





**Abbildung 59: MBS 4, Kalkglimmerschiefer mit Turmalin neben zerscherzten Pyrit**



**Abbildung 60: MBS 4, Kalkglimmerschiefer mit Turmalin neben zerscherzten Pyrit, II N**

In Abbildung 60 ist der Turmalin mit einer grünen Eigenfarbe erkennbar direkt neben dem zerscherzten Pyrit.

### **MBS 5:**

Die Probe MBS 5 ist ebenfalls ein Kalkglimmerschiefer mit einem Kalzitanteil von 70%, 20% Quarz und ca. 9% Glimmer und 1% opake Minerale. Bei MBS 5 zeigen die Scherbänder keine einheitliche Richtung was auf eine mehrfache Deformation hinweist. Die Quarzkristalle in Nähe der Scherbänder (Abbildung 61 & Abbildung 62) erreichen nur eine geringe Größe und zeigen eine geringe undulöse Auslöschung, wobei einige größere Körner eine mittlere Undulösität besitzen. Die Glimmer sind vorrangig entlang der Scherbänder eingeregelt und besitzen hohe Interferenzfarben von rötlich bis bläulich. Die Kalzitkristalle zeigen häufiger Verzwilligungslamellen.



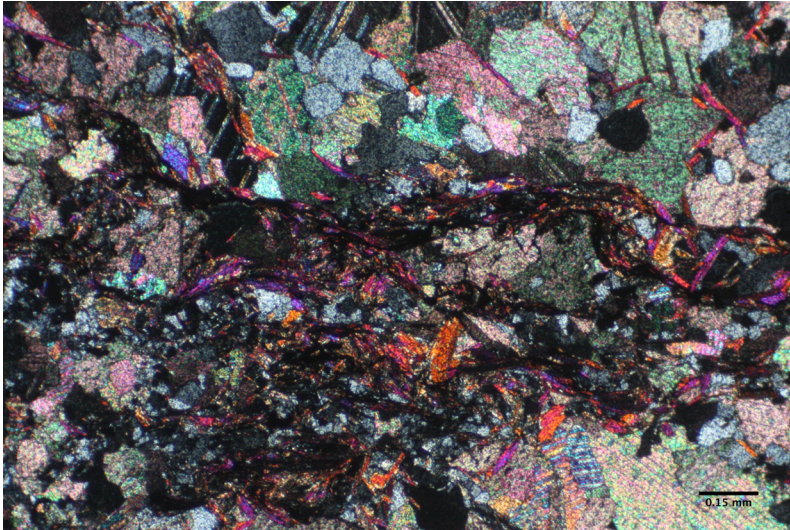


Abbildung 61: MBS 5, Kalkglimmerschiefer mit kleinen Quarzkristallen

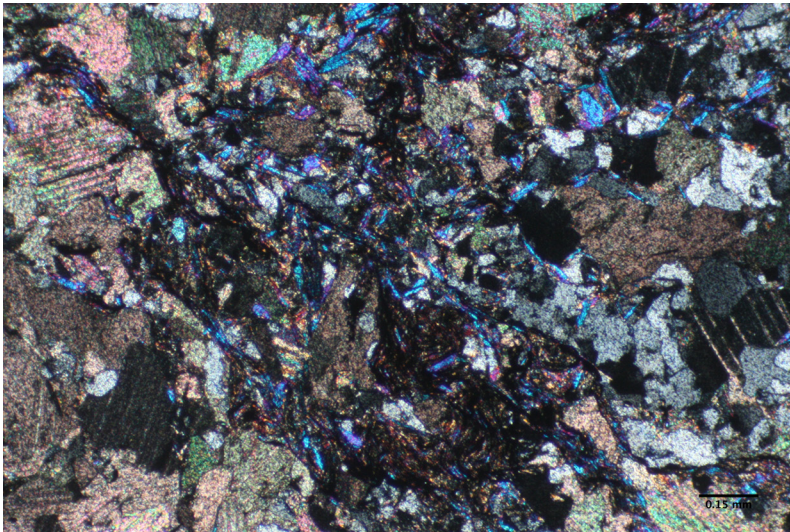
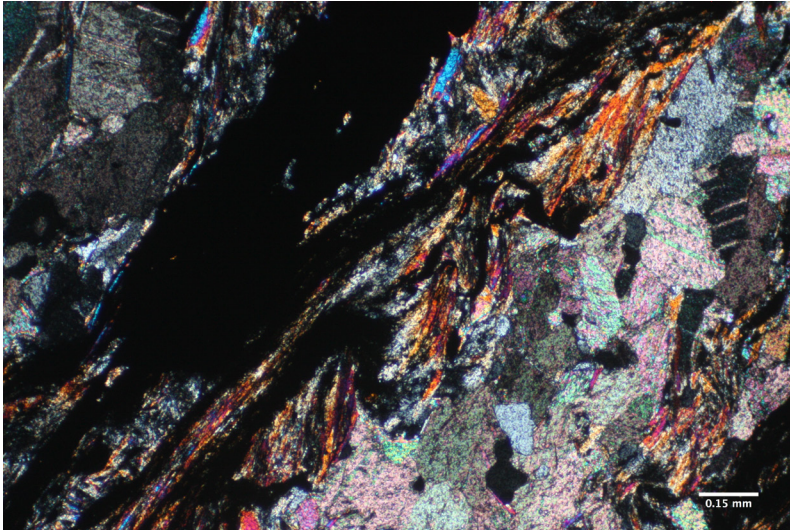


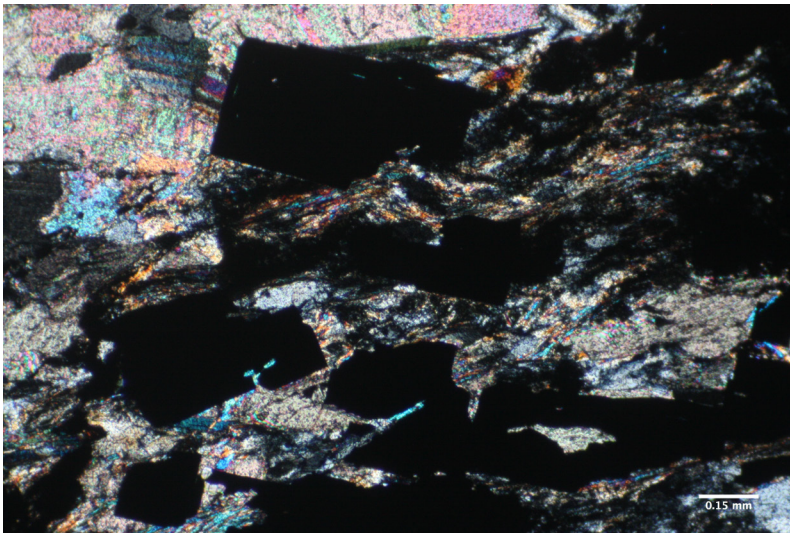
Abbildung 62: MBS 5, Kalkglimmerschiefer mit verzwilligten Kalziten

### **MBS 6:**

Probe MBS 6 ist ein Kalkglimmerschiefer mit 65% Kalzitanteil, 30% Quarz und 3% Muskovit und 2% opake Minerale (Pyrit). Die Quarze werden in MBS 6 teilweise von den Karbonaten umwachsen (Abbildung 63) und besitzen eine geringe Undulösität. Die großen Quarzkristalle zeigen eine höhere Undulösität im Vergleich zu den kleineren Quarzkristallen, welche näher an den Scherbahnen liegen. Die Pyrite (Abbildung 64) werden entlang der Scherbahnen zerschert können aber noch ihre Kristallform Großteils erhalten im Vergleich zu den anderen Proben.



**Abbildung 63: MBS 6, Kalkglimmerschiefer mit Pyrit und umwachsenen Quarzen**



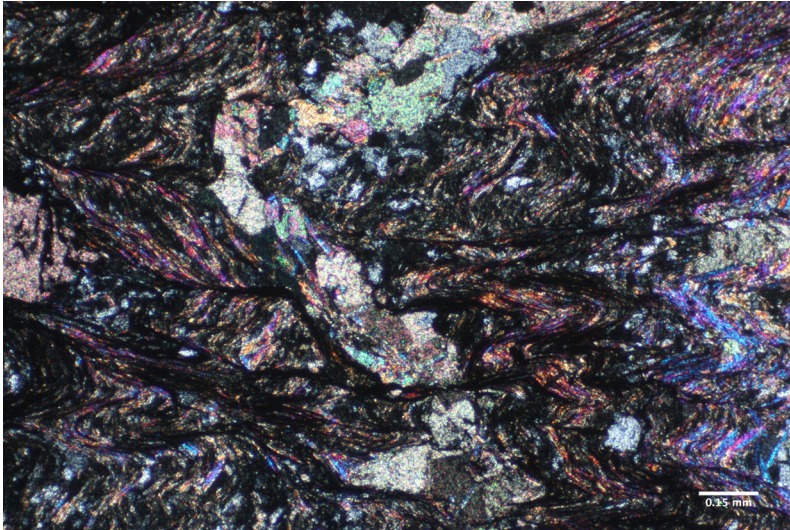
**Abbildung 64: MBS 6, Kalkglimmerschiefer mit Pyriten**

Die Glimmerminerale treten in beiden Schliffen vorrangig entlang der Scherbahnen auf und zeigen wieder eine höhere Bandbreite der Interferenzfarben. Es handelt sich bei den Glimmermineralen um Muskovite und dem feinkristallinen Serizit.

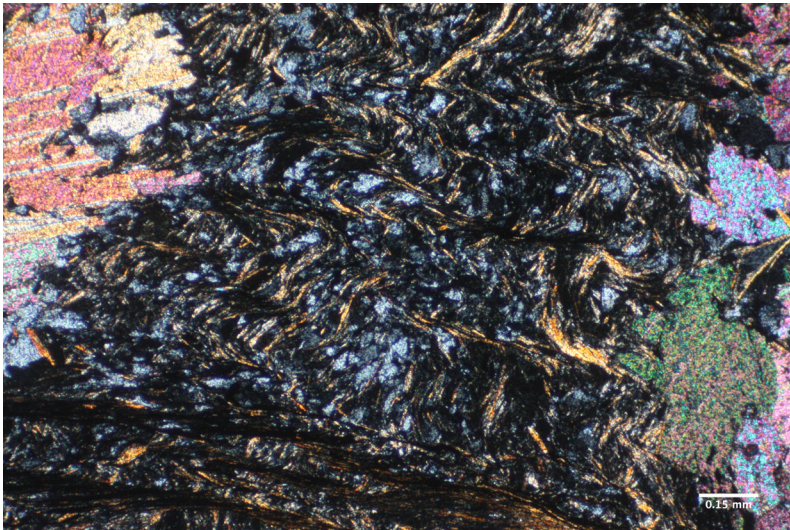
### **MBS 7:**

Die Probe MBS 7 ist ein Kalkglimmerschiefer mit einem relativ ausgeglichenen Modalbestand der Hauptgemengteile von 45% Kalzit und 40% Quarz, 13% Glimmer, <1% Feldspat und 1% opake Minerale. In dieser Probe ist eine erhöhte Deformation anhand der Krenulationsschieferung (Abbildung 65) ersichtlich. Kalzit und Quarzkristalle werden innerhalb der Scherbahnen zerstört. Als Hauptmineral innerhalb der Scherbahnen ist Quarz ersichtlich in Abbildung 66.





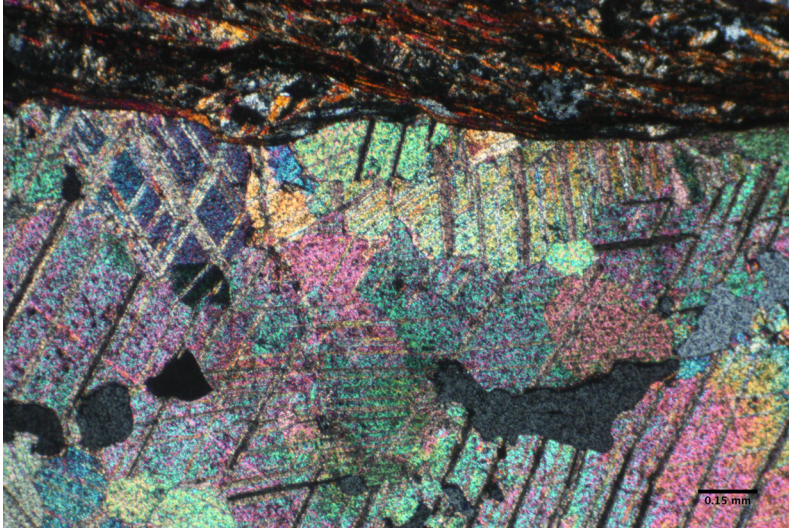
**Abbildung 65: MBS 7, Krenulationsschieferung mit in Auflösung befindlichen Mineralen**



**Abbildung 66: MBS 7, Krenulationsschieferung mit kleinen Quarzkristallen in den Scherbänder und Kalzitkristalle werden an den Korngrenzen angelöst.**

Nach Abbildung 67 lässt sich vermuten, dass die Kalzitkristalle schon vor der Deformation gebildet wurden und später durch die Scherbeanspruchung zerstört wurden. Ähnliches kann auch für die Quarzkristalle gelten, da hier die größeren Kristalle eine erhöhte (mittlere) Undulösität aufweisen im Vergleich zu den kleineren Quarzkristallen, welche eine geringe Undulösität besitzen. An dieser Stelle tritt die Vermutung zu Tage, dass die größeren Kristalle vor dem Deformationsereignis gebildet wurden und die kleineren Kristalle später oder syngenetisch sind.

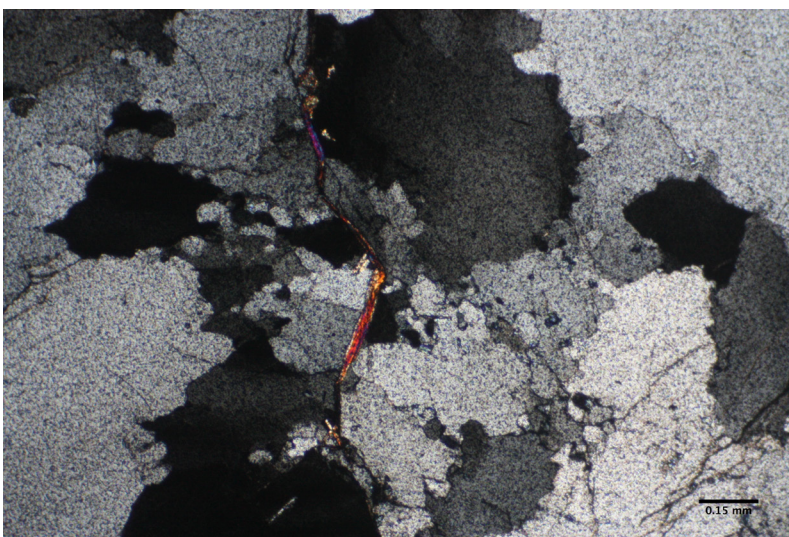




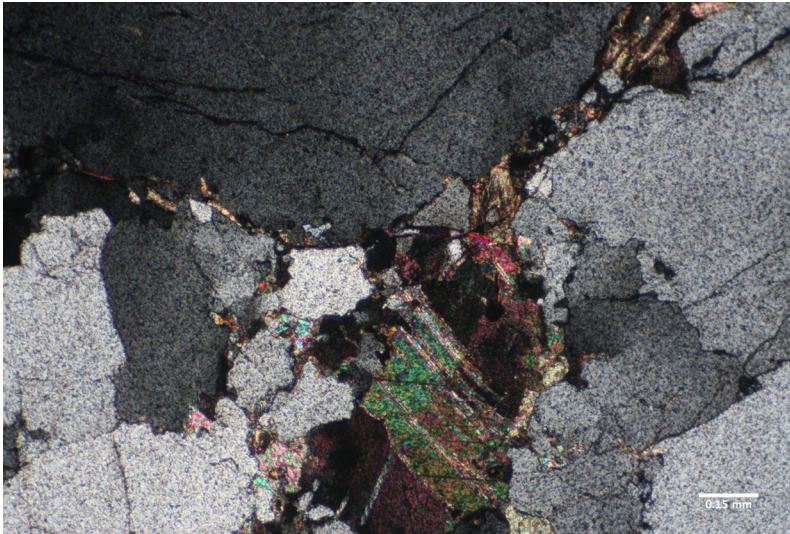
**Abbildung 67: MBS 7, Kalzitkristalle abgeschnitten durch das Scherband**

### **MBS 8:**

Bei der Probe MBS 8 handelt es sich um einen Quarzknauer (Abbildung 68) mit dem Übergang zur Phyllitzone (Abbildung 70). Das Gestein besteht zu 80% aus Quarz, 17% Kalzit, 2% Glimmer und <1% opake Minerale. Die großen Quarzkörner zeigen Spuren von Drucklösungen (Abbildung 68) an den Korngrenzen sowie suturierte Kornkontakte. In diesem Schliff tritt eine Felder-geteilte Auslöschung im Auslöschverhalten der Quarze häufiger auf und sie besitzen mittlere Undulösität. Entlang der Mikrorisse an den Korngrenzen der Quarze kann es zum Auftreten von Glimmermineralen und Kalziten kommen (Abbildung 68 & Abbildung 69). In Abbildung 68 & Abbildung 69 sind Druckrisse erkennbar, welche schon vor Bearbeitung mit dem Laborbrecher im Gestein vorhanden sind. Diese Druckrisse können eine AKR erleichtern.

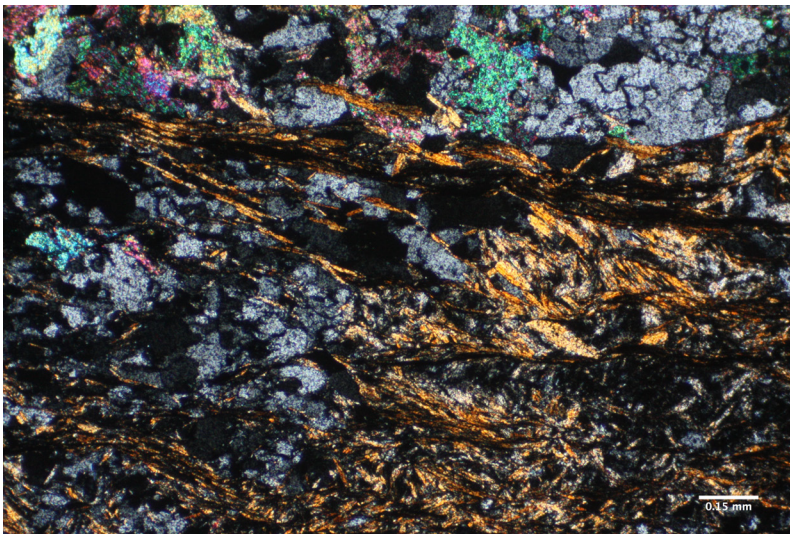


**Abbildung 68: BS8, Quarze mit Drucklösungserscheinungen**



**Abbildung 69: MBS 8, Quarze mit Kalzit und Glimmermineralen in den Mikrorissen**

In Abbildung 70 ist die Phyllitzone ersichtlich. Die Phyllitzone zeigt eine beginnende Krenulationsschieferung was auf eine höhere Deformation schließen lässt. Die Korngrenzen der Kalzite wirken angelöst und auch die Quarze sind eher hypidiomorph bis xenomorph.



**Abbildung 70: MBS 8, Phyllitzone am Übergang des Quarzknauers zum Schiefer**



### 4.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Im nachfolgenden Schliffbild (Abbildung 71) ist ein Quarzkorn ersichtlich, welches durch einen Riss getrennt wird. Dieser Riss kann ein Hinweis auf eine schädigende Reaktion sein. Der Riss ist in Abbildung 72 deutlicher dargestellt, wobei im Schliffbild nicht zu erkennen ist ob eine Rissfüllung vorliegt. Ansonsten scheinen keine Risse im Korn aufzutreten und des Weiteren ist eine Fortsetzung des Risses in der Zementsteinmatrix nicht erkennbar. In der Zementsteinmatrix von Abbildung 71 sind unterschiedliche Färbungen erkennbar.

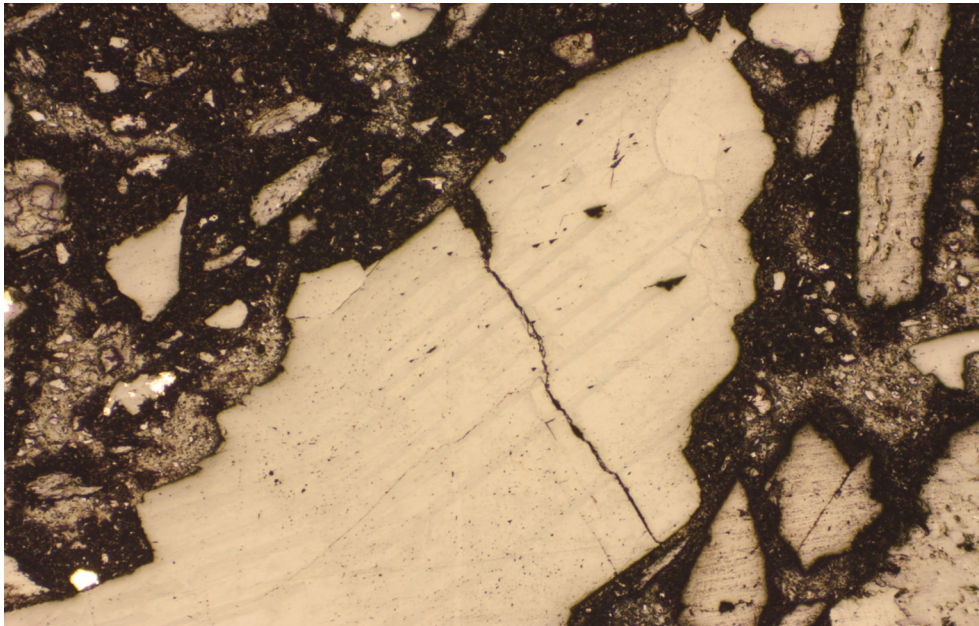


Abbildung 71: Quarzkorn mit Riss, AL, BB: 2mm

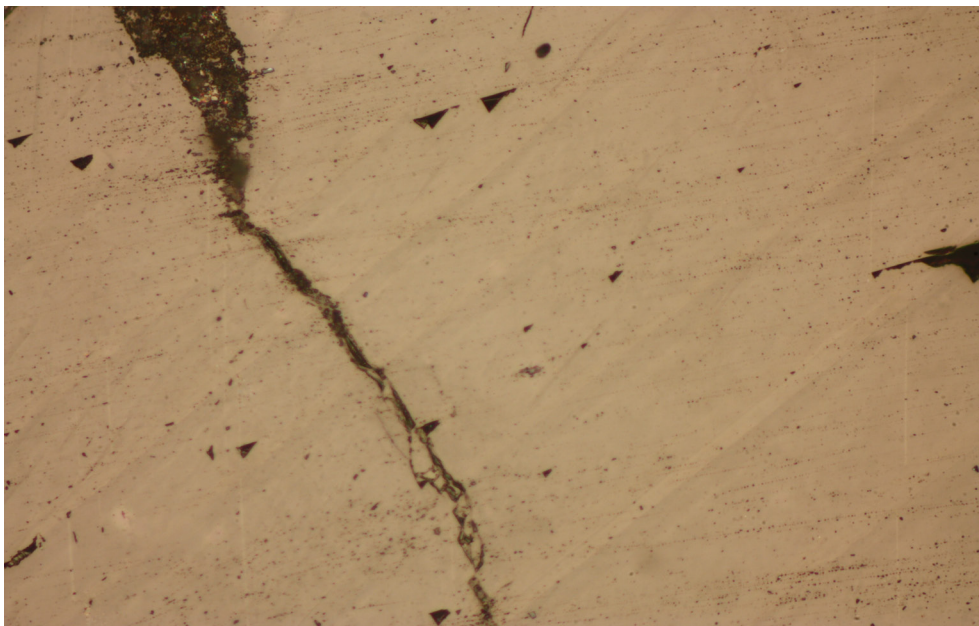
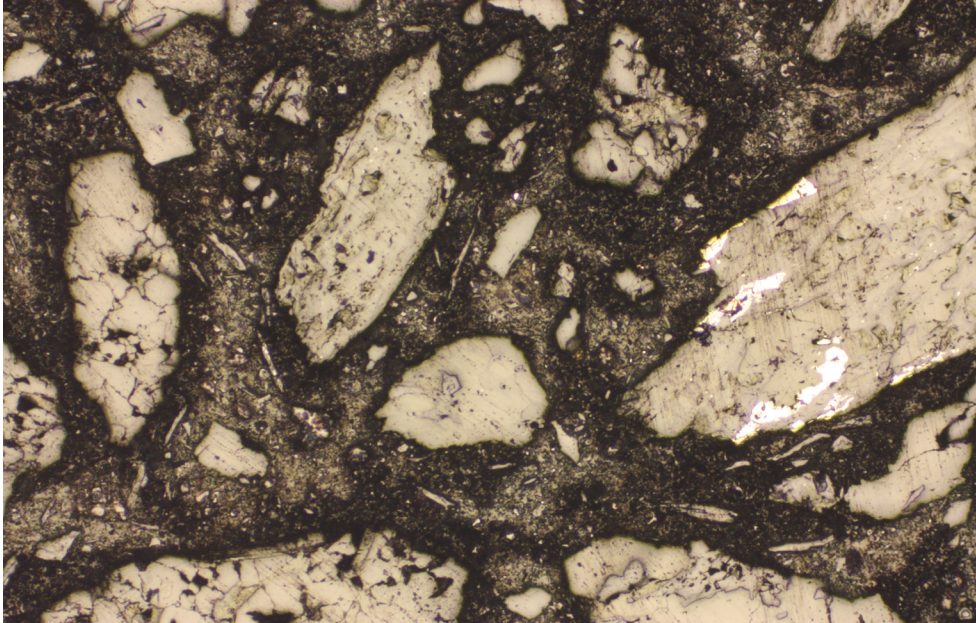


Abbildung 72: Detailaufnahme des Risses, AL, BB: 0,5mm





**Abbildung 73: Körnung + Zementsteinmatrix, AL, BB: 2mm**

Abbildung 73 zeigt die Verwachsung von Zementsteinmatrix und der Körnung. Es sind keine Risse erkennbar im Bild, weder in den Körnern, noch in der Zementsteinmatrix. Die kleineren Risse in den Körnern zeigen auch im Detail keine Füllung, weswegen sie als Korngrenzen angenommen werden.

#### 4.2.4 Beschreibung der Mörtelprismen der Bindemittelkombination

In dem untersuchten Dünnschliff wurden mehrere mittelgroße Risse durch Quarz- und Kalzitkristalle erkannt (Abbildung 74 & Abbildung 75). Die Risse verlaufen nicht durch die vorhandenen Glimmerkristalle. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Rissausbreitung in Kristall und Zementsteinmatrix stattfindet.

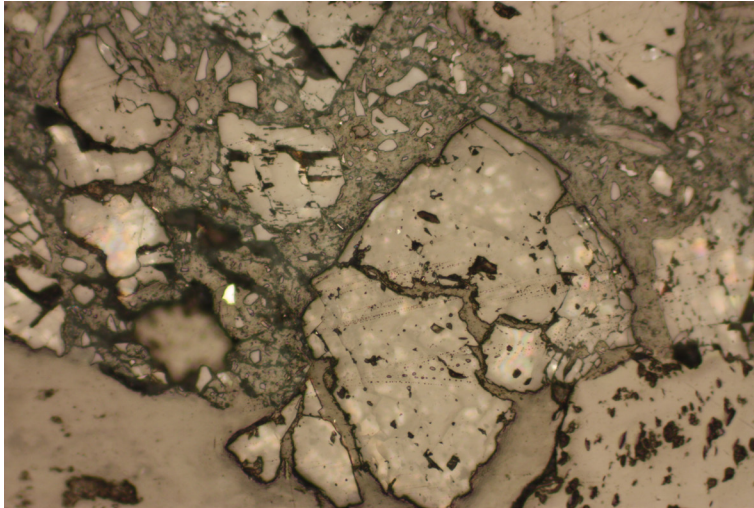


Abbildung 74: Risse in Kristall und Zementsteinmatrix, x10, AL

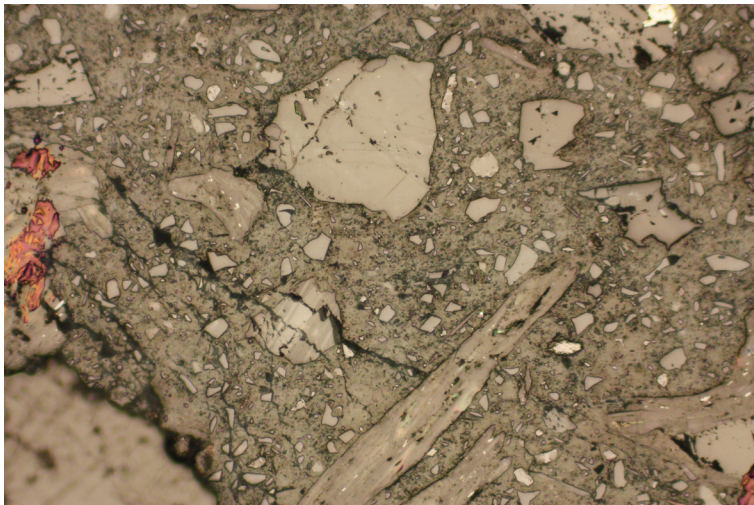
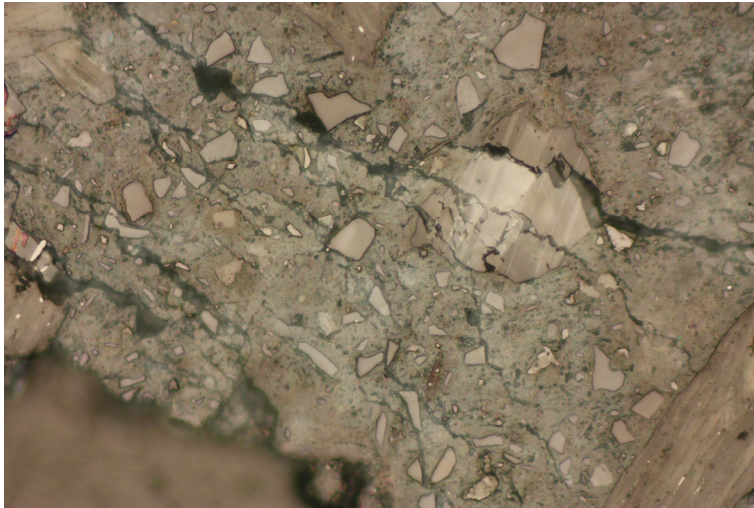
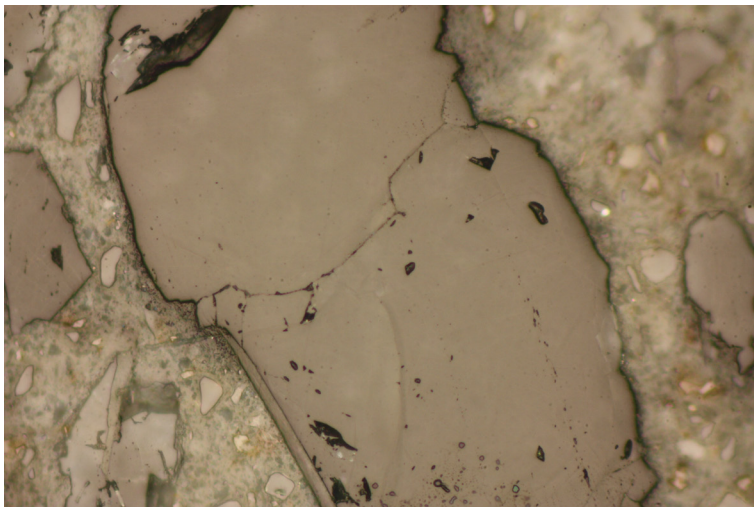


Abbildung 75: Risse durch Kristall und Zementsteinmatrix, x10, AL; rote Farbe ist ein Markierstift

Im Detail ist in Abbildung 76 der Verlauf der Rissbildung durch Kristall und Zementsteinmatrix besser erkennbar. In Abbildung 75 ist das Ende des Risses an einem Glimmerkristall erkennbar. Die Besonderheit in dieser Probe ist das Auftreten mehrerer Risse direkt nebeneinander. Zur Überprüfung ob es sich hier um eine AKR und nicht Ettringit handelt, wäre eine Überprüfung mittels REM notwendig.



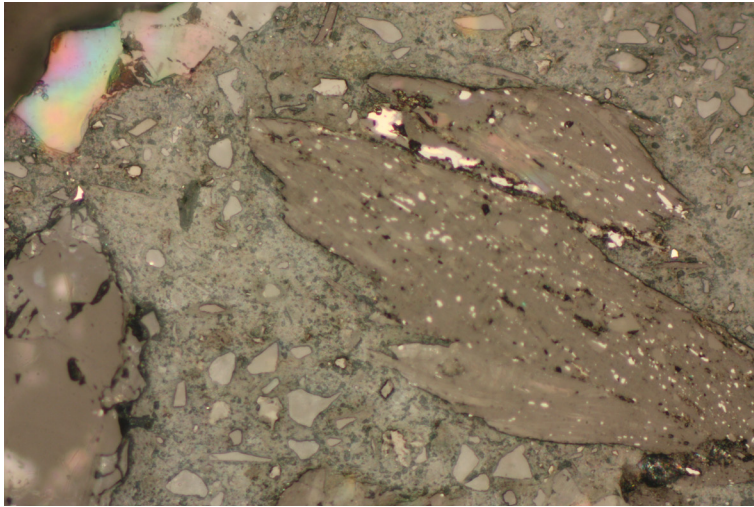
**Abbildung 76: Detailansicht von Rissen durch Kristalle und Zementsteinmatrix, x20, AL**



**Abbildung 77: Feiner Riss durch Quarzkristall, x20, AL**



Des Weiteren wurden in einigen Quarzkristallen die üblichen kleineren, eventuell AKR-bedingten, Risse beobachtet (Abbildung 77 & Abbildung 78). In Abbildung 78 ist auch der Rissfortsatz in der oberen linken Hälfte erkennbar.



**Abbildung 78: Riss durch Kristall und Zementsteinmatrix, x20, AL**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Dünnschliffbetrachtungen Rissbildungen erkennen lassen, die nicht die Testergebnisse des Normtests widerspiegeln. Hier könnte eine AKR bedingte Reaktion stattgefunden haben. Eine EDX – Analyse zeigte Rückstände von angereicherten Na, K, Ionen in den Rissen. Mit der Lichtmikroskopie konnte jedoch kein eindeutiger Nachweis erbracht werden.

#### 4.2.5 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen

In den Dünnschliffen der mittleren Bündner Schiefer wurden eindeutige Rissbildungen bei Kornaggregaten festgestellt. Die Quarze sind des Öfteren stark geschädigt und zeigen manchmal auch eine Schädigung ihrer Struktur. Risse durch die Zementsteinmatrix, welche unter dem Mikroskop schwer erkennbar waren, sind mit Hilfe des REM sehr deutlich geworden.

In Abbildung 79 ist ein größeres Kornaggregat aus Quarz (dunkelgrau) und Kalzit (hellgrau) nachweisbar zu sehen. Durch die Quarzanteile sind die Risse sehr deutlich sichtbar, in den Kalziten treten diese kaum auf. Des Weiteren ist der Pfad zu einer angrenzenden Luftpore gut einsichtbar. Der Riss verläuft in der Zementsteinmatrix weiter im Bild nach oben, dies sollte bei genauerer Betrachtung sichtbar sein. Die Quarze in der Umgebung zeigen ebenfalls ein Riss Bild. Ein AKR Gel wurde in der Luftpore nicht festgestellt, könnte aber bei der Präparation auch ausgewaschen worden sein.

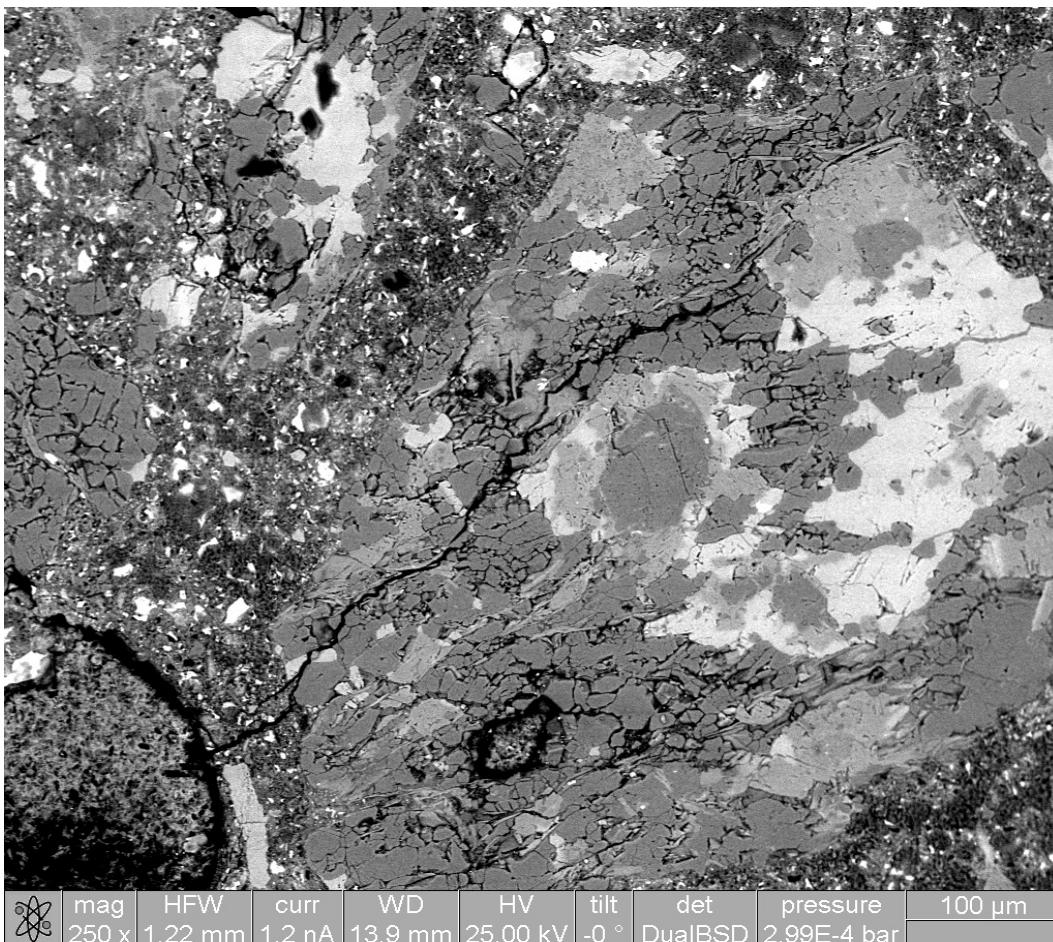
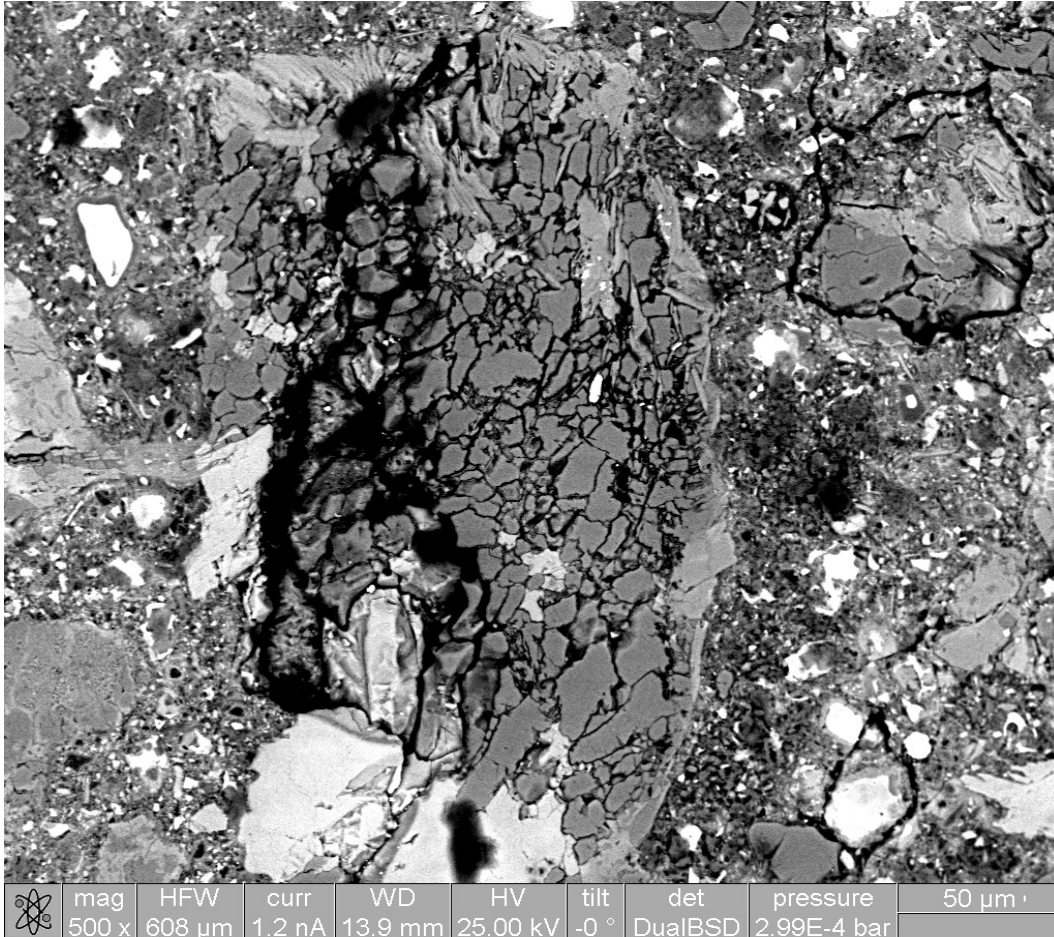


Abbildung 79: Risse durch Kornaggregat bevorzugt in Quarz, Risspfad zu Luftpore

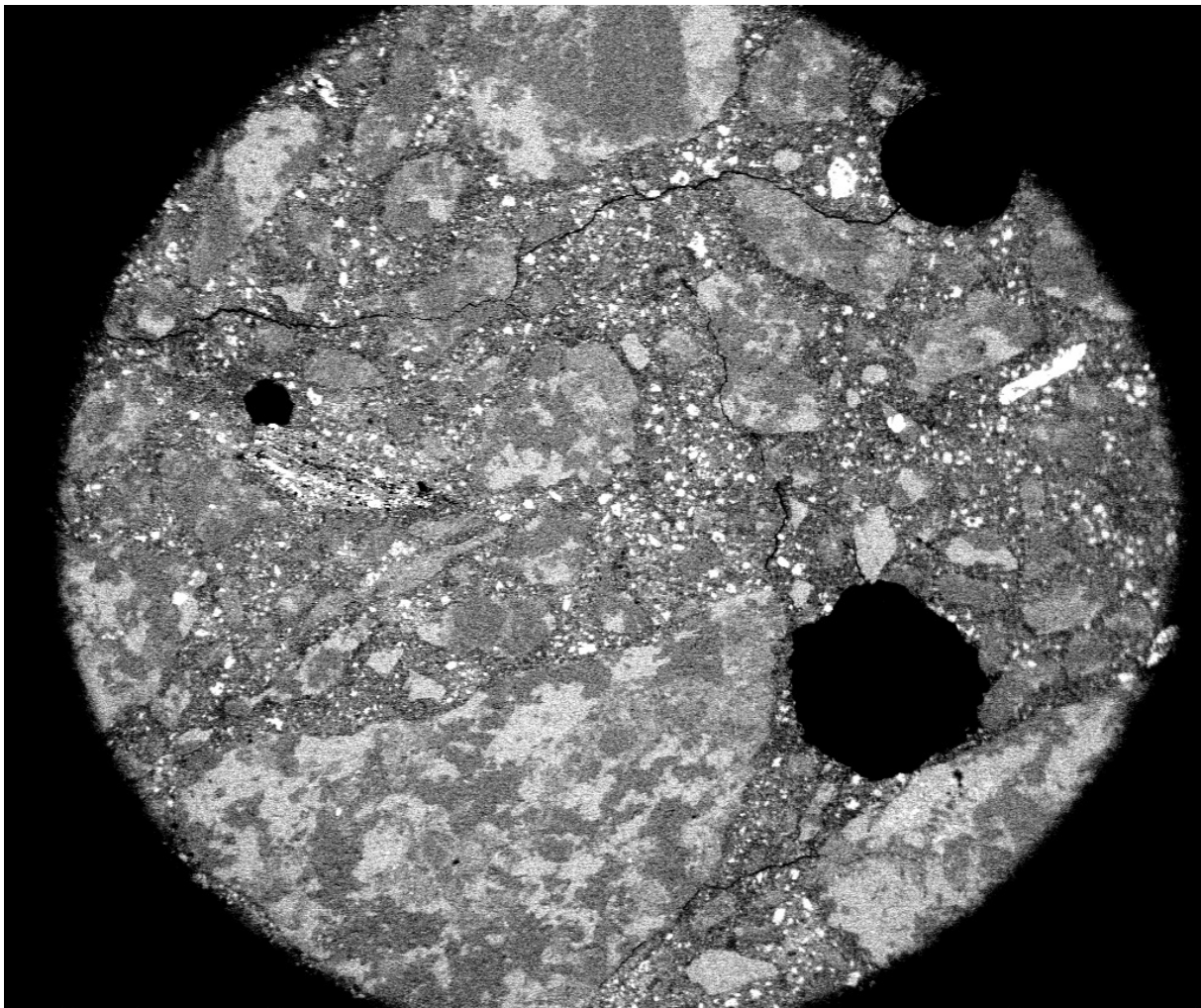
In Abbildung 80 ist ein Netzriss ähnliches Verhalten im Quarz erkennbar. In der REM-Ansicht ist deutlich, dass der Quarz aufgrund der Rissbildung stark aufgelöst wurde. Kleinere Quarze in der Umgebung zeigen zwar auch Risse, jedoch können sie ihre Struktur besser erhalten. Eine Gelbfärbung konnte nicht nachgewiesen werden.



