Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre

Masterarbeit

# Exploration hochreiner Semmeringquarzite für die Glasindustrie

Marcel Aaron Zahrl, BSc

Februar 2024

MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN
www.unileoben.ac.at

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

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

Datum 04.02.2024

Unterschrift Verfasser/in
Marcel Aaron Zahrl

# Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Prof. Frank Melcher für die sehr gute fachliche Betreuung der Masterarbeit bedanken. Danke auch dafür, dass Sie immer ein offenes Ohr für alle anderen Anliegen hatten. Ein weiterer Dank gebührt auch Prof. Heinrich Mali für die Unterstützung im Gelände und an den Mikroskopen. Ebenso gebührt Prof. Gerd Rantitsch für die Kalibration des LIBS-Gerätes und die Hilfe bei der RFA ein großer Dank. Recht herzlich möchte ich auch Werner Haidinger danken, der als Betriebsleiter des Steinbruchs Friesenbichler wesentlich zur Qualität dieser Arbeit beigetragen hat. Namentlich möchte ich auch meinen Ansprechpersonen bei den Projektpartnern, Nina Schrödl (Stoelzle Oberglas) und Heinz Reitner (GeoSphere Austria), danken. Ohne die zahlreich zur Verfügung gestellten Zusatzinformationen wäre das Verfassen dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Danke auch an meine Kommilitonen, die mit wissenschaftlicher und natürlich auch nichtwissenschaftlicher Unterstützung meine Studienzeit bereichert haben. Zu guter Letzt gebührt der größte Dank meiner Familie. Danke für die ungebrochene Unterstützung und das Vertrauen in mich. Mama, amor tollit timorem. Christina, mein Schatz, kein Satz den ich hier schreiben könnte kann ausdrücken, was ich für Dich empfinde. Ich liebe Dich.

# Kurzfassung

Der Haupteinsatzstoff für die Produktion von Weiß- und Buntgläsern ist hochreiner Quarz. Der Bedarf an hochreinen Quarzrohstoffen für die steirische Glasindustrie wird derzeit aus nur zwei Quarzsandlagerstätten gedeckt. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, wird im Zuge des Projektes „MRI_Quarz - Untersuchung von Vorkommen hochwertiger Quarzrohstoffe im südöstlichen Bundesgebiet“ auf hochreine Quarzrohstoffe prospektiert und exploriert. Auf Basis der Prospektionsergebnisse wurde die Semmeringquarzitlagerstätte des Steinbruchs Karl Friesenbichler GmbH Nfg & Co KG (Unterdissau, Bez. Weiz, Stmk.) als Explorationsziel ausgewählt. Die Lagerstätte kann geologisch den permotriassischen Metasedimenten der Vorau-Decke (Silvretta-Seckau-Deckensystem), welche lokal im Fischbacher Fenster aufgeschlossen ist, zugeordnet werden. Hauptkriterium für die Einordnung als hochreiner Quarzrohstoff ist ein $Fe_2O_3$-Gehalt von unter 0,03 m% (Weißglas) bzw. 0,5 m% (Buntglas). Als maßgebende Fe-führende Mineralphase wurden phengitische Muskovite, mit durchschnittlich 5,43 m% FeO, identifiziert. Zusätzlich zu den Haupt- und Nebengemengteilen Quarz bzw. Hellglimmer, kommen Albit, Alkalifeldspat, Apatit, Baryt, Gorceixit, Kaolinit, Monazit, limonitisierter Pyrit, Rutil und Zirkon akzessorisch vor. Auf Basis von RFA-Messungen können die grünen Quarzite (1607 ppm $Fe_2O_3$) als passend für die Buntglasherstellung, und die weißen Quarzite (309 ppm $Fe_2O_3$) als passend für die Weißglasherstellung angesehen werden. Die weißen Quarzite kommen nur als hydrothermal entfärbte Alterationszonen im grünen Quarzit vor und sind häufig mit Verheilungen aus glasigem Quarzit (65 ppm $Fe_2O_3$) assoziiert. Die Ausbildung der Alterationen zu hochreinen Quarziten dürfte mit einer tektonischen und hydrothermalen Aktivität im Zuge der der Öffnung des Fischbacher Fensters einhergegangen sein. Um die geforderten hochreinen Qualitäten zu erreichen sind vermutlich ein selektiver Abbau und eine optische Sortierung notwendig. Für zukünftige Prospektionsarbeiten wurde die Eignung einer Multielektroden-Widerstandsmessung untersucht. Eine Abgrenzung der hochreinen Quarzite zum Nebengestein sollte auf Basis ihres höheren Widerstandes, bedingt durch den geringeren Hellglimmergehalt, möglich sein. Es gilt zu bedenken, dass der kleinräumige Aufbau der Alterationszonen unterhalb der Auflösungsgrenze der Messmethode liegen könnte und potenziell nur massive Anhäufungen von Alterationszonen zuverlässig detektiert werden können. Im Zuge dieser Arbeit wird ein Methodenvergleich zwischen einer portablen LIBS-Analyse im Gelände und der Labor-RFA angestellt. Nach vorangegangener Kalibration mit Quarzit-Pulverpresslingen, die mittels wellenlängendispersiver RFA analysiert wurden, können LIBS-Messwerte in den Grenzen Si: 41-48 m%, Fe: 0-0,26 m%, Al: 0-2 m%, Mg: 0-0,07 m% und Ba: 0-0,24 m% als korrekt angesehen werden. Speziell Fe-Gehalte unter 0,05 m% werden exakt gemessen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass in den Semmeringquarziten des Fischbacher Fensters Alterationszonen mit hochreinen Quarzvarietäten existieren, die für die Weiß- bzw. Buntglasherstellung geeignet wären.

# Abstract

The main raw material for the production of clear and colored glass is high-purity quartz. The demand for high-purity quartz raw materials by the Styrian glass industry is currently covered by only two quartz sand deposits. In order to ensure supply chain security, prospection and exploration for high-purity quartz raw materials is performed within the project "MRI_Quarz - Untersuchung von Vorkommen hochwertiger Quarzrohstoffe im südöstlichen Bundesgebiet". Based on the preliminary results, the Semmering-quartzite deposit of the Karl Friesenbichler GmbH Nfg & Co KG quarry (Unterdissau, district of Weiz, Styria) was selected as the exploration target. The deposit can be geologically assigned to the Permo-Triassic metasediments of the Vorau nappe (Silvretta-Seckau nappe system), which is locally exposed in the Fischbach Window. The main criterion for classification as a high-purity quartz raw material is an $Fe_2O_3$ content of less than 0,03 m% (clear glass) and 0,5 m% (colored glass). Phengitic muscovite with an average of 5,43 m% FeO was identified as the main Fe-bearing mineral phase. In addition to the main and minor components quartz and respectively light mica, albite, alkali feldspar, apatite, barite, gorceixite, kaolinite, monazite, limonitized pyrite, rutile and zircon occur as accessories. Based on XRF measurements, the green quartzites (1607 ppm $Fe_2O_3$) can be considered suitable for colored glass production, and the white quartzites (309 ppm $Fe_2O_3$) as for white glass production. The white quartzites occur only as hydrothermally decolorized alteration zones in green quartzite and are often associated with veinlets of glassy quartzite (65 ppm $Fe_2O_3$). The alteration to high-purity quartzites is likely to have been associated with tectonic and hydrothermal activity during the opening of the Fischbach Window. In order to achieve the required high-purity qualities, selective mining and optical sorting are presumably required. The suitability of a multi-electrode resistivity measurement was investigated for future prospection work. It should be possible to differentiate the high-purity quartzites from the host rock based on their higher resistivity due to the lower mica content. It should be kept in mind, that the small-scale structure of the alteration zones could be below the resolution limit of the measurement method and potentially only massive accumulations of alteration zones can be reliably detected. In the course of this thesis, a method comparison between a portable LIBS analysis in the field and laboratory XRF is made. After previous calibration with quartzite powder compacts, which were analyzed by wavelength-dispersive XRF as part of the prospection work, LIBS readings within the limits of Si: 41-48 m%, Fe: 0-0,26 m%, Al: 0-2 m%, Mg: 0-0,07 m% and Ba: 0-0.24 m% can be considered correct. Especially Fe contents below 0,05 m% are measured accurately. Generally, it should be noted, that the Semmering-quartzites of the Fischbach Window contain alteration zones with high-purity quartz varieties that would be suitable for the production of clear or stained glass.

# Inhaltsverzeichnis


Abkürzungsverzeichnis ..... 6

1 Einleitung ..... 7

1.1 Prospektion ..... 8

1.2 Auswahl des Explorationsziels ..... 10

2 Geologisch-tektonischer Überblick ..... 13

2.1 Semmering-Wechsel-Deckensystem ..... 14

2.2 Silvretta-Seckau-Deckensystem ..... 15

2.2.1 Vorau-Decke ..... 18

2.3 Koralpe-Wölz-Deckensystem ..... 22

3 Methodik ..... 23

3.1 Geländearbeit ..... 23

3.1.1 Portable LIBS ..... 23

3.2 Multielektroden-Widerstandsmessung ..... 23

3.3 RFA-WDS ..... 24

3.4 Mikroskopie ..... 25

3.5 REM-EDS ..... 25

3.6 Statistik ..... 25

3.6.1 Bland-Altman-Plot ..... 25

4 Ergebnisse ..... 27

4.1 Geologisch-lagerstättenkundliche Beschreibung ..... 27

4.1.1 Lithologien ..... 27

4.1.1.1 Meta-Quarzkonglomerat ..... 29

4.1.1.2 Metasandstein ..... 30

4.1.1.3 Grüner Quarzit und hochreine Varietäten ..... 33

4.1.2 Tektonik ..... 37

4.2 Mikroskopie ..... 38

4.2.1 Quarz ..... 38
4.2.2 Hellglimmer ..... 41
4.2.3 Akzessorien ..... 43
4.2.3.1 Feldspat ..... 43
4.2.3.2 Kaolinit ..... 44
4.2.3.3 Ba-Minerale ..... 45
4.2.3.4 Weitere Akzessorien ..... 47
4.2.4 Modaler Mineralbestand ..... 50
4.3 Chemische und mineralogische Analyse ..... 53
4.4 Methodenvergleich – Portable LIBS vs. Labor-RFA ..... 59
4.5 Multielektroden-Widerstandsmessung ..... 64
5 Interpretation & Diskussion ..... 67
5.1 Die Semmeringquarzitlagerstätte des Stbr. Friesenbichler ..... 67
5.1.1 Mineralogie ..... 67
5.1.2 Alterationszonen und lithologischer Aufbau ..... 68
5.1 Angewandte Aspekte ..... 69
5.1.1 Hochreine Quarzite als Rohmaterial für Weiß- und Buntglas ..... 69
5.1.2 Machbarkeitsüberlegungen ..... 71
5.2 Portable LIBS vs. Labor-RFA ..... 72
5.3 Multielektroden-Widerstandsmessungen als Prospektionsmethode ..... 73
6 Conclusio ..... 74
Anhang A ..... 76
A1 Literaturverzeichnis ..... 76
A2 Abbildungsverzeichnis ..... 79
A3 Tabellenverzeichnis ..... 83
Anhang B ..... 84
B1 Probenverzeichnis & Karte ..... 84
B2 Chemische und mineralogische Analysen ..... 87

B3 REM-EDS Messungen ..... 93

B4 Multielektroden-Widerstandsmessung – Inversionsrechnungsprofile..... 96

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| a.p.f.u. | atoms per formula unit (Atome pro Formeleinheit) |
| Anz. | Anzahl |
| EDS | energiedispersiv |
| ET | Etage |
| GG | Gesamtgestein |
| gl. | glasig |
| gr. | grün |
| KG | Korngröße |
| KWD | Koralpe-Wölz-Deckensystem |
| LIBS | laser induced breakdown spectroscopy (laserinduzierte Plasmaspektroskopie) |
| lim. | limonitisiert |
| LOI | Loss on ignition (Glühverlust) |
| m% | Massenprozent |
| mA | Milliampere |
| Mess. | Messung |
| norm. | normiert |
| OOA | Oberostalpin |
| pN | parallel nicols (parallele Polarisatoren) |
| REM | Rasterelektronenmikroskop |
| RFA | Röntgenfluoreszenzanalyse |
| SD | standard deviation (Standardabweichung) |
| SSD | Silvretta-Seckau-Deckensystem |
| Stbr. | Steinbruch |
| SWD | Semmering-Wechsel-Deckensystem |
| UOA | Unterostalpin |
| w. | weiß |
| WDS | wellenlängendispersiv |
| xN | crossed nicols (gekreuzte Polarisatoren) |