**Abbildung 80: Quarz in Auflösung aufgrund AKR induzierter Risse**

In Abbildung 81 ist ein weit verzweigtes Netzwerk erkennbar. Inwiefern die Stabilität des Prismas dadurch beeinträchtigt wird, könnte z.B. über Druckfestigkeitsprüfungen kontrolliert werden. Der Rissverlauf geht durch Kornaggregate und Zementsteinmatrix. Interessant ist auch die Verbindung der Luftporen zueinander über den Ost - West verlaufenden Riss zu dem Nord-Süd verlaufenden Riss der zweiten Luftpore. Die feinen Verästelungen innerhalb der Quarze sind in dieser Ansicht kaum sichtbar.

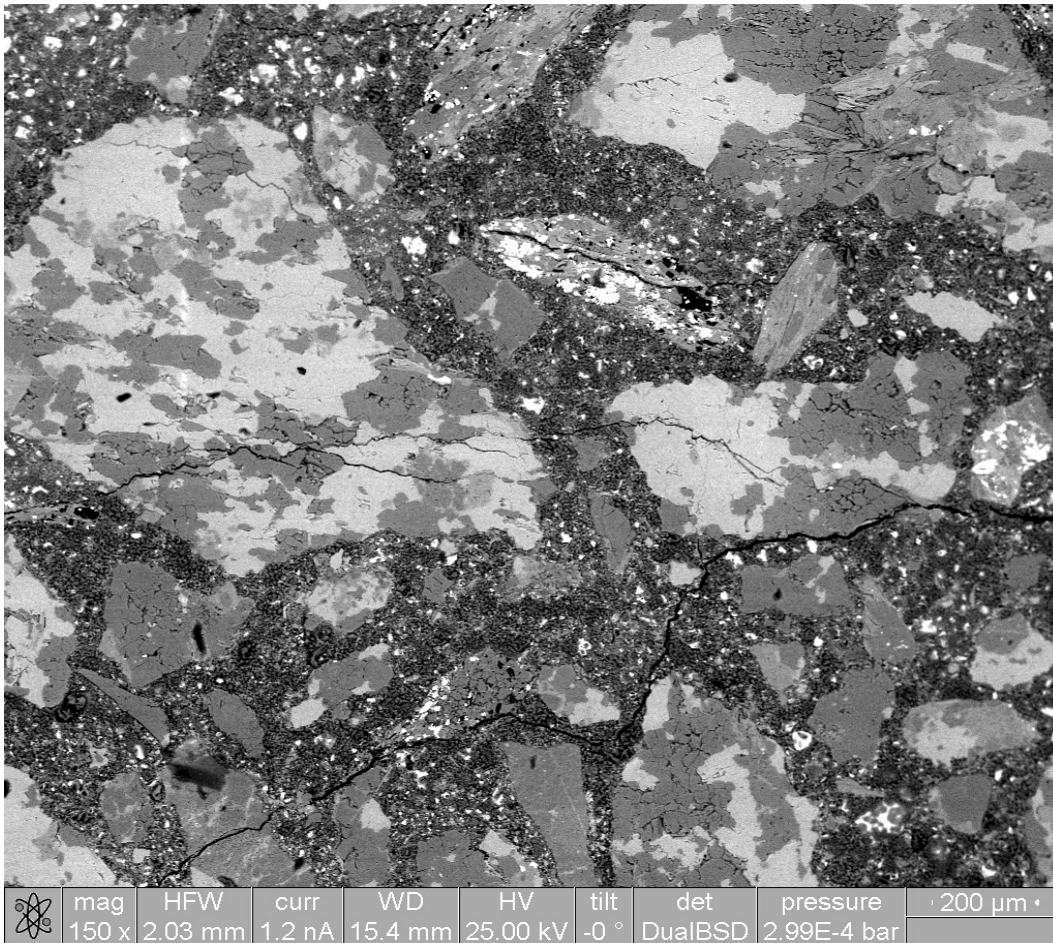




	mag	HFW	curr	WD	HV	tilt	det	pressure	← 500 µm →
	70 x	4.34 mm	1.2 nA	14.0 mm	25.00 kV	-0 °	DualBSD	2.99E-4 bar	

**Abbildung 81: Übersicht des Rissnetzwerkes mit maximaler Vergrößerung**

In Abbildung 82 ist nochmals verdeutlicht, dass auch in Kalzitkörnern Risse auftreten. Neben den Hauptrissen kommt es nur zu sehr feinen Verästelungen und eine Zerstörung der Aggregatstruktur findet nicht statt. Es sind wenig unbeschädigte Aggregate erkennbar und größere Risse verlaufen durch die Zementsteinmatrix.



**Abbildung 82: Risse durch Kornaggregate und Zementsteinmatrix**

Zusammenfassend zu den Schliffen der mittleren Bündner Schiefer bleibt zu sagen, dass weitere Untersuchungen z.B. Performancetests, Änderung der Rezeptur oder Überprüfung weiterer Gesteinsproben sehr hilfreich wären, um das Verständnis zu vertiefen. Die schwer erkennbaren Risse in der Zementsteinmatrix konnten mit Hilfe des REM gut erkannt werden. Bevorzugt sind Quarze betroffen und es gibt sehr wenige unbeschädigte Kristalle. Kalzite sind weniger betroffen.

Die Rissnetzwerke sind hier besonders ausgeprägt, leider konnte kaum ein Gel nachgewiesen werden, dies ist sehr wahrscheinlich den Schwierigkeiten der Präparation zu schulden.

### 4.3 Obere Bündner Schiefer

Die Proben der oberen Bündner Schiefer stammen von der Fels - Bohrkernprobe Pfons (Pf) 2002 – 2004.

#### 4.3.1 Obere Bündner Schiefer Kernprobe 1

##### 4.3.1.1 Makroskopische Beschreibung

Das Kernmaterial (Abbildung 83) wird in weiterer Folge OBS 1 genannt und ist dunkelgrau bis schwarz aufgrund des Graphitgehaltes, welcher nach Aufbereitungsergebnissen nicht über 1% liegt. Der Unterschied zu den unteren und mittleren Bündner Schiefen ist, dass das Gestein feinkristalliner ist. Dies führte auch zu Schwierigkeiten bei der Dünnschliffherstellung. Im Gestein ist ein größerer Quarzgang sichtbar, vereinzelt treten auch sehr kleine Quarzgänge auf. Im Unterschied zu den anderen Bündner Schiefer sind vermehrt intakte Pyrite zu sehen. Aufgrund der Feinkristallinität neigt das Gestein eher zum Zerbrechen. Der Karbonatanteil (Kalzit) überwiegt im Vergleich zu Quarz. Ein leicht fettiger Griff aufgrund des Graphits ist merklich.

Die Kernaussage entspricht der Lage in der Kernkiste.



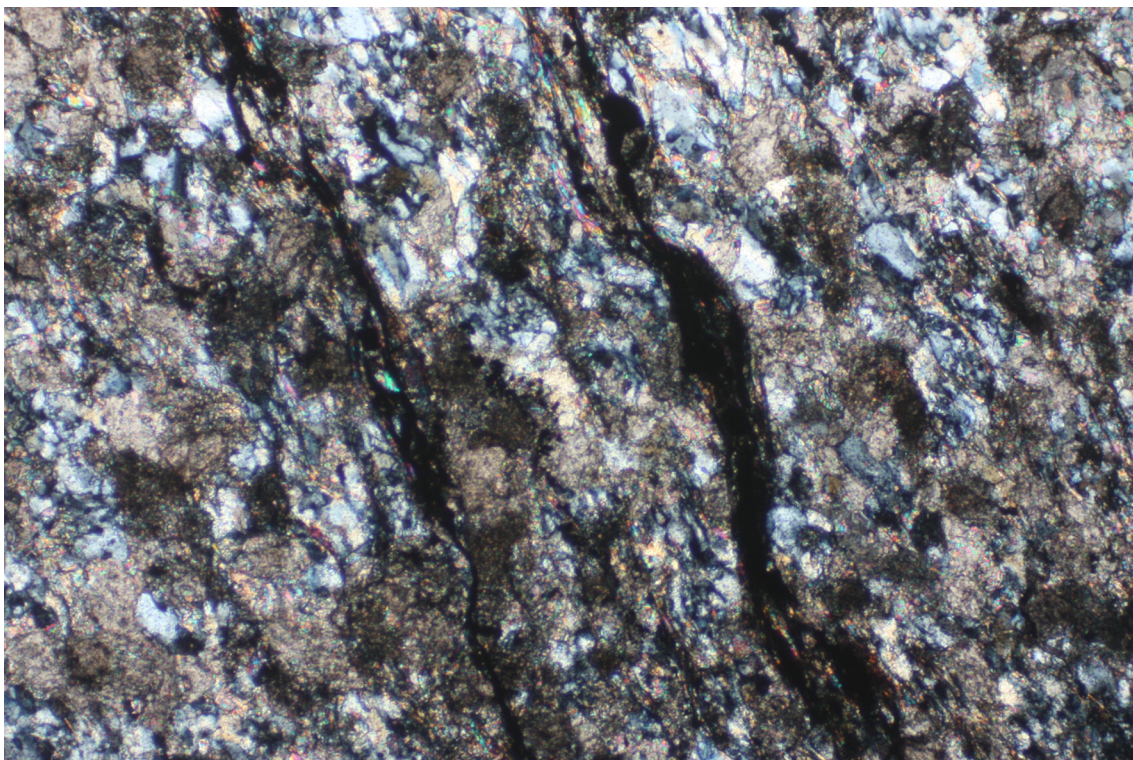
Abbildung 83: Kernmaterial OBS 1, Dünnschliffe wurden aus dem rot umrandeten Bereich hergestellt.



#### 4.3.1.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung der Probe wurden drei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptgemengteil ist Karbonat (Kalzit) mit 67,5%, der Nebengemengteil besteht aus Quarz mit 25% und untergeordnet Muskovit mit 6,5%. Als Accessoire tritt Pyrit (1%) und Graphit < 1% auf. Bei dem Gestein handelt es sich um einen Kalkphyllit

Für die Probe ist typisch, dass diese mit mehreren Scherbändern durchzogen ist. Die Karbonate bilden größere Kristalle im Vergleich zu den Quarzen und treten häufiger auf. In den Scherbändern befindet sich vorrangig Muskovit, die dunkle Farbe kommt vom Graphit und vereinzelt befinden sich Pyritkristalle in den Scherbändern (Abbildung 84). Des Weiteren ist der Muskovit fein verteilt über das Gestein.



**Abbildung 84: Karbonat und Quarz mit Scherbändern, BB: 2mm**

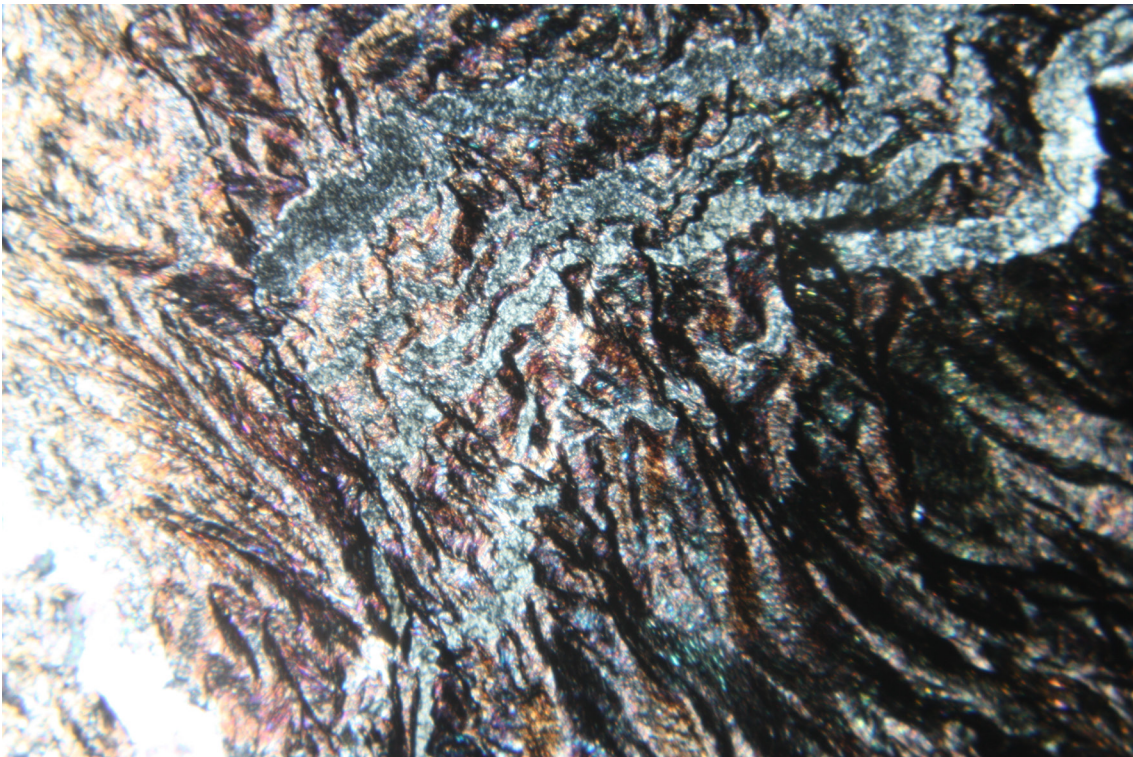
Es treten relativ häufig auch größere Scherbänder auf, zum Beispiel jene wie in Abbildung 85 & Abbildung 86 dargestellt. In Abbildung 85 ist der Größenunterschied zwischen Karbonat und Quarz deutlicher im Vergleich zu Abbildung 84. generell ist zu beobachten, dass die Kristalle nicht sehr groß werden.





**Abbildung 85: Scherband durch das Gestein, BB: 4mm**

In Abbildung 86 wurde ein Scherband zu einem späteren Zeitpunkt von einem Kalzitgang durchschlagen.



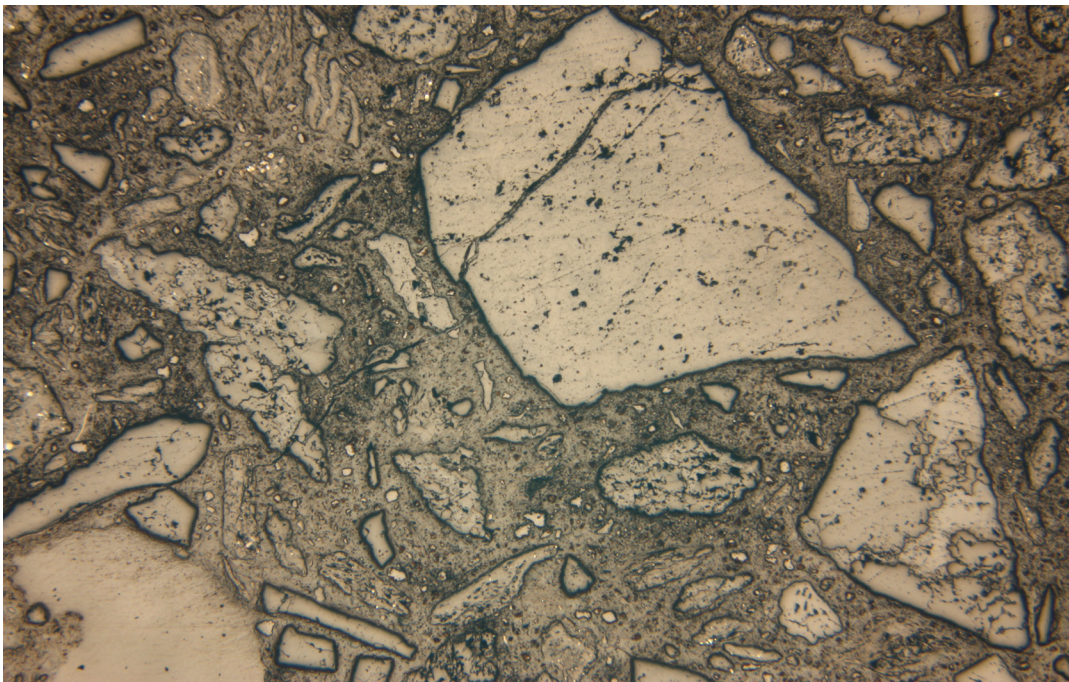
**Abbildung 86: Kalzitgang durch Scherband, BB: 2mm**



### 4.3.1.3 Beschreibung der Mörtelprismen

In der nachfolgenden Bildserie zeigen die Abbildung 87 & Abbildung 89 die Übersicht über den Verlauf eines größeren Risses, der sehr wahrscheinlich durch eine schädigende Reaktion im Zementstein hervorgerufen wurde. Die Risslänge beträgt ungefähr 10 mm, wobei kein eindeutiges Ende des Risses erkennbar ist und auch die Rissbreite variiert. Die Detailansicht des Risses ist in den Abbildung 88 & Abbildung 90 erkennbar.

In Abbildung 87 verläuft der Riss von der Luftpore zu dem größeren Korn in Bildmitte, welches durchtrennt wird. In weiterer Folge verläuft der Riss bis zur Bildoberkante und setzt sich in Abbildung 89 fort.

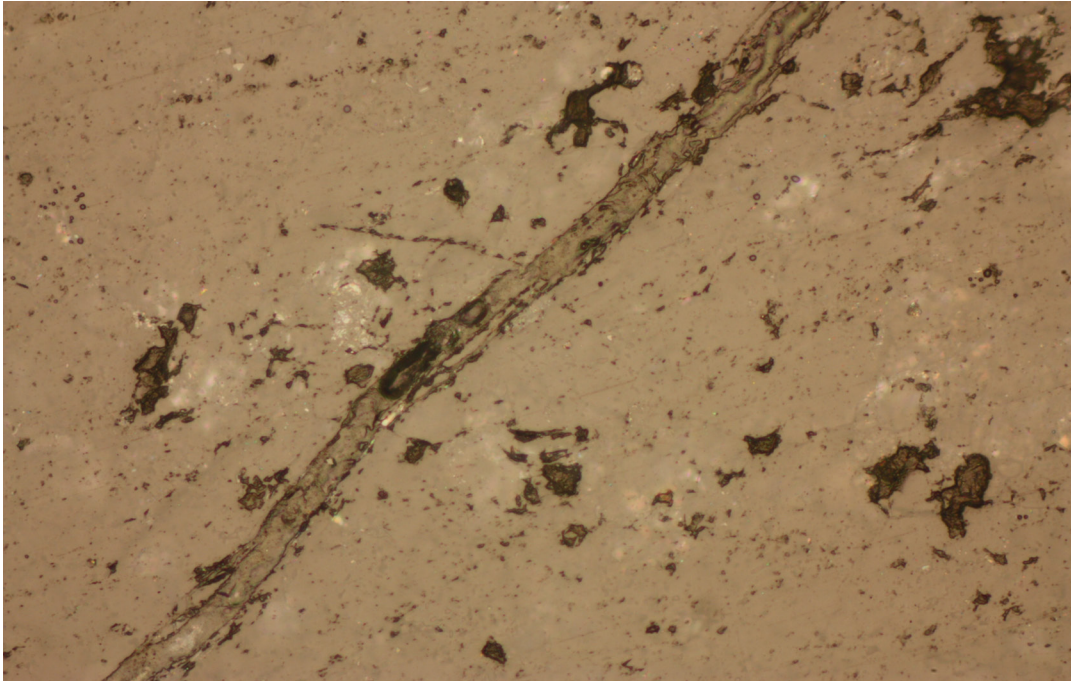


**Abbildung 87: Riss von Korn zu Luftpore, Auflicht, BB: 4mm**

Der Riss ist mit Material verfüllt wie in Abbildung 88 ersichtlich ist. Eine Untersuchung der Verfüllung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Der Bildausschnitt stammt aus der Dünnschliffmitte.

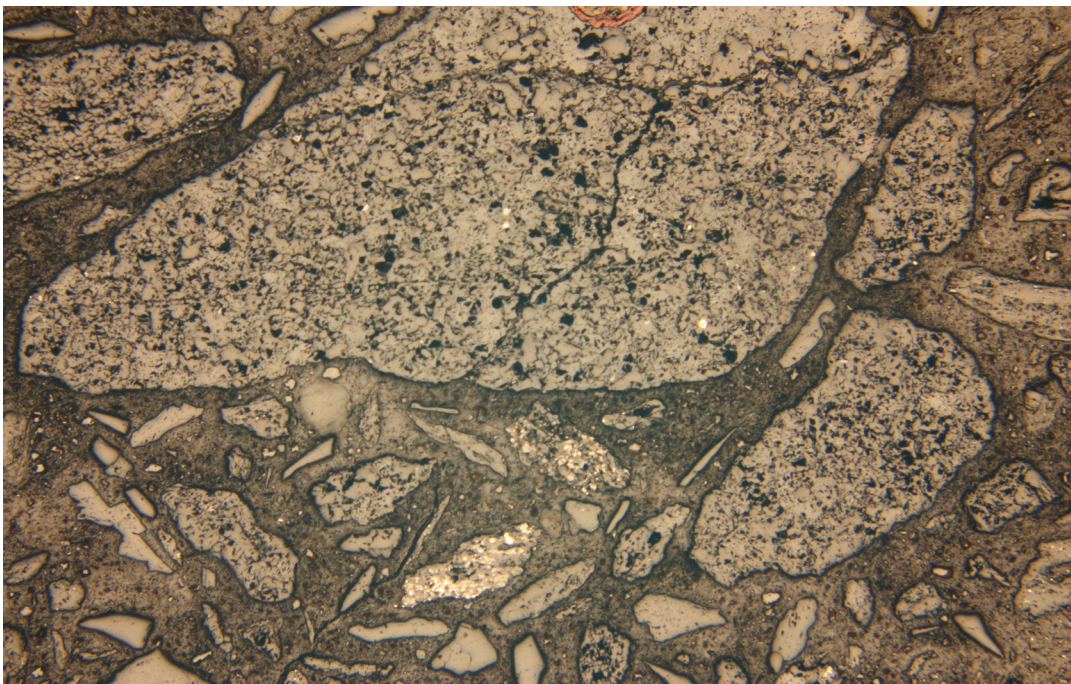
Die Rissbreite beträgt ungefähr 0,03 mm.



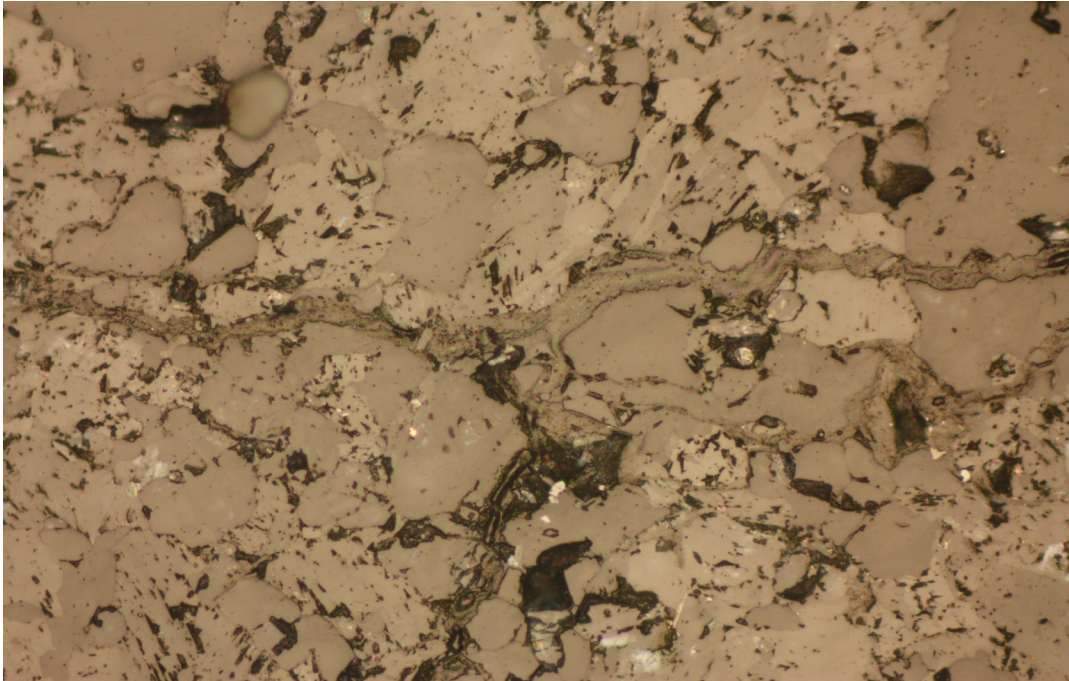


**Abbildung 88: Detailansicht des Risses, Auflicht, BB: 0.5mm**

Abbildung 89 zeigt die Fortsetzung des Risses vom Korn in der unteren linken Ecke durch die Zementsteinmatrix zu einem weiteren großen Korn. Im großen Korn verzweigt sich der Riss anhand einer T-Kreuzung, wodurch das Korn gut durchtrennt wird. Vereinzelt sind auch kleinere Risse abseits des Hauptrisses erkennbar. Der rötliche Fleck am oberen Bildrand stellt eine Markierung dar.



**Abbildung 89: Rissfortsetzung, Auflicht, BB: 4mm**



**Abbildung 90: T-Kreuzung des Hauptrisses im Korn, Auflicht, BB: 0.5mm**

In Abbildung 90 ist eine Detaildarstellung der Verzweigung des Risses erkennbar, die Rissbreite ist ungefähr 0,03 mm. Das Füllmaterial dieses Schliffes wurde mit dem REM untersucht und besitzt die Zusammensetzung eines AKR – Gels.



#### 4.3.1.4 Beschreibung der Mörtelprismen der Bindemittelkombination

In diesem Dünnschliff ist ein längerer Riss erkennbar in Abbildung 91. Dieser hat eine Länge von ca. 6mm und endet in der Zementsteinmatrix. Der Riss verläuft durch einen Mischkristall aus Quarz und Kalzit (Abbildung 92 & Abbildung 93). Des Weiteren ist auch eine Rissfüllung in der Detailbetrachtung zu erkennen.

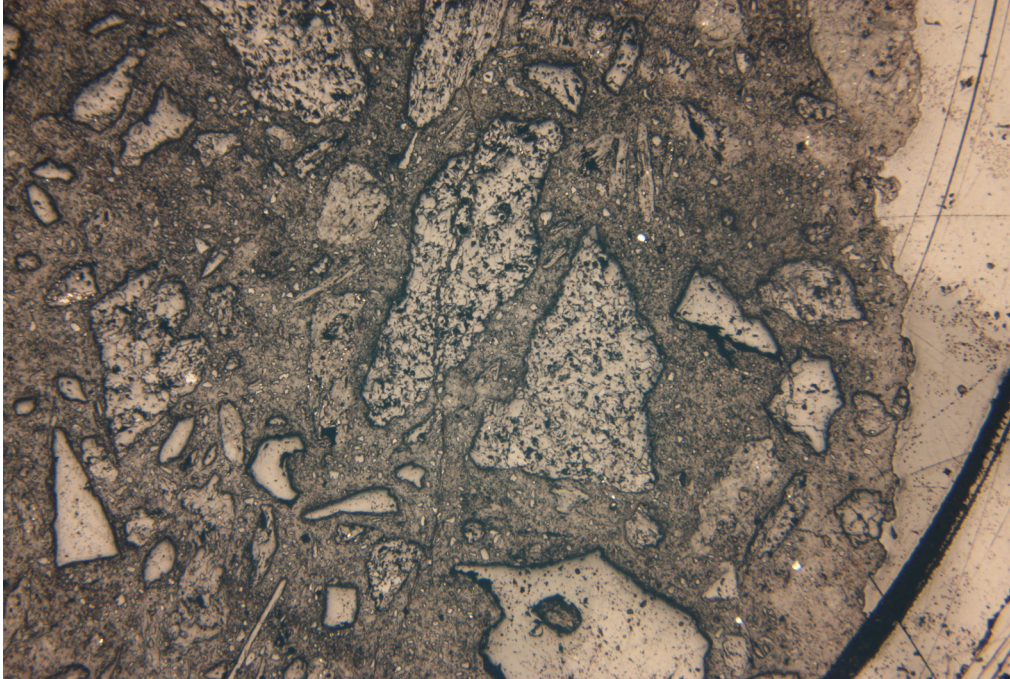


Abbildung 91: Rissverlauf in Bildmitte durch Mischkristall, x2,5, AL

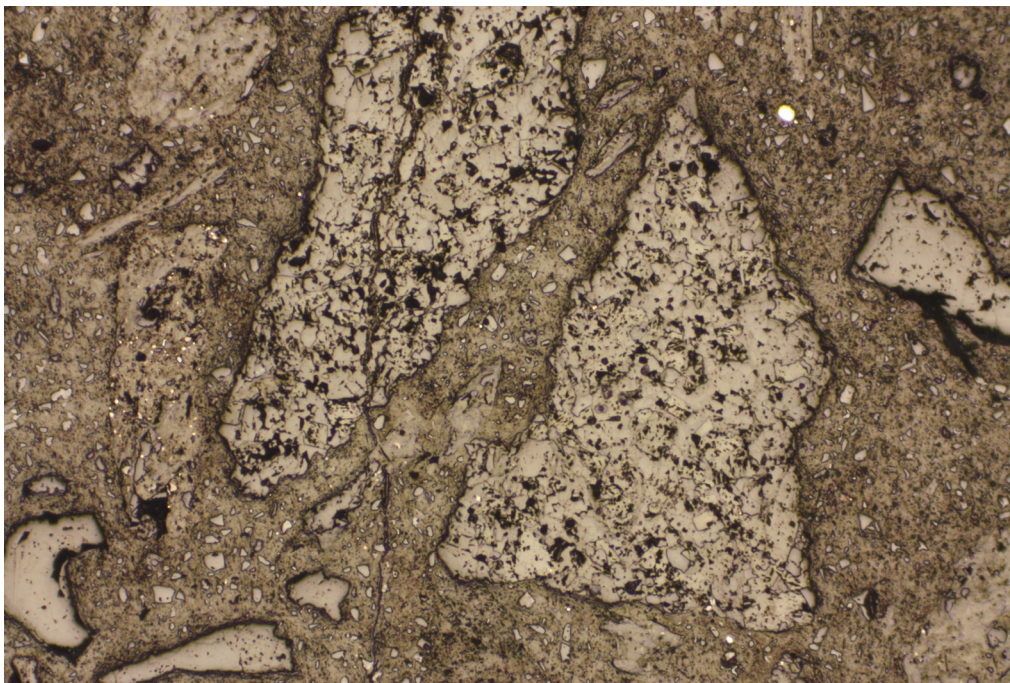
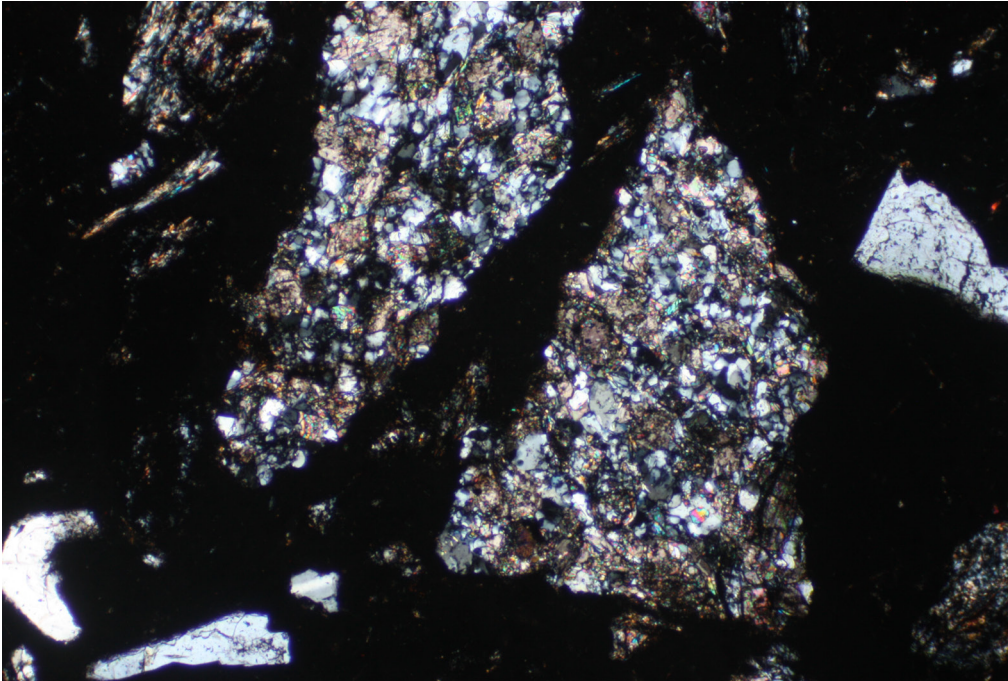


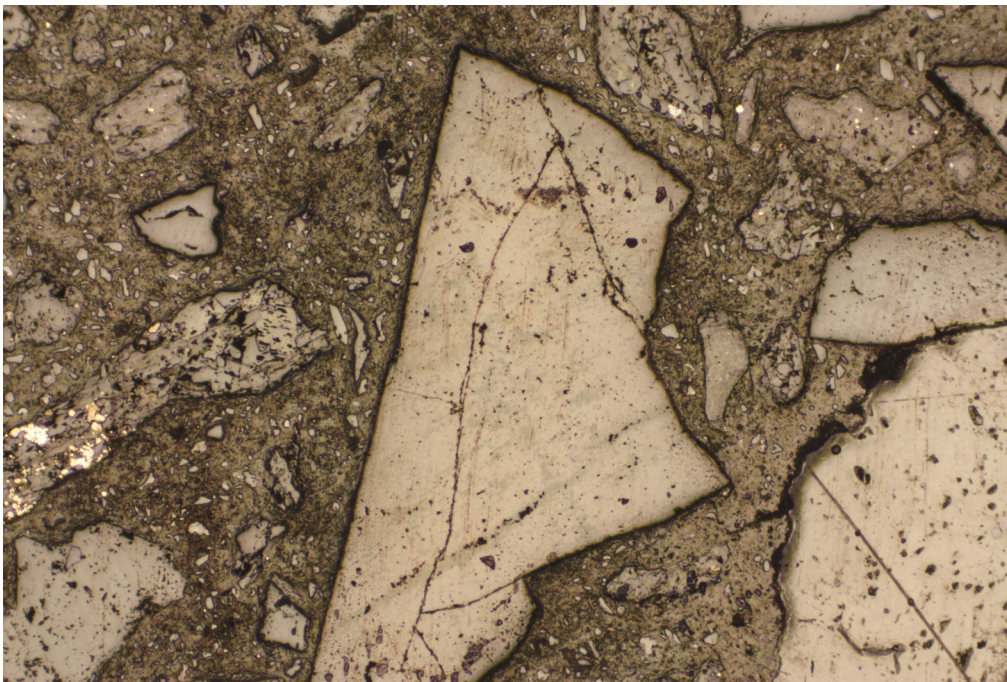
Abbildung 92: Rissverlauf durch Mischkristall, x5, AL





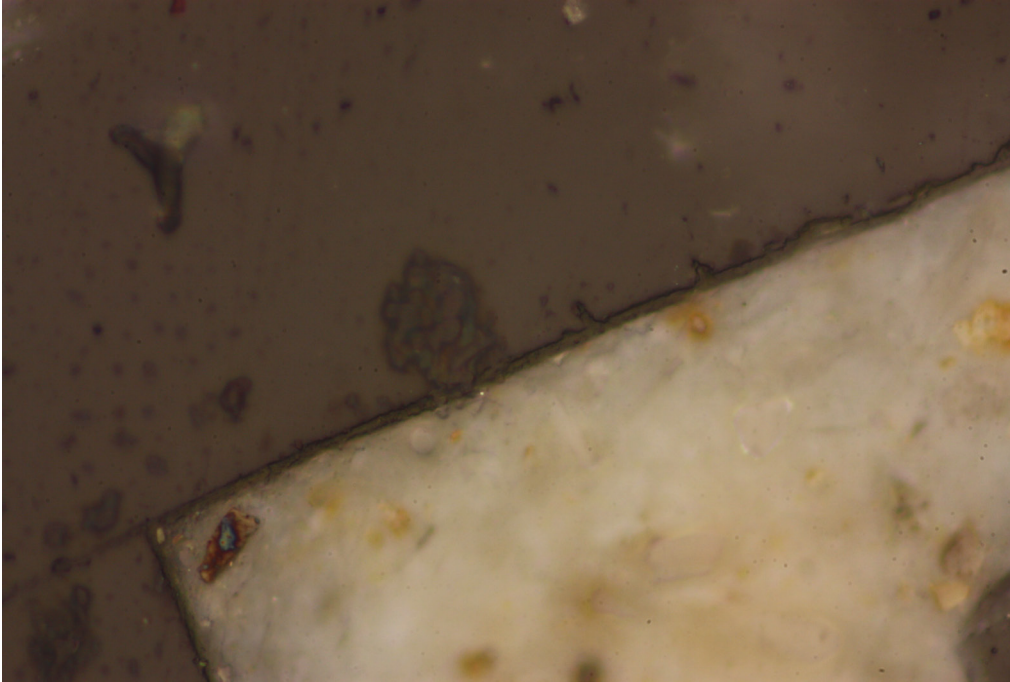
**Abbildung 93: Rissverlauf durch Mischkristall, x5, xN**

Weiters ist ebenso wie in anderen Dünnschliffen zu beobachten, dass in Quarzen kleinere Risse feststellbar sind, ersichtlich in Abbildung 94. Das Besondere an diesem Kristall ist, dass auch eine deutliche Säumung erkennbar ist (siehe Abbildung 95). Die Detailansicht entspricht der unteren Bildmitte von Abbildung 94. Hierbei handelt es sich um die rechteckige Kristallgrenze des Quarzkristalles zur Zementsteinmatrix.



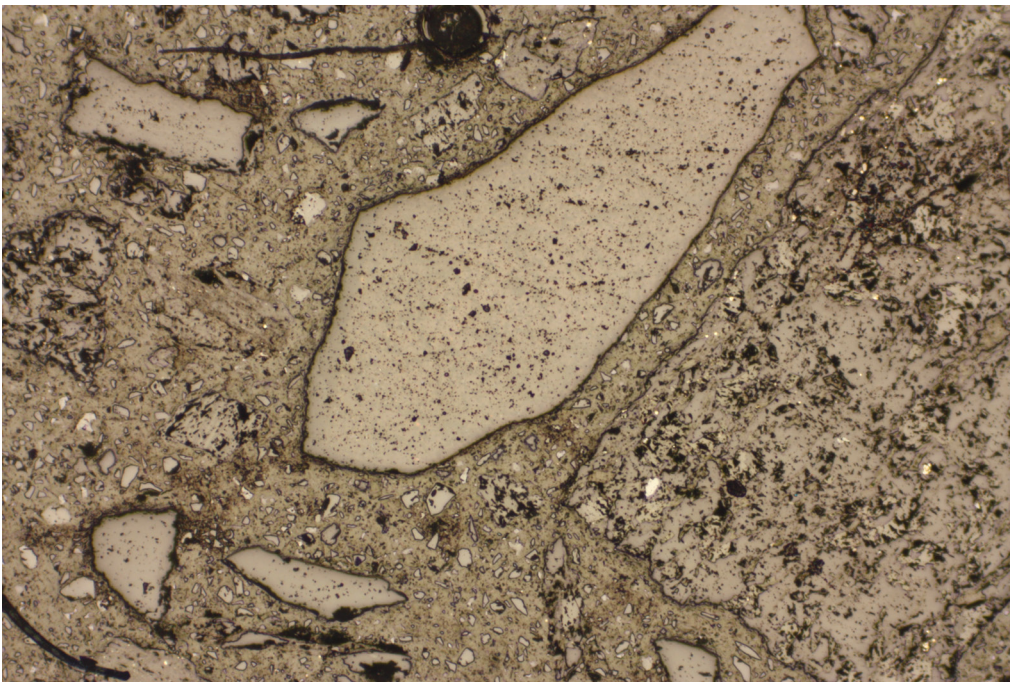
**Abbildung 94: Quarzkristall mit feinen Rissen, x5, AL**



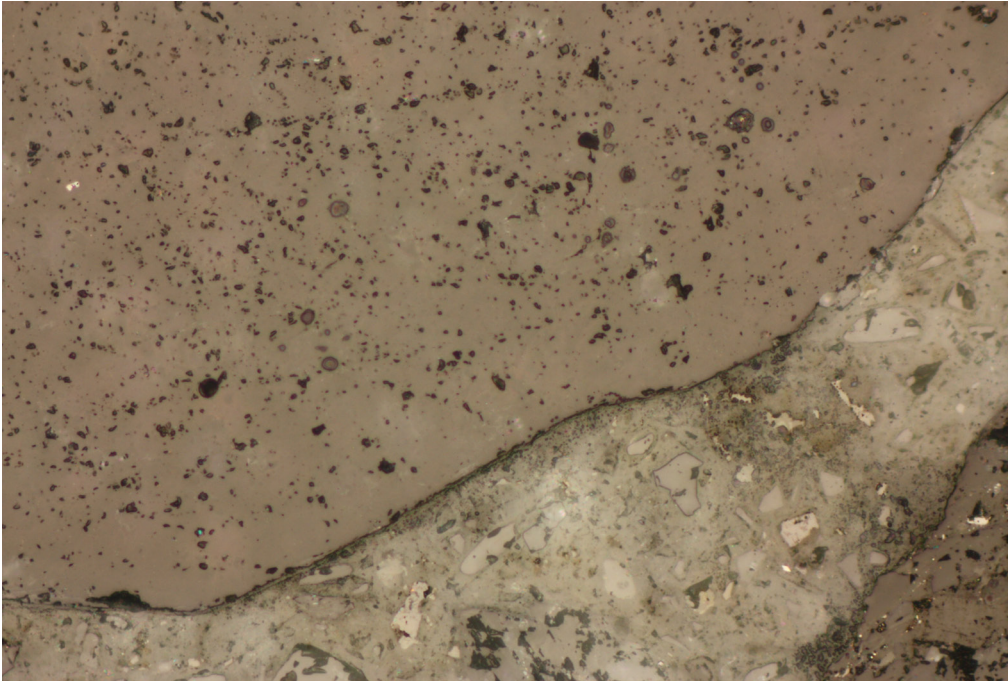


**Abbildung 95: Detailansicht Reaktionssaum, x50, AL**

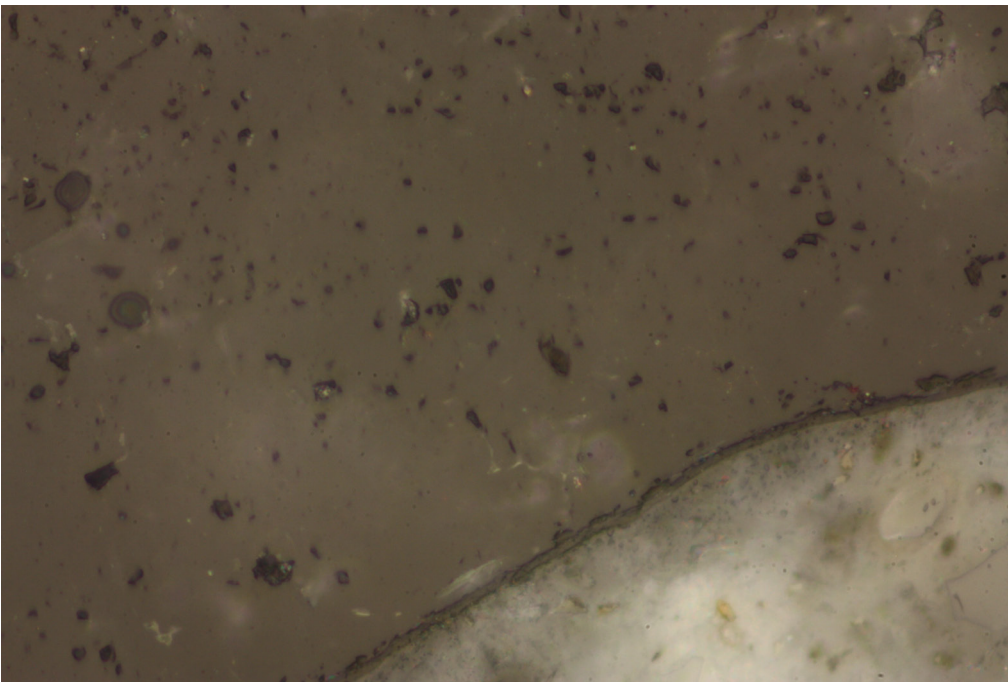
Bei diesem Dünnschliff (Abbildung 94 & Abbildung 96) scheinen einige Kristalle ein höheres Relief zu besitzen, welches durch einen Reaktionssaum suggeriert wird. Dieser Reaktionssaum könnte im Zusammenhang mit einer schädigenden Reaktion im Mörtelprisma stehen. Im REM wurde dies nicht untersucht, womit keine genaue Ursache dafür festgestellt werden konnte. Ein weiteres Beispiel dafür ist in Abbildung 96 erkennbar mit nachfolgender Detailansicht (Abbildung 97 & Abbildung 98). Hierbei handelt es sich um einen unbeschädigten Quarzkristall mit einem Reaktionssaum.



**Abbildung 96: Unbeschädigter Quarzkristall mit deutlichen Kristallgrenzen, x5, AL**



**Abbildung 97: Detailansicht unteres Kristalldrittel mit Reaktionssaum, x20, AL**



**Abbildung 98: Detailansicht zum Erkennen des Reaktionssaumes, x50, AL**

Die Darstellung von Kristall bis zur Kristallgrenze verdeutlicht, dass ein Reaktionssaum sehr schwer zu erkennen ist, da dies nur mit hohen Auflösungen möglich ist. Des Weiteren zeigt Abbildung 98, dass es sich hier um keine scharfe Korngrenze handelt.

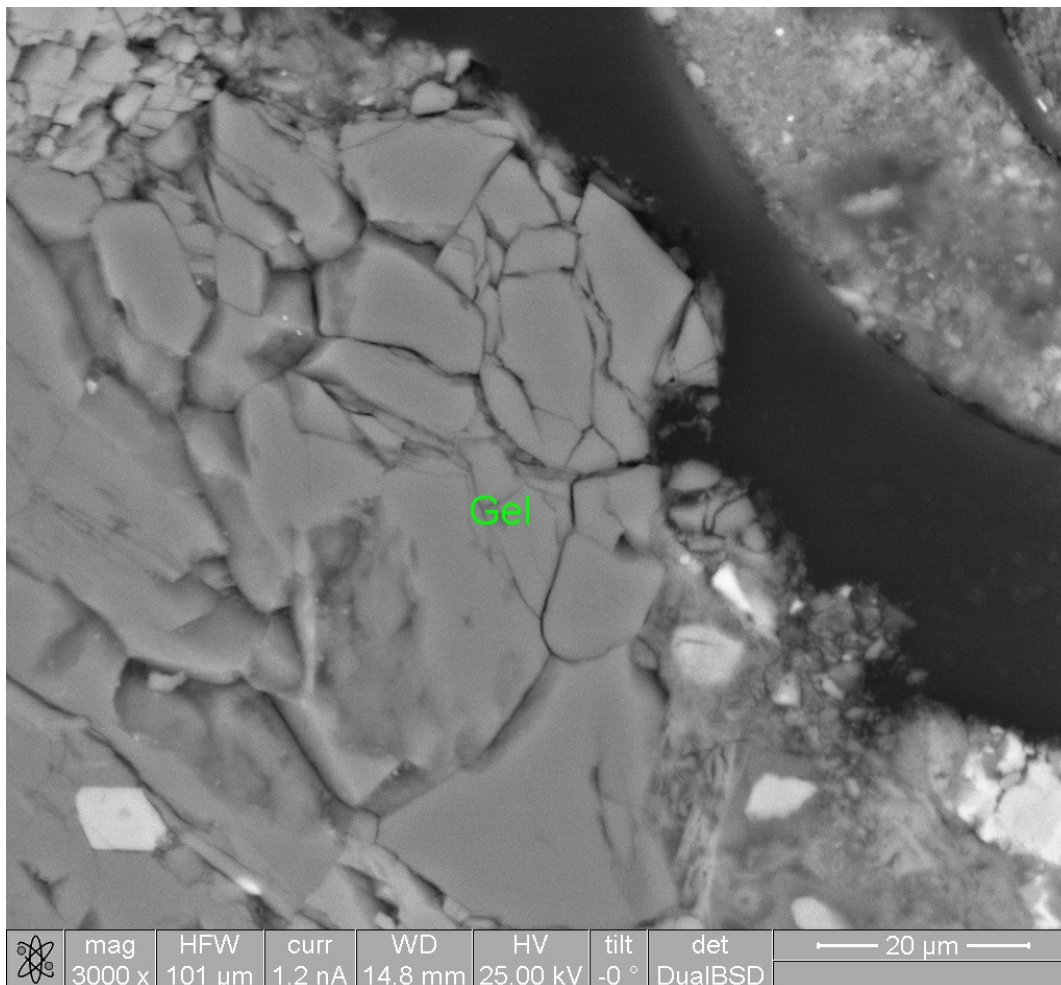
Auch bei diesem Prisma der Bindemittelkombination ist zu erkennen, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit eine AKR stattgefunden hat. Diese ist besser ersichtlich im Vergleich zu vielen anderen Proben.



#### 4.3.2.5 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen

Hier ist zu beachten, dass die Dünnschliffe der Bindemittelkombination untersucht wurden und nicht die des Normtest.

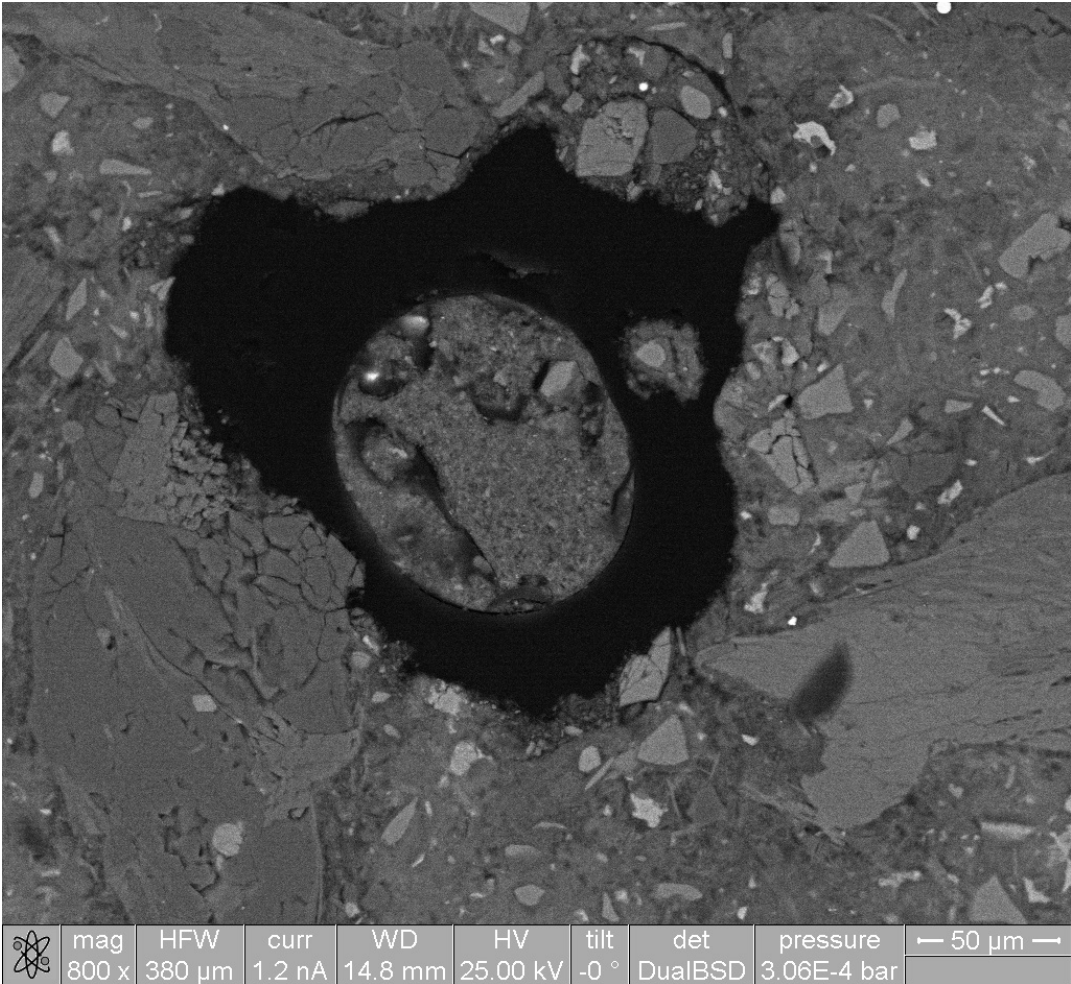
In den Dünnschliffen der Bindemittelkombination ist vorrangig erkennbar, dass weniger Risse in der Zementsteinmatrix vorhanden sind. Des Weiteren treten Risse in den Quarzen bevorzugt in Nähe von Poren oder am Rand des Prismas auf. Bei dem Gel in Abbildung 99 handelt es sich sehr wahrscheinlich um ein Ca-haltiges Gel, der Anteil an den Alkalien  $\text{Na}^+$  &  $\text{K}^+$  ist relativ gering. Es ist erkennbar, dass ein Großteil des Gels während der Probenbearbeitung wahrscheinlich ausgewaschen wurde.



**Abbildung 99: Ca-hältiges Gel in Quarz neben Pore**

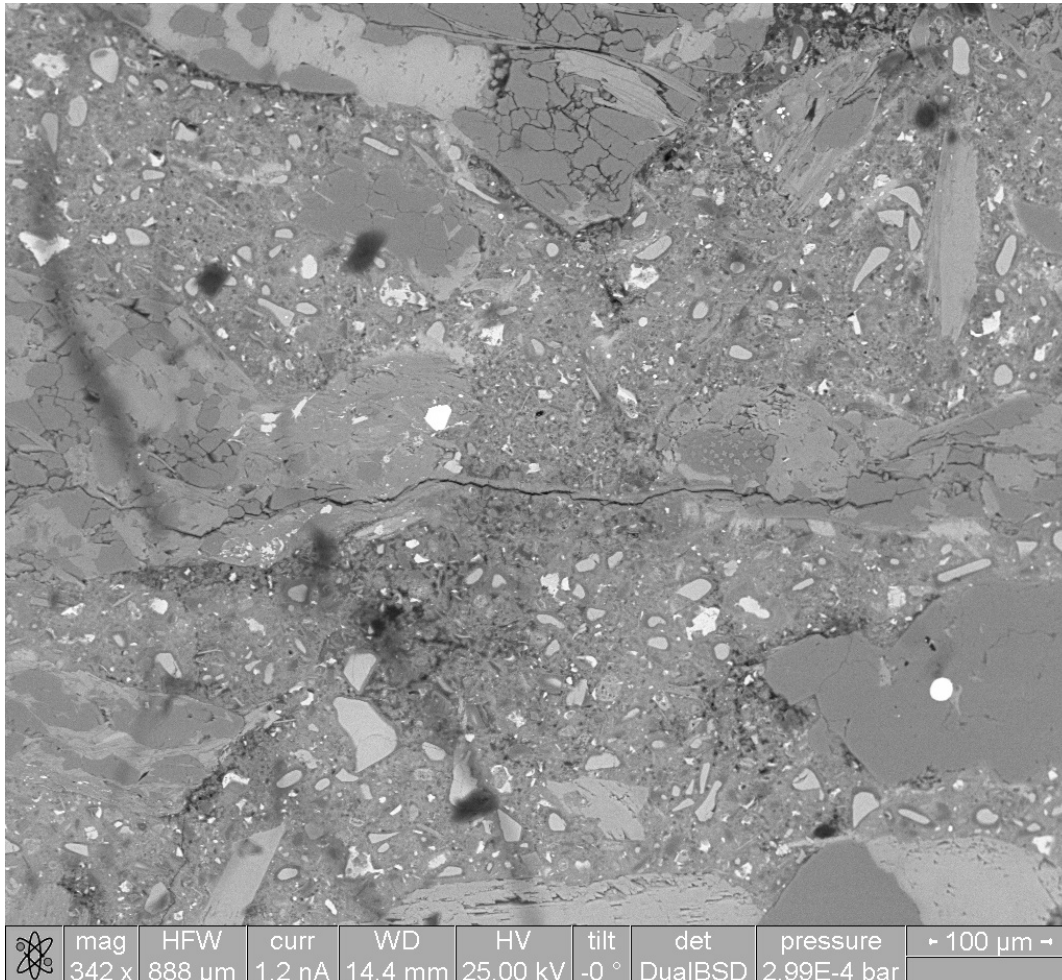
Der Quarzkristall (grau) in Abbildung 99 wird durch die gelbedingten Risse faktisch zerstört. Weiters im Bild sichtbar sind Kalzite (hellgrau) und Pyrite (weiß). Das Gel scheint aufgrund des Druckes in die Pore „zu fließen“ um sich ausdehnen zu können. In der Pore selbst ist jedoch kaum ein Rückstand des Gels zu erkennen.

Dies wird in Abbildung 100 verdeutlicht. Des Weiteren ist auch erkennbar, dass sich die Risse um die Pore häufen. In den Kalzitkristallen treten ebenso Risse auf wie rechts der Pore ersichtlich ist.



**Abbildung 100: Übersicht über die Luftpore mit Gel im Quarz auf der linken Seite der Pore**

In den Mörtelprismen mit Bindemittelkombination treten auch größere Risse (Abb. 101) durch mehrere Kristalle auf. Gelfüllungen können zum Teil erkannt werden. Der Quarz im oberen Bildabschnitt ist stärker zersetzt als die Kalksilikate im mittleren Bereich von Abbildung 101.



**Abbildung 101: Großer Riss durch mehrere Kristalle, zersetzter Quarz im oberen Bildbereich**



An den Rändern der Prismen kann es verstärkt zur Zersetzung der Quarze kommen, was in Abbildung 102 verdeutlicht wird. Im Kalzitkristall treten kaum Risse auf und die Muskovite sind in diesem Fall nahezu ohne Rissbildungen. Eine interessante Beobachtung ist, dass sich stengelige Muskovite zwischen den Quarzen befinden.

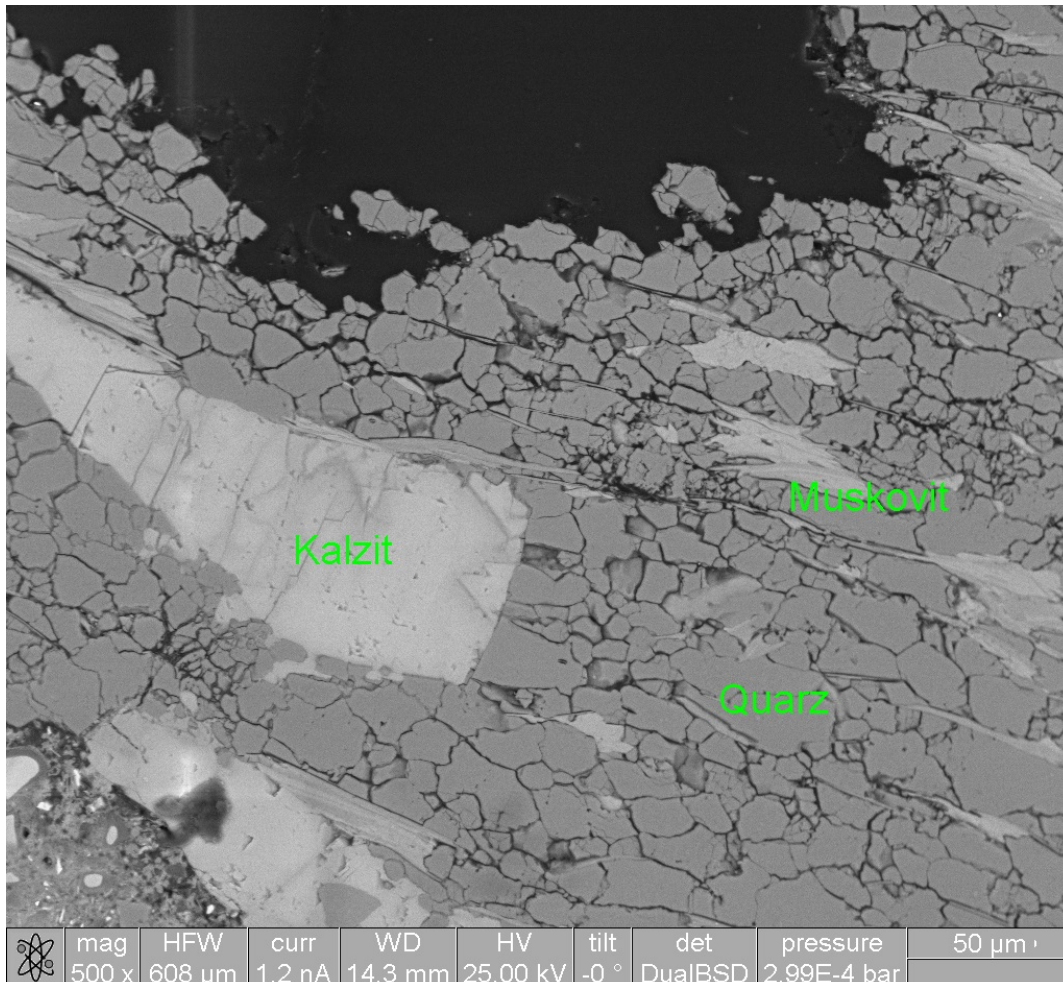
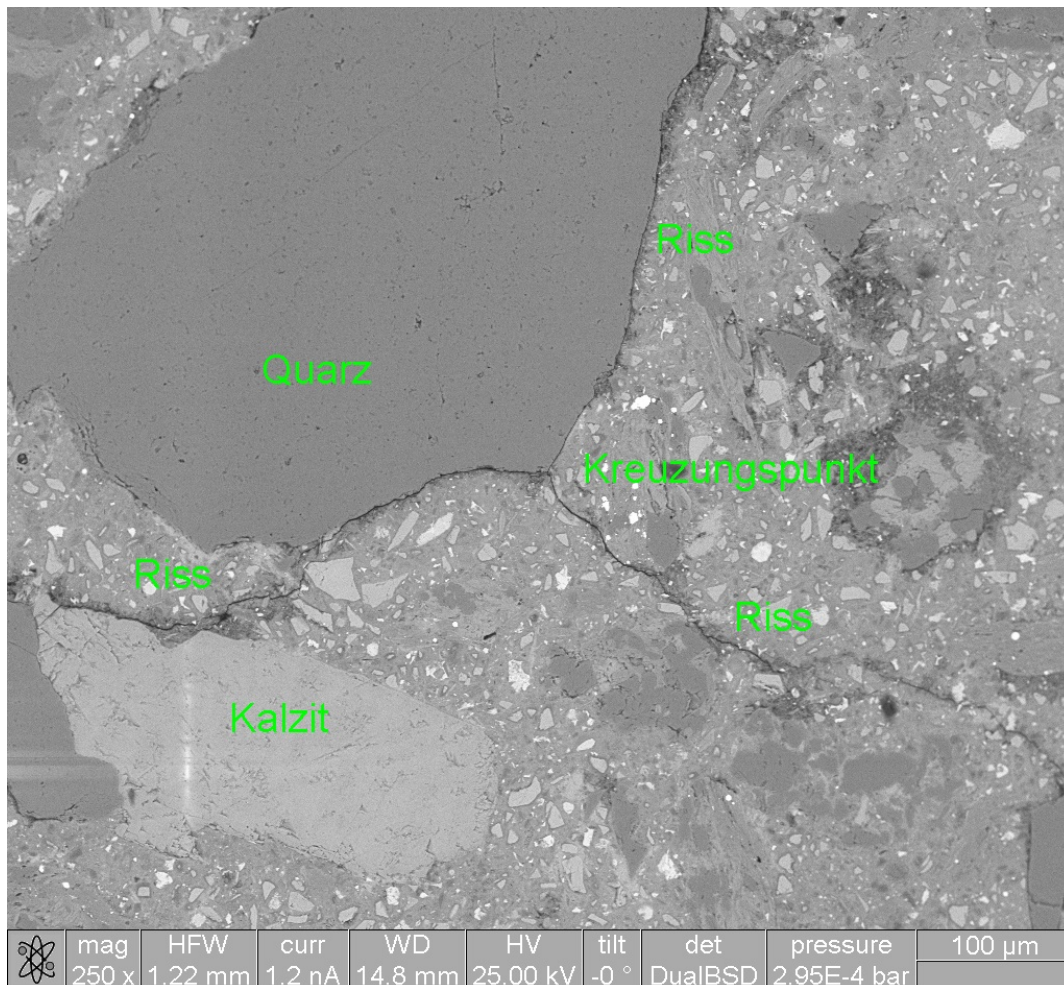


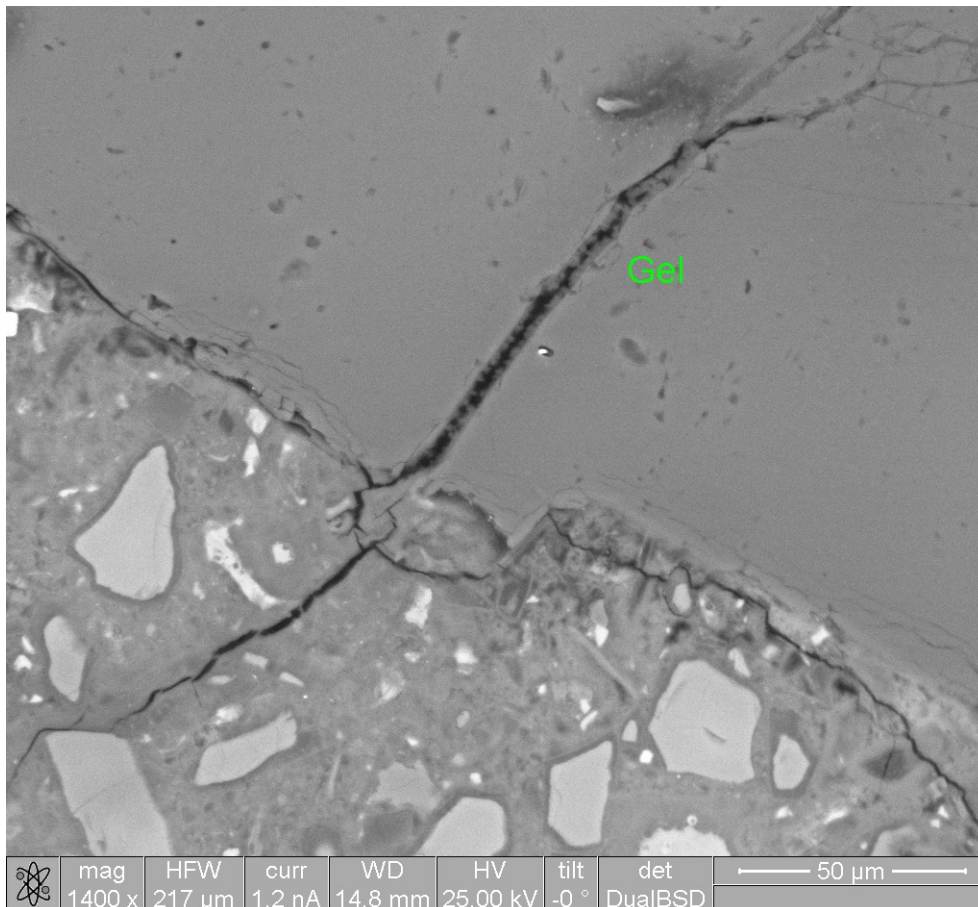
Abbildung 102: Zersetzte Quarze im Randbereich

Im Kernbereich der Prismen kann es vorkommen, dass Quarze nahezu unbeschädigt bleiben. In Abbildung 103 ist ein größerer Quarz sichtbar mit kleineren Rissen im Randbereich, des Weiteren verläuft ein Riss um den Kristall und umrundet den Kristall. Am Eckpunkt des Quarzes kommt es zu einem Kreuzungspunkt des Risses. Bei den dunkleren Flecken in der Zementsteinmatrix handelt es sich wahrscheinlich um nicht hydratisierte Bereiche. Eine Rissfüllung war nicht nachweisbar, wobei ein präparationsbedingtes Auswaschen des Gels vermutet wird..



**Abbildung 103: Riss umrundet Quarz durchschlägt in jedoch nicht**

In Abbildung 104 ist ein Na-haltiges Gel im Quarzkristall erkennbar. Mehr als die Hälfte des Gels ist wahrscheinlich durch die Präparation ausgewaschen worden. Die Rissbreite



**Abbildung 104: Gelüberreste in Quarz**

verringert sich beim Übergang in die Zementsteinmatrix.

Zusammenfassend kann zu den Dünnschliffen der Prismen mit Bindemittelkombination gesagt werden, dass in der Zementsteinmatrix weniger Risse im Vergleich zur Verwendung des Einheitszementes auftreten. In den Randbereichen und in der Nähe von Luftporen kommt es vermehrt zum Auftreten einer Mikrorissbildung, die der AKR zugeordnet werden könnte.



## 4.3.2 Obere Bündner Schiefer Kernprobe 2

### 4.3.2.1 Makroskopische Beschreibung

Das Kernmaterial (OBS 2) in Abbildung 105 besitzt einen geringeren Graphitgehalt was durch die graue Färbung sichtbar ist. Das Gestein ist grobkristalliner im Vergleich zur Probe OBS 1 und besitzt eine höhere Festigkeit. Der Karbonatanteil (Kalzit) überwiegt hier ebenso und der Quarz spielt eine untergeordnete Rolle. Kleinere Quarzgänge sind sichtbar. Im Gestein sind noch Muskovite und vorrangig zerschernte Pyrite zu erkennen. Die Schieferung ist im Vergleich zu OBS 1 deutlich erkennbar.

Die Kernaussage erfolgt nach Lage in der Kernkiste.



Abbildung 105: Kernmaterial OBS 2, Dünnschliffe wurden aus den rot umrandeten Bereich hergestellt.

### 4.3.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung der Probe wurden drei Dünnschliffe hergestellt. Die Hauptgemengteile sind Karbonat (50%) und Quarz (40%), Nebengemengteil ist Muskovit (8%) und als Accessoire tritt Feldspat (<1%), Pyrit (<1%) und Graphit (<1%) auf. Bei dem Gestein handelt es sich um einen quarzitischen Kalkphyllit.

Im Unterschied zu den Dünnschliffen von OBS 1 sind hier größere Quarze zu beobachten. Des Weiteren sind viele Korngrenzen der Quarze suturiert und erscheinen wie eine „Quarzwolke“ in Abbildung 106. Die Hauptgemengteile bilden große und kleine Kristalle, was auf zwei unterschiedliche Bildungsalter hinweisen könnte. Die kleineren Quarze sind sehr wahrscheinlich während der alpinen Orogenese aufgrund von Drucklösung entstanden. Sehr oft sind die größeren Minerale durch Scherbänder begrenzt. In diesen Scherbändern tritt häufig Muskovit auf.

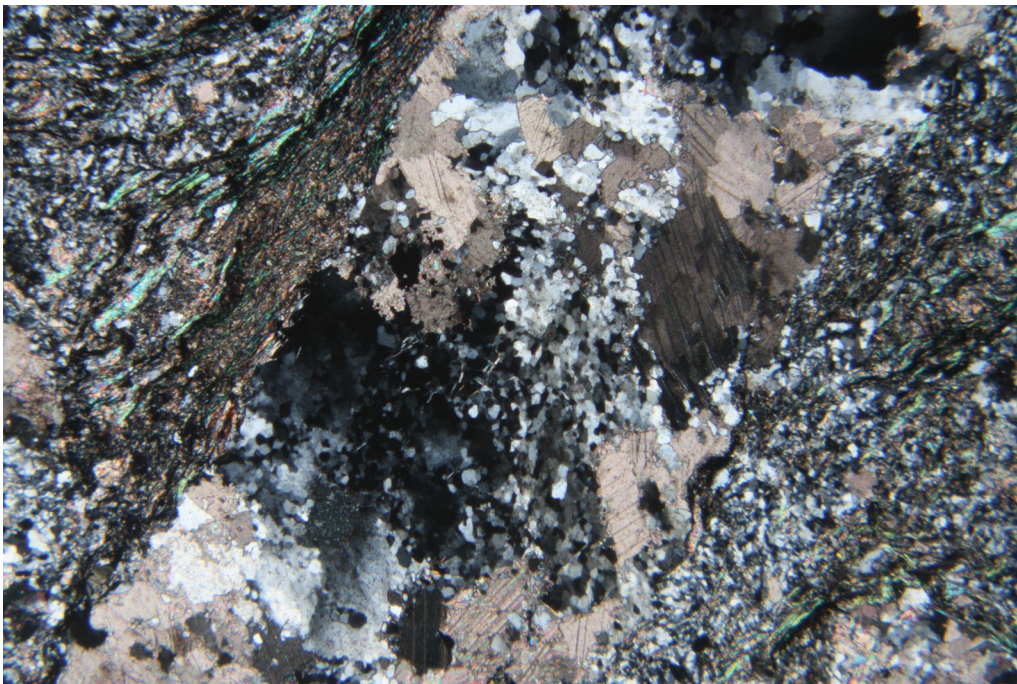


Abbildung 106: Quarz-Kalzit Kristallite in verschiedenen Größen, größere Kristalle durch Scherbänder begrenzt, xN, BB: 4mm

In Abbildung 107 sind viele Scherbänder im Gestein erkennbar. Quarze sind stark deformiert und zeigen eine mittlere Undulösität. Eine Einregelung der Muskovite entlang der Scherbahnen ist erkennbar. Der dunkle Kristall in der Mitte ist ein Pyrit, welcher teilweise Quarze eingebaut hat. Des Weiteren ist der Pyrit stark gerundet.

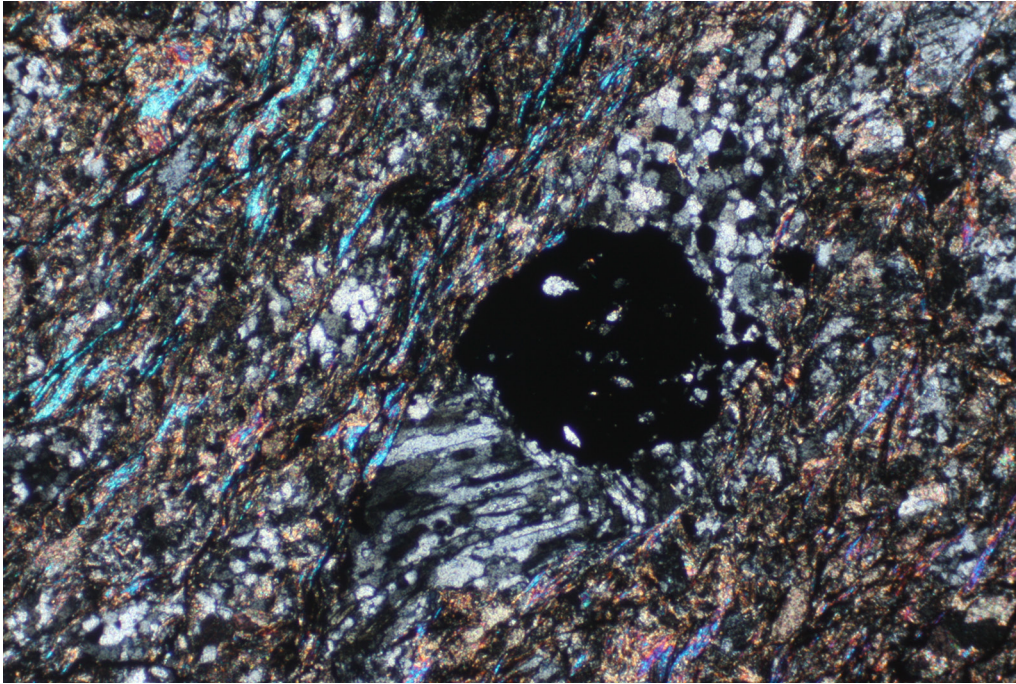


Abbildung 107: Pyrit und stark deformierter Quarz, Scherbahnen mit Muskovit, xN, BB: 2mm



### 4.3.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Das untersuchte Mörtelprisma zeigt im Vergleich zu den anderen Proben eine Häufung der Rissbildungen.

In Abbildung 108 ist ein Rissverlauf durch Körner und Zementsteinmatrix erkennbar. Des Weiteren ist erkennbar, dass der Riss mit Material verfüllt ist. In der oberen Bildhälfte sind sehr feine Risse ersichtlich.

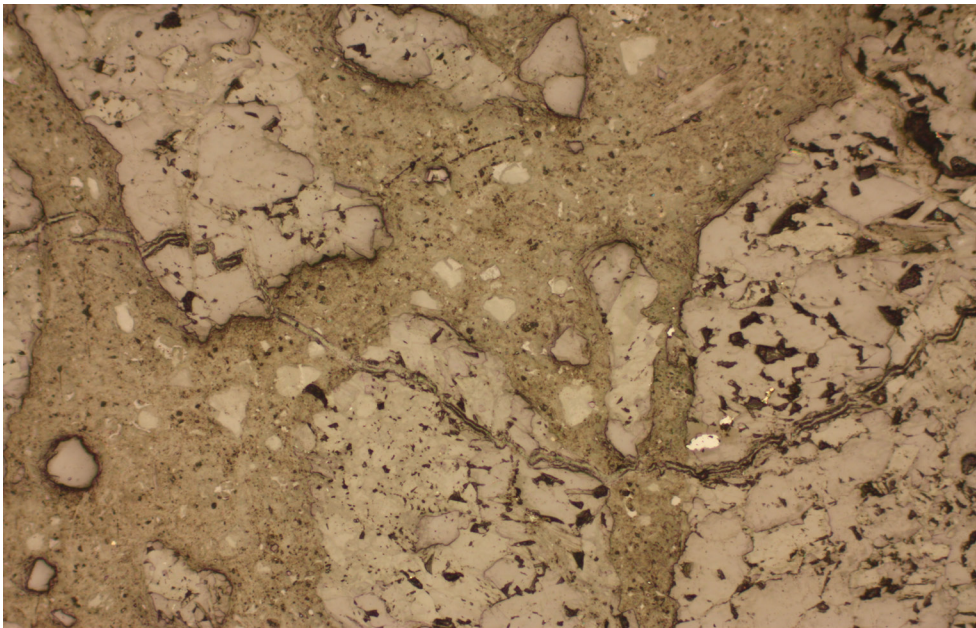


Abbildung 108: Riss durch Körner und Zementsteinmatrix, AL, BB: 1mm

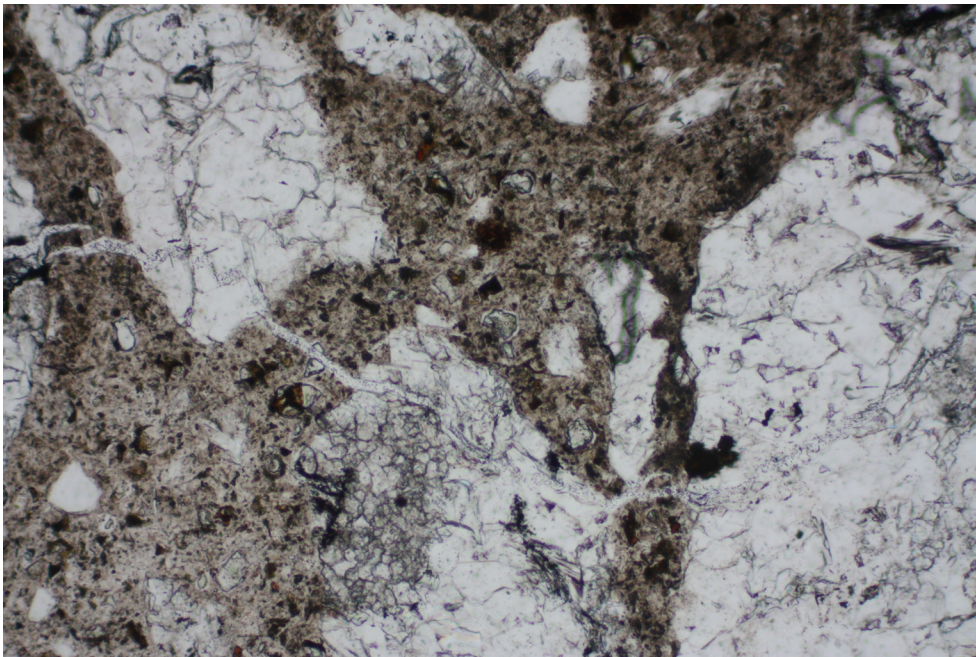
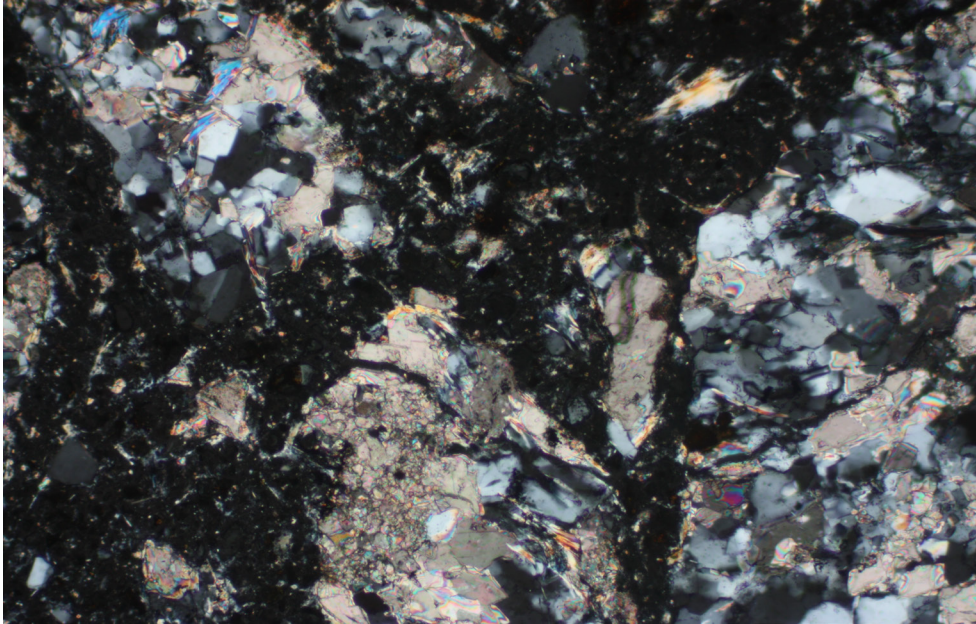


Abbildung 109: Riss durch Körner und Zementsteinmatrix, II N, BB: 1mm

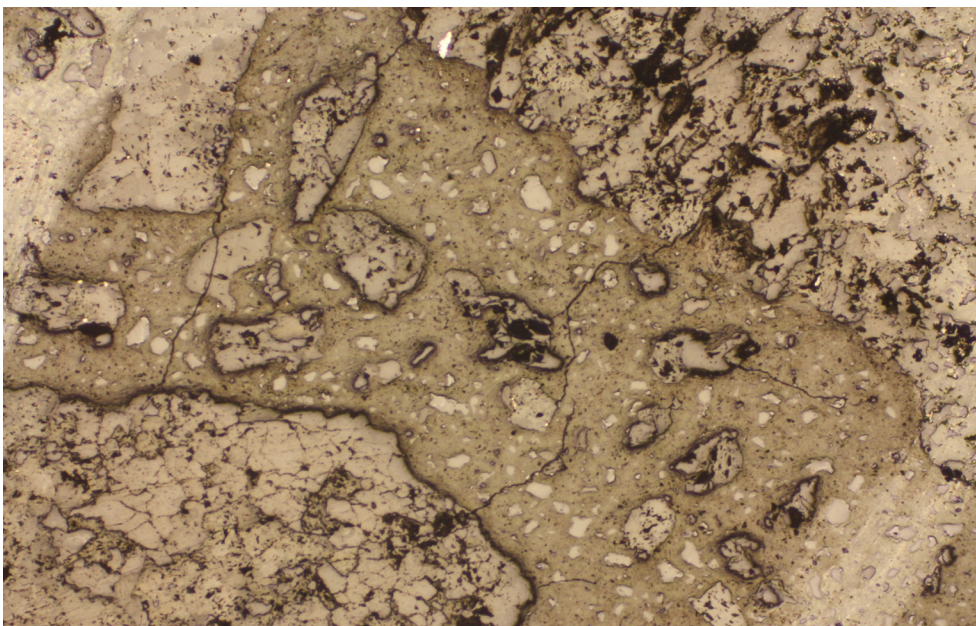


Der Riss ist unter ausgeklappten Polarisatoren (Abb. 109) ebenfalls erkennbar und eine Füllung ist erkennbar. Dem Rissverlauf ist jedoch schwieriger zu folgen im Vergleich zur Auflichtmikroscopie vor allem in den Körnern. Hingegen mit gekreuzten Polarisatoren (Abb. 110) ist der Riss sehr schwer erkennbar dafür ist die Heterogenität der Körner deutlich sichtbar, welche in den anderen Darstellungen (Abb. 109) als ganze Körner erscheinen.



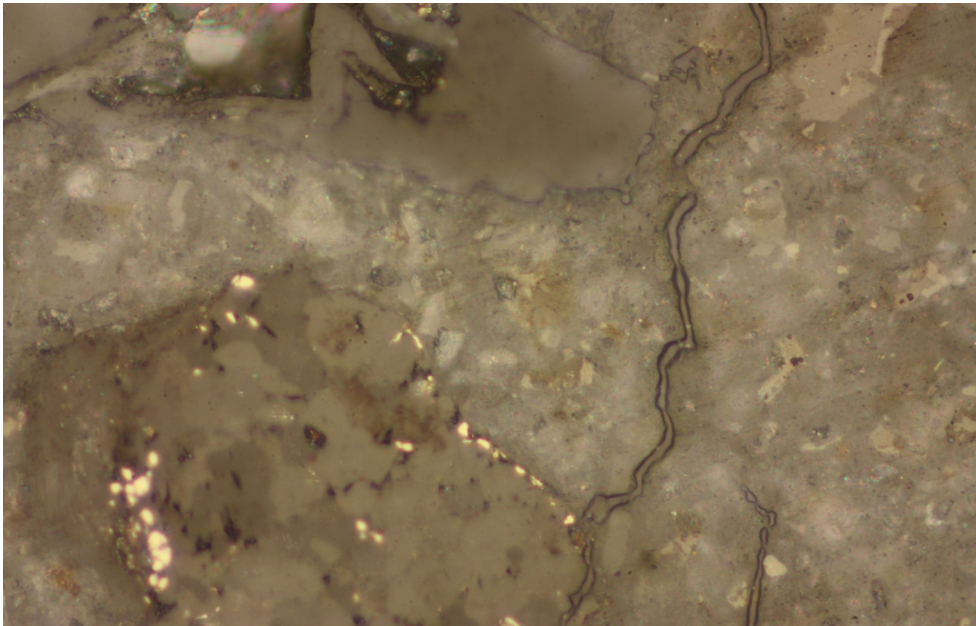
**Abbildung 110: Riss durch Körner und Zementsteinmatrix, xN, BB: 1mm**

In Abbildung 111 ist ein weiterer Bereich im Dünnschliff erkennbar, welcher einen deutlichen Hinweis auf eine stattgefundene Reaktion im Zementstein aufweist. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen wird eine AKR vermutet, eine Gelfüllung ist in Abb. 112 erkennbar, eine Überprüfung mit dem REM erfolgte nicht. Die Rissbreite hier ist jedoch geringer im Vergleich zu den Abbildung 108, 109 & 110 jedoch sind mehrere Risse erkennbar. In diesen feinen Rissen im  $\mu\text{m}$ -Bereich ist ebenfalls Füllmaterial erkennbar (Abb. 112).