# 1 Einleitung

Diese Arbeit wurde für die Firma Stoelzle Oberglas GmbH im Zuge des Projektes „MRI_Quarz - Untersuchung von Vorkommen hochwertiger Quarzrohstoffe im südöstlichen Bundesgebiet“ der GeoSphere Austria verfasst. Die Firma Stoelzle Oberglas GmbH zählt zur multinationalen Stoelzle Glasgruppe und hat ihren Sitz in Köflach (Steiermark, AUT). Am Standort werden Weiß- und Buntgläser (grün, braun) für die Pharmazeutische-, Getränke- und Lebensmittelindustrie hergestellt. Das Glasgemenge dieser Kalk-Natron Gläser setzt sich aus Quarzsand, Soda, Kalkstein, Dolomit und Feldspat zusammen, wobei der größte Anteil mit 69-74 % auf den Quarzsand entfällt. Je nach Produktqualität werden außerdem 20-80 % Scherben (Altglas) eingesetzt. Speziell für die hohe Farbqualität von extraweißen Gläsern werden hochreine Quarzrohstoffe benötigt. Entscheidend hierfür ist der geringe Anteil an den färbenden Elementen Fe, Ni, Cu, Co, Pb und Cr. Am kritischsten sind in erster Linie die Verunreinigungen durch $Fe_2O_3$, da schon geringe Mengen zu einer Verfärbung führen können (Tabelle 1). Der Rohstoffverbrauch betrug im Jahr 2023 ca. 30 000 t Quarzsand für Weißglas und 10 000 t Quarzsand für Buntglas. Der gesamte Bedarf wird derzeit aus Quarzsandlagerstätten gedeckt. Als Aufbereitung wird einzig der Fe-Gehalt durch Flotation verringert.

| | $Na_2O$ [m%] | $Al_2O_3$ [m%] | $SiO_2$ [m%] | $K_2O$ [m%] | $Fe_2O_3$ [m%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Weißglas | 0,1 - 0,7 | 2,3 - 2,7 | 94,5 – 97 | 1,3 - 1,9 | **< 0,03** |
| Buntglas | 0,5 - 1,1 | 3,7 - 4,5 | 91 – 95 | 2 - 2,8 | < 0,5 |

*Tabelle 1: Qualitätsanforderungen der Quarzsande für die Herstellung von Weiß- bzw. Buntglas. Chemische Analysen (RFA) der Firma Stoelzle Oberglas GmbH. Hauptkriterium für den Einsatz als Weißglas-Rohmaterial sind $Fe_2O_3$-Gehalte unter 300 ppm.*

Derzeit gibt es in Österreich nur einen Lieferanten, der diese Qualität in diesen Mengen liefern kann. Hinzu kommen die finanziellen und ökologischen Auswirkungen, die beim Transport des Rohmaterials mittels Silo-LKW von Köflach (ca. 270 km) anfallen. Weiters muss die Endlichkeit der Quarzsandreserven bedacht werden.

Das Ziel dieses Projektes ist, eine nachhaltige Alternative für die Versorgung an hochreinem Quarz zu finden und hinsichtlich der Eignung für die Weißglas-Herstellung bzw. alternativ für die Buntglas-Herstellung zu bewerten. Zusätzlich zur chemischen Eignung sollen Machbarkeits-Überlegungen bezüglich Abbaubarkeit, Aufbereitungsmöglichkeiten und Transportdistanz angestellt werden. Darüber hinaus werden die Methoden der Labor-RFA und des portablen LIBS-Gerätes (Messungen im Gelände) miteinander verglichen. Des Weiteren wurden von GeoSphere Austria Geoelektrik-Messungen an hochreinen Quarziten durchgeführt, die in dieser Arbeit interpretiert werden.

## 1.1 Prospektion

Im Zuge des Projektes MRI_Quarz wurde von GeoSphere Austria die Literaturstudie - *„Datenaufbereitung und Dokumentation hochwertiger Quarzressourcen (Quarzsand, Quarzit, Pegmatit/Gangquarz) im Großraum Köflach“* - nach Vorgaben der Firma Stoelzle Oberglas GmbH angefertigt, welche im November 2019 vorgelegt wurde (Schedl et al. 2019). Anhand aller vorhandenen Daten in den Datenbanken von GeoSphere Austria wurden neben Quarzsand- und Pegmatit/Gangquarz-Vorkommen, 14 Quarzit-Vorkommen zur näheren Beprobung vorgeschlagen (Abbildung 1).