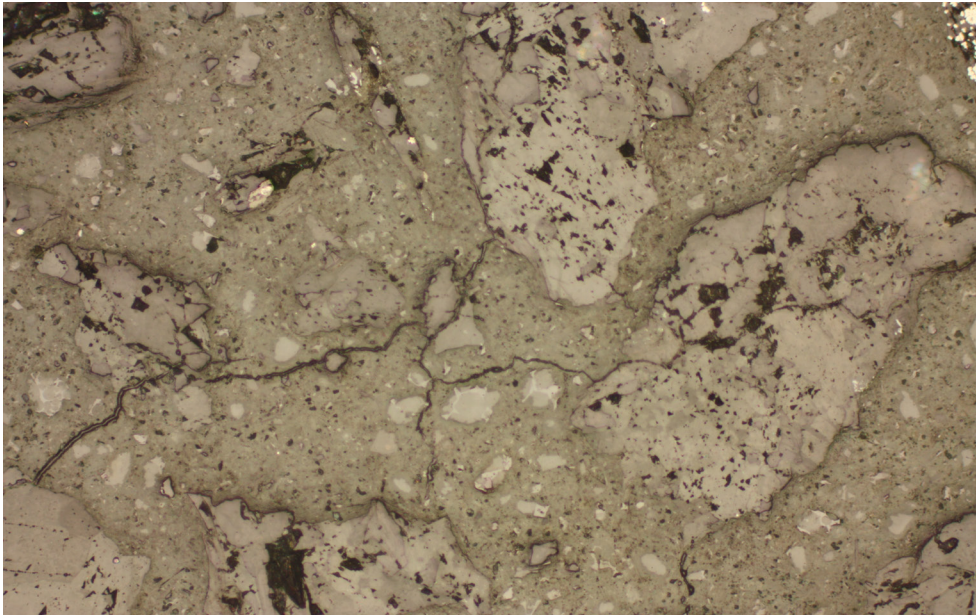
**Abbildung 111: Risse in Zementsteinmatrix und Korn, AL, BB: 2mm**





**Abbildung 112: Detaildarstellung eines Risses von Abb. 111, Auflicht, BB: 0,2mm**

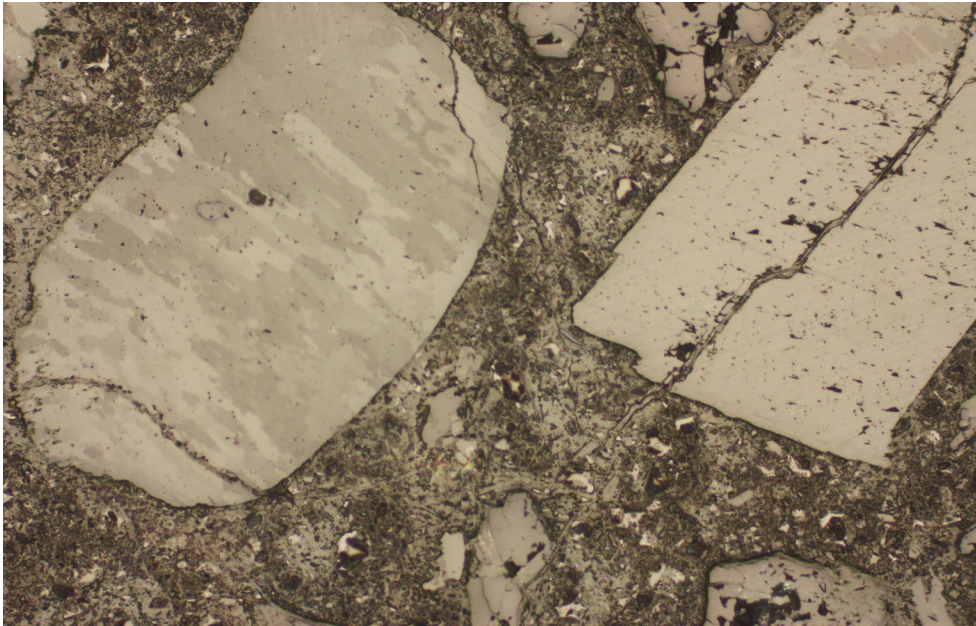
In Abbildung 113 ist ein deutlicher Riss im Zementstein erkennbar. Der Riss verläuft durch die Zementsteinmatrix und Körner aber auch entlang der Korngrenzen. Das Korn in der Mitte wird durchtrennt während am größeren Korn in der oberen Bildhälfte der Riss an den Korngrenzen entlang verläuft.



**Abbildung 113: Rissverlauf durch Matrix, entlang von Körnern und durch Körner, Auflicht, BB: 1mm**

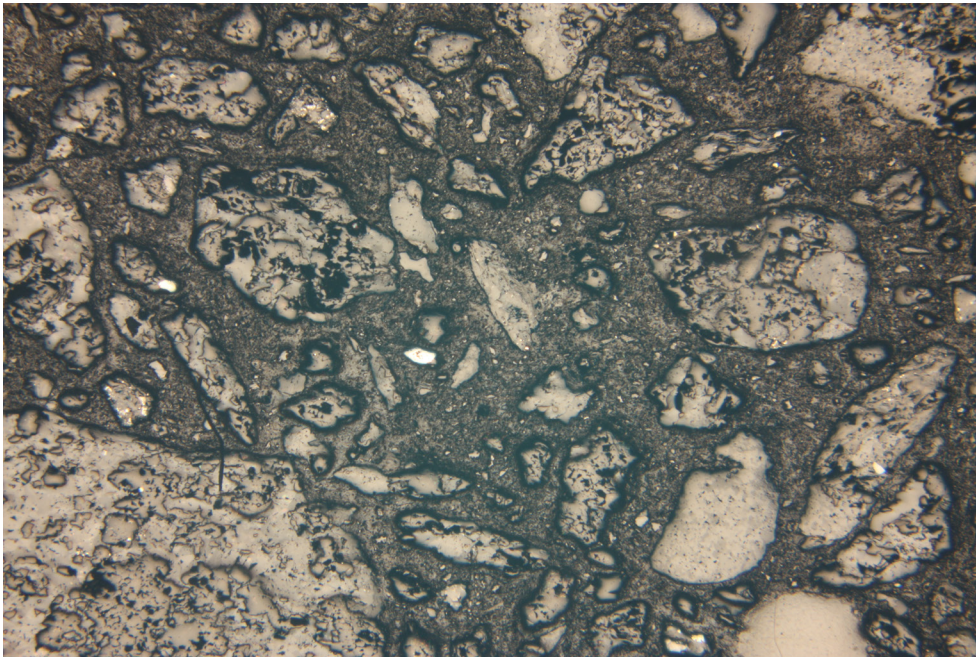


In Abbildung 114 sind deutliche Rissbildungen an den Körner erkennbar. Die Risse verlaufen durch die Körner und auch die Zementsteinmatrix. Des Weiteren sind die Risse zum Großteil mit Material verfüllt.



**Abbildung 114: Risse in Körner und Matrix, Auflicht, BB: 1mm**

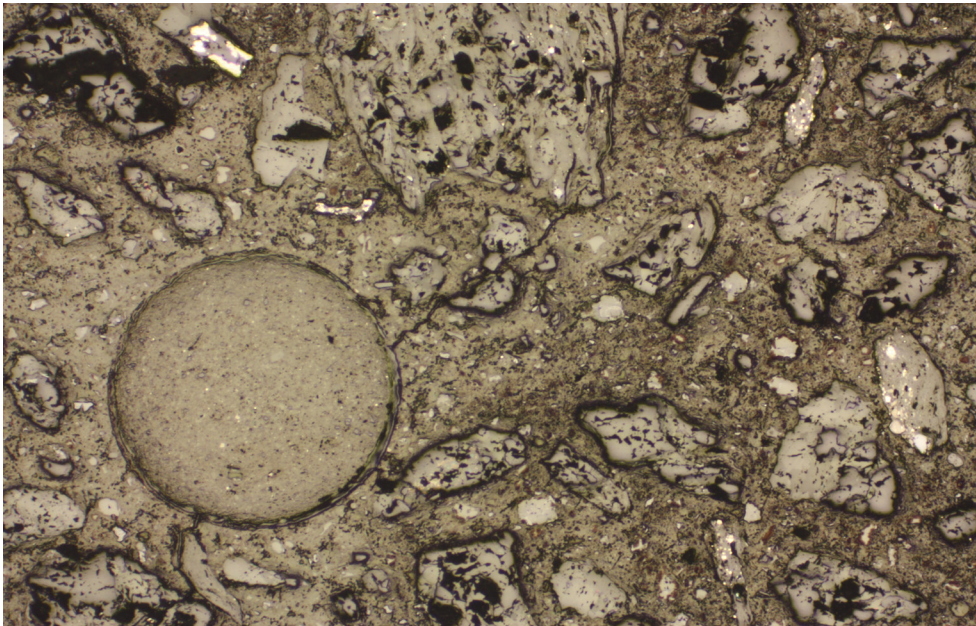
In diesem Dünnschliff existieren aber auch große Bereiche ohne Hinweis auf Schädigungen wie in Abbildung 115 ersichtlich ist. Der vermeintliche Riss in der linken Hälfte über dem großen Korn ist ein „Artefakt“.



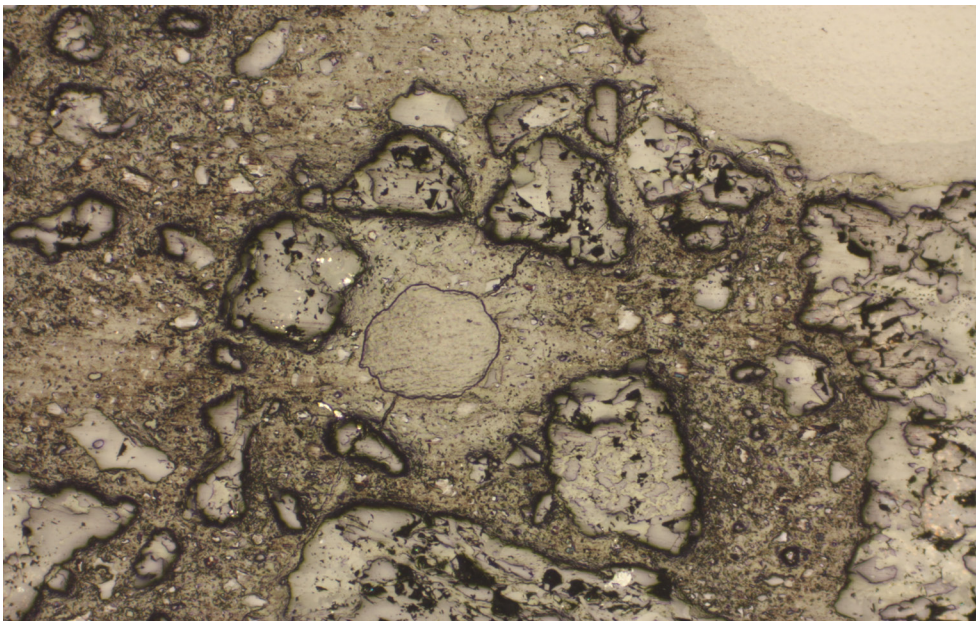
**Abbildung 115: Intakte Matrix und Körner, Auflicht, BB: 4mm**



In dieser Probe könnten sich auch Poren verfüllt mit schädlichem AKR-Gel befinden (Abb. 116 & Abb. 117). Eine Verifizierung bedarf noch einer detaillierten Untersuchung mit dem REM.



**Abbildung 116: Verfüllte Pore mit Rissfortsetzung, Auflicht, BB: 2mm**



**Abbildung 117: Verfüllte Pore mit Rissfortsetzung in beide Richtungen, Auflicht, BB: 2mm**

#### 4.3.2.4 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen

In den Dünnschliffen der mit Natronlauge beaufschlagten Probe OBS 2 waren schon in der Mikroskopie eindeutige Hinweise zu sehen, die eine initiierte AKR vermuten lassen. Diese Vermutungen wurden durch das REM nicht widerlegt. In Abbildung 118 sind ähnliche Rissstrukturen wie in den MBS sichtbar. Neben den größeren Rissen befinden sich in einigen Quarzen mehr oder minder „Rissnester“. Während durch Kalzite ebenso Risse verlaufen, verzweigen diese im Kalzit kaum. Die Verfolgung der Risse in der Zementsteinmatrix ist mit Hilfe des REM besser im Vergleich zur Auflichtmikroskopie. Bei den kleineren Quarzen treten die Risse vermindert auf.

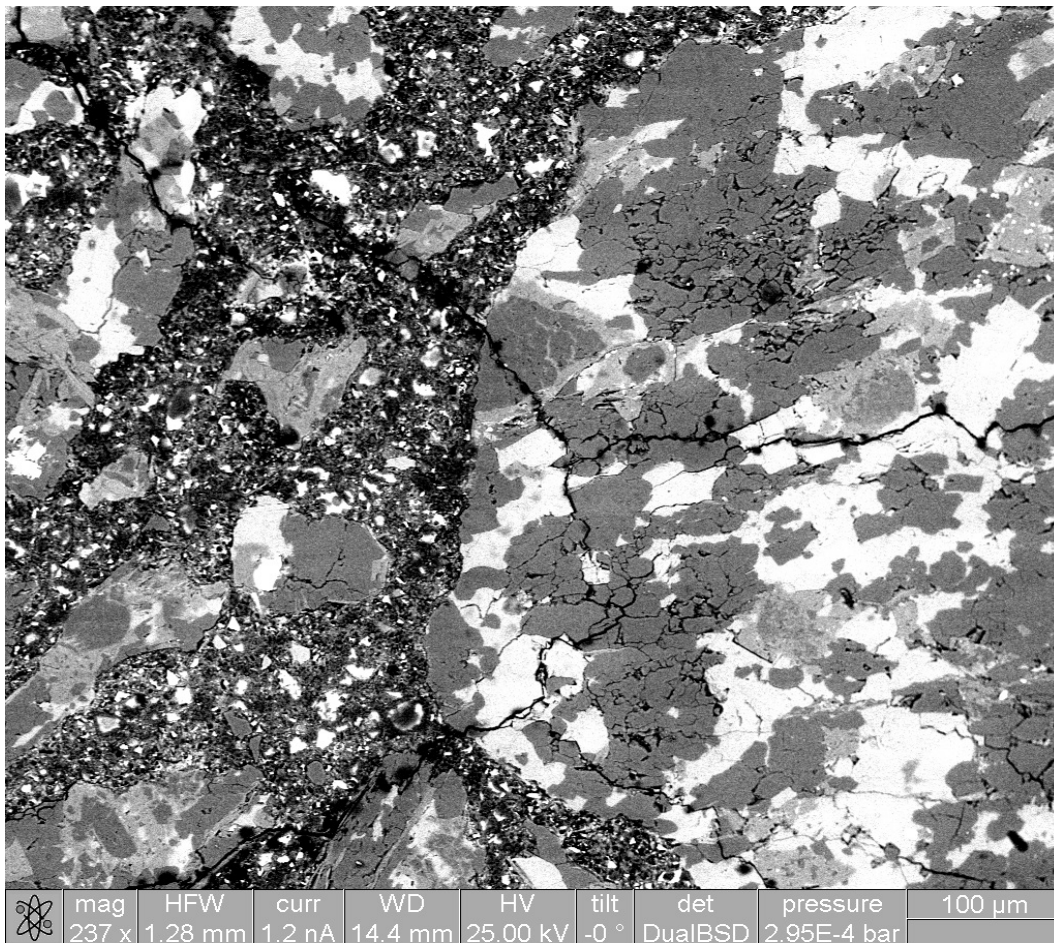
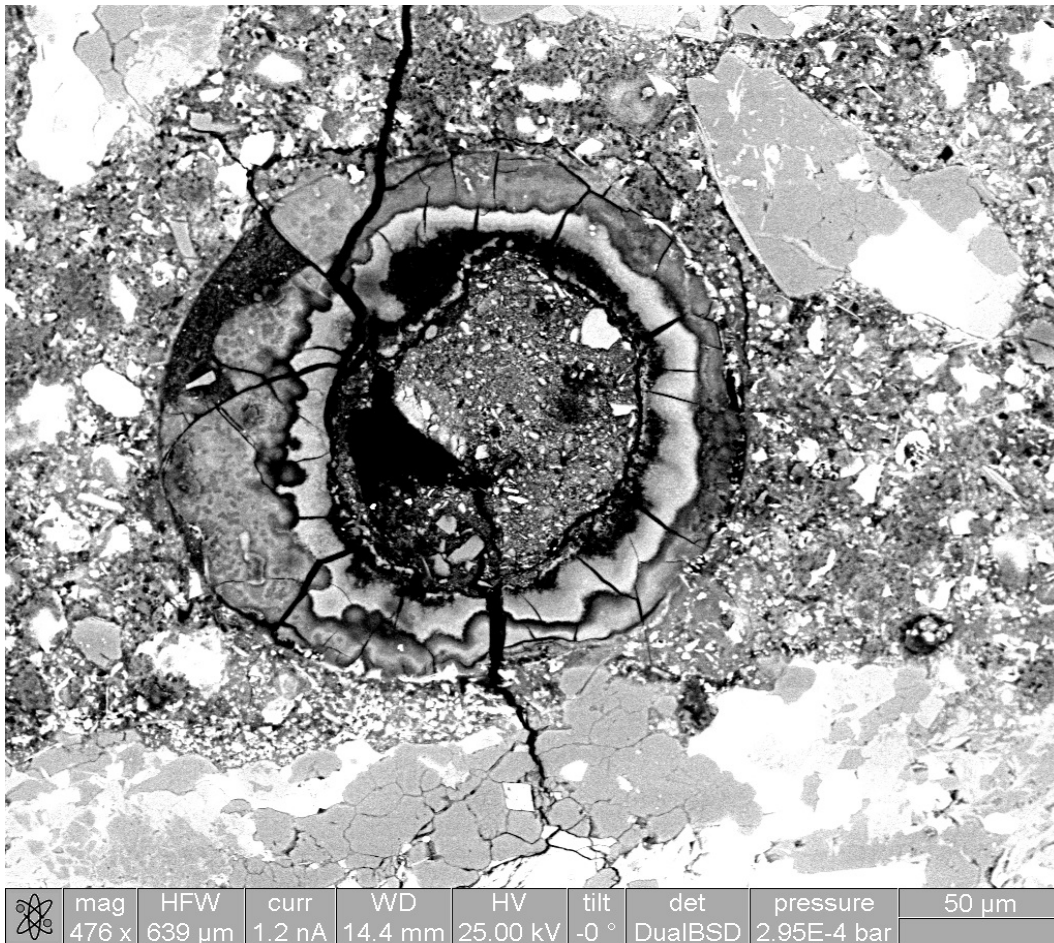


Abbildung 118: AKR bedingte Risse durch Kalksilikat mit "Rissnester" im Quarz

In Abbildung 119 & Abbildung 120 ist eine Luftpore zu sehen in welcher das AKR Gel gut erhalten geblieben ist. Im Zentrum der Pore befinden sich Reste der Schleifpräparation im Randbereich sind die Gelbildungen sehr gut erkennbar. Ein größerer Riss verläuft N-S durch die Pore und könnte wahrscheinlich für die Zufuhr des Gels gesorgt haben. In der Umgebung der Luftpore treten vermehrt kleinere Risse in den Kristallen auf.

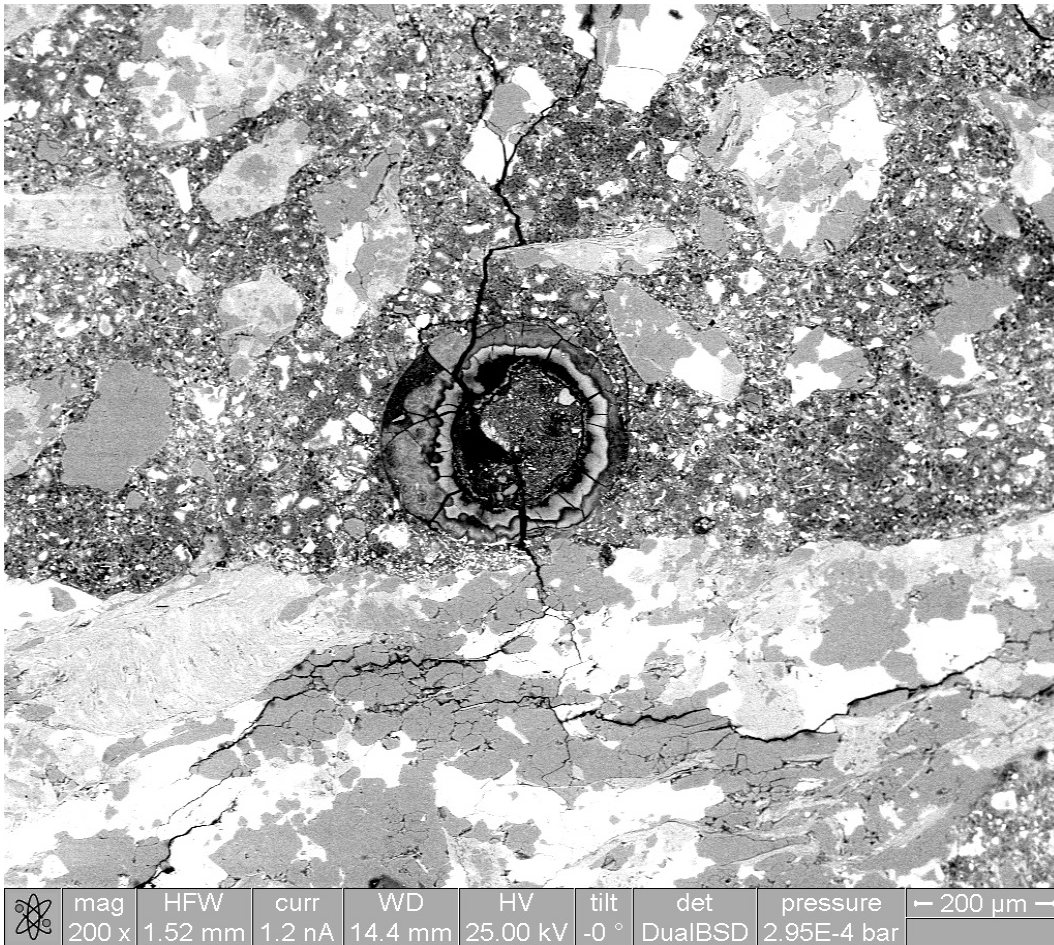
Das Kalksilikataggregat im rechten Bild ist hingegen kaum von Rissen betroffen, es treten nur sehr feine Risse im Quarz auf.





**Abbildung 119: AKR Gel in Luftpore**

In Abbildung 120 ist der Zustand der Zementsteinmatrix und anderen Kornaggregate im größeren Bereich besser sichtbar. Außer dem großen Riss durch die Pore mit weiterer Verzweigung im unteren großen Kalksilikat treten kaum weitere sichtbare Risse auf. Die Zementsteinmatrix scheint nahezu unbeschädigt und die Quarze sind ebenfalls von größeren Schädigungen verschont geblieben. Alles in Allem scheint die Probe hier sehr stabil zu sein, eine möglicherweise stattgefundenene Druckbildung „entlädt“ sich in die Luftpore.



**Abbildung 120: Übersicht um die Gel gefüllte Luftpore**

Generell lässt sich über die Probe sagen, dass die in Folge der Extremlagerung der Normenprismen vermutlich AKR- Bereiche induziert wurden, die gut erkennbar sind. Wenn kein Platz zum Ausbreiten vorhanden war, kommt es eher zur Sprengung der Quarze und zu der Bildung von Netzrisstrukturen. Wenn Platz zum Ausbreiten ist, wie in Abbildung 119 sichtbar, werden die Zementsteinmatrix und Kornaggregate deutlich weniger geschädigt.

## 4.4 Hochstegenmarmor

Die Proben entstammen aus der Schrägbohrung Gr-B 11/15S (Abbildung 13).

### 4.4.1 Hochstegenmarmor Kernprobe 1

#### 4.4.1.1 Makroskopische Beschreibung

Das Kernmaterial (Abb. 121) stammt vom Liegenden des Hochstegenmarmores und wird in weiterer Folge mit HM 1 bezeichnet. Sichtbar im Vergleich zum Hangenden sind die auftretenden Verunreinigungen. Es sind färbliche Verunreinigungen sichtbar und des Weiteren sind Quarze, Hellglimmer und Pyrite erkennbar. Der Pyritanteil sollte höher sein als im Vergleich zur Hangendprobe. Die Sedimentationsabfolge ist erkennbar sowie auch sekundäre Quarzgänge. Das Gestein besitzt eine hohe Festigkeit.

Die Kernaussage entspricht jener der Kernkiste.



Abbildung 121: Kernmaterial HM 1, Dünnschliffe wurden aus den rot umrandeten Bereich hergestellt.



#### 4.4.1.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung des Mineralbestandes wurden zwei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptgemengteil ist Karbonat (Kalzit) mit 80 % und dem Nebengemengteil Quarz mit 16 %. Accessorisch tritt Muskovit (3,25%), Pyrit(0,75%), Feldspat und Titanminerale auf.

An der Basis des Hochstegenmarmors sind mehr silikatische Bestandteile im Marmor erkennbar. Die Quarzkristalle treten bis auf einen Gang relativ diffus auf. Des Weiteren zeigen diese auch stärkere Beanspruchungen was in Rissen in den Kristallen erkennbar ist (Abb. 122 & Abb. 123). Diese Risse werden mit Karbonat gefüllt was auf einen späteren Zeitpunkt der Bildung des Karbonats schließen lässt (Abb. 122). Die Muskovite haben sich entlang von Scherbahnen eingeregelt.

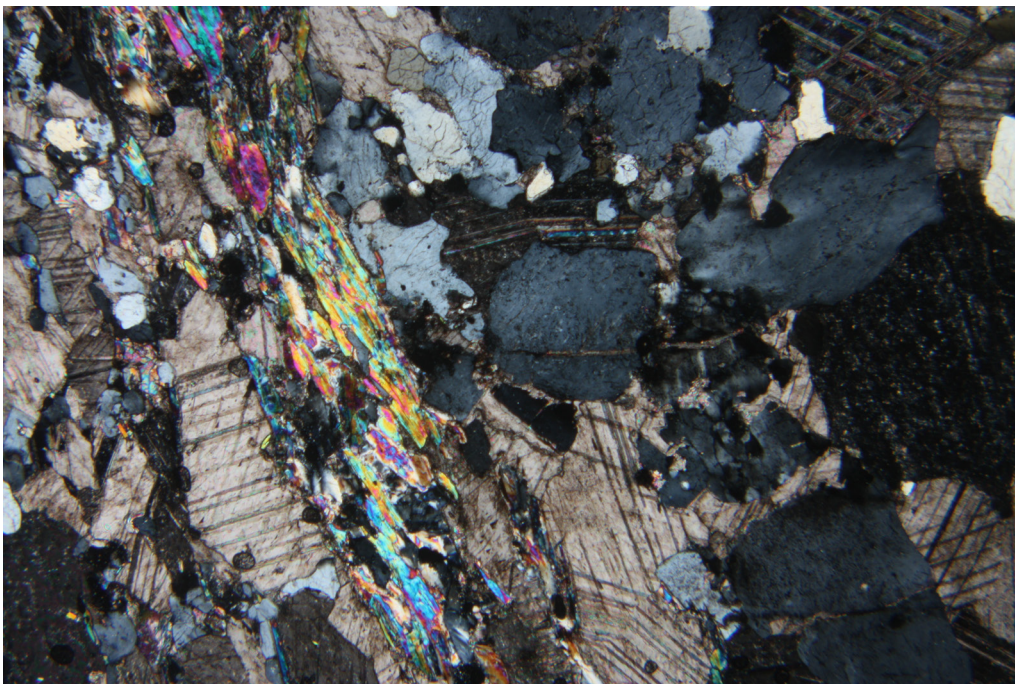
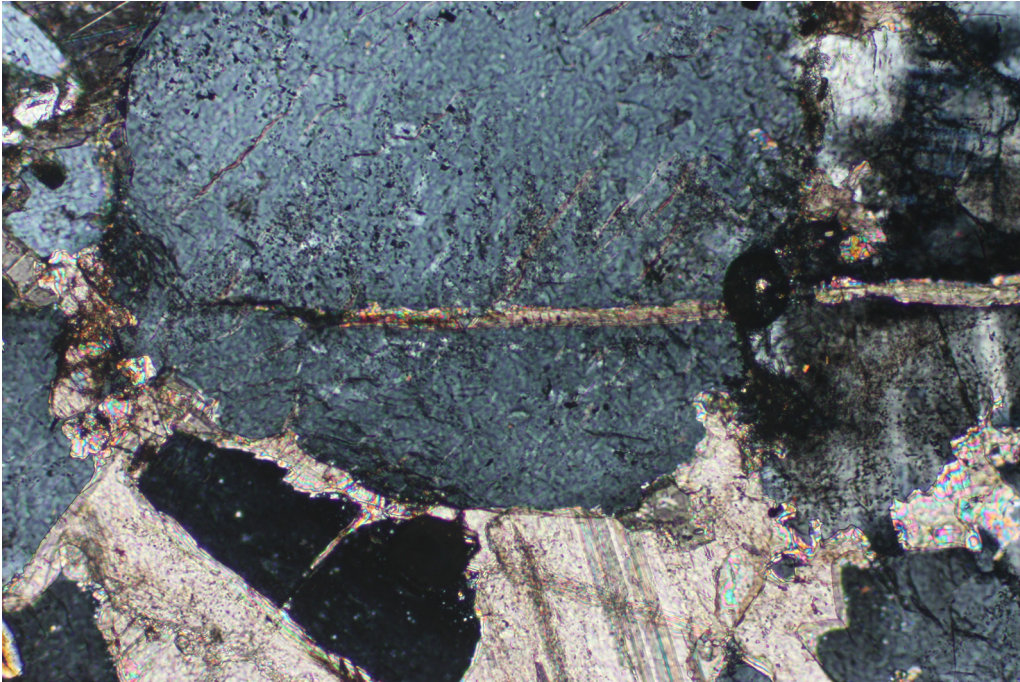


Abbildung 122: Karbonat mit Quarz und eingeregeltten Muskoviten, BB: 4mm

Im Detail ist in Abbildung 123 die kalzitische Rissverfüllung der Stressrisse im Quarz erkennbar. Die größeren Risse verlaufen quer durch die Quarzkristalle. Die Undulösität der Quarze ist gering.

Im Allgemeinen überwiegen die Karbonatkristalle mit ca. 80% Anteil deutlich, was in den Abbildungen jedoch nicht ersichtlich ist, da hier auf die Unterschiede im Vergleich zu HM 2 wert gelegt wurde.



**Abbildung 123: Rissfüllung in Quarzen, BB: 1mm**



#### 4.4.1.3 Beschreibung der Mörtelprismen

In den Schliffen treten vereinzelt mehrere feine Risse durch eine vermutete AKR auf. Diese sind meist relativ kurz und nur in manchen Kristallen zu finden. Es konnte auch ein Riss erkannt werden, der sich in die Zementsteinmatrix fortsetzt, im Gegensatz zu den Proben an der Basis des Hochstegenmarmores. Auch hier treten Risse in Kalzit- und Quarzkristallen auf.

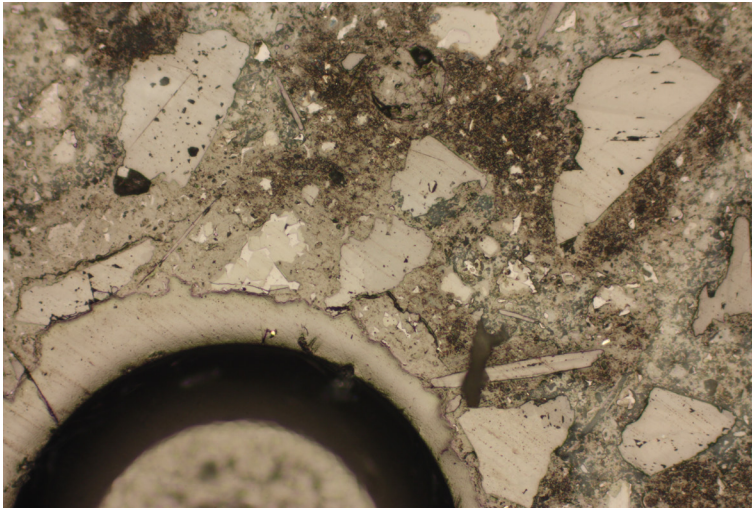


Abbildung 124: Risse aufgrund von AKR in Zementsteinmatrix, x10, AL

In Abbildung 124 sind mehrere Risse erkennbar, welche sich in der Zementsteinmatrix und in der Nähe zu Kristallgrenzen befinden. Diese Risse besitzen nur relativ kurze Reichweite und befinden sich in der Nähe einer Luftpore. Des Weiteren sind auch Hinweise in Kalzitkristallen (Abb. 125) erkennbar, die eine ähnliche Erscheinungsform zur AKR aufweisen.

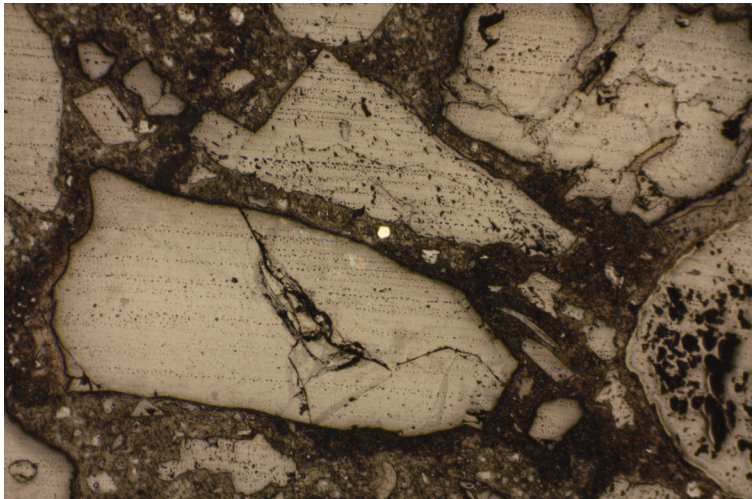
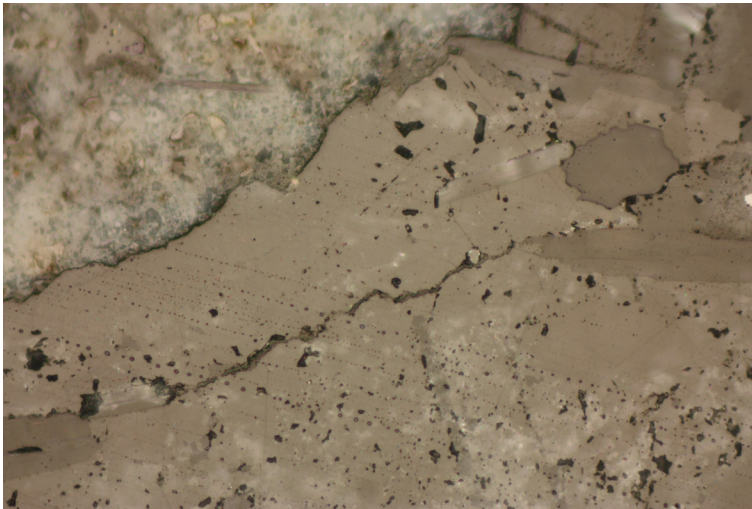


Abbildung 125: Risse in Kalzitkorn, x5, AL

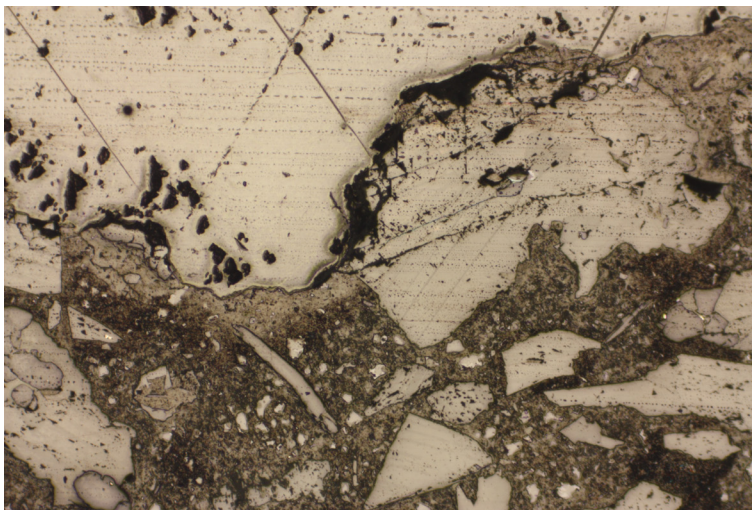


Wie in Abbildung 126 ersichtlich sind sehr feine Risse mögliche Hinweise auf eine AKR.



**Abbildung 126: Riss in Kalzitkristall, x20, AL**

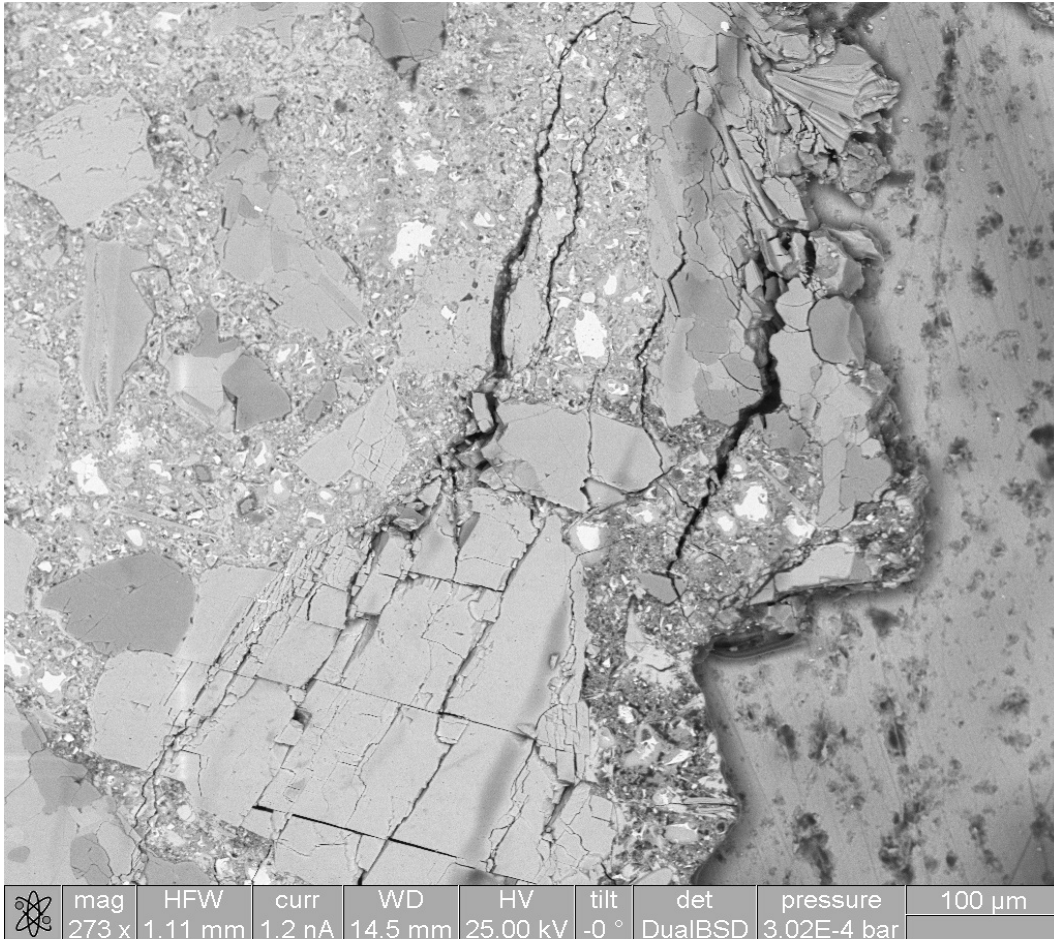
Der Unterschied zu den Marmoren an der Basis zeigt sich durch das Auftreten der AKR in der Zementsteinmatrix (Abb. 125 & Abb.127). In Abbildung 127 ist auch der einzige Riss, welcher durch Kristall und Zementsteinmatrix verläuft erkennbar. Alle anderen Rissbildungen finden nur in Kristall oder in der Zementsteinmatrix statt.



**Abbildung 127: AKR in Zementsteinmatrix und Kalzitkristall, x5, AL**

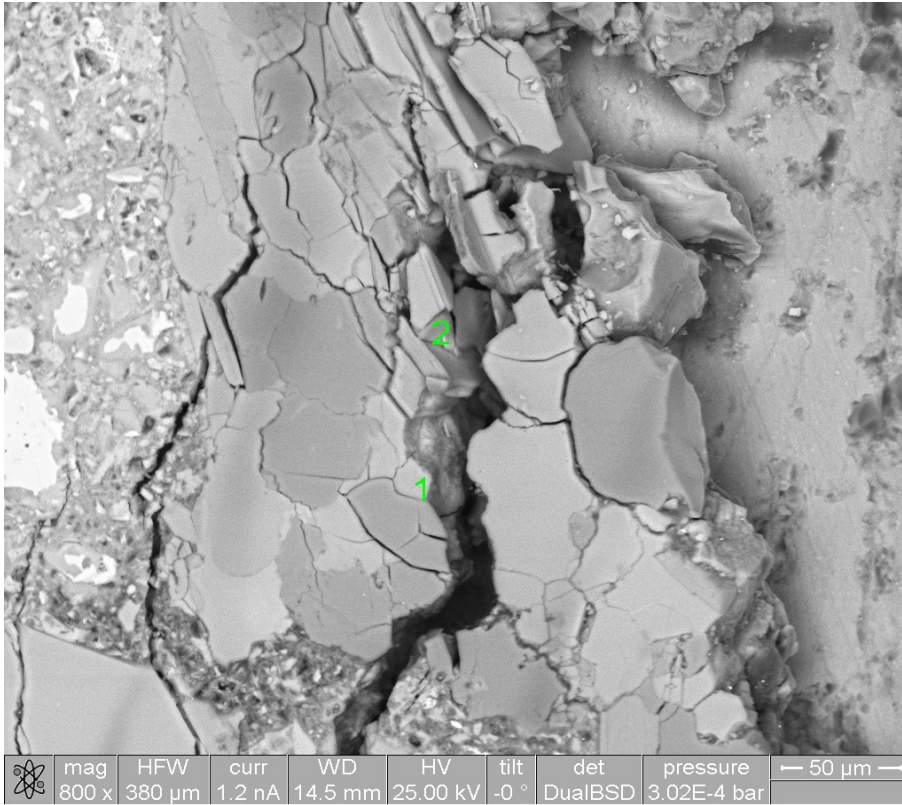
#### 4.4.1.4 REM - Untersuchungen der Mörtelprismen

In den Dünnschliffen der Basis der Hochstegenformation kommt es bevorzugt zur Rissbildung in der Nähe von Luftporen und im Randbereich der Prismen. Ein gutes Beispiel dafür ist in Abbildung 128 zu sehen. Je weiter man sich von einer der genannten Störzonen entfernt befindet, umso geringer ist das Auftreten von Rissen.



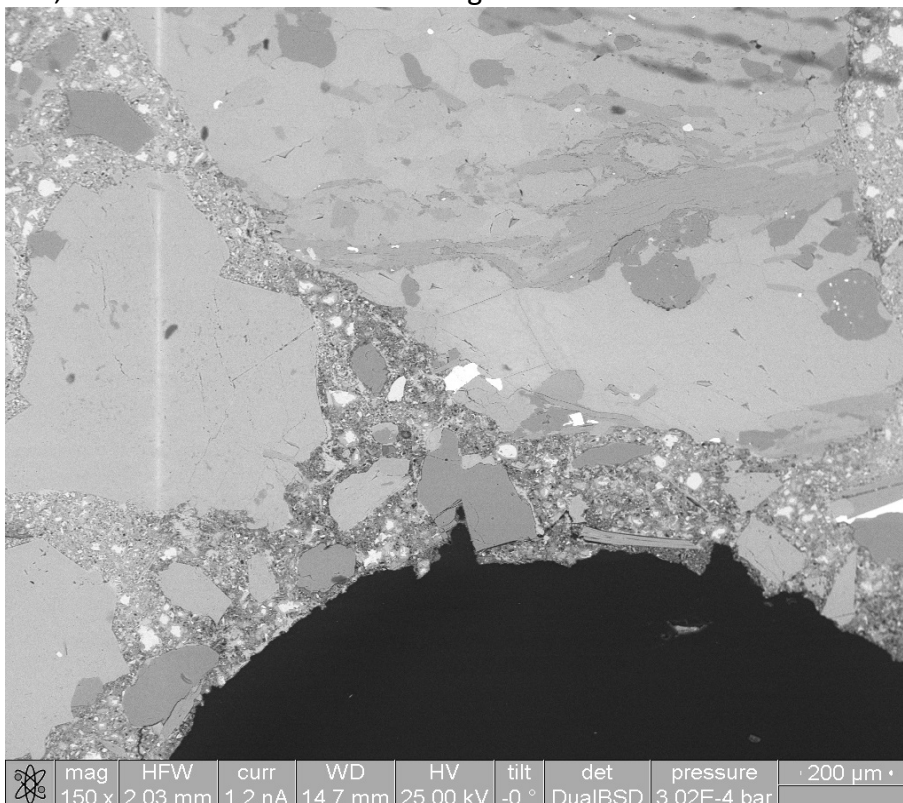
**Abbildung 128: Größere Risse um Luftpore**

In der Umgebung der Luftpore sind die Zementsteinmatrix und einzelne Kornaggregate sowie Kalzitkristalle geschädigt. Die Risse im Kalzitkristall scheinen sich an der Spaltbarkeit zu orientieren. Eine Gelfüllung in den Rissen kann vermutet werden, konnte jedoch nicht mit absoluter Gewissheit festgestellt werden. Die Detailansicht ist in Abbildung 129 ersichtlich und zeigt die Schwierigkeit, eine klare Aussage über einen Gelinhalt zu treffen, da dieses zum größten Teil schon ausgewaschen ist. Erhöhte Werte an Kalium und Aluminium im EDX - Spektrum sind eher ein Hinweis auf einen Feldspatvertreter als ein AKR Gel.



**Abbildung 129: Detailansicht, Risse in der Nähe einer Luftpore, vereinzelt AKR – Gel im größeren Riss erkennbar.**

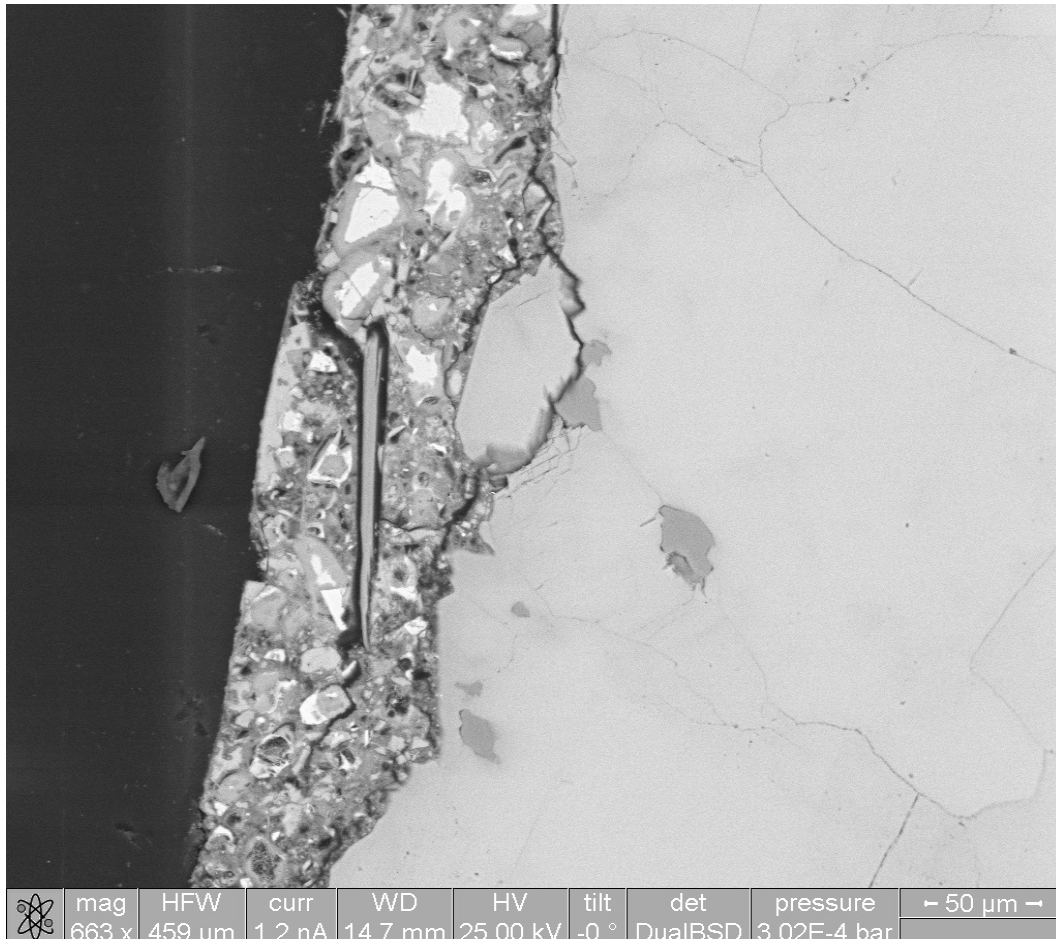
Ein weiteres Beispiel zu dem Verhalten des Hochstegenmarmor ist in Abbildung 130 zu sehen. Hier kommt es ebenso vorrangig in der Nähe der Luftpore zu Rissbildungen und in der Peripherie sind diese kaum wiederzufinden. Im großen Kalksilikat treten einige kleiner Risse auf, diese dürften kaum Auswirkungen auf die Stabilität besitzen.



**Abbildung 130: Risse in Luftporennähe, kleine Risse in Kalksilikataggregat**



Im überwiegenden Teil zeigen die Hochstegenmarmore kaum größere Risse und besitzen meist eine kompakte Zementsteinmatrix. In Nähe von Luftporen und im Randbereich kommt es vermehrt zum Auftreten von Rissen. Des Weiteren kann es hier auch zum Abtrennen von kleineren Kristallen aufgrund von Rissbildungen kommen (Abb. 131). Der Kalzitkristall selbst ist nur von kleineren Rissbildungen betroffen.



**Abbildung 131: Abtrennung von Kalzitkristall in Luftporennähe**

## 4.4.2 Hochstegenmarmor Kernprobe 2

### 4.4.2.1 Makroskopische Beschreibung

Das Kernmaterial (Abb. 132) stammt aus dem Hangenden des Hochstegenmarmores und wird in weiterer Folge als HM 2 bezeichnet. Es handelt sich hierbei um einen fast reinen Marmor. Verunreinigungen sind nahezu nicht erkennbar, vereinzelt sind Pyrite und Muskovite zu beobachten. Quarz ist makroskopisch nicht erkennbar. Die Sedimentationsabfolge ist gut erkennbar teilweise scheint es zu einer duktilen Verformung gekommen zu sein. Die Festigkeit des Gesteins ist sehr hoch.

Die Kernaussage entspricht jener der Kernkiste.



Abbildung 132: Kernmaterial HM 2, Dünnschliffe wurden aus den rot umrandeten Bereich hergestellt.

#### 4.4.2.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung des Mineralbestandes wurden drei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptbestandteil ist Karbonat (Kalzit) mit mehr als 98% und als Accessorien Quarz, Muskovit & Pyrit zu je < 1%.

Es handelt sich bei dieser Probe um einen nahezu reinen Marmor mit einem Karbonatgehalt von ca. 98-99%. Vereinzelt sind Quarzkristalle im Gestein erkennbar sowie Muskovite. Die Pyrite sind über die gesamte Probe fein verteilt (Abb. 133).

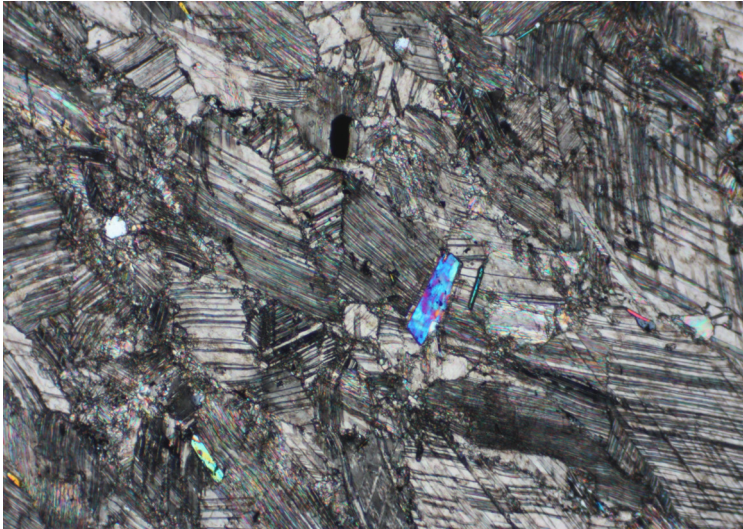


Abbildung 133: Karbonat mit Quarz, Muskovit, Pyrit (opak), xN, BB: 2mm

Es kann vorkommen, dass in Rissen (wahrscheinlich aufgrund größerer Scherbeanspruchung) die Bildung von Muskoviten stattfindet (Abb.: 134).

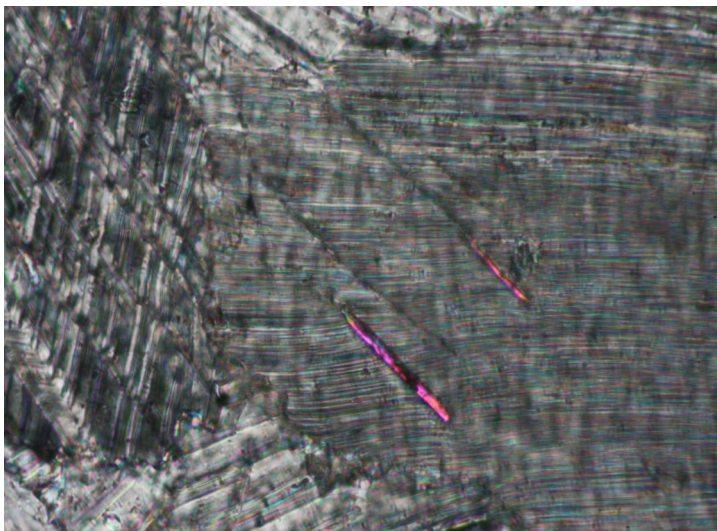


Abbildung 134: Risse in Karbonat verfüllt mit Muskovit, xN, BB: 0,5mm



#### 4.4.2.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Die Dünnschliffe der in Natronlauge gelagerten Mörtelprismen zeigen entgegen der Annahme aus dem Schnelltest, dass eine AKR im Prisma stattgefunden haben könnte. In den Dünnschliffen beider untersuchten Prismen sind einige kleinere Risse erkennbar.

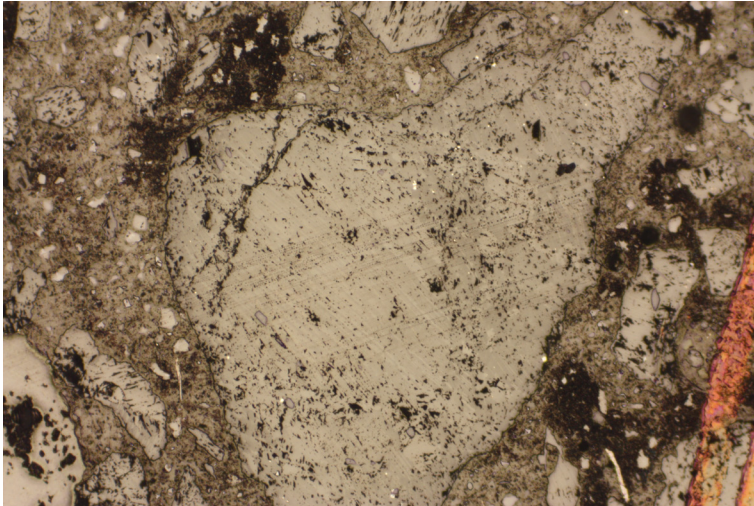


Abbildung 135: Riss in Calcitkorn, x5, AL

In Abbildung 135 ist im Kalzitkorn am linken Kornende ein Riss erkennbar, sowie weitere feine Risse in der rechten oberen Kornhälfte. Der Riss ist in Abbildung 136 nochmal im Detail besser erkennbar. Des Weiteren ist erkennbar, dass der Riss vermutlich mit Gel verfüllt ist, genauere Untersuchungen mit dem REM wären notwendig um dies zu bestätigen. An den Korngrenzen ist kein Saum erkennbar.

In Abbildung 137 sieht man das Korn mit gekreuzten Polarisatoren und erkennt weitere Risse, welche jedoch im Auflicht nicht bestätigt werden können.

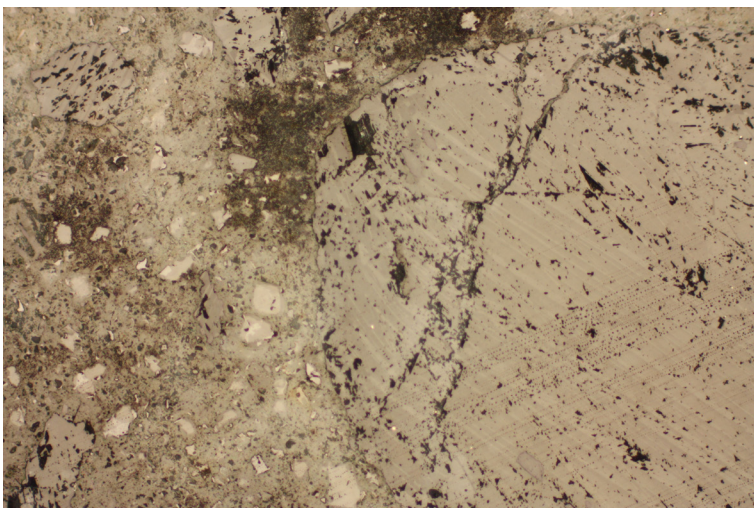
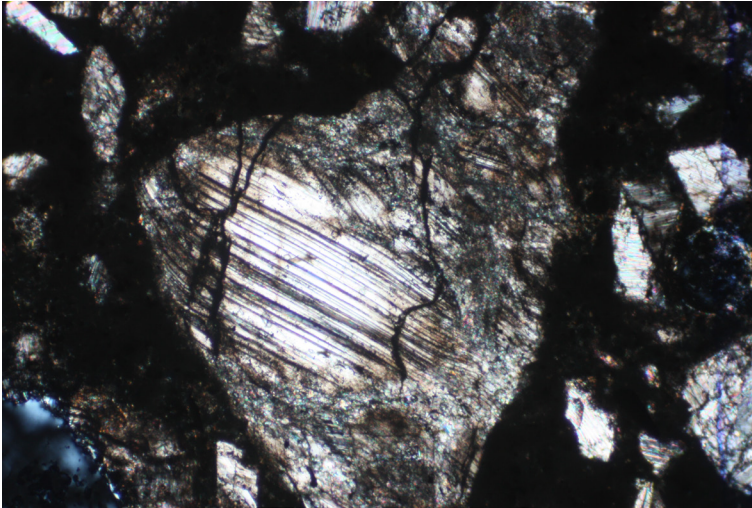
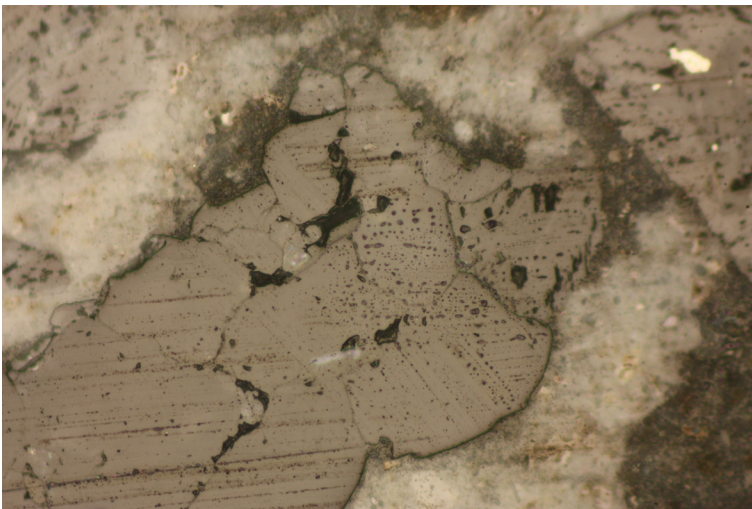


Abbildung 136: Detailansicht Riss in Calcitkorn, x10, AL



**Abbildung 137: Riss in Calcitkorn, x5, xN**

Weitere feine Risse sind in den vereinzelt Quarzkristallen im Marmor zu erkennen (Abb. 138).



**Abbildung 138: Risse in Quarzkristall, x20, AL**

Generell ist in den Schliffen erkennbar, dass nur vereinzelte Risse und diese nur in den Kristallen auftreten. Aufgrund bisheriger Erfahrungen ist zu sagen, dass bei der Extremlagerung des Schnelltests nur sehr feine und wenige Risse im Marmor verursacht wurden. Diese treten in Quarz und Kalzitkristallen auf. Es wurde nur ein größerer Riss in den Dünnschliffen erkannt (Abb. 139).

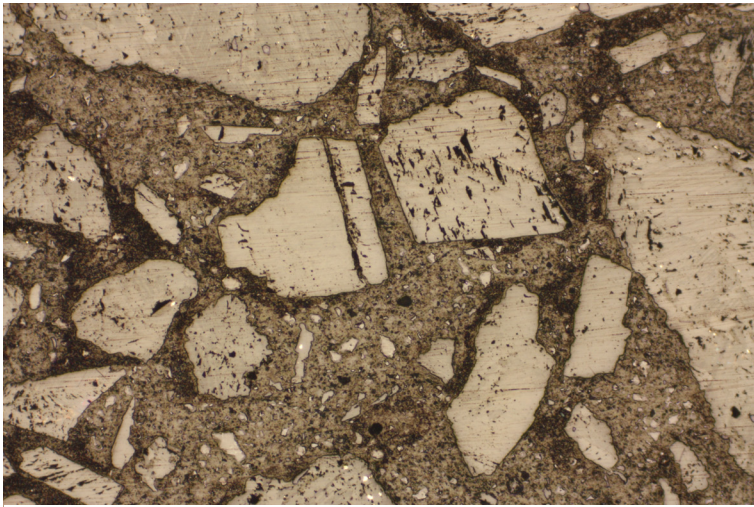


Abbildung 139: Größerer Riss in Kalzitkorn, x5, AL



## 4.5 Kaserer Formation

### 4.5.1 Makroskopische Beschreibung

Bei dem Kernmaterial (Abb. 140) der Kaserer Formation (KF) ist eine deutliche Schichtung und Einregelung sichtbar. Die Zusammensetzung aus vorrangig Quarz mit Feldspäten und Glimmer lässt auf einen Gneis schließen. Des Weiteren kann mit Hilfe des Salzsäuretests ein gewisser Anteil an Karbonat (Kalzit) nachgewiesen werden. Pyrite sind nicht erkennbar.

Die Kernaussage entspricht jener der Kernkiste.

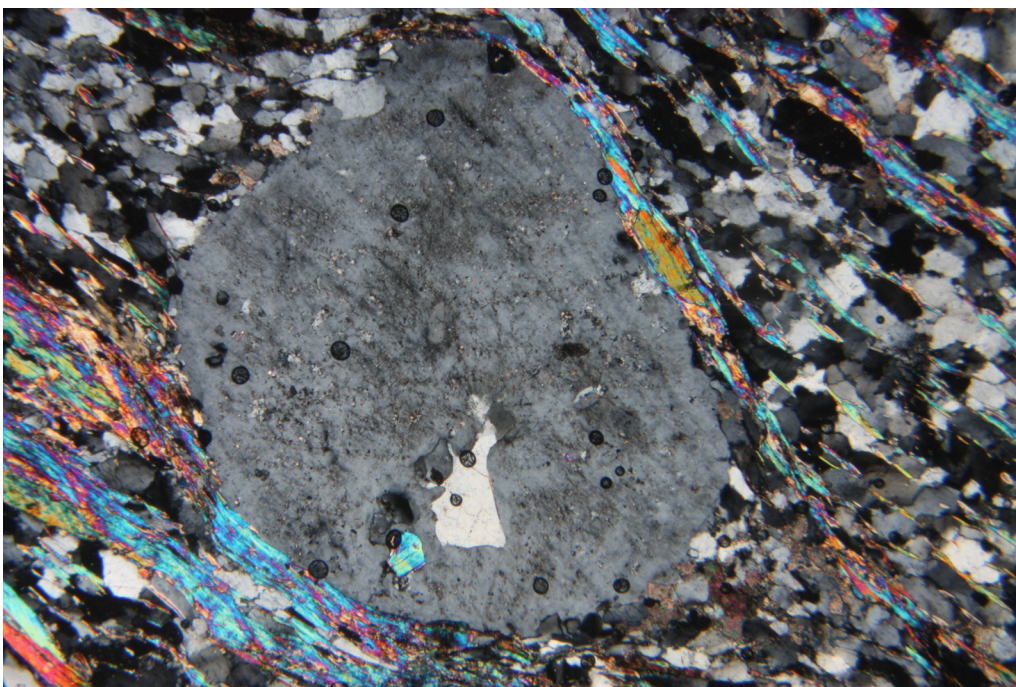


Abbildung 140: Kernmaterial KF, Dünnschliffe wurden aus den rot umrandeten Bereich hergestellt.

#### 4.5.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung des Mineralbestandes wurden zwei Dünnschliffe hergestellt. Hauptbestandteil bildet Quarz mit 62,5% und den Nebengemengteilen an Feldspat mit 31,5%, Glimmer (vorrangig Muskovit) mit 12,5% und Karbonat (Kalzit) mit 5,5%. Accessorisch tritt Pyrit auf.

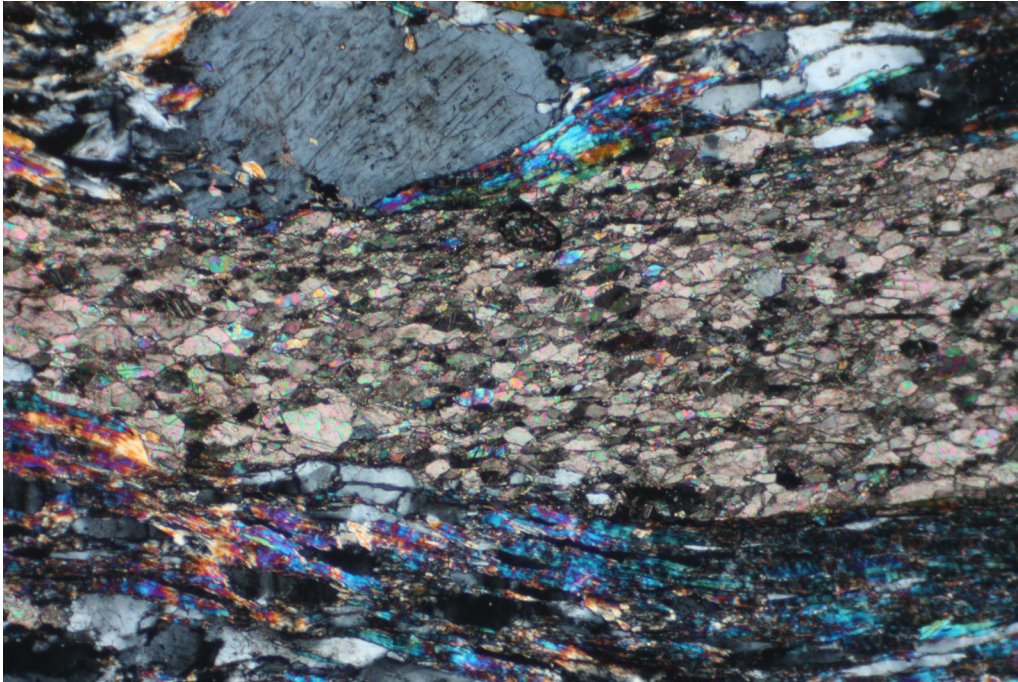
Die Dünnschliffe zeigen eine lagenförmige Schichtung der Minerale. Größere Feldspäte unter anderem Kalifeldspäte sind gerundet was einen horizontale Druckrichtung (Scherung) schließen lässt. Die auftretenden Klüften werden durch Muskovite oder auch Karbonate verfüllt (Abb. 141). Bei dem großen Kalifeldspat sind beginnende Serizitisierungserscheinungen erkennbar. Die dunklen Flecken stellen Überreste des Klebharzes dar.



**Abbildung 141: Gerundeter Kalifeldspat umgeben von eingeregelt Quarz, Muskovit & Biotit, BB: 4mm**

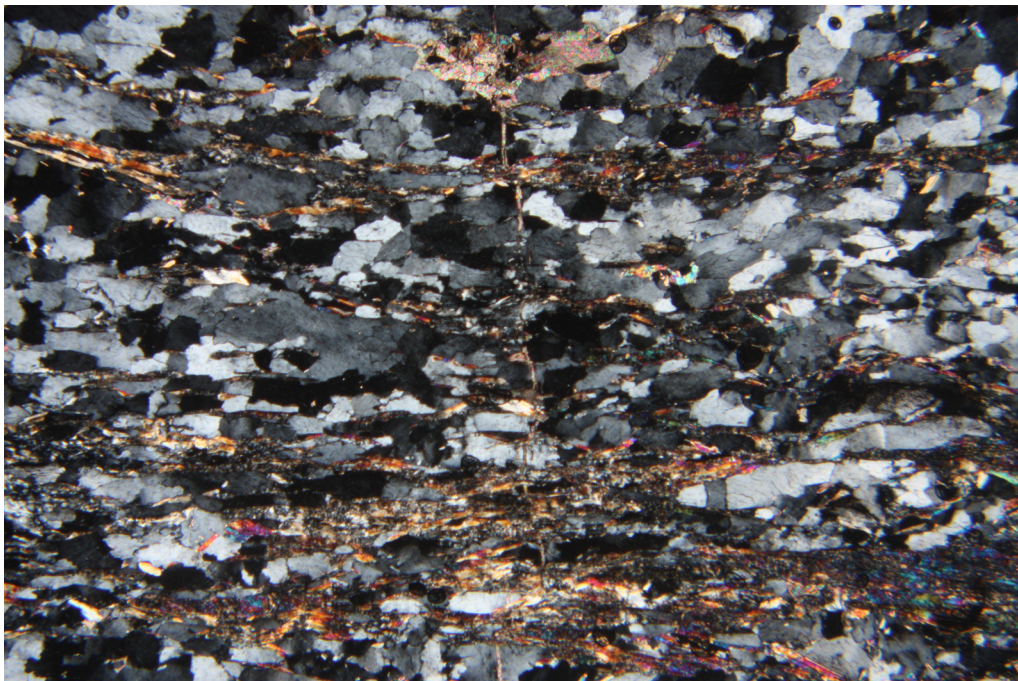
In Abbildung 142 ist ebenfalls ein größerer Kalifeldspat zu sehen während in der Bildmitte ein Karbonatgang durch das Gestein verläuft. Neben diesem Gang treten auch Glimmerminerale (vorrangig Muskovit und untergeordnet Biotit) auf. Im Detail ist zu beobachten, dass sich Muskovite an den Grenzfläche von zerscherten Quarzkristallen bilden.





**Abbildung 142: Karbonatgang durch die Proben, BB: 2mm**

Ein Hinweis auf ein späteres Eindringen des Karbonates ist in Abbildung 143 ersichtlich. Der Karbonatgang verläuft quer zur Schichtungsrichtung. Des Weiteren ist eine gute Einregelung der Quarze erkennbar. Die Undulösität liegt im niedrigen Bereich.



**Abbildung 143: Karbonatgang quer zur Einregelungsrichtung, BB: 4mm**



### 4.5.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Bei den Quarzen der KF sind netzartige Schädigungsstrukturen ähnlich der Bündner Schiefer zu erkennen. Abbildung 144 zeigt die gut sichtliche Schädigung unter gekreuzten Polarisatoren während im Auflicht (Abb. 145) die Korngrenzen gut erkennbar sind und auch die Rissstrukturen entschärft scheinen. Die Bildposition gibt den Randbereich des Mörtelprisma wieder.

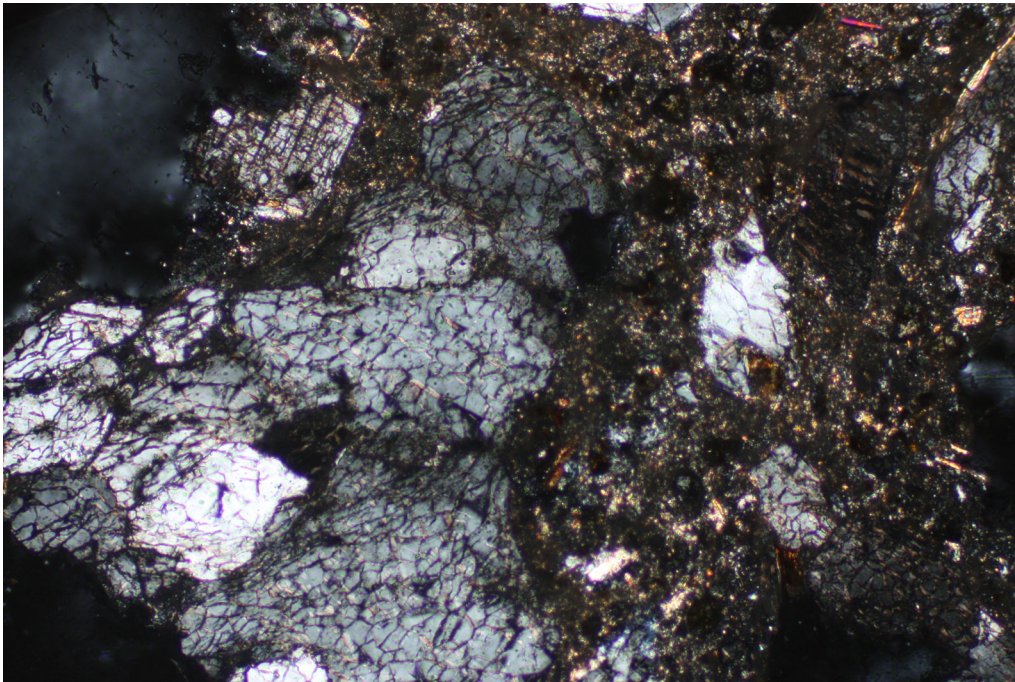


Abbildung 144: Quarz mit netzrissartiger Struktur, bräunliche Matrix, x10, xN

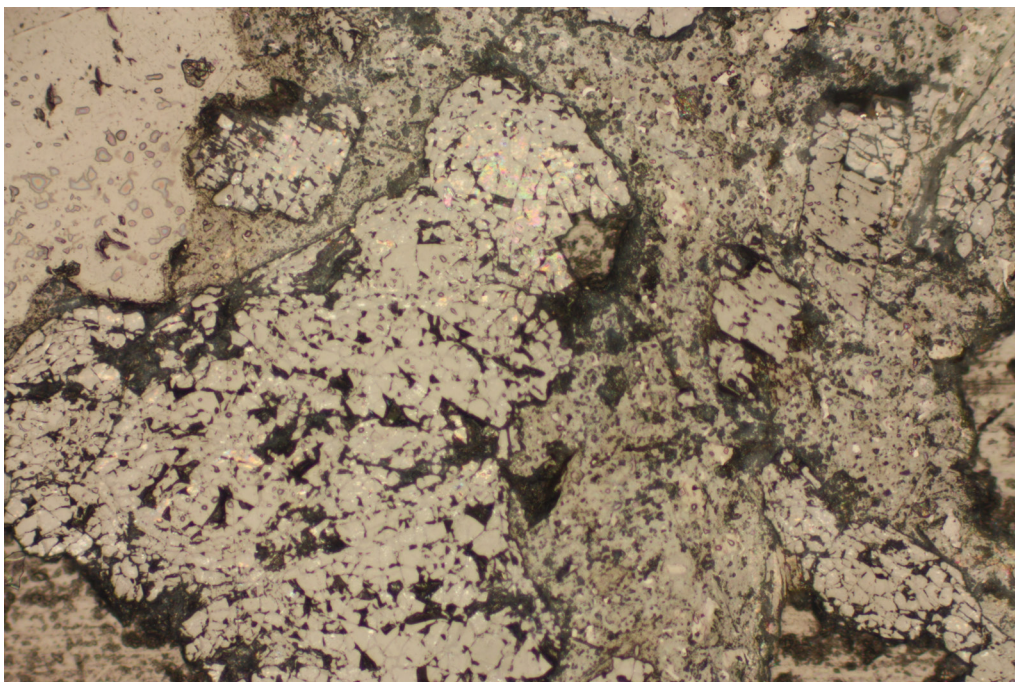
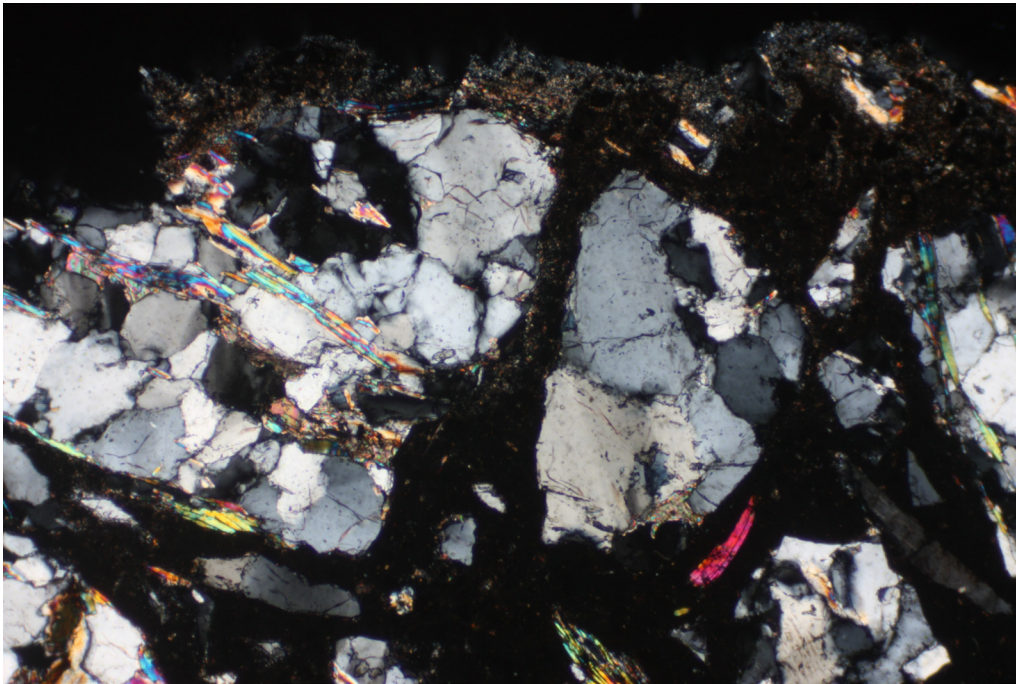


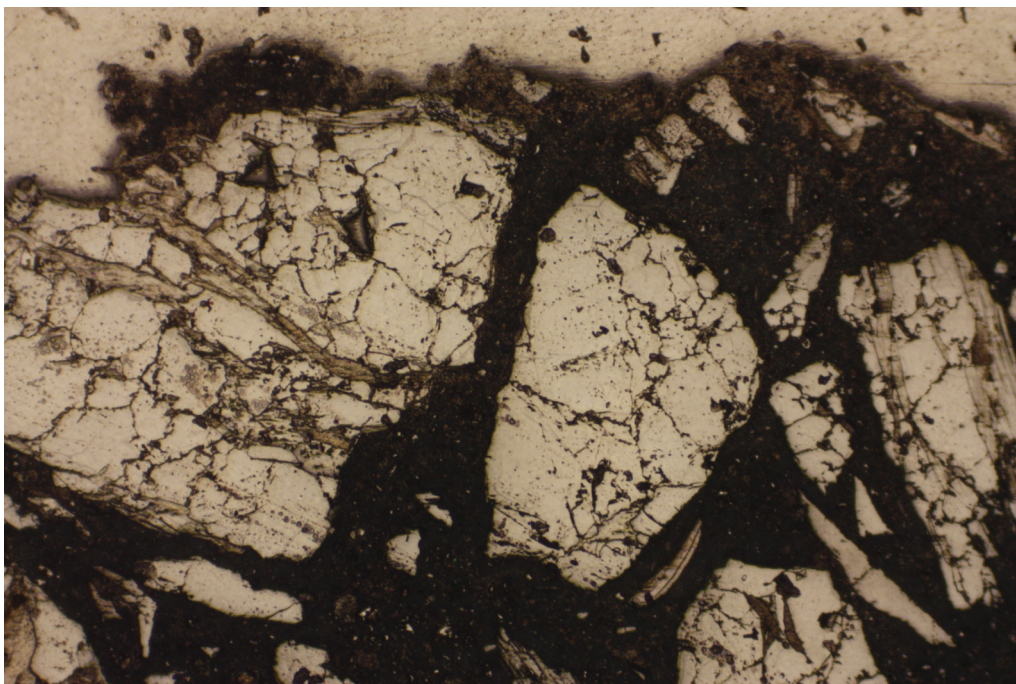
Abbildung 145: Rissstrukturen im Quarz schwer erkennbar, x10, AL



In Abbildung 146 sind viele Risse durch den Quarz erkennbar, diese durchschlagen die eingebauten Muskovite jedoch nicht. Erwähnenswert ist auch das Einbauen von Karbonat im Kornaggregat neben den Muskoviten. Im Bildbereich scheinen alle Quarze angegriffen zu sein. Die unterschiedliche Zementsteinmatrixfärbung ist wahrscheinlich auf die Schlifffdicke zurückzuführen. In der Zementsteinmatrix (Abb. 147) sind keine Risse erkennbar, im Vergleich zu den meisten anderen Dünnschliffen scheinen, aufgrund bisheriger Erfahrungen, die Risse unter xN und AL nahezu übereinstimmend zu sein.



**Abbildung 146: Risse durch Quarze, Muskovite nicht beeinträchtigt, x5, xN**



**Abbildung 147: Risse in Quarzkörner, nicht durch Muskovite und Matrix, x5, AL**

## 4.6 Brixner Granit

### 4.6.1 Makroskopische Beschreibung

Wie dem Name schon zu entnehmen ist, handelt es sich bei dieser Probe (Abb. 148) um einen Granit und wird in weiterer Folge mit BG bezeichnet. Quarz & Feldspat dominieren und der Glimmervertreter besteht hier vorrangig aus etwas Biotit, weiters tritt Chlorit auf. Die grünliche Färbung ist auf den Chloritanteil zurückzuführen. Das Gestein besitzt meist eine sehr hohe Festigkeit, wird aber von mehreren Gängen durchzogen und bricht auch relativ leicht entlang dieser Gänge. Pyrite sind im Gestein nicht erkennbar. Die Gänge sind teilweise mit weißlich – grünlichem Material verfüllt oder es können auch Rekristallisationen stattgefunden haben.

Die Kernaussage entspricht jener Position in der Kernkiste.



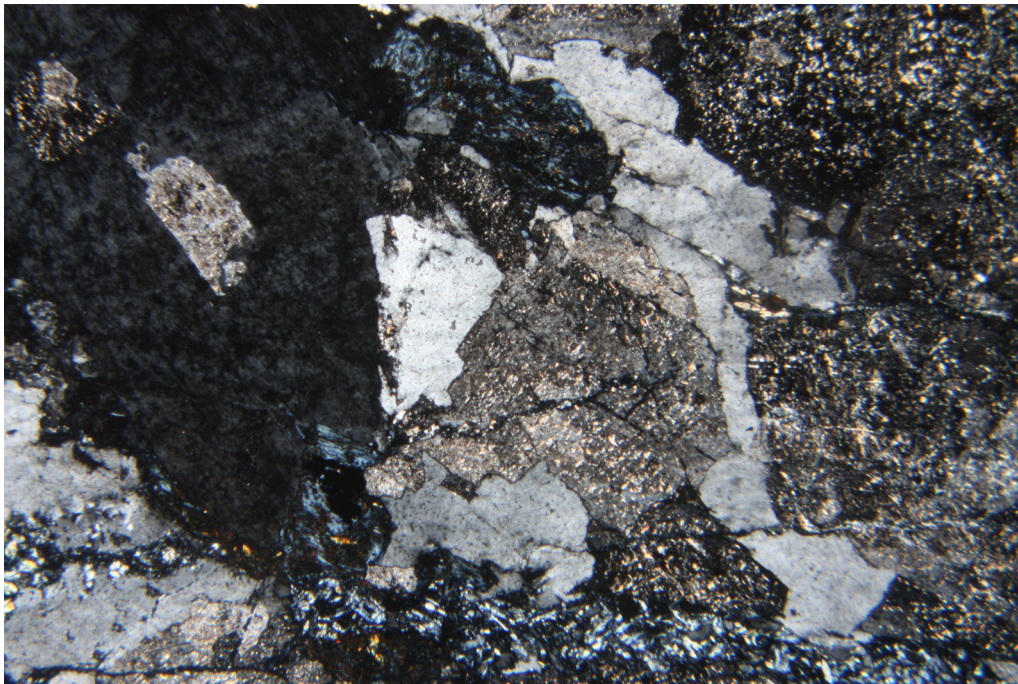
Abbildung 148: Kernmaterial BG, Dünnschliffe wurden aus dem rot umrandeten Bereich hergestellt.



#### 4.6.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung der Probe wurden zwei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptmodalbestand sind Feldspäte (Plagioklas, Mikroklin, Kalifeldspat) mit 55% und Quarz mit 36%. Nebengemengteil ist Chlorit mit 6%, Glimmerminerale sind nahezu nicht vertreten außer etwas Biotit mit einem Anteil <1%. Als weitere Accessorien treten Zoisit, Epidot, Titanit, Kataklasit und Pyrit auf.

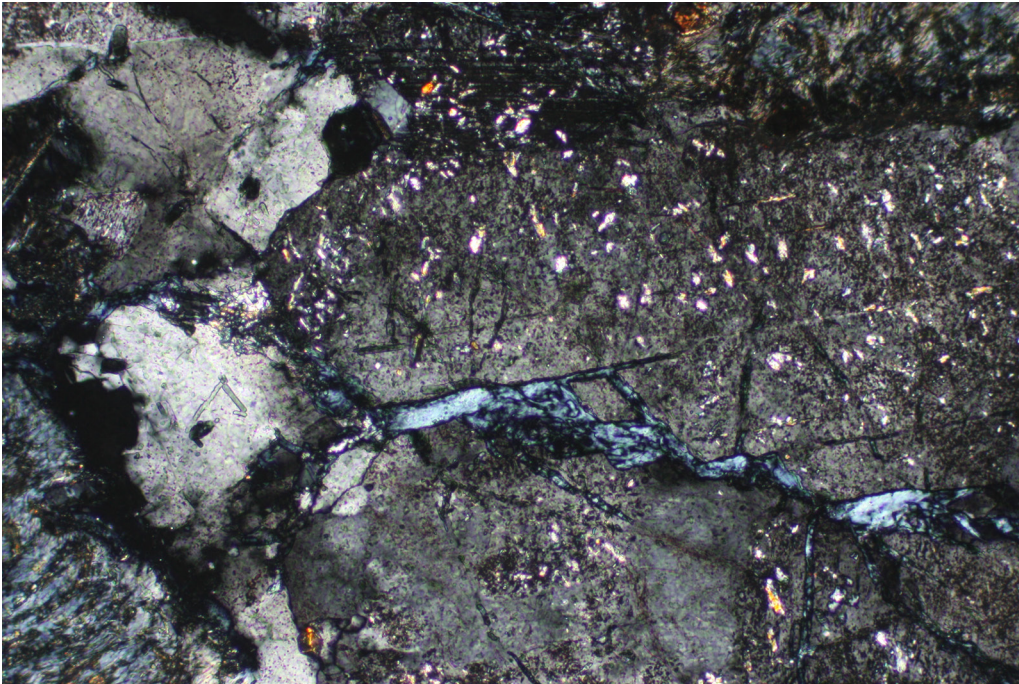
Das Gestein ist sehr deutlich mit vielen Rissen durchzogen, welche nicht alle dem gleichen zeitlichen Ereignis zuzuordnen sind. Diese Risse besitzen unterschiedliche Verfüllungen. Sehr häufig ist die Bildung von Chlorit in den Rissen, welche auch nadelförmig sein kann (Abb. 150). Des Weiteren kann es auch zur Bildung von Zoisit in den Rissen kommen. In den Feldspäten kommt es zur Serizitisierung und Chlorit gefüllte Risse sind häufiger zu beobachten (Abb. 149). In den Quarzen kommt vorrangig zu keinen kleineren Rissbildungen.