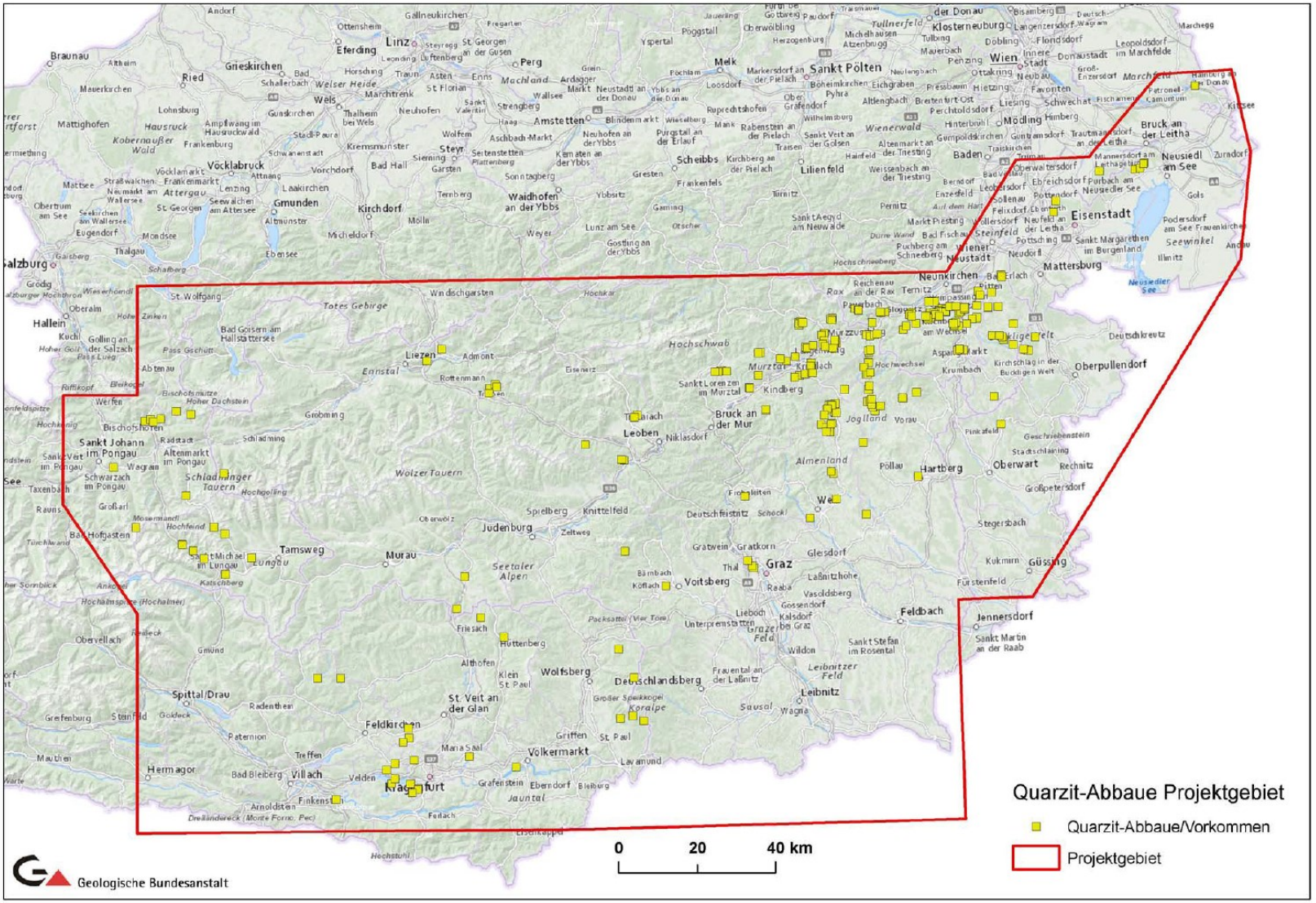


*Abbildung 1: Projektgebiet des Projektes MRI_Quarz. Ausgewiesen sind alle bekannten Quarzit-Abbaue und Vorkommen. 14 aktive Abbaue wurden zur weiteren Beprobung vorgeschlagen (Schedl at al. 2019).*

Die Auswahl der Quarzit-Abbaue basiert auf der chemischen Zusammensetzung, der geographischen Verortung, der derzeitigen Verwendung des Rohmaterials, den möglichen Reserven an hochreinem Quarzit und den generellen Qualitätsanforderungen für die Glasproduktion.

Nach Evaluierung durch den Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre wurden im Herbst 2022 und Frühjahr 2023 zehn dieser 14 Vorkommen besucht, sowie drei zusätzliche Vorkommen, die auf Basis des Wissenstandes des Lehrstuhls für Geologie und Lagerstättenlehre ausgewählt wurden. In diesen insgesamt 13 Lokalitäten wurden Stichproben der optisch weißesten und somit mutmaßlich reinsten Quarzite und Gangquarze („Rittiser Quarzit“) genommen und im Rahmen einer Bachelorarbeit mittels RFA analysiert (Mitterdorfer 2024) (Abbildung 2). Ebenso wurden Quarzknauer aus dem Talk-Bergbau Rabenwald und Quarzrückstände der Spodumenaufbereitung des Lithium-Bergbaues bei Wolfsberg analysiert.