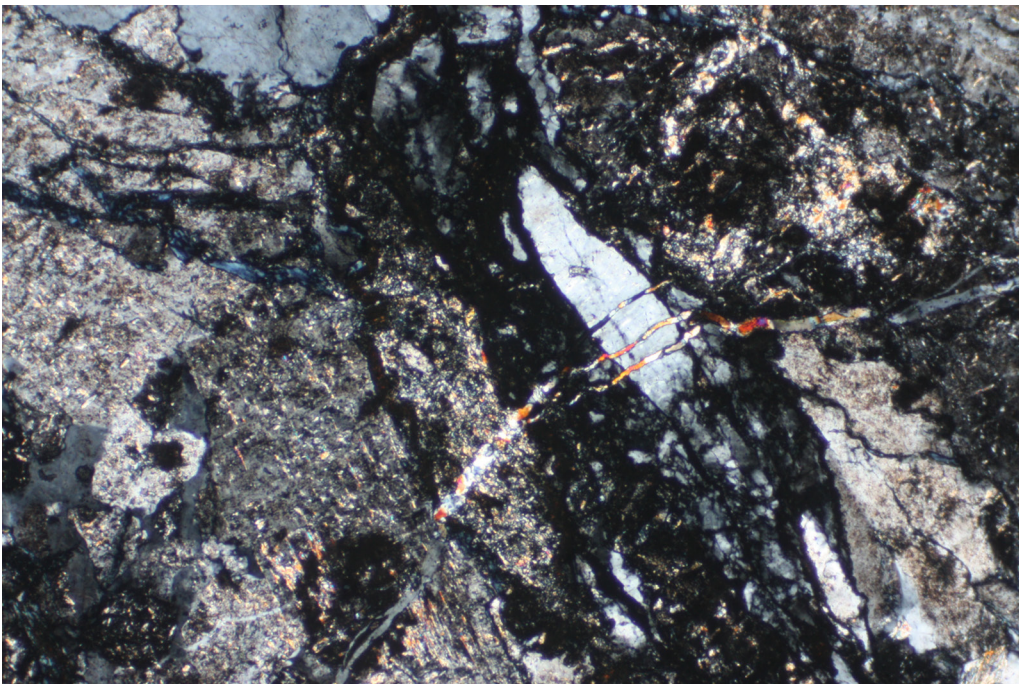
**Abbildung 149: Feldspäte serizitisiert, Risse durch das Gestein, nadelförmige Verzweigungen in den Feldspäten, Zoistigang im unteren Bildbereich, BB: 4mm**

Eine bessere Darstellung der nadelförmigen Verzweigung von Chlorit in den Feldspäten ist in Abbildung 150 ersichtlich, welcher auch für die Grünfärbung des Gesteins verantwortlich ist. Der Plagioklas zeigt Serizitisierungserscheinungen.





**Abbildung 150: Nadelförmige Verzweigung von Chlorit in Plagioklas, BB: 1mm**



**Abbildung 151: Spätere Gangbildung im Gestein, BB: 2mm**

In Abbildung 151 ist eine Gangbildung zu einem späteren Zeitpunkt der Gesteinsentstehung erkennbar. Des Weiteren tritt auch die Bildung von Kataklasit im Dünnschliff auf.



### 4.6.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Die Quarze des Brixner Granit scheinen relativ beständig zu sein und zeigen wenige Rissmuster. Es sind einige Risse erkennbar (Abb. 152), jedoch deutlich weniger im Vergleich zu den Bündner Schiefer. Die Gesamtstruktur scheint sehr stabil zu sein und in der Zementsteinmatrix sind Risse nicht erkennbar. Oberhalb des zentralen leicht beschädigten Quarzes mit erkennbaren Rissen befinden sich unbeschädigte Quarze im umliegenden Bereich.

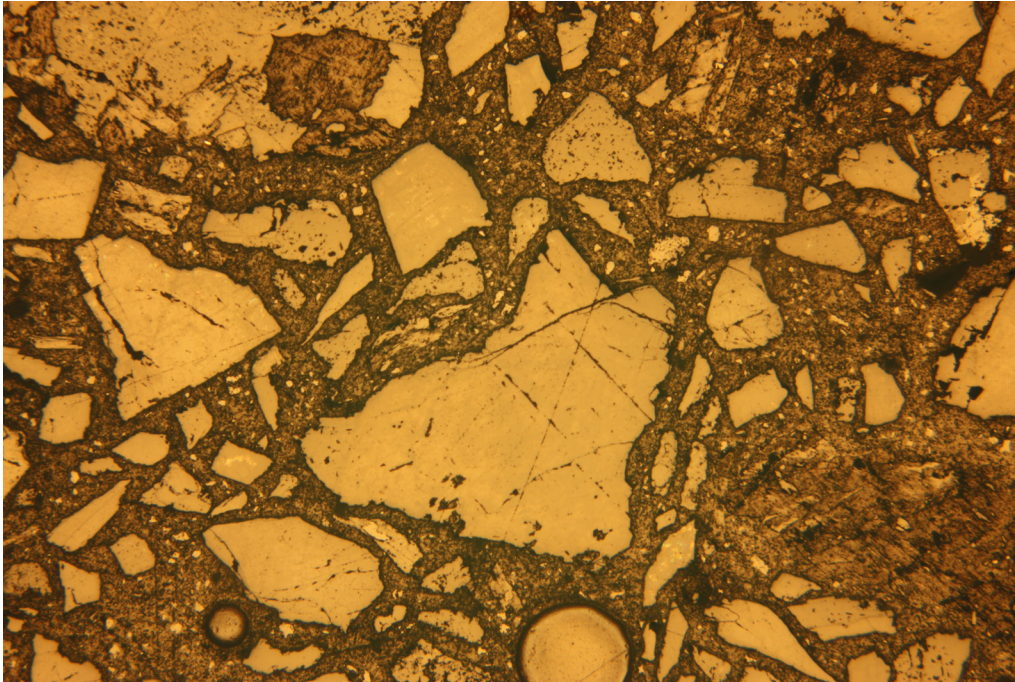


Abbildung 152: Wenige Risse in den Quarzen, Risse in der Matrix unwahrscheinlich, x2,5, AL

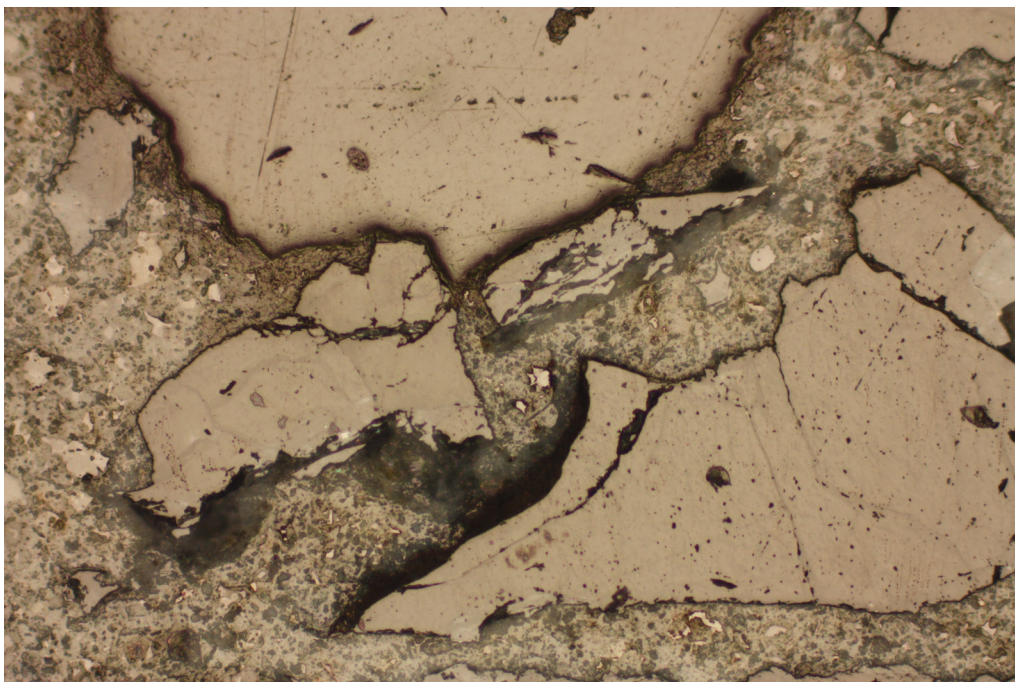


Abbildung 153: Risse in Quarzen, Matrixverfärbung in Luftporennahe erkennbar, x10, AL



In Abbildung 153 sind deutliche Risse in den Quarzen erkennbar. Des Weiteren ist eine Verfärbung der Zementsteinmatrix in Porennähe auffallend, die Ursache konnte jedoch nicht bestimmt werden. Die schwarzen Bereiche zwischen und in der Nähe der zwei Körner ist auf die Präparation zurückzuführen. Zum Vergleich sind in Abbildung 154 die Quarze im Durchlicht mit ausgeklappten Polarisatoren zu sehen. Es ist wesentlich schwieriger hier die Rissbildungen zu betrachten.

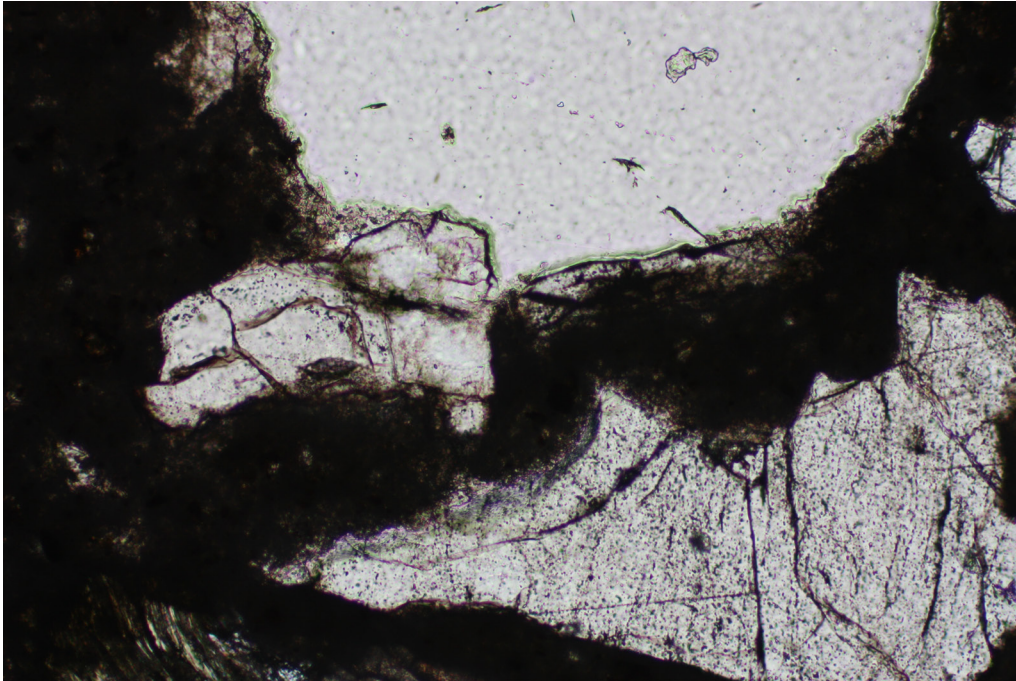


Abbildung 154: Risse in Quarzen schwerer erkennbar, x10, IIN

## 4.7 Tonalit

### 4.7.1 Makroskopische Beschreibung

Die Probe wird in weiterer Folge mit TO bezeichnet. Das Kernmaterial (Abb. 155) ist neben einigen kompakteren Kernstücken eher aufgelockert und mit vielen kleineren und einigen größeren Klüften bzw. Gänge durchzogen. Ein größerer Gang ist im linken Bereich zwischen den Dünnschliffentnahme Punkten sichtbar und ist mit weißem Material verfüllt, welcher kein Talk ist. Brüche entlang der Klüftflächen geschehen rasch. Bei den schlechter sichtbaren bräunlichen Bereichen wird das Gestein durch äußere Einflüsse nahezu entfestigt.

Im Gestein dominieren Quarz und Feldspat. Des Weiteren sind Glimmerminerale erkennbar, wobei der Biotit gegenüber dem Muskovit überwiegt. Die grünliche Färbung ist auf die Anwesenheit von Chlorit zurückzuführen. Pyrite sind kaum erkennbar.

Die Kernaussage entspricht jener der Position in der Kernkiste. Das zerbröselte Material wurde nicht ausgelegt.



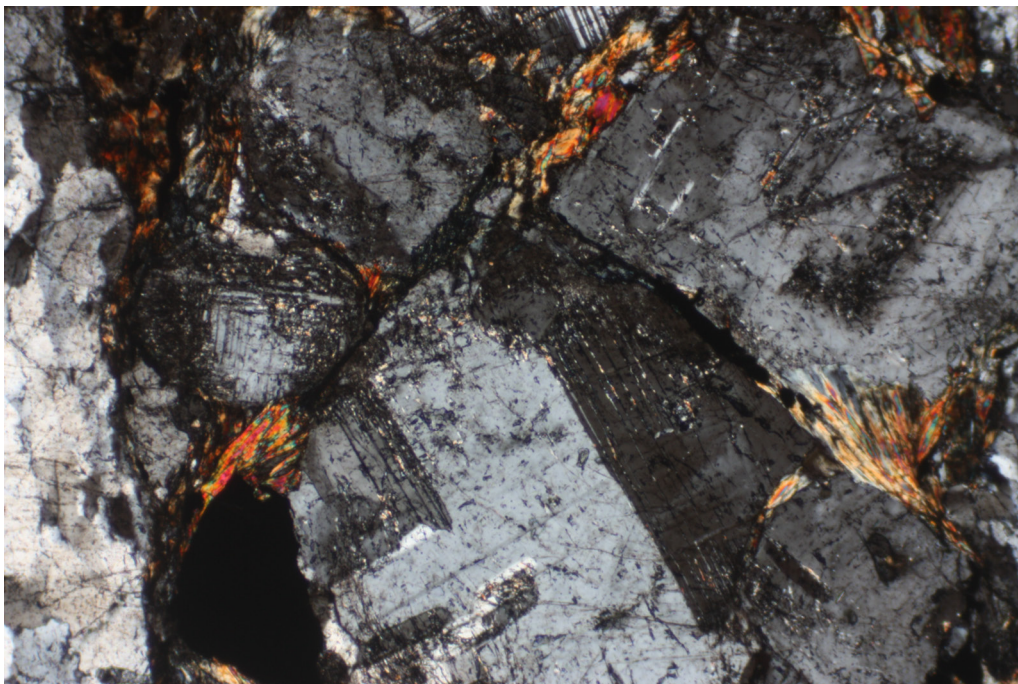
**Abbildung 155: Kernmaterial TO, Dünnschliffe wurden aus dem rot umrandeten Bereich hergestellt.**



#### 4.7.2 Beschreibung der Dünnschliffe

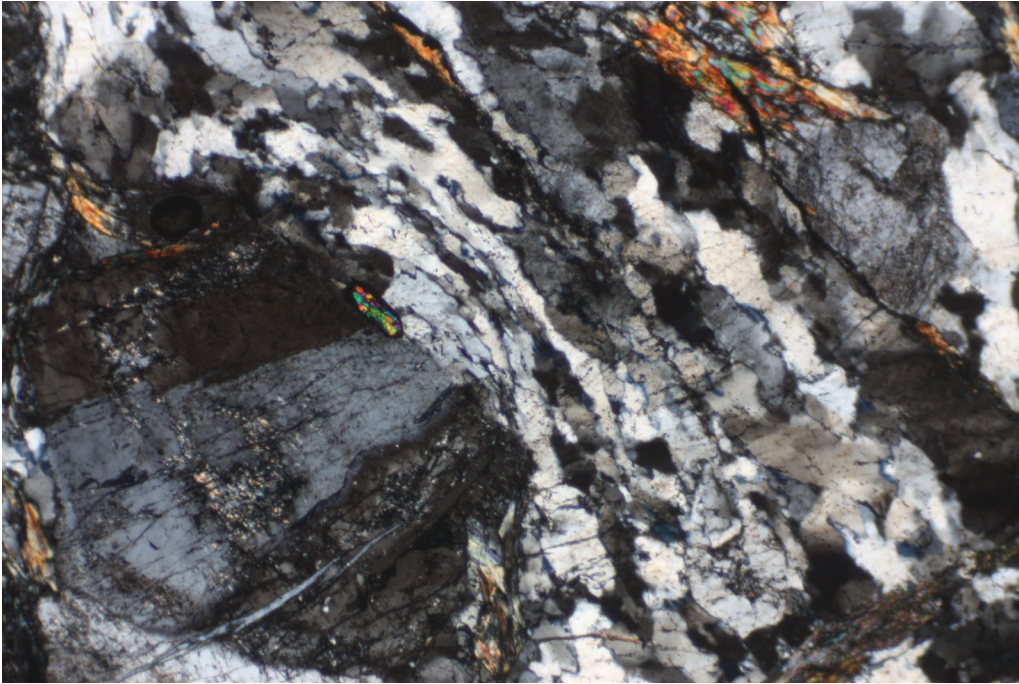
Zur Charakterisierung des Gesteins wurden zwei Dünnschliffe hergestellt. Die Hauptgemengteile sind Feldspäte (Plagioklas, Kalifeldspat, Mikroklin) mit 50% und Quarz mit 40%. Nebengemengteile sind die Glimmerminerale (Biotit, untergeordnet Muskovit) mit 7%. Des Weiteren sind als Accessorien Chlorit mit 2%, Pyrit mit 1%, und Hornblende, Zirkon, Zoisit, Illmentit vorhanden.

Die Feldspäte zeigen Rundungserscheinungen und bei den Plagioklasen sind Serizitisierungserscheinungen sichtbar. Die Quarze sind durch den Druck gepresst und besitzen im Schnitt eine starke Undulösität. Die Quarzkristalle weisen hier kaum Risse auf. In den Zwischenräumen wurden Biotite gebildet (Abb. 156).

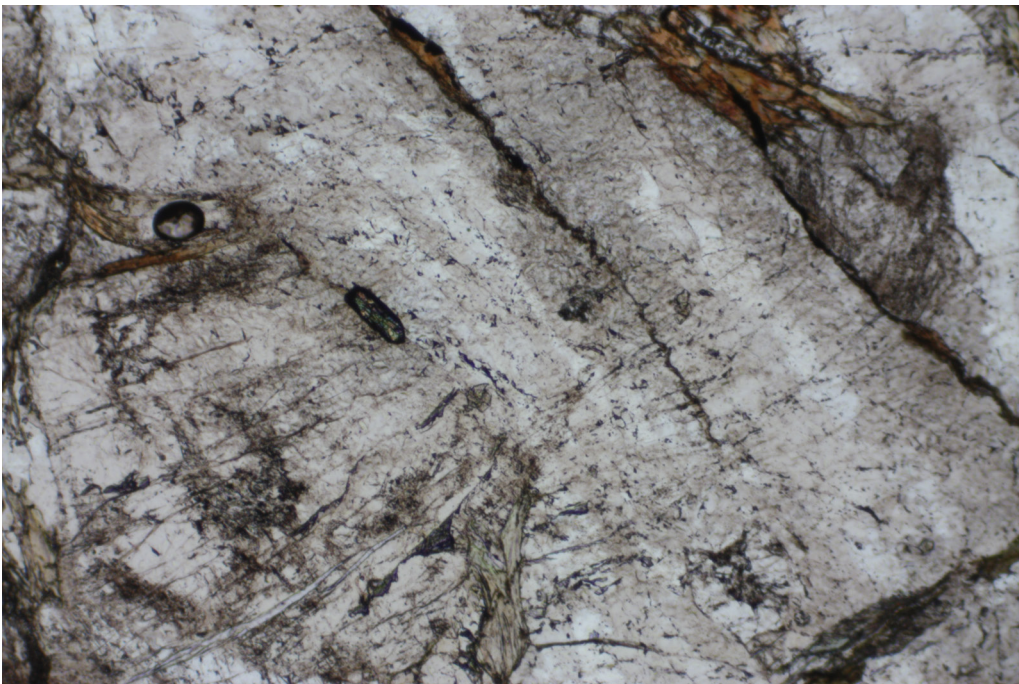


**Abbildung 156: Gerundete Feldspäte, Biotite im Zwischenraum, BB: 2mm**

Die Inhomogenität der Quarze ist in Abbildung 157 deutlicher sichtbar. Hier wird der Quarzkristall gegen einen Feldspat (Plagioklas/Kalifeldspat) gedrückt. Rissbildungen durch Feldspat und Quarz sind zu beobachten. In den entstehenden Klüften kann es zur Bildung von Biotiten kommen. Die Rissbildungen O-W und N-S deuten auf mehrere Stressrichtungen hin. Der Verlauf der Biotitbildung ist in Abbildung 158 unter parallelen Polarisatoren besser sichtbar sowie das hohe Relief des Zirkon.



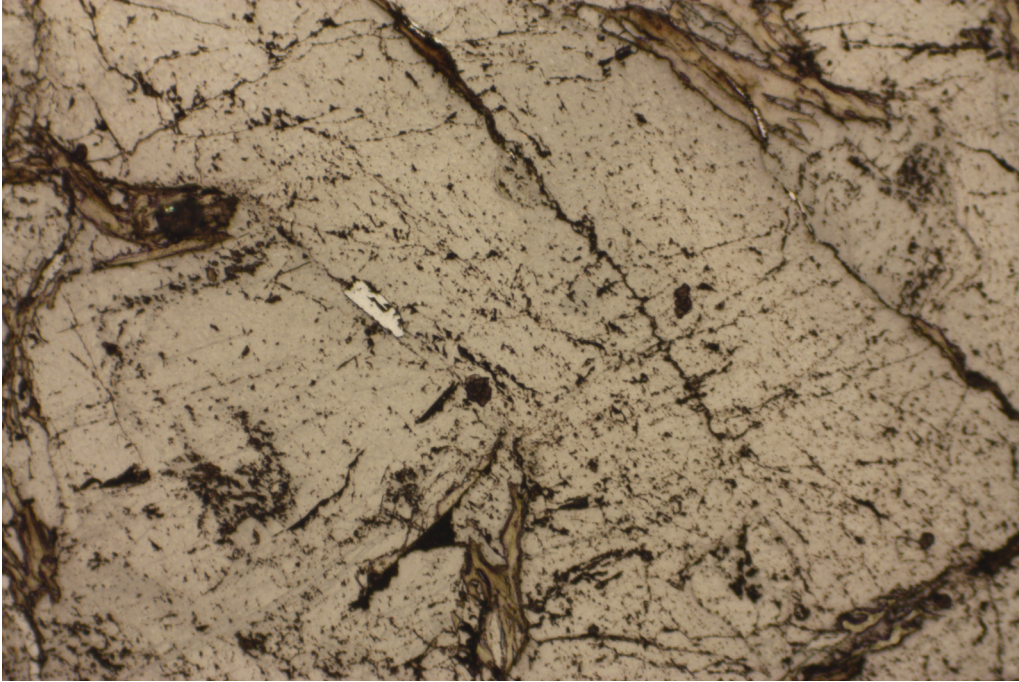
**Abbildung 157: Quarz drückt gegen Feldspat, Biotite in Rissen, Querrisse erkennbar, BB: 2 mm**



**Abbildung 158: Quarz presst gegen Feldspat, Biotite in Rissen, Querrisse erkennbar, Zirkon in Bildmitte sichtbar, II N, BB: 2 mm**

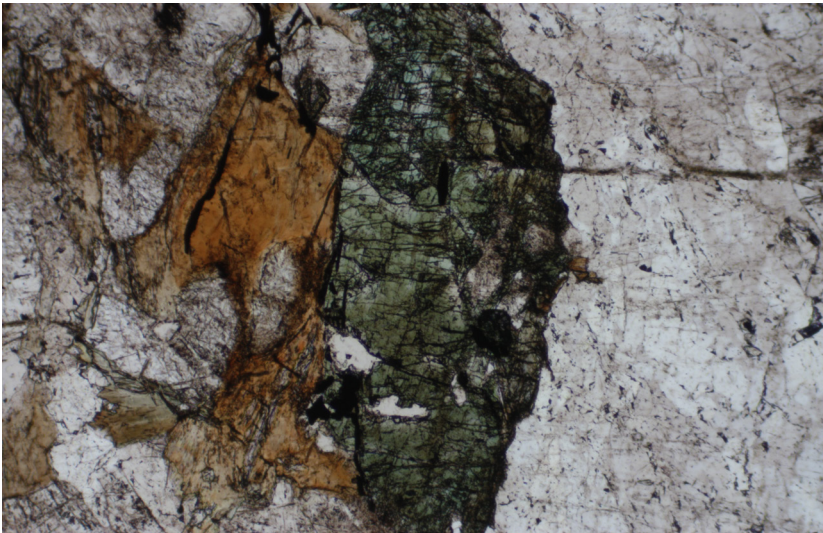
Interessant ist auch die Reflexion im Auflicht des Zirkons (Abb. 159). Die Querrisse sind hier auch sehr gut erkennbar.





**Abbildung 159: Querrisse in Quarz, Reflexion im Zirkon, BB: 2mm**

Im Tonalit ist auch die Bildung von hypidiomorphen Hornblenden (Abb. 160) erkennbar. Risse durch die Quarze an der rechten Seite verlaufen ca. bis zur Mitte der Hornblende. Die Hornblende ist mit kleinen Rissen durchzogen.



**Abbildung 160: Hornblende neben Biotit, BB: 2mm**

Generell ist auffallend, dass es im Tonalit zu Neukristallisationen kommt. Diese scheinen kleine Quarzgänge zu sein und besitzen ein ähnliches Relief (Abb. 161). Die Gänge durchschlagen die vorhandenen Kristalle.

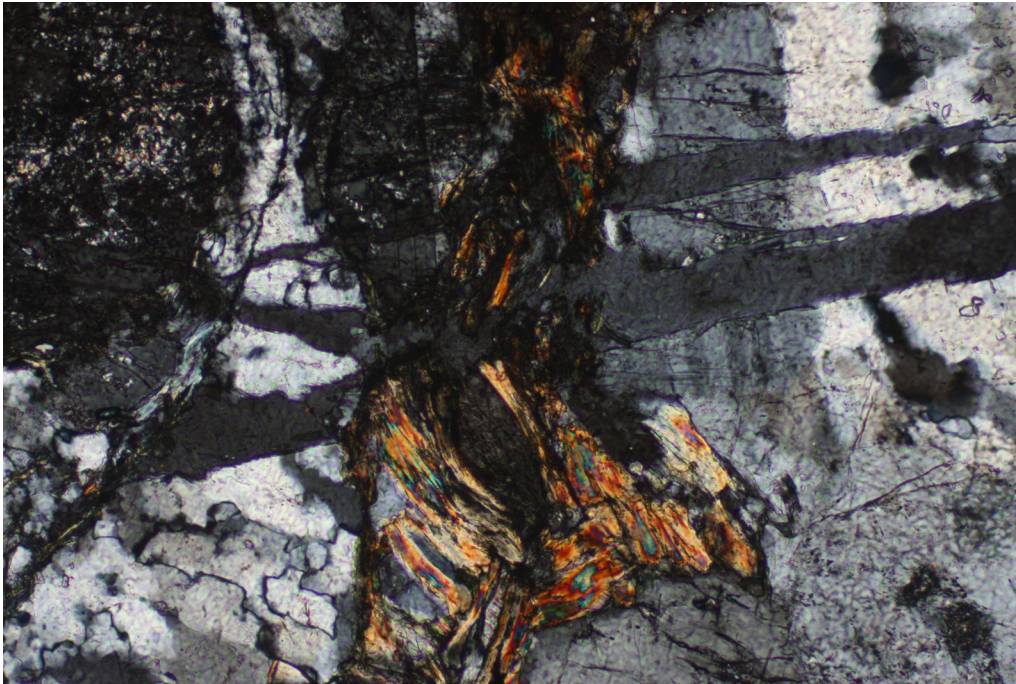


Abbildung 161: Quarzgänge aufgrund von Neukristallisation, BB: 1mm

### 4.7.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Da kein Fokus auf die Gesteine des Tonalits in der Anwendung liegt wurde auf die Herstellung von Schliffen aus den Prismen verzichtet.



## 4.8 Augengneis

### 4.8.1 Makroskopische Beschreibung

Bei der Probe (Abb. 162) sind die großen Feldspäte deutlich zu erkennen was auch zur Bezeichnung Augengneis führt. Des Weiteren ist die zweite dominante Komponente im Gestein der Quarz. Untergeordnet treten die Glimmerminerale auf, wobei der Biotitanteil überwiegt. Vereinzelt kommt es zum Auftreten kleinere Pyrite im Gestein. Karbonate (Kalzit) scheint nicht vorhanden zu sein. Das Gestein besitzt eine hohe Festigkeit und eine Einregelung ist erkennbar.

Die Kernaussage entspricht jener der Kernkiste.



Abbildung 162: Kernmaterial AG, Dünnschliffe wurden aus dem rot umrandeten Bereich hergestellt.

#### 4.8.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Bestimmung der Minerale im Augengneis wurden zwei Dünnschliffe hergestellt. Die Hauptminerale sind Feldspäte mit 52,5% und Quarz mit 40,5%. Der Nebengemengteil setzt sich aus den Glimmermineralen mit 6%, vorrangig Biotit untergeordnet Muskovit und Chlorit zusammen. Als Accessorien treten Pyrit <1%, Staurolith & Titanit auf.

Die Minerale im Augengneis zeigen eine allgemeine Einregelung, was auf eine starke Beanspruchung schließen lässt. Die Korngrenzen der Quarze sind vorrangig suturiert, es sind vereinzelt Risse durch verschiedene Kristalle erkennbar. Eine Serizitisierung der Plagioklase ist erkennbar. In den Klüften kommt es bevorzugt zur Bildung von Biotit und etwas Muskovit (Abb. 163). Bei der Betrachtung der Dünnschliffe ist auch die unterschiedliche Größe der Quarze auffallend was auf mehrere Bildungsalter hinweist.

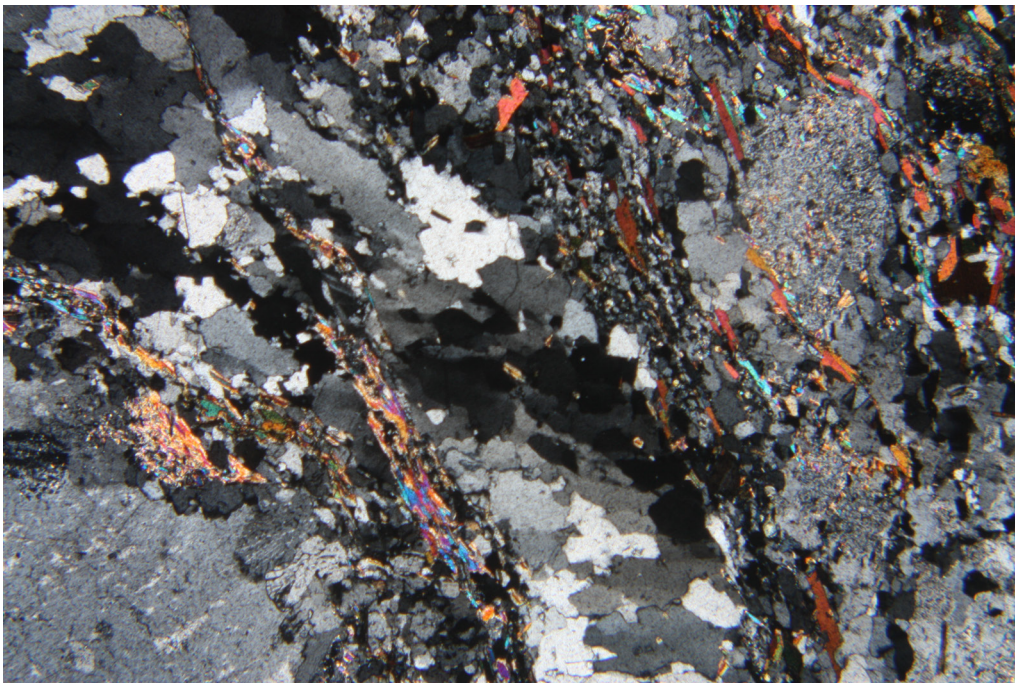
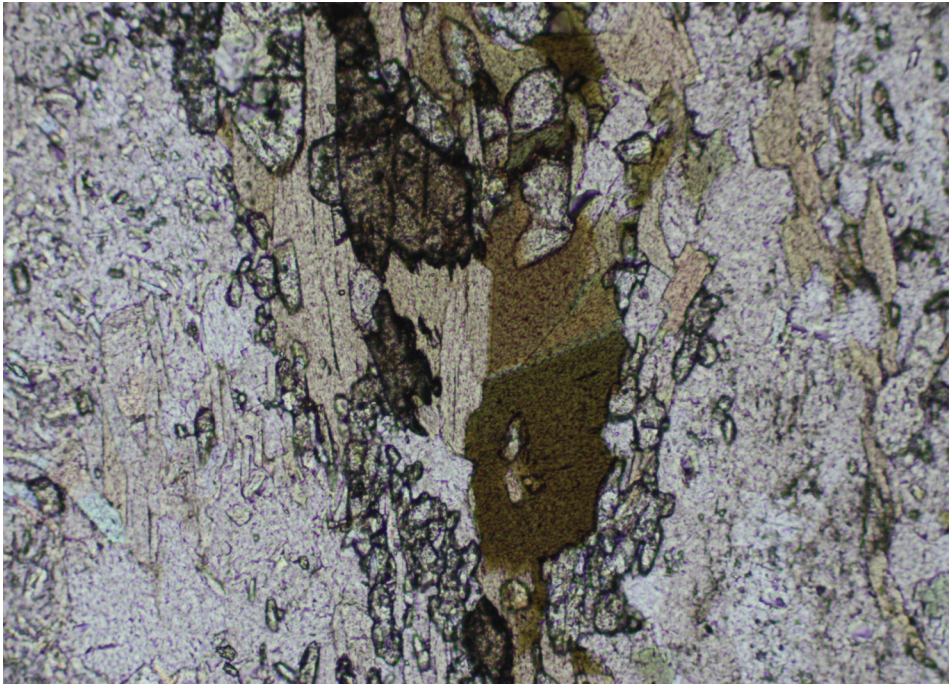


Abbildung 163: Deformierte Quarze, Serizitisierung der Plagioklase, BB: 4mm

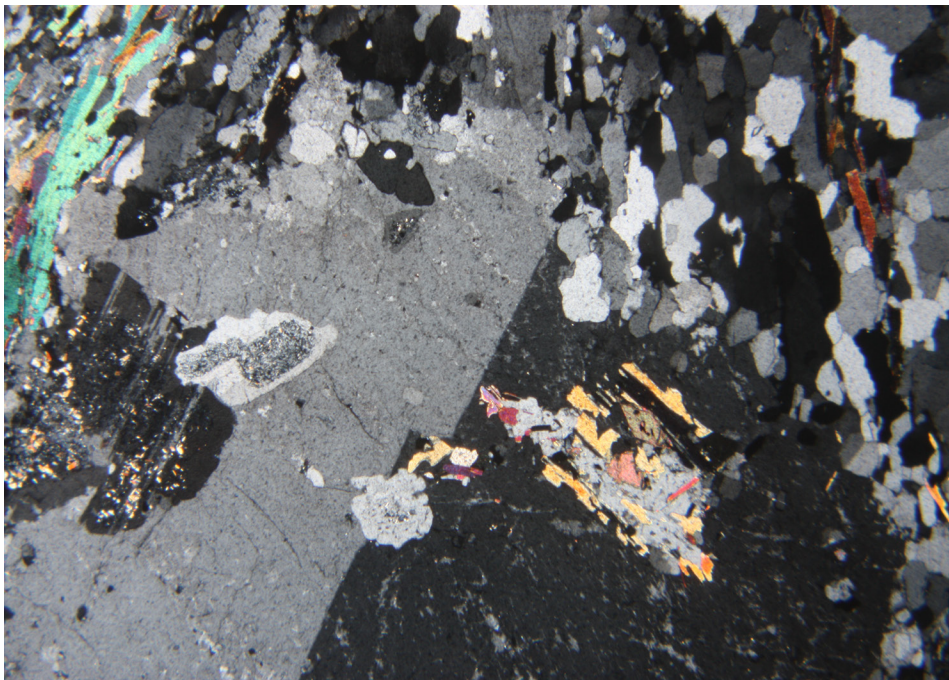
Die großen Kräfte der Deformierung sind in Abbildung 164 gut erkennbar, besonders an dem größeren zerrissenen Kristall des Stauroliths sowie dem kleineren zerrissenen Titanit. Des Weiteren sind mit bräunlich-grünlicher Farbe die Biotite erkennbar, welche sehr häufig in Klüften auftreten.





**Abbildung 164: Staurolith zerrissen daneben ebenso der bräunliche Titanit, BB: 1mm**

Bei den untersuchten Dünnschliffen ist auch auffällig, dass große Feldspäte (Kalifeldspat, Mikroklin) des Öfteren kleinere Kristalle überwachsen, dies kann ein Hinweis auf eine Neukristallisation oder spätere Bildung sein (Abb. 165). Die Kristallgrenzen der Feldspäte an den Rändern zeigen Auflösungserscheinungen, im Kristall sind kleinere Risse erkennbar. Die Undulösität liegt im Bereich wenig bis mittel.



**Abbildung 165: Feldspat mit überwachsenen Plagioklasen und Biotiten, BB: 4mm**



### 4.8.3 Beschreibung der Mörtelprismen

In den betrachteten Dünnschliffen sind Risse zufolge der Extremlagerung in Natronlauge erkennbar, die einer AKR zugeordnet werden können. Diese Risse befinden sich meist in Quarz- oder Feldspatkristallen. In der Zementsteinmatrix wurden keine Risse entdeckt.

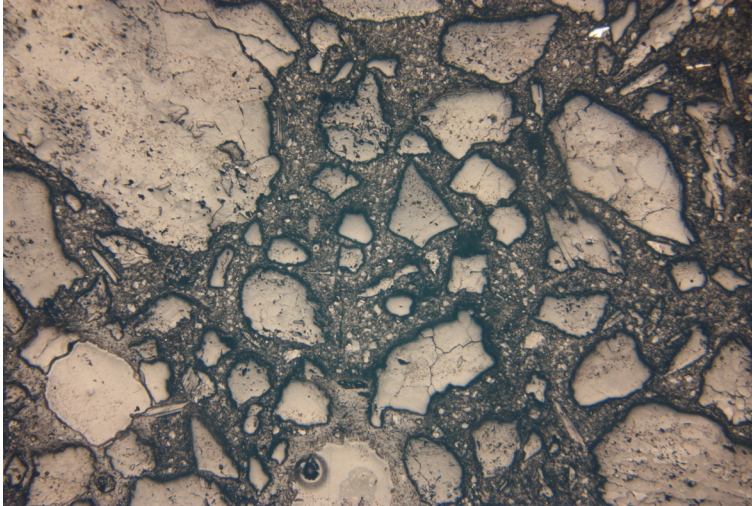


Abbildung 166: Risse in verschiedenen Kristallen, x2.5, AL

In Abbildung 166 sind mehrere Risse erkennbar, die einer AKR, zugeordnet werden könnten. Der relativ große Riss im Kristall links verläuft durch einen Feldspat, jedoch nicht weiter in der Zementsteinmatrix. Es sind weiters mehrere feine Risse in anderen Kristallen erkennbar, z.B. im Kristall in der unteren Bildhälfte Mitte. Zur Bestimmung der verschiedenen Kristalle ist Abbildung 167 hilfreich wo auch der große Riss im Feldspat noch gut erkennbar ist.

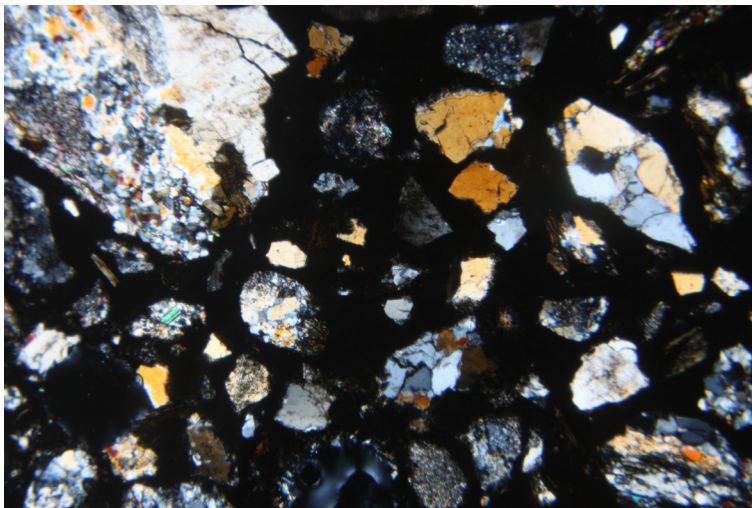
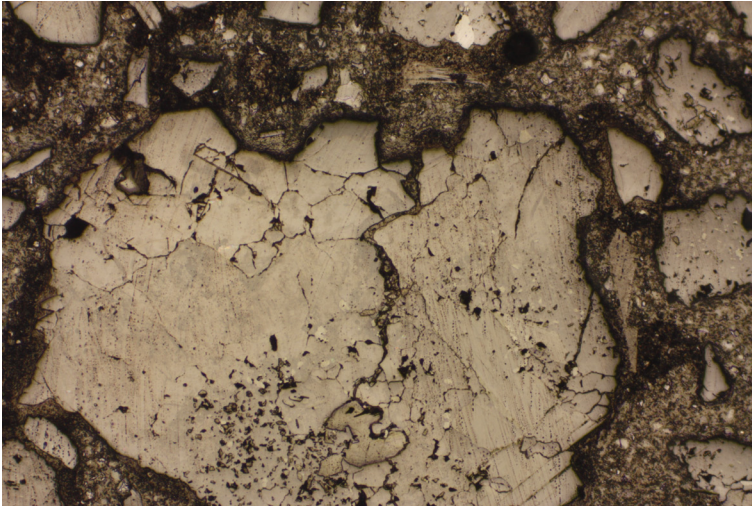


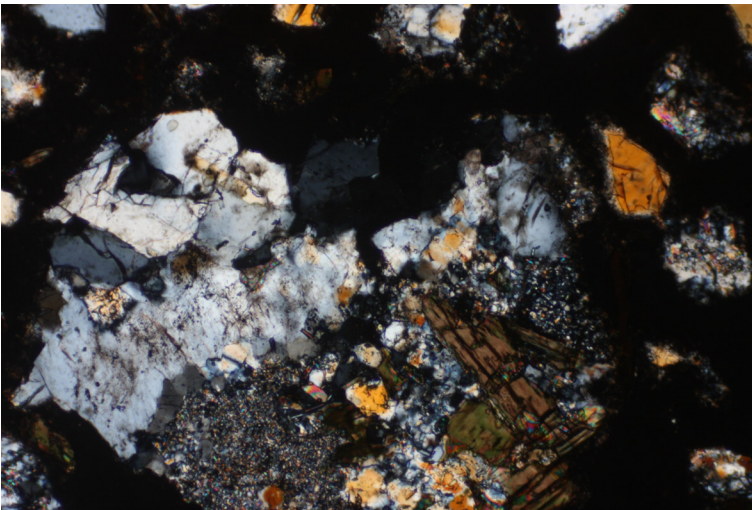
Abbildung 167: Risse in verschiedenen Kristallen, x2.5, xN

In den Mörtelprismen des Augengneises befinden sich generell mehrere größere Risse in den Gesteinskörnern wie nachfolgend in Abbildung 168 ersichtlich ist. Vorrangig treten diese Risse in den Feldspäten auf und eher untergeordnet in den Glimmern. Zur Unterscheidung des Gemischtkorns ist Abbildung 169 hilfreich.