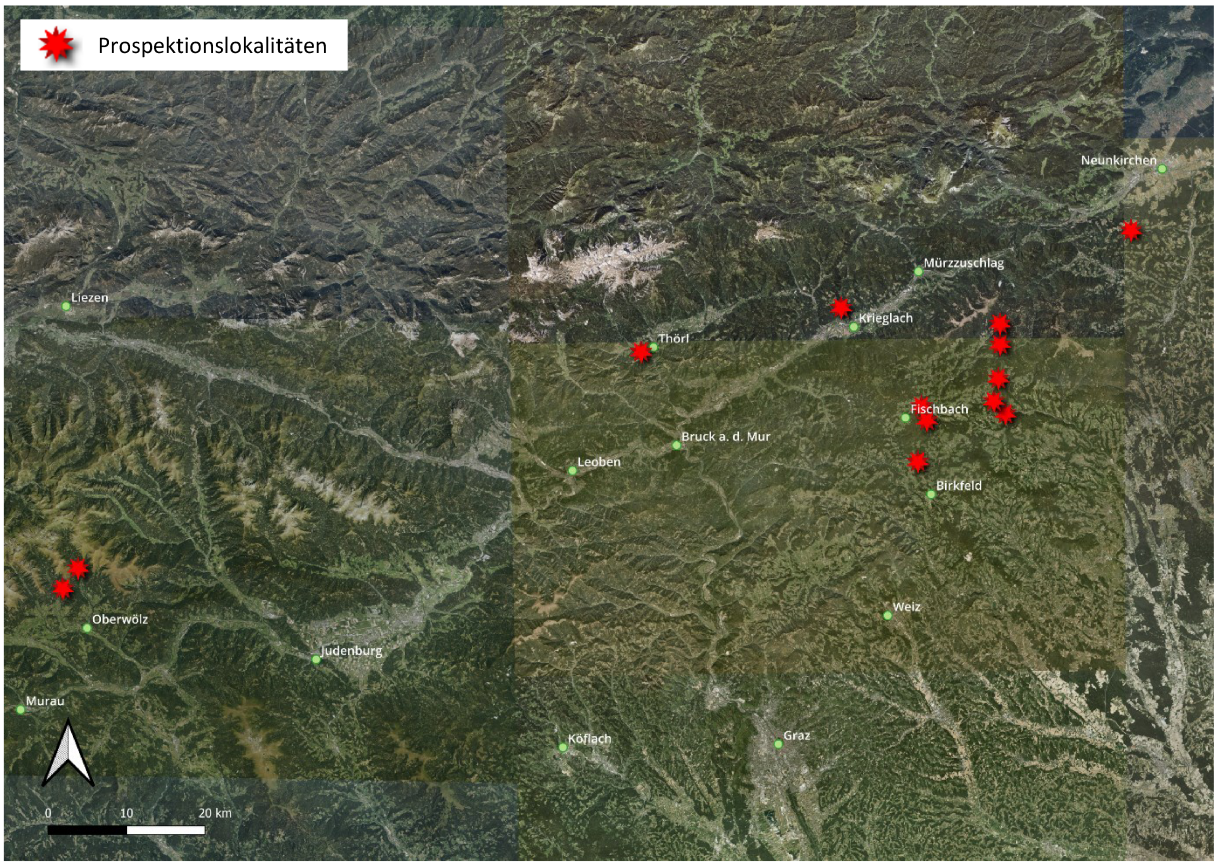


*Abbildung 2: Geographische Lage der Quarzit-Prospektionslokalitäten, die im Zuge des Projektes besucht und beprobt wurden (Orthofoto; www.basemap.at; Abfrage: 21.10.2023).*

## 1.2 Auswahl des Explorationsziels

Auf Basis der chemischen Analysen (Mitterdorfer 2024), der Abbaukapazitäten, der geographischen Verortung und der möglicherweise vorhandenen Tonnagen an hochreinen Quarziten wurde der Stbr. Karl Friesenbichler GmbH Nfg & Co KG (Unterdissau 4, 8654 Fischbach, Stmk., AUT) als Explorationsziel

ausgewählt (Abbildung 3). Der Tagebau befindet sich im Schindergraben in der Gemeinde Fischbach (pol. Bez. Weiz) ca. 14 km nördlich von Birkfeld. Geographisch kann er den Fischbacher Alpen zugeordnet werden. Lithologisch ist im Wesentlichen Semmeringquarzit vorherrschend (Abbildung 4). Der gewonnene Quarzit wird hauptsächlich als Zuschlagsstoff bei der Betonherstellung und als Tragschicht im Straßenbau eingesetzt. Der Tagebau zählt 8 Etagen, wobei derzeit nur auf ET 0-7 abgebaut wird. Die Bruchwandneigung beträgt 72,5-80°. Die Gewinnung erfolgt hauptsächlich reißend. Sprengarbeiten finden ca. zweimal jährlich statt (pers. Komm. Betriebsleiter W. Haidinger). ET 0 liegt auf 685 m Seehöhe und ET 8 liegt auf 820 m Seehöhe. Die durchschnittliche Jahresförderung liegt bei 90 000 t (Untersweg et al. 1999).

*Abbildung 3: Geographische Verortung des Explorationsziels – Stbr. Friesenbichler (Basiskarte; www.basemap.at; Abfrage: 21.10.2023).*

*Abbildung 4: Semmeringquarzit Tagebau Stbr. Friesenbichler mit den Etagen 0 bis 8. Stand: 2021. Vor allem die ET 5,6 und 7 wurden zwischen 2021 und Ende 2023 weiter aufgefahren. Der Baumbestand zwischen ET 7 und 8 ist mittlerweile gerodet. Der SE-Bereich des Tagebaus wird hauptsächlich zur Befahrung und als Halde genutzt. (Orthofoto; www.basemap.at; Abfrage: 21.10.2023).*

# 2 Geologisch-tektonischer Überblick

Großtektonisch kann die Lagerstätte der liegendsten Einheit des Oberostalpins, dem Silvretta-Seckau-Deckensystem und darin der Vorau-Decke, zugeordnet werden. Die Detailkarte und eine geologische Übersicht ist auf dem Kartenblatt 135 Birkfeld von GeoSphere Austria zu finden (Abbildung 5) (Matura & Schuster 2014). Im Liegenden des SSD befindet sich das Semmering-Wechsel-Deckensystem (UOA) und im Hangenden das Koralpe-Wölz-Deckensystem (OOA) (Schuster 2015). Diese drei Systeme bestehen aus diversen tektonischen Decken, die teilweise weiter in lithostratigraphische Komplexe aufgeteilt werden können. Eine Abgrenzbarkeit ist durch unterschiedliche Gesteinsvergesellschaftungen, Entwicklungsgeschichte, Metamorphoseprägungen und geochronologische Daten gegeben (Abbildung 6).

Die ab Punkt 2.1 folgende Beschreibung erfolgt vom Liegenden ins Hangende.

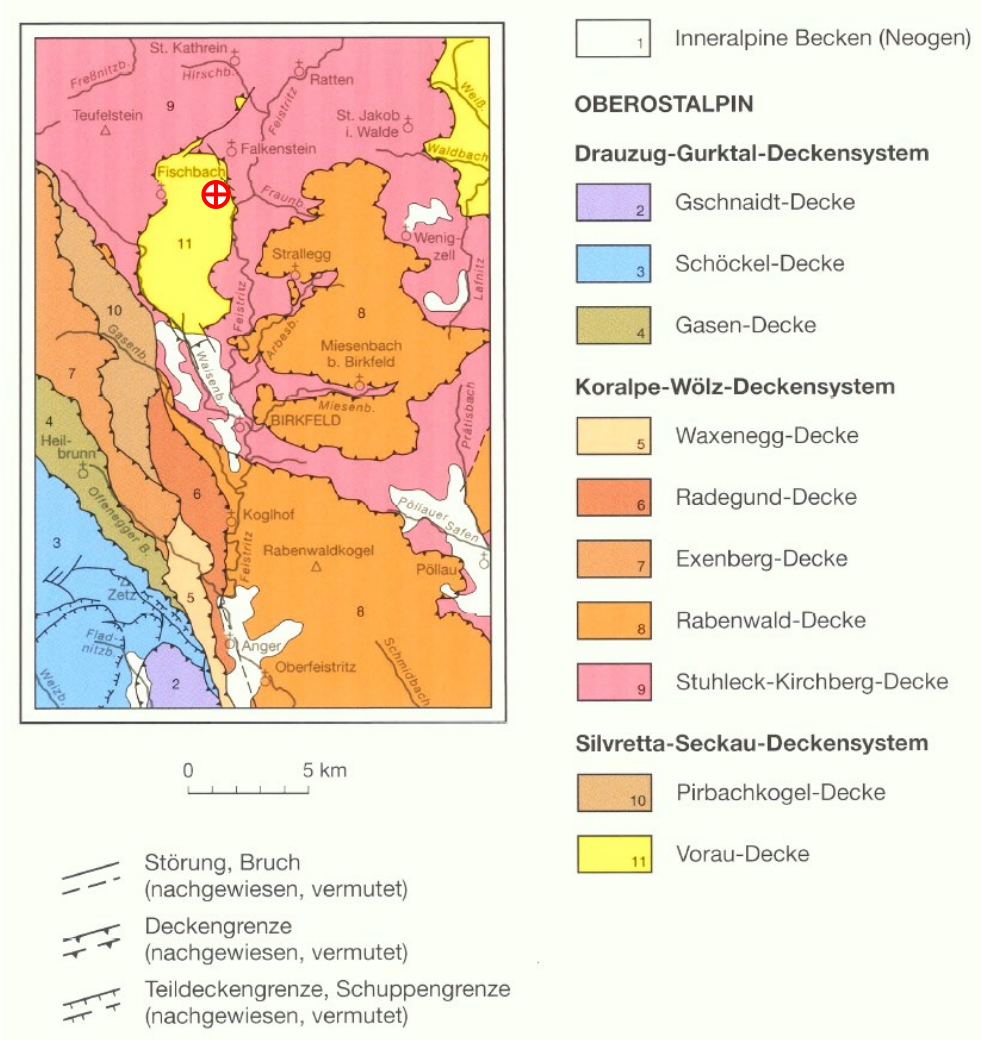


*Abbildung 5: Geologisch-tektonische Übersicht des Kartenblattes 135 Birkfeld (Matura & Schuster 2014). Die Lage des Stbr. Friesenbichler innerhalb der Vorau-Decke (11) ist markiert.*

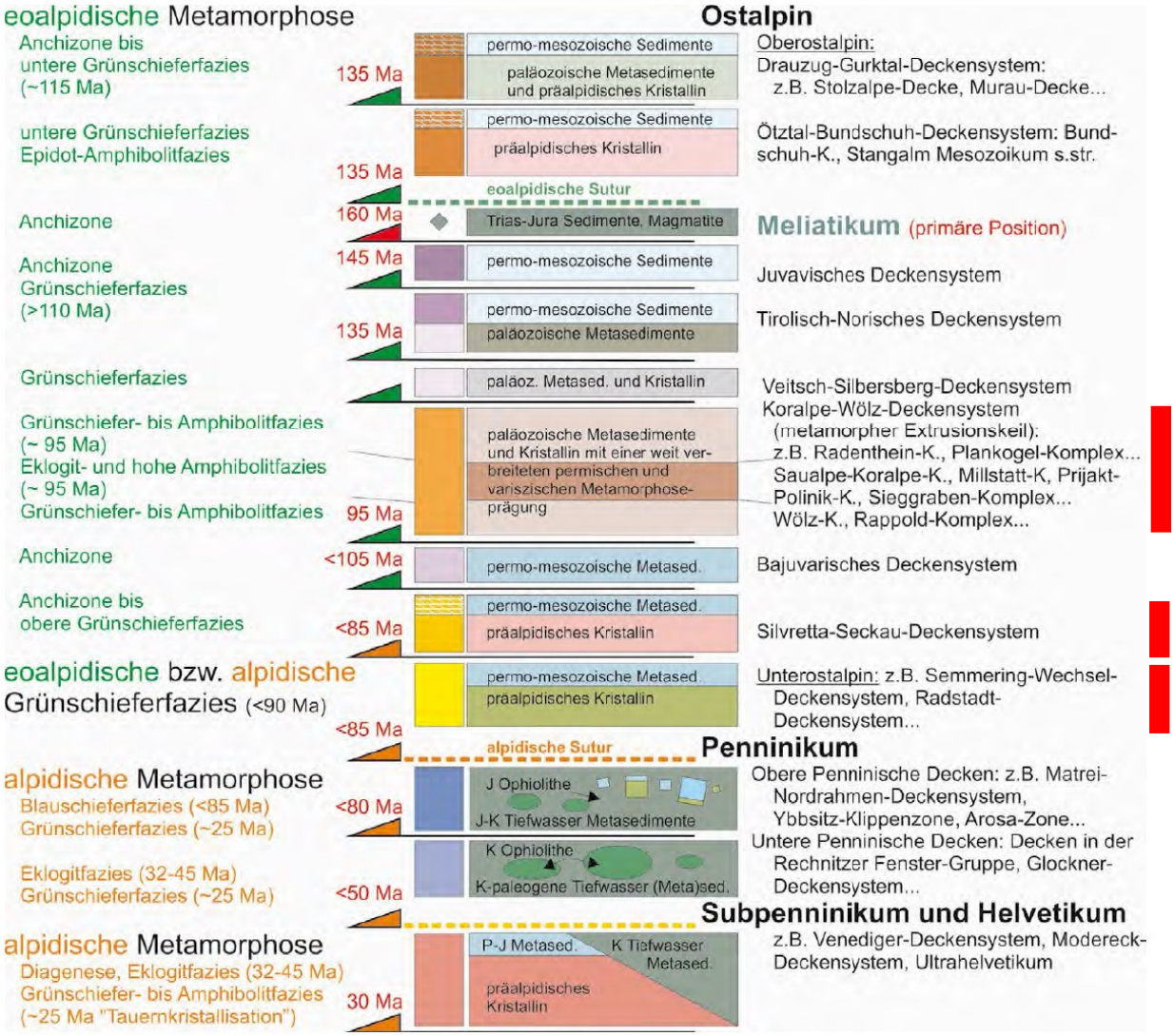


*Abbildung 6: Das SWD, SSD und KWD (rote Balken) im tektonischen Kontext der Ostalpen, inklusive Metamorphosegrad, Metamorphosehöhepunkt und Zeitpunkt des Einbaus in den ostalpinen Deckenstapel (rote Zahlen). Das Bajuvarische-Deckensystem kommt im betrachteten Gebiet nicht vor. (modifiziert nach Schuster et al. 2013).*