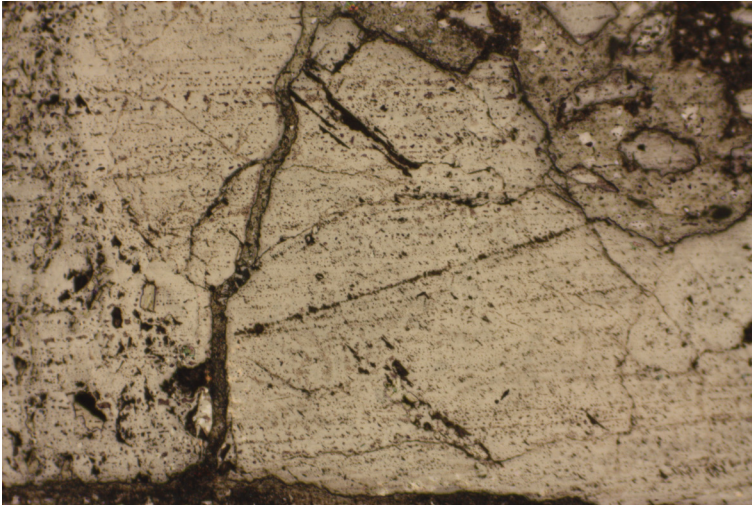


**Abbildung 168: größerer Riss in gemischten Kristall mit mehreren kleineren Rissen, x5, AL**

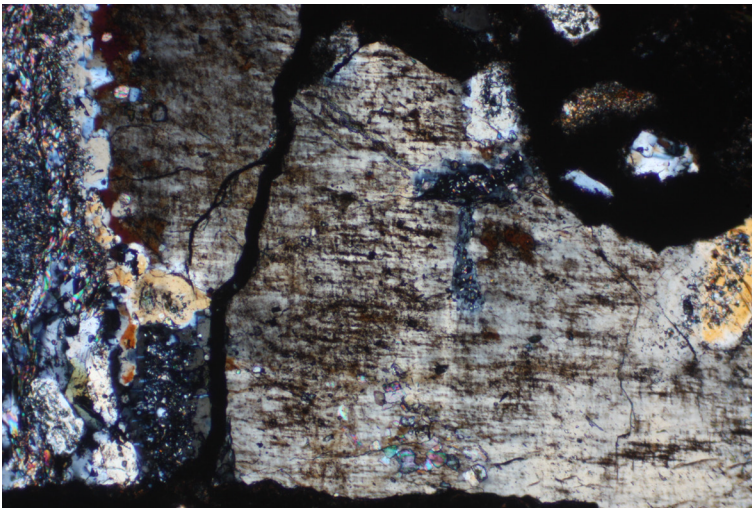


**Abbildung 169: größerer Riss in gemischten Kristall mit mehreren kleineren Rissen, x5, xN**

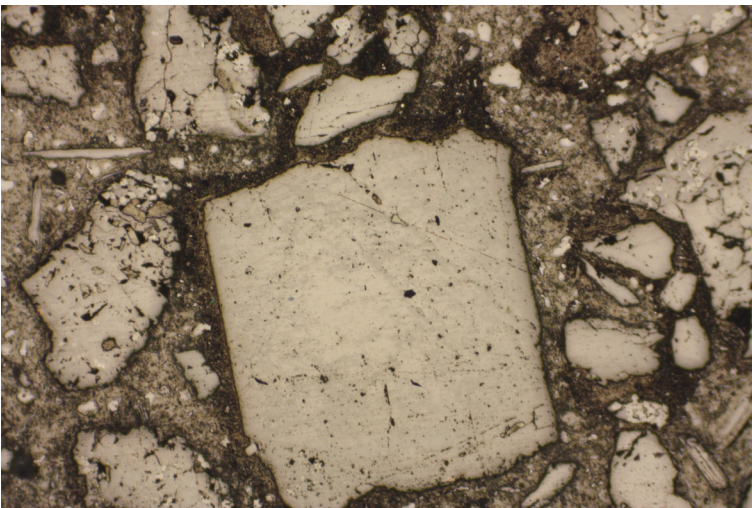
Die Angreifbarkeit der Feldspäte wird durch Abbildung 170 & Abbildung 171 weiter unterstützt, da auch hier ein größerer Riss durch den Kristall verläuft. Hingegen ist in Abbildung 172 & Abbildung 173 ein unbeschädigter Feldspatkristall zu erkennen was hinweist, dass nicht alle Feldspäte einen lagerungsbedingten Schaden erleiden müssen und Ausnahmen durchaus vorhanden sind.



**Abbildung 170: großer Riss durch Feldspat, x5, AL**

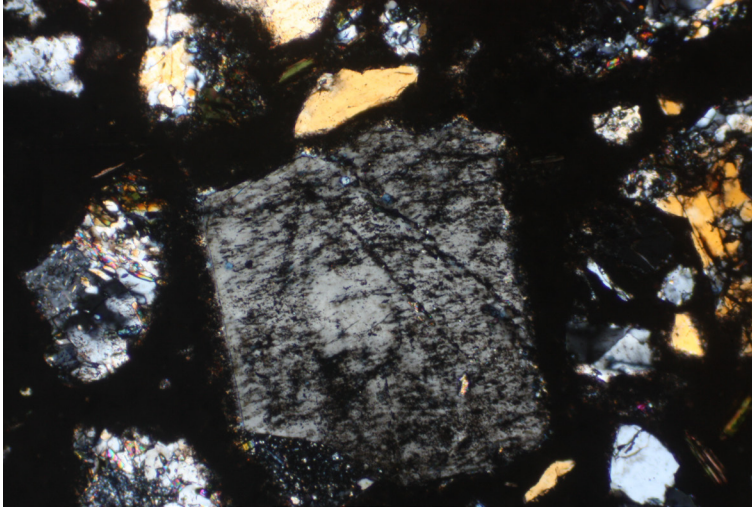


**Abbildung 171: großer Riss durch Feldspat, x5 xN**



**Abbildung 172: Unbeschädigter Feldspat, x5, AL**





**Abbildung 173: Unbeschädigter Feldspat, x5, xN**

Zusammenfassend sei bemerkt, dass bei Verwendung des Augengneises die Feldspäte das größte Angriffspotential hinsichtlich einer möglichen AKR bieten. Es treten wie bei den anderen untersuchten Proben, ebenso viele kleine Risse auf, welche hier nicht im Detail gezeigt wurden. Ein definitiver Nachweis einer stattgefundenen AKR war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Vermutung einer AKR erfolgt aufgrund bisherig gewonnenen Erfahrungen, eine Bestätigung mit dem REM ist nicht erfolgt.

## 4.9 Metagranit

### 4.9.1 Makroskopische Beschreibung

Bei der Probe (Abb. 174) des Metagranit (MG) ist ein geringer Anteil an Chlorit auffällig, was zu einer teilweisen grünen Verfärbung führt. Das Gestein besteht überwiegend aus Quarz und Feldspat, die Glimmerminerale treten untergeordnet auf wobei Biotite nicht erkennbar sind. Pyrite sind vereinzelt im Gestein sichtbar. Aufgrund des Salzsäuretests ist ein geringer Anteil an Karbonat (Kalzit) anzunehmen. Des Weiteren ist im Gestein ein Xenolith, bei Beginn der Fels-Bohrkernprobe erkennbar.

Das Gestein besitzt eine sehr hohe Festigkeit. Der große Unterschied zum Brixner Granit und dem Tonalit ist, dass hier kaum Klüfte zu sehen sind und keine Gänge sichtbar sind. Der Anteil an Chlorit ist ebenso geringer.

Die Kernaussage entspricht jener der Kernkiste.



Abbildung 174: Kernmaterial MG, Dünnschliffe wurden aus dem rot umrandeten Bereich hergestellt.



## 4.9.2 Beschreibung der Dünnschliffe

Zur Charakterisierung des Granites wurden zwei Dünnschliffe hergestellt. Der Hauptbestandteil der Minerale entfällt auf Quarz mit 47,5% und Feldspat mit 40,5%. Als Nebenminerale treten Glimmerminerale mit 9,5%, vorrangig Muskovit (8%) und untergeordnet Chlorit (1,5%) auf. Accessorien sind Karbonat (Kalzit) mit 1%, Pyrit <1%, und Granat.

Bei der Betrachtung des Dünnschliffes ist erkennbar, dass die Feldspäte stärkere Auflösungserscheinungen an den Rändern zeigen. Des Weiteren ist in den Plagioklasen eine deutliche Serizitisierung erkennbar. Die Quarze zeigen Verzahnungsstrukturen, welche auf höhere Drücke hinweisen (Abb. 175). Die Muskovite zeigen keine vorrangige Einregelung. Bei den größeren Feldspäten ist zu erkennen, dass sie kleinere Minerale überwachsen, hier überwächst der Kalifeldspat kleinere Plagioklase.

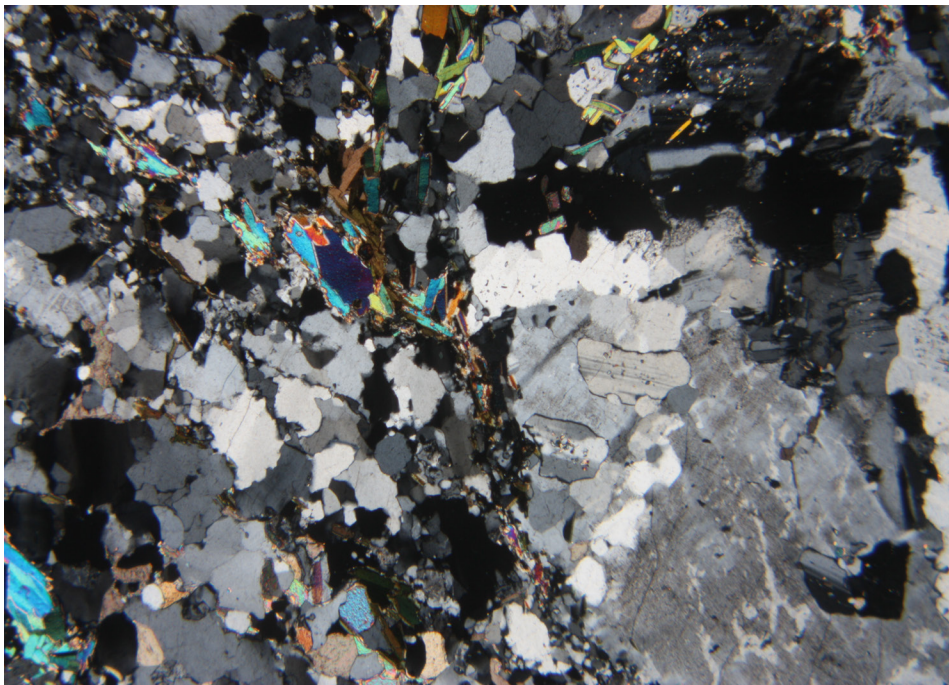
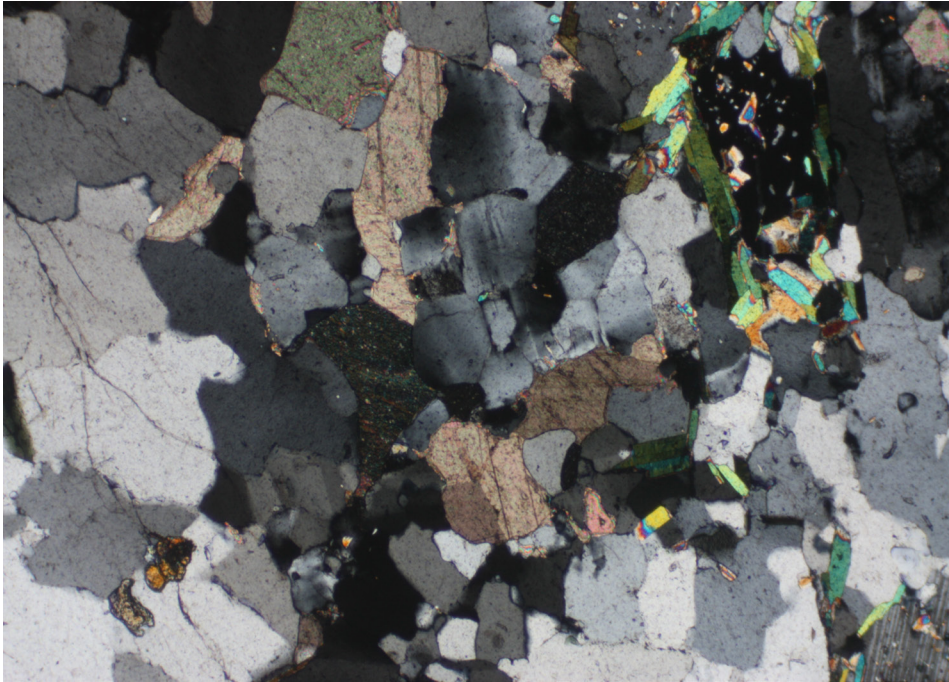


Abbildung 175: Verwachsungsstruktur, BB: 4mm

Bei genauerer Betrachtung sind bei einigen Quarzmineralen schon leichte Schädigungen in Form von Rissen erkennbar (Abb. 176). Diese Risse können ein Eindringen der  $\text{Na}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Hydroxidionen erleichtern. Des Weiteren ist auch die Bildung von Karbonatmineralen erkennbar.

Auch in Abbildung 176 ist Serizitisierung der Plagioklase erkennbar, dies betrifft nicht die anderen Feldspäte. Die Undulösität liegt im mittleren Bereich.



**Abbildung 176: Risse in Quarzen, Karbonate im Granit, BB: 2mm**



### 4.9.3 Beschreibung der Mörtelprismen

Bei den Plagioklasen treten vermehrt netzartige Rissmuster im Dünnschliff auf, diese sind jedoch nicht leicht erkennbar (Abb. 177). Die Quarze zeigen vereinzelt Risse, während die Glimmerminerale davon anscheinend verschont bleiben. In der Zementsteinmatrix sind keine Rissbildungen erkennbar (Abb. 178).

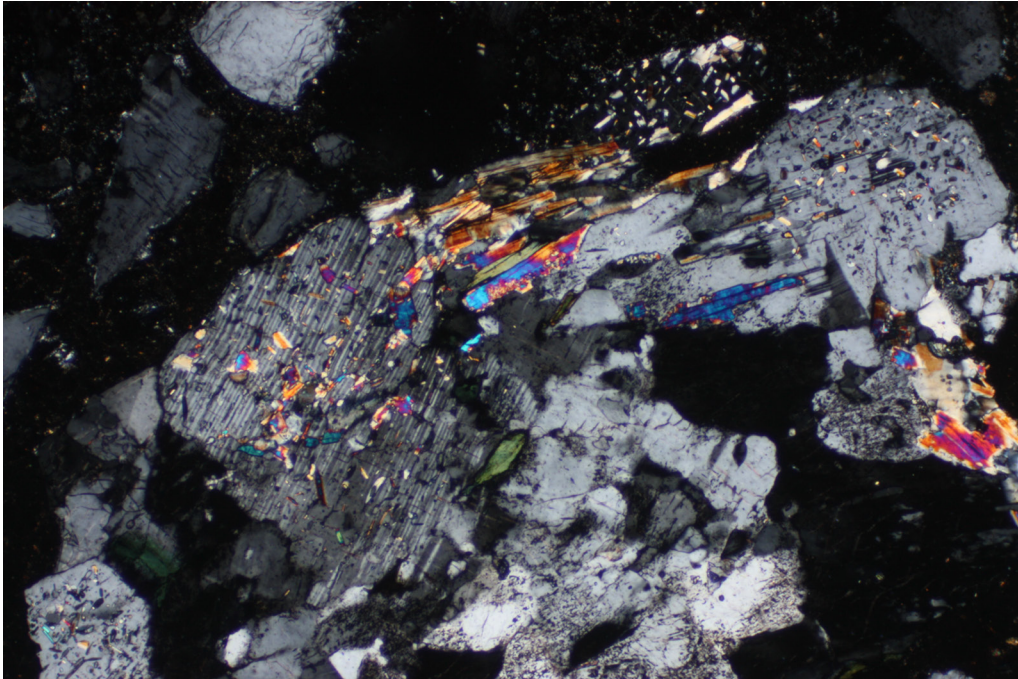


Abbildung 177: In dieser Darstellung kaum Risse erkennbar, Risse in Quarzen in der linken Bildhälfte erkennbar, schwerer bei den Plagioklasen, x5, xN

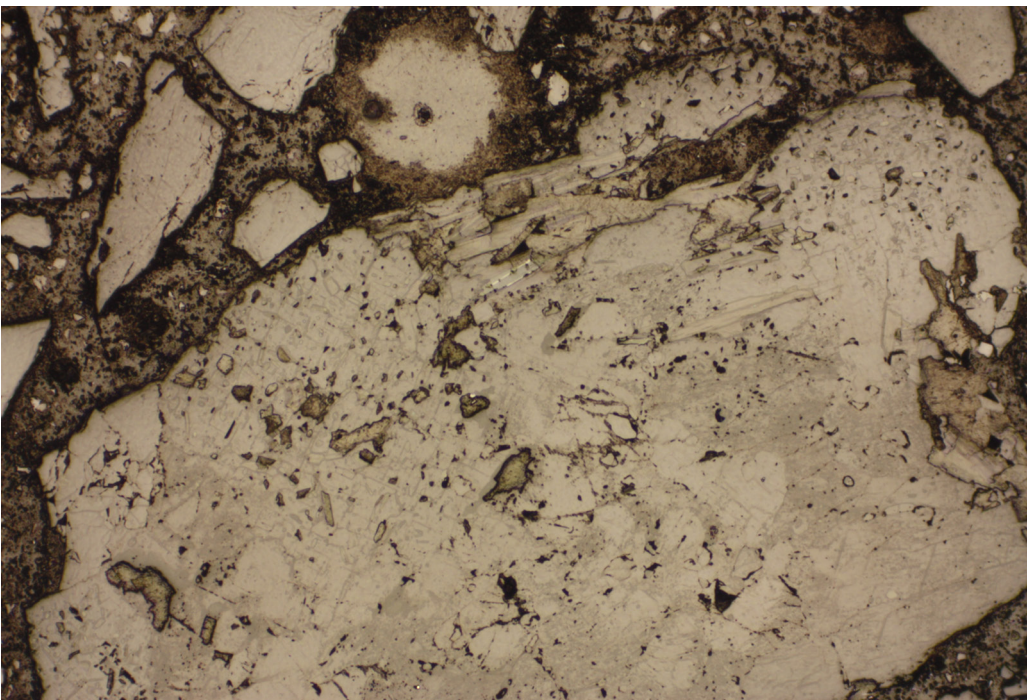


Abbildung 178: Risse in Quarze erkennbar, Rissmuster in Plagioklase schwer erkennbar, x5, AL

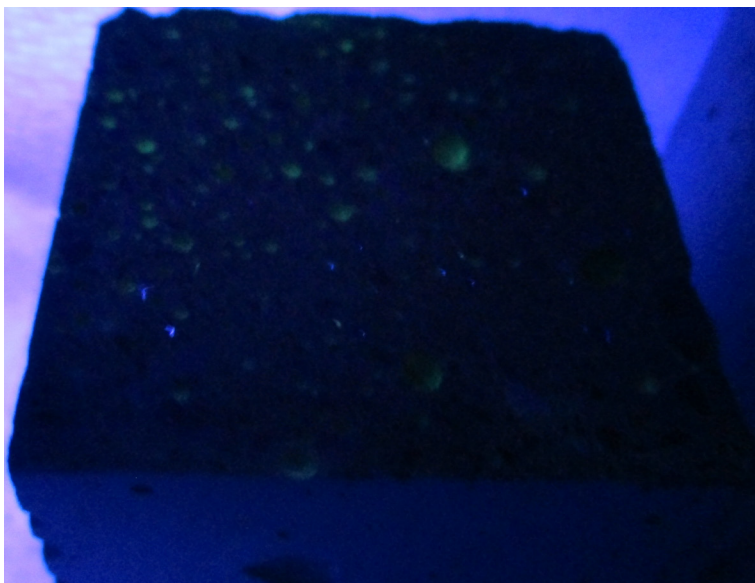
#### **4.10 Ergebnis der Behandlung mit Uranylacetat**

Die durchgeführte Methode ist für einen Nachweis von AKR international anerkannt, führte in den untersuchten Fällen jedoch nicht zu den erwarteten Ergebnissen. Nach befolgen der Anleitung sollte nach dem Bestreichen der Prismen mit dem Uranylacetat der Nachweis eines AKR-Gels rasch möglich sein. Es wurden die Mörtelprismen bei den Bruchseiten sowie bei den Abschnitten der Dünnschliffpräparate eingestrichen. Dadurch sollte es auch möglich sein, das Verhalten der Randbereiche im Vergleich zu den Kernbereichen im Prisma zu bestimmen.

Der Nachweis erfolgt durch die Reflexion unter UV-Licht, was bei den wenigen positiven „Treffern“ ersichtlich ist. Trotz den voran beschriebenen Erscheinungsbildern aus Dünnschliffen und REM, die durch die vorangegangenen Untersuchungen einer AKR zugeordnet wurden, lieferte diese Methodik ein anderes Erscheinungsbild. Am besten sichtbar war ein Nachweis bei den Proben des AG (Abb. 179) und bei HM 2 (Abb. 180). Des Weiteren trat bei UBS 2 (Abb. 181 & Abb. 182) eine bläuliche Rückstrahlung auf, was auf eine andere Gelzusammensetzung oder auch auf einen anderen Schädigungsmechanismus hinweisen könnte. Die Reaktion auf die UV-Bestrahlung trat eher im Randbereich auf. Alle anderen Prismen wiesen keine bis nahezu keine Reaktion auf das UV-Licht auf.



**Abbildung 179: AG, gelbliche Fluoreszenz weist auf Anwesenheit von AKR-Gel hin, Prismenbreite 4cm**



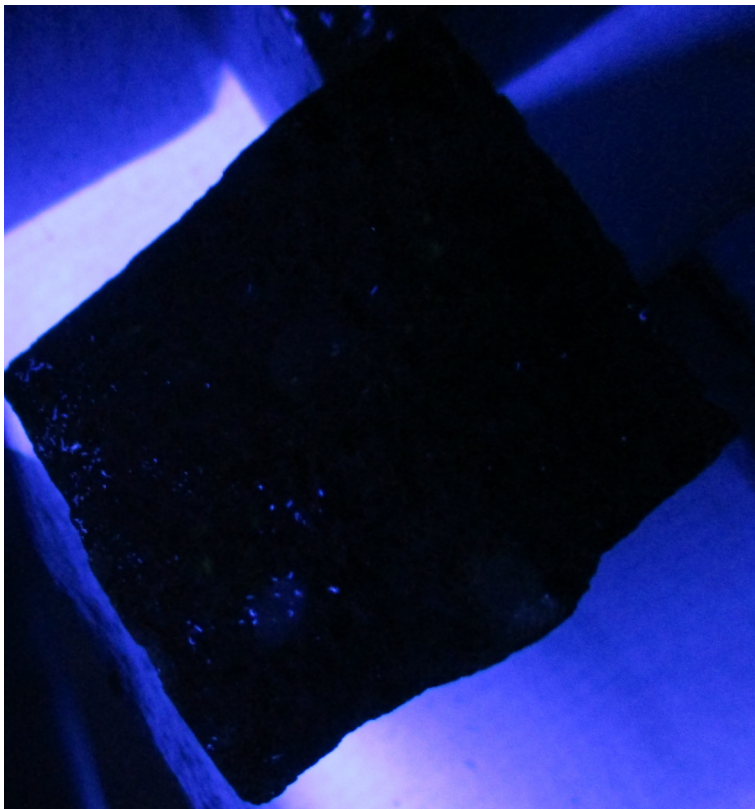
**Abbildung 180: HM 2, Reflexion in den Luftporen erkennbar, Prismenbreite: 4cm**



In den obigen Abbildungen ist erkennbar, dass sich die gelbliche Reflexion des Uranylacetat vorrangig auf die Luftporen konzentriert. Bei dem Prisma des Augengneises (Abb. 179) sind vereinzelte Reflexionen in der Zementsteinmatrix erkennbar. Die auftretende Blaufärbung unter UV-Licht ist am besten bei UBS 2 (Abb. 181) ersichtlich. Die Verfärbung tritt vorrangig in den Luftporen aber auch bei Kristallen auf (Abb. 182).



**Abbildung 181: UBS 2, Blaufärbung in den Luftporen, Prismenbreite: 4cm**



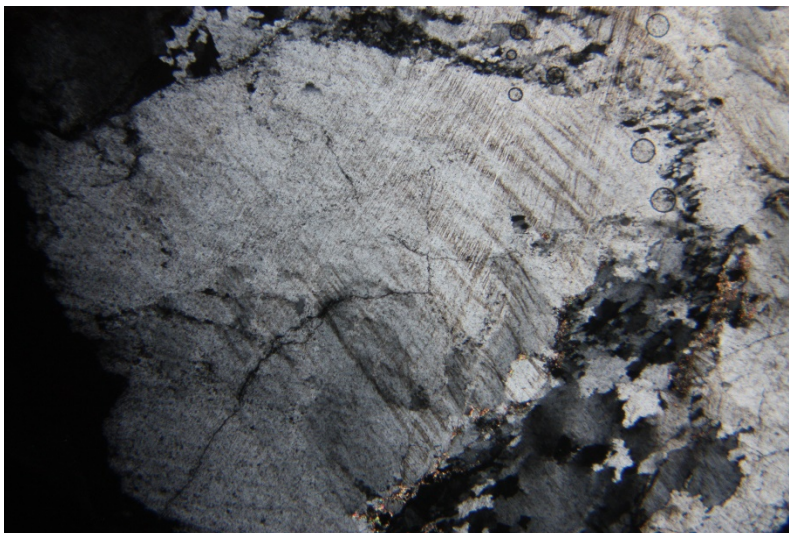
**Abbildung 182: UBS 2, 2. Prisma, Blaufärbung bei Kristallen, Prismenbreite: 4cm**

#### **4.11 Auswirkungen des Brechvorganges zur Herstellung von Kornfraktionen, zum Beispiel für die Probenvorbereitung**

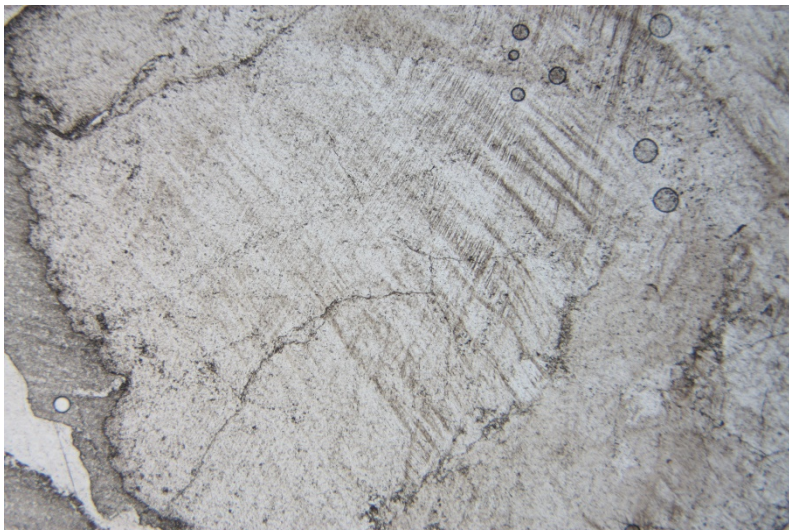
Die festgestellten Risse in den Gesteinskörnern der Mörtelprismen ließen die Frage zutage kommen, ob die Gesteinskörner durch den Brechvorgang der Probenvorbereitung schon Vorschädigungen erhalten haben. Um dies genauer zu untersuchen, wurden von fünf gebrochenen Bündner Schiefer Proben Körnerkonzentrate in Epoxidharz eingebettet und anschließend Dünnschliffe daraus hergestellt.

##### **UBS 1:**

Hier ist ein gutes Beispiel vorhanden, welches zeigt, dass der Brechvorgang bei größeren Mineralkörnern einen Einfluss auf die Rissbildung hat, der jedoch im Zuge dieser Arbeit nicht systematisiert werden konnte. (Abb. 183). Der Quarz zeigt im unteren Bereich einen längeren Riss. Aufgrund von Drucklösungserscheinungen sind viele kleinere Quarze an den Korngrenzen zu erkennen. Des Weiteren kommt es zum Auftreten von Karbonat (Kalzit) in den Klufflächen. Die gräulichen Schlieren sind Schleifspuren.



**Abbildung 183: Quarz mit Druckriss im unteren Bereich, suturierte Kornkontakte, BB: 4mm**

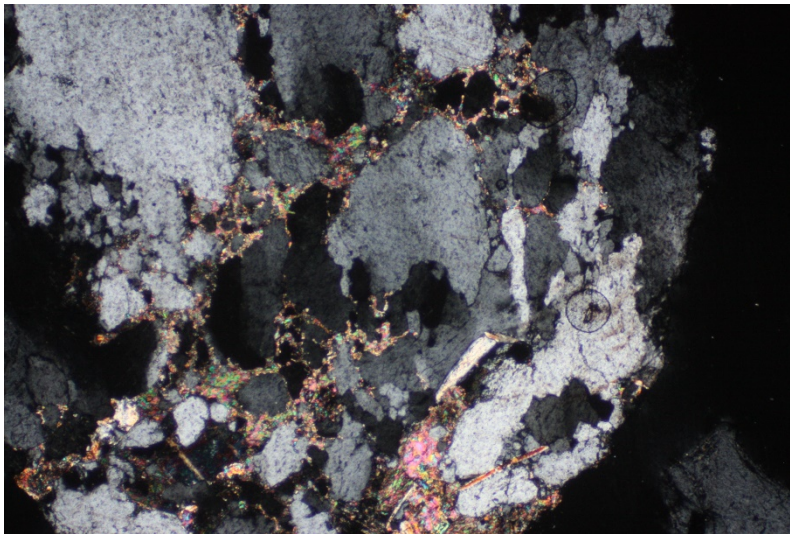


**Abb. 184: Quarz mit Druckriss im unteren Bereich, suturierte Kornkontakte, II N, BB: 4mm**

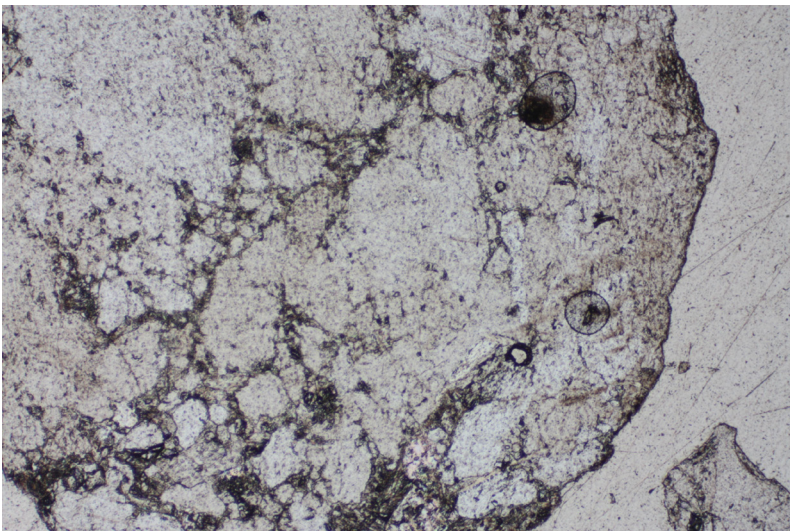


In Abb. 184 sieht man die Rissverläufe deutlicher. Der Bereich mit mehreren mittelgroßen Quarzen im rechten unteren Ende zeigt eine kompakte Form im Vergleich zu Abbildung 183. Die suturierten Kornkontakte scheinen wenig Einfluss auf den Quarz zu haben. Im betrachteten Dünnschliff gibt es aber durchaus auch Quarzminerale die leichte Spuren des Brechvorganges aufweisen. Diese sind bei anderen Dünnschliffen in ausgeprägter Form besser ersichtlich (Abb. 187 & Abb. 190).

Bei den Kalksilikaten sind Risse relativ selten zu sehen. Ein Grund dafür kann sein, dass die Quarze hier eine geringere Größe besitzen. Eine Vermutung ist, dass durch den größeren Karbonat (Kalzit) Anteil hier eventuell eine Art kleiner Puffer vorhanden ist, welcher die Rissentstehung vermindert. In Abb. 185 & Abb. 186 ist ein solches Kalksilikat sichtbar.



**Abb. 185: Kalksilikat mit kaum erkennbaren Rissen in Quarzen, eventuelle Pufferwirkung durch Karbonate, BB: 2mm**

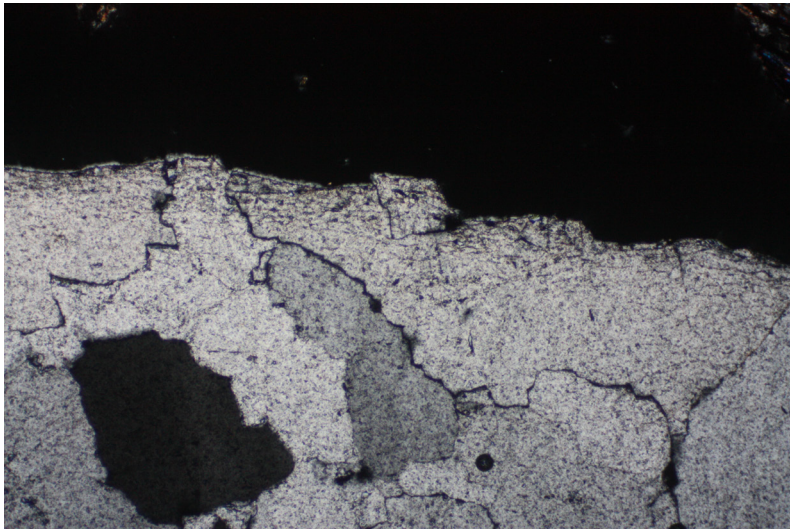


**Abb. 186: Kalksilikat mit kaum erkennbaren Rissen der Quarze, eventuelle Pufferwirkung durch Karbonate, II N, BB: 2mm**

Die mit Karbonaten verfüllten Klüfte (Abb. 185 & Abb. 186) könnten die Möglichkeit einer Entstehung eines AKR Gels jedoch begünstigen. Des Weiteren erreichen diese Klüfte fast jedes Einzelkorn, was eine Ausbildung einer AKR ebenfalls begünstigen könnte.

### **UBS 3:**

Die kleineren Quarze zeigen hier kaum Einflüsse durch die Brechenergie. Bei großen Körnern ist dies aber anders. Wie in Abbildung 187 sichtbar ist, sind an den Korngrenzen die Einflüsse des Brechvorganges mit einer Auflockerung des Minerals erkennbar. Es ist jedoch nicht ganz eindeutig ob diese Auflockerungsrisse nur mit dem Brechvorgang zusammenhängen, da leichtere Auflockerungen schon vor dem Brechvorgang im Dünnschliff zu beobachten waren. Der schwarze Rand in der oberen Bildhälfte ist Epoxidharz. Die Risse im Quarz sind sehr wahrscheinlich schon vorher durch Druckbeanspruchungen im Gestein vorhanden gewesen. Die Auswirkungen des Brechvorganges können ein Hinweis auf die komplette Auflockerung des Mineralverbandes bei manchen größeren Mineralkörnern liefern.

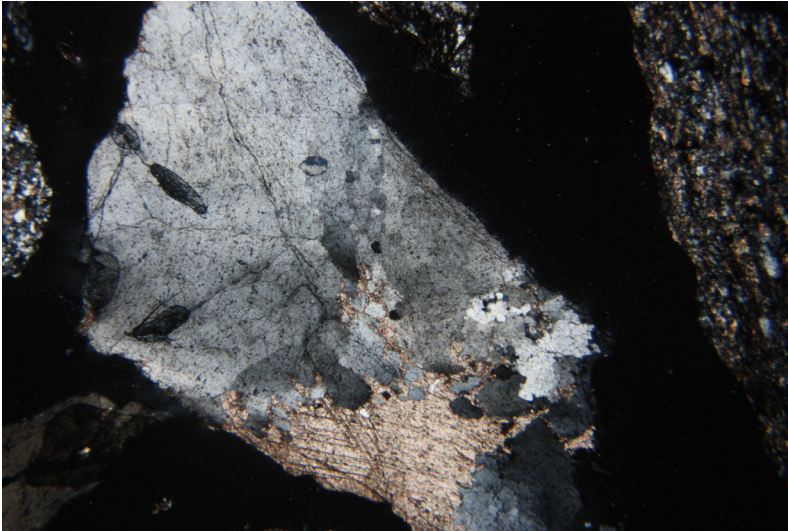


**Abbildung 187: Quarz mit Subkörnern und Druckrissen an der Korngrenze, BB: 2mm**

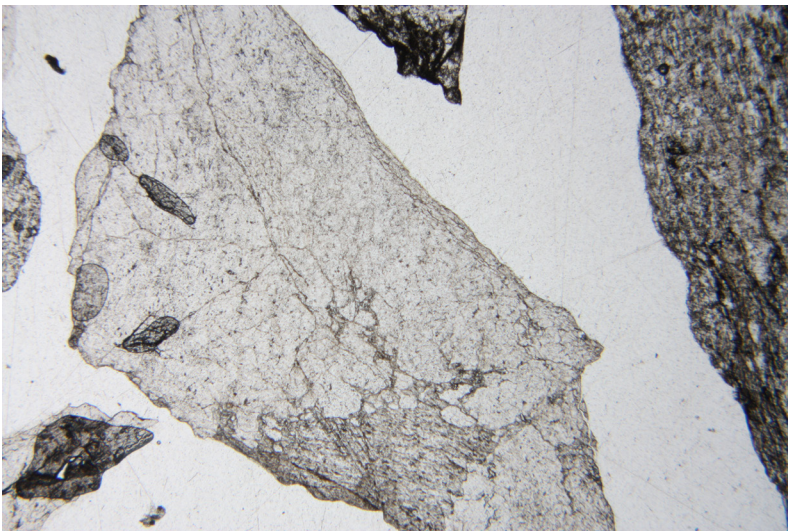
### **OBS 1:**

Hier ist ein weiteres gutes Beispiel (Abb. 188 & Abb. 189) für ein leicht beschädigtes Kalksilikatmineral. Ein Riss durch den gesamten Quarz ist erkennbar. Die Auflockerung durch Druckerscheinungen an den Korngrenzen ist ebenso erkennbar. Bei genauer Betrachtung der Dünnschliffe vor dem Brechvorgang ist im Vergleich eine geringe Erweiterung der Auflockerungszone beobachtbar. Die Druckrisse im Quarz sind Großteils vor dem Brechvorgang schon vorhanden.





**Abb. 188: Druckrisse im Quarz mit Auflockerungserscheinungen im Randbereich, BB: 4mm**



**Abb. 189: Druckrisse im Quarz mit Auflockerungserscheinungen im Randbereich, II N, BB: 4mm**

Bei kleineren Quarzen ist der Einfluss des Brechvorganges ebenso geringer wie bei den anderen untersuchten Proben.

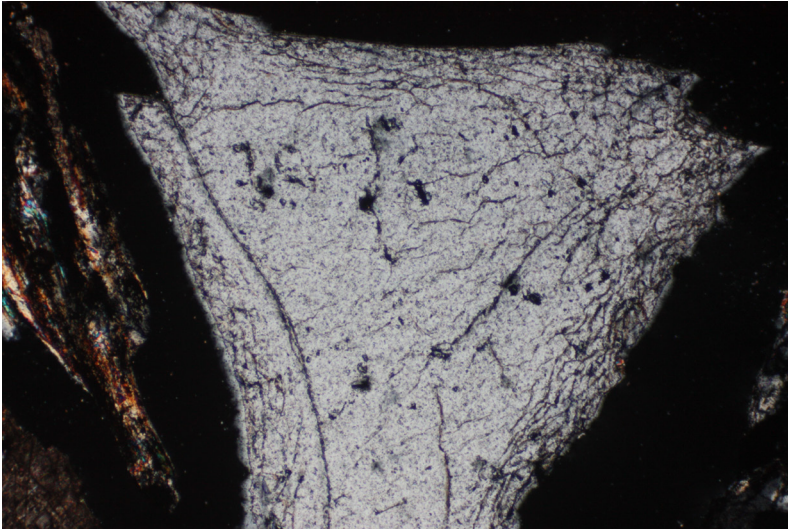
#### **OBS 2:**

Bei diesem Dünnschliff sind die Auswirkungen des Brechvorganges kaum zu erkennen. Der Grund dafür ist die Feinkristallinität der Probe, welche keine größeren Quarze beinhaltet.

#### **MBS**

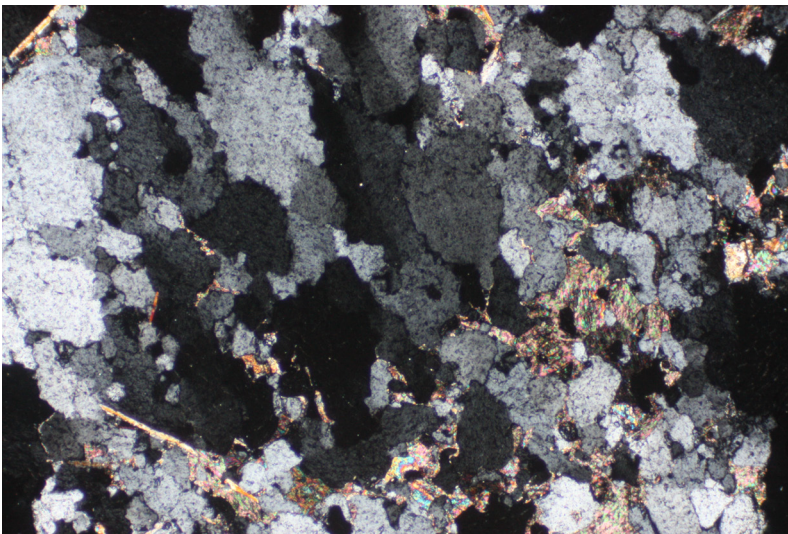
Diese Probe liefert ein gutes Beispiel für einen beschädigten Quarz (Abb. 190) vor dem Normtest. In den Dünnschliffen vor dem Brechvorgang treten vereinzelt Quarze mit einer ähnlich beschädigten Struktur auf, diese ist jedoch nicht so ausgeprägt. Der Quarz wurde an den Korngrenzen komplett aufgelockert. Diese Entfestigung ist sehr wahrscheinlich auch

unterstützend für die Netzrisssbildung (Abbildung 19 & Abbildung 20), welche bei einigen größeren Quarzen beobachtet wurde.



**Abb. 190: Beschädigter Quarz nach Brechvorgang, BB: 2mm**

Bei den Kalksilikaten wurde so ein Einfluss nicht beobachtet. Dies ist in Abb. 191 ersichtlich. Die kleineren Quarze zeigen hier keine neuen Risse im Vergleich zur petrographischen Betrachtung.



**Abb. 191: Unbeschädigte Kalksilikate, BB: 2mm**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Größe der Quarze anscheinend einen Einfluss auf das Brechverhalten hat. Die größeren Quarze neigen an den Kornkontakten zur weiteren Auflockerung des Mineralverbandes im Vergleich zur Struktur vor dem Brechvorgang. Neue Druckrisse in den Quarzen entstehen kaum durch den Bruchvorgang, vorhandene werden aber verstärkt. Kleinere Quarze bleiben von Auswirkungen häufig verschont. Im Verbund mit Karbonat sind Risse ebenso seltener zu beobachten. Die vorhandenen Risse erschweren das Zuordnen von Rissursachen. Wenn kein Gel gefunden werden kann, ist es nicht möglich von einer eindeutigen AKR Schädigung zu sprechen.



## 5. Interpretation, Diskussion und Schlussfolgerung der Ergebnisse

### 5.1 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die Proben der Bündner Schiefer zeigen in den Norm-Schnelltestversuchen gemäß ÖNORM B 3100 alle eine Dehnung von über 2 mm/m, mit der Ausnahme der kalkreichen Probe der mittleren Bündner Schiefer (Abb. 192). Das Ergebnis bestätigt die Erwartung, dass die kalkreicheren Proben etwas geringere Dehnungen aufweisen im Vergleich zu quarzreicheren Bündner Schiefen. Um dies tatsächlich quantifizieren zu können, wäre jedoch eine wesentlich größere Versuchsreihe notwendig. Weiters wiesen die Quarzitprobe der Kaserer Formation bei Versuchsdurchführung mittels Schnelltest nach ÖNORM B 3100 ein potentiell reaktives Verhalten auf.

Die anderen untersuchten Lithologien können nach Normtest als nicht reaktiv bewertet werden. Interessant hierbei ist, dass die silikatreichen Gesteine des Augengneises und Tonalits bei Einlagerung in die NaOH<sub>2</sub>-Lauge ebenso nur eine relativ geringe Dehnung zeigen. Die silikatreicheren Hochstegenmarmore an der Basis zeigen mit ~0,3 mm/m eine doppelt so starke Dehnung im Vergleich zu den nahezu silikatfreien Marmoren in den höheren Lagen.