## 2.1 Semmering-Wechsel-Deckensystem

Das SWD setzt sich aus der Wechsel-, Mürz-Tachenberg- und Roßkogel-Decke zusammen, die jeweils aus einem kristallinen Basement sowie auflagernden permischen Metavulkaniten und permomesozoischen Metasedimenten bestehen. Diese permomesozoischen Metasedimente bauen die nördlichen Fischbacher Alpen größtenteils auf. Sie sind durch typische Abfolgen aus Alpinem Verrucano (Perm), (Roßkogel-)Porphyroid (Perm), Semmeringquarzit (Untertrias), dunkelgrauem Kalkmarmor (Unter- und Mitteltrias) und hellgrauem Dolomit (Mitteltrias) gekennzeichnet. Das Basement besteht hauptsächlich aus monotonen phyllonitischen Glimmerschiefern. Im Bereich der Lagerstätte unterlagert der kristalline Untergrund der Wechsel-Decke direkt die Vorau-Decke des SSD, wobei die Wechsel-Decke im betrachteten Gebiet nur distal östlich des Waldbach-Komplexes (SSD) aufgeschlossen ist (Abbildung 7) (Schuster & Ilickovic 2015).

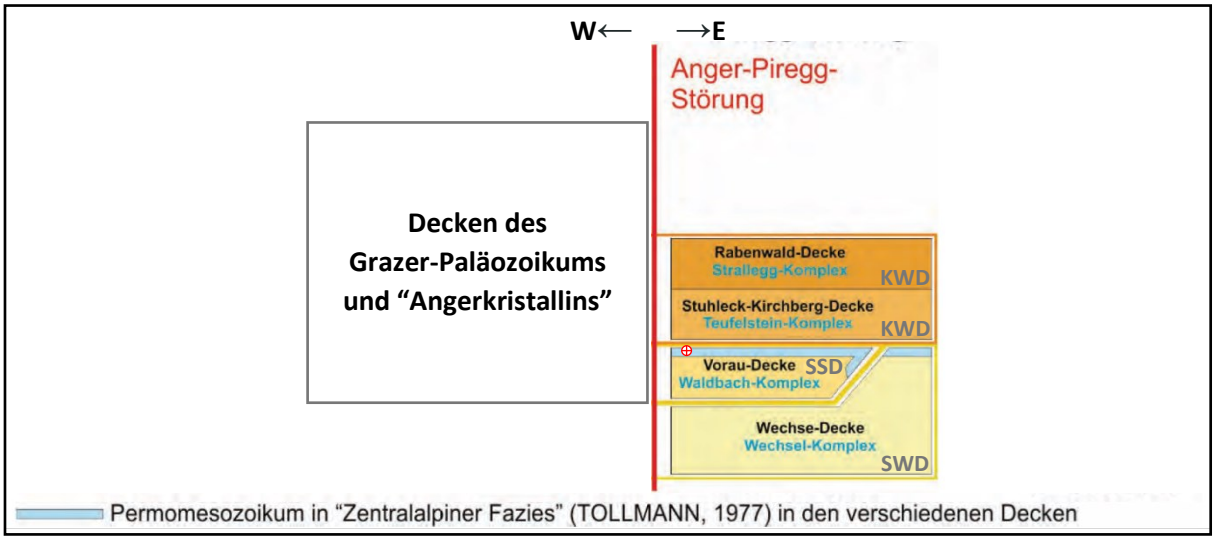


*Abbildung 7: Schematische Darstellung des Deckenbaus des Großraumes zwischen Graz und Semmering. Die Bezeichnungen orientieren sich an Schmid et al. 2004 (modifiziert nach Schuster & Ilickovic 2015). Der Stbr. Friesenbichler kann in die permomesozoische Bedeckung der Vorau-Decke eingeordnet werden.*

## 2.2 Silvretta-Seckau-Deckensystem

Im Hangenden der Einheiten des SWD befindet sich das Silvretta-Seckau-Deckensystem. Die Vorau-Decke (Fischbacher Fenster und Waldbach) und die Pirbachkogel-Decke (Piregg) bauen das System im betrachteten Gebiet auf (Abbildung 5). Die Decken ähneln in ihrer lithologischen Zusammensetzung jenen des SWD. Sie bestehen aus post-variszischen permotriassischen Metasedimenten, permomesozoischen Metavulkaniten und aus einem prä-permischen kristallinen Basement mit Paragneisen, Hornblende führenden Gneisen, Amphiboliten, Orthogneisen, Aplitgneisen und Pegmatitgneisen. Der kristalline Untergrund erfuhr eine variszische amphibolitfazielle Metamorphose und wurde eoalpidisch überprägt. Die Überprägung erfuhr Bedingungen der unteren Grünschieferfazies und resultierte in einer starken Phyllonitisierung der Lithologien (Schuster & Ilickovic 2015).