#### Längenänderung AKR nach ÖN B3100

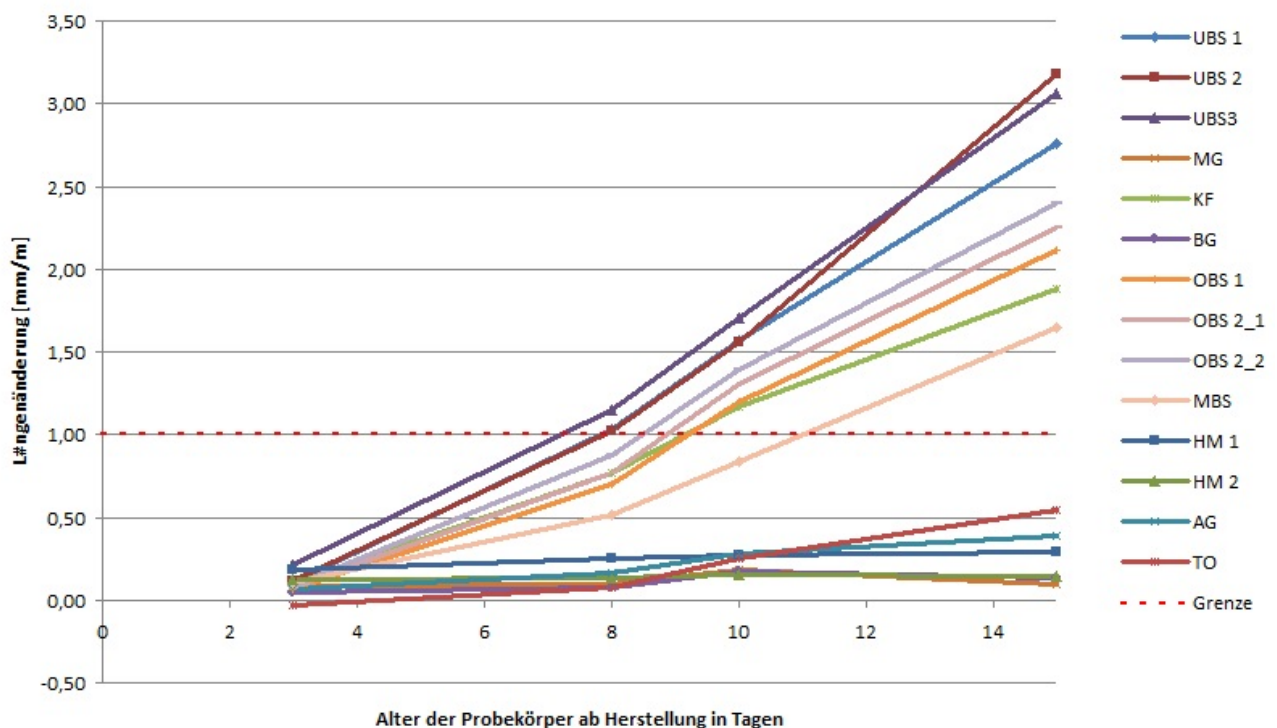
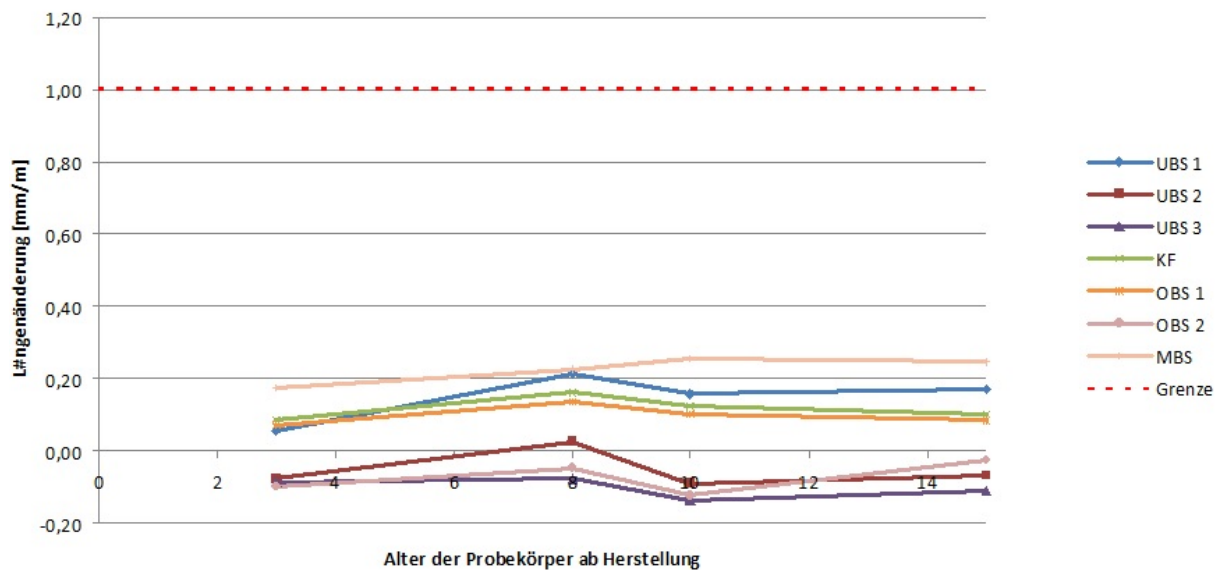


Abbildung 192: Längenänderung nach Ö-Norm B3100

Es konnte kein Zusammenhang zwischen dem prozentuellen Anteil der Luftporen zur Dehnung hergestellt werden.

## Längenänderung AKR mit Bindemittelkombination



**Abbildung 193: Längenänderung der Betonprismen unter Verwendung der Bindemittelkombination**

Die untersuchten Prismen mit der Bindemittelkombination weisen bei Durchführung des Normtests nach ÖNORM B3100 alle eine geringe Dehnung deutlich unter 1 ‰ auf. Dies verdeutlicht den Einfluss des Bindemittels, bzw. der Bindemittelkombination auf die potenziell stattfindende AKR. In den Dünnschliffen und bei den Untersuchungen mit dem REM zeigen diese Prismen auch Risse und Gelbildungen sind des Öfteren zu beobachten.

In den Bünderschiefer ist eine Häufung der Rissbildung bei betroffenen Quarzen, im Vergleich zu den anderen Lithologien, erkennbar. Die Änderung des Bindemittels zeigt eine deutliche Reduzierung geschädigter Quarze und eine markante Änderung des Dehnungsverhaltens der NaOH<sub>2</sub>-gelagerten Mörtelprismen. Die Zementsteinmatrix in den Bündner Schiefern zeigt sich mit einer Bindemittelkombination kompakter als im Vergleich zum Normtest, in denen die sogenannte Netzrisstruktur wesentlich häufiger auftritt.

Bei den Prismen der Bindemittelkombination treten Risse häufiger im Bereich von Luftporen auf. Überraschend ist das Auftreten von relativ großen Rissen durch Kornaggregate und Zementsteinmatrix, obwohl kaum Dehnungen nach Normtest-Versuchsdurchführung auftreten. Eine weitere Möglichkeit die Ergebnisse zu verbessern sollte eine umfangreiche Testreihe mit verschiedenen Betonrezepturen darstellen.

In der Mikroskopie erwies sich die Verwendung des Auflichtes (AL) als die zu bevorzugende Methode um Risse in der Zementsteinmatrix und den Kornaggregaten festzustellen. Die Korngrenzen der Kornaggregate sind sehr gut erkennbar. Weiters ist eine Rissfüllung auch besser erkennbar, wie die Beispiele der OBS sehr gut zeigen. Feine Risse in der Zementsteinmatrix und den Kornaggregaten sind aber auch mit dem Auflicht nicht so einfach auffindbar und mit Sicherheit zu dokumentieren. Im Durchlicht (DL) ist es relativ schwer die feineren Risse zu erkennen wobei es für mich kaum Unterschied macht ob



eingeklappte oder ausgeklappte Polarisatoren verwendet werden. In den Dünnschliffen der UBS Proben konnten mit dem Durchlicht die Risse nur schwer nachgewiesen werden, selbst größere durch den Zementstein verlaufende. Bei Betrachtung nur mit dem DL würde die beobachtete Rissbildung wahrscheinlich zu einer anderen Einstufung führen, als bei einer kombinierten Betrachtung DL & AL. Die Betrachtung mit dem AL ist als Erkenntnis dieser Arbeit Zeit- und Zielorientierter.

Für eine schnelle Kontrolle ist die Mikroskopie sicher ein geeignetes Werkzeug. Die Vorteile der Mikroskopie sind hier ein schnelles Auffinden von Rissen in der Zementsteinmatrix und das Finden von Hinweisen auf eine mögliche AKR in Luftporen und Rissfüllungen. Bei sehr kleinen Rissen kommt die Lichtmikroskopie jedoch an ihre Grenzen. Die Inhalte von Rissfüllungen sind nicht bestimmbar und müssen mit REM erfasst werden. Weiters ist das Erkennen der tatsächlichen Rissverläufe in den meisten Fällen relativ schwer und benötigt mehr Zeit. Die beste Aussagekraft besitzt im Vergleich der Methoden natürlich das REM, welche aber auch am Zeitintensivsten und teuersten ist.

Die Ergebnisse der Mikroskopie hinsichtlich der Glimmerminerale lassen vermuten, dass ein erhöhter Karbonatanteil förderlich für den Erhalt der Glimmerminerale ist. Die Quarze werden wesentlich häufiger angegriffen im Vergleich zu den Karbonaten. Wenn Risse in den Karbonaten sichtbar sind, verzweigen diese wesentlich seltener im Vergleich zu Quarzen. Dies lässt auf eine höhere Resistivität der Karbonate schließen.

Die Vorteile des REM sind, dass die Zusammensetzung der Kornaggregate schnell bestimmt werden kann. Rissverläufe durch Korn und Zementsteinmatrix sind schnell erkennbar im Vergleich zur Lichtmikroskopie wo das Verfolgen der Verläufe des Öfteren sehr schwierig ist. Mit dem REM sind auch die Rissfüllungen gut erkennbar bzw. auch ob diese bei der Präparation ausgewaschen wurden was sehr häufig der Fall war.

Eine Korrelation zwischen der Dehnung zu Rohdichte oder Volumen und auch Luftporengehalt konnte nicht hergestellt werden (Anhang D).

Für die Bewertung der vorliegenden Lithologien ist die Beurteilung alleine mittels Schnelltest nach ÖNORM B 3100 nicht ausreichend, da die Prüfbedingungen sehr streng sind und Reaktionen hervorrufen, die in der natürlichen Beanspruchung laut Erfahrung mit in der Praxis verwendeten Gesteinskörnungen nicht auftreten. Sehr wohl ist aber der Einfluss des Bindemittels zu erkennen, der eventuell bei der Durchführung des Schnelltests nach ÖNORM B 3100 gewertet werden könnte.

Bei den Messungen der Proben während der 14 Tage muss die Norm exakt eingehalten werden, da sehr schnell äußere Einflüsse das Ergebnis verändern können. Unter Berücksichtigung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen erscheint die Prüfzeit der Prismen mit 14 Tagen als etwas zu gering ist, um die AKR auch im Kernbereich gut wirken zu lassen, dafür die Temperaturlagerung von 80°C als zu hoch. Durch eine Erhöhung der Zeitdauer auf 28 Tage könnten eventuell auch die Silanol-Verbindungen

aufgebrochen werden, um diese auch in den Fokus zu bringen sowie die Durchdringung der Proben verbessern, in Verbindung mit einer Verringerung der Temperatur auf ca. 60°C könnte dies vermutlich praxisnähere Bedingungen schaffen.

Die Auswirkungen der Deformationsereignisse während der Alpen Orogenese sind bei den größeren Quarzkristallen meist größer im Vergleich zu den kleineren Kristallen. Dies spiegelt sich in der Stärke der Undulösität wider.

Die Versuche das AKR Gel mit Uranylacetat nachzuweisen zeigten ein differierendes Ursachenbild. Untersucht wurden die Proben der Bündner Schiefer, in welchen das Gel mittels Kombination von Mikroskopie und REM nachgewiesen wurde und die relativ große Dehnungskoeffizienten ergaben. Bei der Durchführung der Methode konnten jedoch nur in drei Proben ein fluoreszierendes Gel nachgewiesen werden. Diese Diskrepanz konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden.

Die Auswirkungen durch den Brechvorgang sollten genauer untersucht werden, da dies eine nachfolgende AKR beeinflussen kann. Größere Körner zeigen eher Anfälligkeiten im Vergleich zu kleineren Körnern bzw. werden bestehende Schädigungen erweitert.



## 5.2 Schlussfolgerung

Aufgrund der vorgehenden Diskussion und Interpretation der Ergebnisse werden dieser Arbeit folgende Schlussfolgerungen zugrunde gelegt:

- Quarze sind häufiger von einer Rissbildung durch AKR betroffen, als Karbonate und Kalksilikate.
- Auflicht-Mikroskopie (AL) ist geeignet für ein schnelles Auffinden von Rissen.
- Bei Rissfüllungen ist eine weiterführende Untersuchung mittels REM zielführend.
- Das Bindemittel hat einen großen Einfluss auf die AKR. Eine (erste) Aussage für den positiven oder negativen Einfluss des Bindemittels auf die AK-Reaktivität kann nach derzeitiger Erkenntnis mittels Schnelltest getroffen werden. Für eine umfassende Beurteilung ist eine Prüfung der tatsächlich verwendeten Bindemittelkombination entscheidend.
- Eine Beurteilung mittels Schnelltest nach ÖNORM B3100 ist nicht ausreichend. Ein Performance Test im Beton sollte für vertiefte Untersuchungen zusätzlich durchgeführt werden.
- Für eine Anpassung an den fortschreitenden AKR – Prozess werden geänderte Prüfbedingungen des Schnelltest nach ÖNORM B3100 vorgeschlagen. Eine längere Prüfdauer mit 28 Tagen anstatt der bisherigen 14 Tage sowie eine verringerte Lagerungstemperatur von 60° C statt 80° C. Diese Versuchsabänderung erfordert jedoch weiterführende Untersuchungen.
- Im Hinblick auf weitere Untersuchungen dieser Proben oder auch Thematik sollten Versuche nach MCPT Methode von Latifee 2013 durchgeführt werden, um eine hoffentlich bessere Aussagekraft zwischen den Längenänderungen und den Mikroskopieergebnissen zu erfahren
- Bei den, in dieser Arbeit beschriebenen Erscheinungen, handelt es sich um Gefüge Änderungen im Mikrobereich. Veränderungen der Gesamtstruktur der Prismen, z.B. Zerfall, Abplatzungen oder Verkrümmungen fanden nicht statt.
- Vorschädigungen der Kornaggregate aufgrund des Brechvorganges oder auch durch Sprengeneinwirkungen sind möglich bzw. auch vorhanden und sollten genauer untersucht werden.
- Die Porosität von Beton- bzw. Mörtelrezepturen hat einen wesentlichen Einfluss auf das Auftreten, Fortschreiten oder Ausbilden eines Schädigungsmechanismus bei der AKR. Diese Thematik sollte bei der Beurteilung des Schädigungspotentials von unterschiedlichen Betonzusammensetzungen berücksichtigt werden.
- Eine Korrelation zwischen Luftporengehalt der Prismen und ermittelter Dehnung im Schnelltest konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht für alle Lithologien festgestellt werden. Das Bild in den Schliffen zeigt jedoch unbestritten, dass Rissfüllungen mit Gel von Luftporen ausgehen, bzw. dass Gel in die Poren expandiert.

## 6. Literaturverzeichnis

BERNINGER A.M. (2004): Mikrostrukturelle Eigenschaften von Quarz als Bestandteil spät reagierender alkaliempfindlicher Zuschläge, Diss., Bauhaus-Universität.

BRANDNER R., REITER F. & TÖCHTERLE A. (2008): Überblick zu den Ergebnissen der geologischen Vorerkundung für den Brenner-Basistunnel, *Geo.Alp* **5**, 165 – 174.

CHATTERJI S., JENSEN A.D., THAULOW N. & CHRISTENSEN P. (1986): Studies of alkali-silica reaction, Part 3. Mechanisms by which NaCl and Ca(OH)<sub>2</sub> affect the reaction, *Cement and Concrete Research* **16**, 246 – 254.

CHATTERJI S., THAULOW N. & JENSEN A.D. (1989): Studies of the alkali-silica reaction. Part 5. Verification of a newly proposed reaction mechanism. *Cement and Concrete Research* **19**, 177 – 183.

CHATTERJI S., THAULOW N. (2000): Some fundamental aspects of alkali-silica reaction. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregat Reaction, Quebec, 21 – 29.

CHATTERJI S. (2005): Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates, *Cement and Concrete Composites* **27**, 788 – 795.

DENT GLASSER, L.S. (1979): Osmotic pressure and the swelling of gels, *Cement and Concrete Research* **9/4**, 515 – 517.

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON, (2003): Empfehlung für die Schadensdiagnose und die Instandsetzung, *Beton* **9**, 438 – 443.

EDEN M. (2010): A code of practice for the petrographic examination of concrete, Applied Petrography Group, SR2 July 2010, 1 – 20.

FREYBURG E. (1997): Petrographische Aspekte der Alkali-Kieselsäure-Reaktion. In 13. Internationale Baustofftagung ibausil Weimar, Tagungsbericht Band 1, 753 – 764.

FREYBURG E. & BERNINGER A.M. (2000): Bewertung alkalireaktiver Zuschläge außerhalb des Geltungsbereiches der Alkalirichtlinie des DafStb: Kenntnisstand und neue Erkenntnisse. In 14. Internationale Baustofftagung ibausil Weimar, Tagungsbericht Band 1, 931 – 947.

FREYBURG E. & SCHLIFFKOWITZ D. (2006): Bewertung von Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen nach petrografischen und mikrostrukturellen Kriterien. In: 16. Internationale Baustofftagung (ibausil), Weimar, Tagungsbericht Band 2, 355 – 372.



FREYBURG E. & ERFURT D. (2007): Betonschäden durch Alkali – Kieselsäure – Reaktion und Probleme der Ursachenfindung. In: 17. Internationale Baustofftagung (ibausil), Weimar, Tagungsbericht Band 2, 203 – 210.

FERNANDES I., NORONHA F. & TELES, M. (2004): Microscopic analysis of alkali-aggregate reaction products in a 50-year-old concrete, *Materials Characterization* **53**, 295 –306.

FERNANDES I., DOS ANJOS RIBEIRO M., BROEKMANS M. & SIMS I. (2016): Petrographic Atlas, Characterization of Aggregates Regarding Potential to Alkalis, RILEM 219-ACS AAR 1.2, Springer - Verlag, 1 – 197.

GUDEON, J.-S., MARTINEU F. & LE ROUX, A. (1993): Essai de mise en évidence du gel d'alkali réaction par fluorescence des ions uranyl, *Projet de méthode d'essai LPC n° 36*, Janvier, 5 – 8.

HELMUTH R. & STARK D. (1992): Alkali–silica reactivity mechanisms. In SKALNY, J.: *Material Science of Concrete III*, The American Ceramic Society, Westerville/OH, 131 – 208.

HILL S., (2004): Zur direkten Behandlung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz anhand deren Kieselsäure- und Aluminiumlöseverhalten, *Diss.*, Technische Universität Cottbus.

HÖGGERL, N., (2001): Bestimmung von rezenten Höhenänderungen durch wiederholte geodätische Messungen. In: HAMMERL C., LENHARDT W.A., STEINACKER R. & STEINHAUSER P. (Hrsg.): *Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851 – 2001, 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich*, Leykam Verlag Graz, 630 – 644.

HOU X., STRUBLE L.J. & KIRKPATRICK R.J. (2004): Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite. *Cement and Concrete Research* **34**, 1683 – 1696.

ICHIKAWA T. & MIURA M. (2007): Modified model of alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research* **37**, 1291 – 1297.

INGHAM J.P., (2011): *Geomaterials under the Microscope: A colour guide: building stone, roofing slate, aggregate, concrete, mortar, plaster, bricks, ceramics, and bituminous mixtures*, Manson Publishing Ltd, London, UK, 1 – 192.

KAWAMURA M. & IWAHORI K. (2004): Some theoretical considerations on expansive pressure of ASR gel. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Beijing, 135 – 142.

KNAUTE, W. (2008): Probleme im Betonbau aus der Sicht des Gutachters – Neubau, Instandsetzung, Sanierung der Sanierung. 10. Eipos–Sachverständigentag Bauschadensbewertung, 1 – 44.

LATIFEE E., (2013): Miniature Concrete Prism Test - a New Test Method for Evaluating the ASR Potential of Aggregates, the Effectiveness of ASR Mitigation and the Job Mixture, Dissertation, All Dissertations Paper 1176.

MERZ C. & HAMMERSCHLAG J.-G. (2000): Alkali-Aggregat-Reaktionen (Teil 2), Cementbulletin **68/9**, 1 – 6.

POWERS T.C. & STEINOUR H.H. (1955): An interpretation of some published researches on the alkali–aggregate reaction: Part 1. The chemical reactions and mechanisms of expansion. J. Am. Concr. Inst. Journal & Proceedings **51**, 497–516.

PALMER FRENCH W.F., GRANTHAM M., GUTTERIDGE W.A., HEMMERSLEY G.P., HOBBS D.W., NIXON P.J., POOLE A.B., SIMMS I. & SMART S. (1992): The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction, Report of a working party. British Cement Association, Wexham Springs.

PREZZI, M., MONTEIRO P.J.M. & SPOSITO G. (1997): The alkali–silica reaction, part I: Use of the double-layer theory to explain the behaviour of reaction-product gels, ACI Materials Journal **94/1**, 10 – 17.

PREZZI, M., MONTEIRO P.J.M. & SPOSITO G. (1998): The alkali–silica reaction, part II: The Effect of chemical admixtures, ACI Materials Journal **95/1**, 3 – 10.

RILEM RECOMMENDATION, TC 191-ARP (2003): RILEM Recommended Test Method AAR – 1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method. In: RILEM TC 191 - ARP: 'Alkali-reactivity and prevention – Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity', Materials and Structures / Matériaux et Constructions **36**, 480 – 496.

RILEM RECOMMENDATION, STAR 219-ACS (2015): RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali - Aggregat Reactions in New Concrete Structures, unedited Version, Springer - Verlag, 1 – 142.

SCHLIFFKOWITZ D. (2005): Beurteilung der Alkalireaktivität von Stressquarz-Zuschlägen mit Hilfe von lichtmikroskopischen Methoden im Polarisationsmikroskop, Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar.

SHRIMER F. (2005): Progress in the Evaluation of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Construction in the Pacific Northwest, United States and Canada. In: BLISS J.D., MOYLE P.R. & LONG K.R.: Contributions to Industrial-Minerals Research Bulletin 2209-K. US. Geological Survey, Reston, Virginia.

STARK J. & WICHT B. (2013): Dauerhaftigkeit von Beton, 2. Auflage, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 1 – 479.

ST. JOHN D.A., POOLE A.W. & SIMS I. (1998): Concrete Petrographie, A Handbook of investigative techniques, Arnold Publisher, London, 1 – 474.

WANG H. & GILLOT J.E. (1991): Mechanism of alkali–silica reaction and the significance of calcium hydroxide. *Cement and Concrete Research* **21/4**, 647 – 654.

WANG H., FARZAM H. & BRYAN S. (2004): ASR – a review of mechanisms and proper prevention measures. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Beijing*, 682 – 687.





## Petrographische Beschreibung der Betonprismen

Labornamen	
Probenbezeichnung	
Maße (mm) und Anzahl der Prismen	
<b>Grobaggregat:</b>	
Maximale Größe	
Kornform	
Hauptgemengteile	
Nebengemengteile	
Accessorien	
<b>Feinaggregat:</b>	
Kornverteilung (geschätzte BS 882 (fein - mittel - grob) Kornklasseneinteilung)	
Maximale Größe	
Kornform	
Hauptgemengteile	
Nebengemengteile	
Accessorien	
<b>Alkali - Aggregat Reaktion</b>	
Gel auf Dünnschliff	
Gel in Porenräumen	
Gel in Klüften	
Hinweis auf Beteiligung bestimmter Gesteinstypen an der Reaktion	
Hinweis auf andere Formen der Aggregat - Zerstörung (unstable Schlacke, Pyrit)	
Aggregat Oberflächen details (mit Hinweisen auf Schwindung, DEF & AAR)	
Notizen:	

## Mikroskopische Eigenschaften der Prismen

Anzahl der Dünnschliffe	
Erkennbare Minerale	
Schädigende Reaktion (AAR, DEF)	
Risse in Mineralen / Aggregaten	
betroffene Minerale / Aggregate	
Risse in Betonmatrix	
Risse in Nähe von Luftporen	
Rissstrukturen	
Rissfüllung	
durchschnittliche Risslänge (mm)	
Notizen:	

### Petrographische Beschreibung des Bindemittel

Labornamen	
Probenbezeichnung	
Zementtyp	
Zementersatz und geschätzte Menge an Zementersatz	
Textur des karbonatisierten Bindemittel (Details der Porosität, Korngröße, Hinweise)	
Portlandit (Anteil in Vol %)	
Zementkörner	
Nichthydratisierter Zement (Körner / 40mm Beton)	
Pseudomorph hydratisierte Zementkörner	
Mineralogie der unhydratisierten Zementkörner	
<b>Porosität</b>	
Porosität allgemein	
Porositätsverteilung	
<b>Mikrokluft</b>	
Mikrokluft allgemein	
Mikrokluft an der Oberfläche	
Durchschnittliche Länge (mm)	
Kluftfüllung	
Porenfüllung und Häufigkeit	
Petrographisch geschätztes w/z Verhältnis	
Notizen:	

### Zusammensetzung der Mörtelprismen

Labornamen	
Probenbezeichnung	
<b>Volumseigenschaften:</b>	
Wasser %	
Bindemittel %	
Feinaggregat %	
Grobaggregat %	
Hohlraum %	
w/z Verhältnis (petrographisch bestimmt)	
<b>Gewichtseigenschaften:</b>	
Feinaggregat (kg/m³)	
Grobaggregat (kg/m³)	
Zement (kg/m³)	
Wasser (kg/m³)	
Aggregat / Zement Verhältnis	



## Anhang B: Ermittelte Werte der Dünnschliffe der Gesteinsproben & Mörtelprismen

Dünnschliffname	Quarz	Karbonat	Glimmer	Feldspat	Chlorit	Pyrit	Undulösität
UBS_1	73	24	3	0	0	0,1	mittel
UBS_2	70	8	20	0	0	2	wenig
UBS_3	60	20	18	0	0	2	wenig-mittel
UBS_4	90	5	>4	0	0	<1	mittel
UBS_5	80	4	15	0	0	1	wenig
UBS_6	85	2	13	0	0	1	wenig
UBS_7	85	1	10	0	0	4	wenig
UBS_8	80	10	9	0	0	1	wenig-mittel
UBS_9	85	7	5	0	0	3	mittel
MBS_1	20	70	9	0	0	1	wenig
MBS_2	40	55	4	0	0	1	wenig
MBS_3	60	25	13	0	0	2	mittel
MBS_4	30	60	8	0	0	2	wenig
MBS_5	20	70	9	0	0	1	mittel
MBS_6	30	65	3	0	0	2	Mittel-stark
MBS_7	40	55	4	0	0	1	Mittel-stark
MBS_8	80	17	2	0	0	1	wenig
OBS_1	--	--	--	--	--	--	--
OBS_2	20	75	4	0	0	1	wenig
OBS_3	30	60	9	0	0	1	wenig-mittel
OBS_4	35	55	7	<1	0	2	mittel
OBS_5	30	65	3	0	0	<1	mittel
OBS_6	55	30	14	0	0	<1	wenig-mittel
MG_1	50	1	8	38	1	1	mittel
MG_2	45	1	8	43	2	<1	mittel
KF_1	55	10	15	20	0	0	wenig
KF_2	70	5	10	15	0	0	wenig
BG_1	34	0	1	60	5	0	wenig
BG_2	40	0	0?	50	7	0	wenig
HM_1	7	90	<3	0	0	<1	wenig
HM_2	25	70	4	0	0	1	wenig
AG_1	44	0,5 – 0,6%	5	50	0	<1	wenig
AG_2	37	0	7	55	0	<1	mittel
HM_3	<1	98	<1	0	0	<1	keine
HM_4	<1	98	<1	0	0	<1	keine
HM_5	<1	98	<1	0	0	<1	keine
TO_1	40	0	7	50	2	1	stark
TO_2	--	--	--	--	--	--	--

### Dünnschliffe der Mörtelprismen des Schnelltests nach ÖNORM B 3100

<u>Bearbeitungs-</u> <u>methodik</u>	<u>Zement</u>	<u>Bezeichnung</u> <u>Dünnschliff</u>	<u>AKR</u> <u>bestätigt</u> <u>mit REM</u>	<u>Luftporen</u> <u>geschätzt</u>	<u>Luftporen</u> <u>gemittelt</u>
trocken	Normtest	BT_MBS_1			
trocken	Normtest	BT_UBS_1			
trocken	Normtest	BT_UBS_2			
trocken	Normtest	BT_UBS_3			
trocken	Normtest	BT_OBS_1			
Alkohol	Normtest	B_MBS_1		~1 – 1,5%	2,64
Alkohol	Normtest	B_MBS_2	ja	~3 – 4%	2,64
Alkohol	Normtest	B_MBS_3		3,2 – 3,4%	2,64
Alkohol	Normtest	B_MBS_4	ja	2,4 – 2,6%	2,64
Alkohol	Normtest	B_UBS_1		1,8 – 2%	1,76
Alkohol	Normtest	B_UBS_2		1,6 – 1,7%	1,76
Alkohol	Normtest	B_UBS_3	ja	~1%	1,76
Alkohol	Normtest	B_UBS_4	ja	~2%	1,76
Alkohol	Normtest	B_UBS_5		~1 – 1,5%	1,61
Alkohol	Normtest	B_UBS_6		~2 – 2,5%	1,61
Alkohol	Normtest	B_UBS_7		~1,8%	1,61
Alkohol	Normtest	B_UBS_8		3 – 3,2%	1,61
Alkohol	Normtest	B_UBS_9		~0,8%	1,61
Alkohol	Normtest	B_UBS_10		~0,9-1%	1,61
Alkohol	Normtest	B_UBS_11		~1%	1,21
Alkohol	Normtest	B_UBS_12		0,5%	1,21
Alkohol	Normtest	B_UBS_13		~1%	1,21
Alkohol	Normtest	B_UBS_14		2 – 2,2%	1,21
Alkohol	Normtest	B_UBS_15		1,4 – 1,5 %	1,21
Alkohol	Normtest	B_OBS_1		1,4 – 1,5 %	1,40
Alkohol	Normtest	B_OBS_2	ja	~1,3 – 1,4%	1,40
Alkohol	Normtest	B_OBS_3		1,2 – 1,3%	1,34
Alkohol	Normtest	B_OBS_4	ja	~0,9-1,1%	1,34
Alkohol	Normtest	B_OBS_5		1,9 – 2,1%	1,34
Alkohol	Normtest	B_OBS_6		1 – 1,2%	1,34
Alkohol	Normtest	B_MG_1		3,4 – 3,6%	2,98
Alkohol	Normtest	B_MG_2		2,4 – 2,5%	2,98
Alkohol	Normtest	B_KF_1		1,9 – 2,1%	2,23
Alkohol	Normtest	B_KF_2		2,4 – 2,5%	2,23
Alkohol	Normtest	B_BG_1		3,9 – 4,0%	3,95
Alkohol	Normtest	B_BG_2		n.b.	3,95
Alkohol	Normtest	B_HM_1	ja	2,4 – 2,5%	2,60
Alkohol	Normtest	B_HM_2		2,7 – 2,8%	2,60
Alkohol	Normtest	B_AG_1		~2,3%	1,93
Alkohol	Normtest	B_AG_2		1,5 – 1,6%	1,93
Alkohol	Normtest	B_HM_3		~1,9%	1,45
Alkohol	Normtest	B_HM_4		1%	1,45
<b><u>Bindemittelkombination</u></b>					
Alkohol	Bindemittelkombo	BMK_MBS_1	ja	0,5 – 0,6%	0,55
Alkohol	Bindemittelkombo	BMK_UBS_1		~0,6%	0,60
Alkohol	Bindemittelkombo	BMK_OBS_1	ja	0,8%	0,80

### Anhang C: Ermittelte Werte der Mörtelprismen im Schnelltest nach ÖNORM B 3100

Name der Probe	1. Messung [mm]	2. Messung [mm]	3. Messung [mm]	4. Messung [mm]
UBS_1	0,106	1,049	1,586	2,791
UBS_2	0,100	1,022	1,555	2,721
UBS_3	0,118	1,081	1,584	2,770
UBS_4	0,106	0,968	1,530	3,589
UBS_5	0,230	1,253	1,843	3,257
UBS_6	0,193	1,046	1,563	2,865
MG_1	0,094	0,113	0,176	0,138
MG_2	0,069	0,076	0,189	0,044
KF_1	0,069	0,726	1,157	1,902
KF_2	0,126	0,807	1,179	1,866
BG_1	0,087	0,100	0,205	0,137
BG_2	0,013	0,056	0,132	0,138
OBS_1	0,019	0,672	1,214	2,173
OBS_2	0,107	0,733	1,172	2,050
OBS_3	0,119	0,786	1,251	2,238
OBS_4	0,031	0,743	1,353	2,267
OBS_5	0,088	0,838	1,364	2,390
OBS_6	0,081	0,919	1,418	2,412
MBS_1	0,106	0,542	0,878	1,699
MBS_2	0,106	0,492	0,791	1,594
HM_1	0,207	0,301	0,301	0,294
HM_2	0,150	0,206	0,231	0,294
HM_3	0,126	0,145	0,163	0,170
HM_4	0,118	0,125	0,143	0,118
AG_1	0,038	0,164	0,277	0,384
AG_2	0,100	0,164	0,277	0,384
TO_1	-0,037	0,081	0,255	0,567
TO_2	-0,019	0,069	0,251	0,528



<u>Name der Probe</u>	<u>Volumen vorher [cm<sup>3</sup>]</u>	<u>Volumen nachher [cm<sup>3</sup>]</u>	<u>Δ Volumen [cm<sup>3</sup>]</u>	<u>Rohdichte vorher [kg/m<sup>3</sup>]</u>	<u>Rohdichte nachher [kg/m<sup>3</sup>]</u>	<u>Δ Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]</u>
UBS_1	258,1	260,2	2,1	2326	2323	-3
UBS_2	257,4	259,5	2,1	2303	2306	3
UBS_3	257,7	259,9	2,2	2329	2325	-4
UBS_4	257,1	259,5	2,4	2316	2316	0
UBS_5	255,2	258,6	3,4	2341	2317	-24
UBS_6	258,4	261,8	3,4	2364	2343	-21
MG_1	255,7	255,8	0,1	2232	2203	-29
MG_2	254,3	254,7	0,4	2224	2194	-30
KF_1	256,8	258,6	1,8	2270	2256	-14
KF_2	253,1	254,9	1,8	2247	2231	-16
BG_1	254,8	254,6	-0,2	2271	2252	-19
BG_2	254,4	254,1	-0,3	2259	2238	-21
OBS_1	255,3	257,5	2,2	2309	2286	-23
OBS_2	256,1	258,6	2,5	2312	2292	-20
OBS_3	252,2	254,2	2,0	2333	2314	-19
OBS_4	253,8	256,8	3,0	2345	2334	-11
OBS_5	253,1	256,4	3,3	2317	2292	-25
OBS_6	253,7	256,9	3,2	2337	2309	-28
MBS_1	257,2	260,6	3,4	2320	2299	-21
MBS_2	256,1	263,9	7,8	2329	2310	-19
HM_1	251,5	251,7	0,2	2262	2252	-10
HM_2	251,7	251,1	-0,6	2267	2253	-14
HM_3	254,4	254,2	-0,2	2236	2227	-9
HM_4	254,8	254,4	-0,4	2247	2238	-9
AG_1	257,7	259,7	2,0	2251	2243	-8
AG_2	257,0	261,6	4,6	2243	2236	-7
TO_1	257,6	257,9	0,3	2242	2257	15
TO_2	256,9	257,2	0,3	2237	2254	17

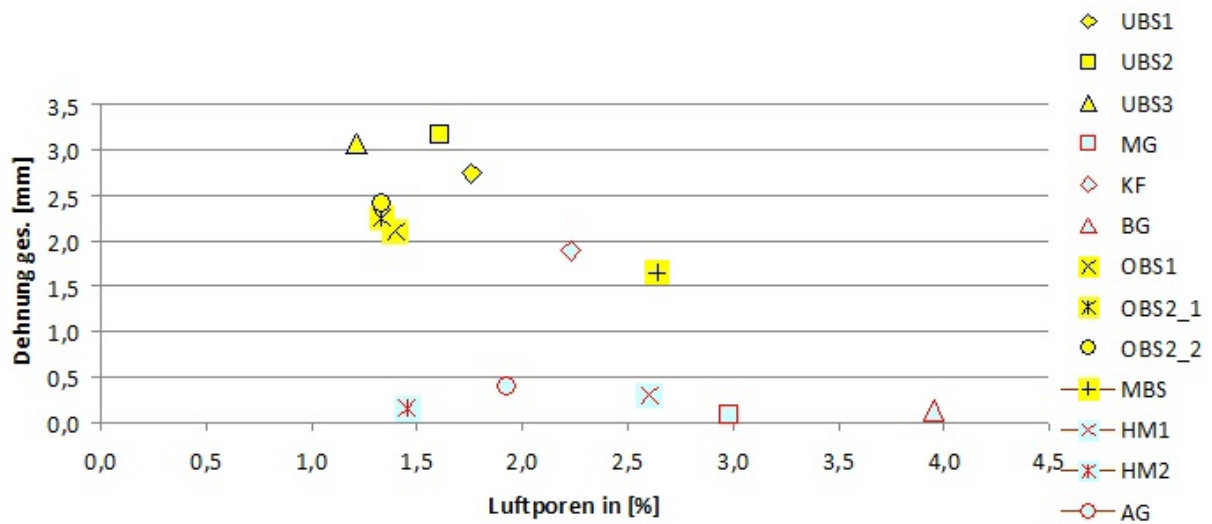
### Prismen der Bindemittelkombination

Name der Probe	1. Messung [mm]	2. Messung [mm]	3. Messung [mm]	4. Messung [mm]
UBS_1	-0,076	0,025	-0,088	-0,066
UBS_2	0,054	0,213	0,160	0,170
UBS_3	-0,085	-0,075	-0,138	-0,110
UBS_4	0,084	0,163	0,125	0,103
UBS_5	-0,081	-0,037	-0,144	-0,100
UBS_6	-0,088	-0,113	-0,132	-0,119
KF_1	0,087	0,162	0,131	0,112
KF_2	0,081	0,163	0,119	0,094
OBS_1	0,038	0,119	0,075	0,057
OBS_2	0,106	0,156	0,131	0,112
OBS_3	-0,081	-0,044	-0,112	-0,012
OBS_4	-0,119	-0,050	-0,131	-0,038
MBS_1	0,169	0,225	0,237	0,256
MBS_2	0,178	0,228	0,273	0,235

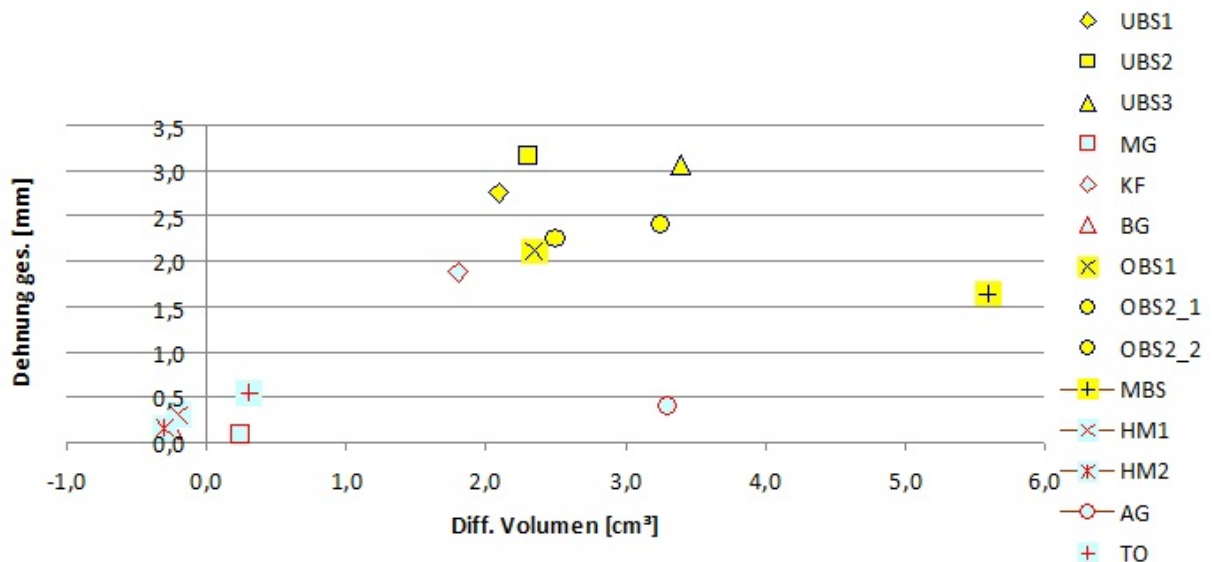
Name der Probe	<u>Volumen vorher</u> [cm <sup>3</sup> ]	<u>Volumen nachher</u> [cm <sup>3</sup> ]	<u>Δ Volumen</u> [cm <sup>3</sup> ]	<u>Rohdichte vorher</u> [kg/m <sup>3</sup> ]	<u>Rohdichte nachher</u> [kg/m <sup>3</sup> ]	<u>Δ Rohdichte</u> [kg/m <sup>3</sup> ]
UBS_1	251,8	254,7	2,9	2325	2322	-3
UBS_2	251,3	254,8	3,5	2332	2329	-3
UBS_3	252,8	253,8	1,0	2317	2313	-4
UBS_4	253,8	254,4	0,6	2326	2328	2
UBS_5	252,0	255,6	3,6	2320	2312	-8
UBS_6	253,2	257,2	4,0	2336	2327	-9
KF_1	251,6	250,4	-1,2	2293	2312	19
KF_2	250,8	251,7	0,9	2295	2319	24
OBS_1	255,6	257,2	1,6	2326	2326	0
OBS_2	254,8	254,2	-0,6	2315	2307	-8
OBS_3	250,7	255,2	4,5	2330	2313	-17
OBS_4	250,5	254,8	4,3	2319	2301	-18
MBS_1	253,8	254,1	0,3	2303	2310	7
MBS_2	251,8	252,8	1,0	2297	2305	8

Anhang D: Darstellung der Korrelationsverhältnisse zwischen Dehnung, Rohdichte oder Volumen und auch Luftporengehalt

### Luftporen zu Dehnung ges

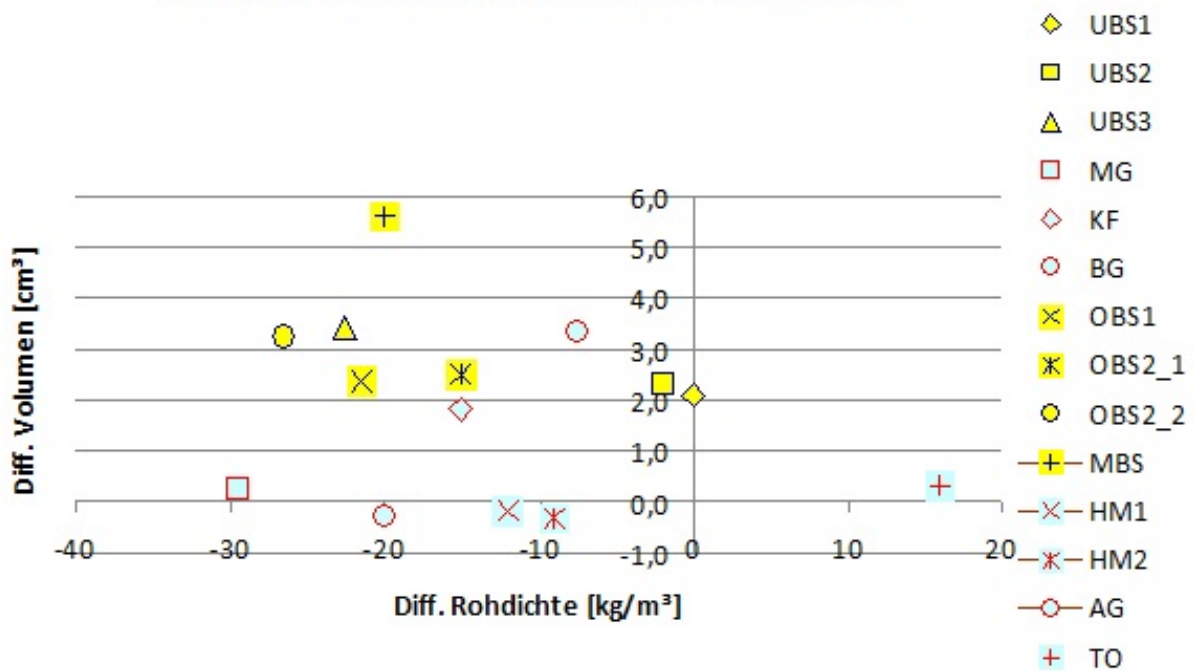


### Diff. Volumen zu Dehnung ges





## Diff. Rohdichte zu Diff. Volumen



## Diff. Rohdichte zu Dehnung