Die im betrachteten Gebiet auflagernden Metasedimente und Metavulkanite zeigen in Lithologie und Abfolge große Ähnlichkeiten innerhalb der Ober- und Unterostalpinen Decken und können daher laut Tollmann (1977) zusammenfassend, im Folgenden beginnend mit der ältesten Einheit, beschrieben werden (I - IV). Als Ursprung wird ein gemeinsamer „zentralalpiner" Faziesbereich im Perm angenommen, der heute als zentralalpines Mesozoikum angesprochen wird. Ihre Metamorphose fand im Verlauf der eoalpidischen Ereignisse in der späten Kreide zusammen mit den kristallinen Einheiten statt und erreichte grünschieferfazielle Bedingungen (Tollmann 1977).

### I) Metavulkanit, „Roßkogel-Porphyroid“ (Perm):

Als Edukte werden quarzphyrische saure Laven, Tuffe, Tuffite und Ignimbrite angenommen, deren Alter auf Grund des gemeinsamen Auftretens mit Alpinem Verrucano und der Überlagerung mit Semmeringquarzit als permisch interpretiert werden kann. Vor allem am namensgebenden Roßkogel finden sich Biotit-Uralitschiefer (*Uralit:* Pseudomorphosen von Mineralen der Amphibol-Gruppe nach Mineralen der Pyroxen-Gruppe; oftmals Aktinolith nach Augit), deren Edukte vermutlich andesitische Metavulkanite waren (Schuster & Ilickovic 2015).

Die Gesteine zeigen generell eine hellgraue, gelbliche oder leicht grünliche Färbung und eine engständige Schieferung bzw. ein ausgeprägtes Streckungslinear. Folglich ist ein mylonitisches Gefüge vorhanden (Cornelius 1952, Gaal 1966). Die vormals partiell glasige Matrix ist zu großen Teilen rekristallisiert, wobei das vulkanische Gefüge in wenigen Bereichen noch erhalten ist. In den rekristallisierten Anteilen zeigt die Matrix einen Lagenbau mit Porphyroklasten und Serizit auf den Schieferungsflächen. Mikroskopisch lässt sich feststellen, dass die Matrix aus feinkörnigem Quarz, Serizit und Albit besteht. Akzessorisch finden sich Zirkon, Orthit, Rutil und Ilmenit (Schuster & Ilickovic 2015).

### II) Alpiner Verrucano (Perm):

Petrographisch setzt sich der Alpine Verrucano hauptsächlich aus Metasedimenten zusammen (Metapelite, Metakonglomerate, Metabrekzien, Metaarkosen, Quarzite, Phyllite, Serizitschiefer) (Faupl 1970b). Am häufigsten kommt der Alpine Verrucano als Metapelit vor, beispielsweise als feinkörniger Serizitschiefer, Quarzphyllit oder Phengitschiefer. Hauptgemengteile sind Hellglimmer, Quarz und Chlorit und als Nebengemengteile treten detritärer Alkalifeldspat und eisenschüssiges Karbonat auf. Letzteres ist oftmals für die rostige Verwitterung des Alpinen Verrucano verantwortlich. Rutil tritt immer akzessorisch auf. Seltener finden sich auch Ilmenit, Zirkon, Apatit und Turmalin. Neben den Metapeliten sind auch Metakonglomerate häufig. Sie treten als Quarzite, quarzitische Schiefer, Quarzolite aus Quarzmobilisatgängen oder helle feldspatreiche Gneise auf. Die rote Färbung mancher Quarzgerölle lässt noch auf die ursprüngliche rote Farbe des juvenilen Sediments rückschließen (Schuster & Ilickovic 2015).

### III) Semmeringquarzit (Untertrias):

**Lithostratigraphie**

In den liegenden Anteilen des Semmeringquarzites finden sich quarzreiche Metabrekzien und Metakonglomerate (Cornelius 1952, Faupl 1970a). Diese Konglomerate kommen vermehrt im Fischbacher Fenster und im Pfaffenzug vor (Kirchmayer 1960). Die Komponenten bestehen hauptsächlich aus weißen bzw. rosa bis violett gefärbten gut gerundeten Quarzgeröllen mit

Korngrößen bis zu 3 cm. Die schwarzen Komponenten dürften Lydite sein, wobei Vetters (1970) gezeigt hat, dass es sich, zumindest bei einigen, um Turmaline handelt. Die Matrix der Metakonglomerate kann als feinkörnig serizitisch beschrieben werden und zeigt ein Krenulationsgefüge (crenulation cleavage), das sich vermutlich unter abkühlenden Bedingungen ausgebildet hat. Die Quarzkomponenten dürften hierbei spröde mittels Bruch reagiert haben (Schuster & Ilickovic 2015).

In Richtung des Hangenden nimmt die Korngröße ab und der Feldspatgehalt zu, sodass das Gestein als feldspatreiche Arkose angesprochen werden kann (Schuster & Ilickovic 2015). Die frühere starke tektonische Beanspruchung führt in Zusammenhang mit einer gravierenden Verwitterung zu einer Vergrusung der Arkose, was in einer kreideweißen Färbung des zu Sand verwitterten Materials resultiert. Mineralogisch erfolgt dabei eine Kaolinitisierung der Feldspäte (Cornelius 1952). Vereinzelt können in diesem Bereich ebenfalls weiß oder rosa gefärbte Quarzgerölle auftreten.

Weiter in Richtung Hangendem folgen parallel zur Hauptschieferung gebankte, typische Semmeringquarzite mit geringem Feldspatgehalt. Die Farben der Quarzite reichen von reinem Weiß bis hin zu Grün und zeigen häufig eine kleinräumige Wechsellagerung. Die Färbung korreliert direkt mit dem Hellglimmergehalt, der von weiß nach grün zunimmt. Die weißesten Varietäten bestehen überwiegend aus Quarz und verschwindend geringen Mengen an Serizit auf den Schieferungsflächen. Akzessorisch konnten Eisenoxide, Zirkon, Titanit, Rutil, Turmalin und Chlorit nachgewiesen werden (Schuster & Ilickovic 2015).

In den Semmeringquarziten sind generell keine Fossilfunde bekannt (Kirchmayer 1960).

Die Abschätzung der heutigen wahren Mächtigkeit des Semmeringquarzites erweist sich aufgrund der exzessiven tektonischen Geschichte als schwierig. Tollmann (1977) geht von einer Mächtigkeit von 200 m aus, wobei, sollten die Profile von Heritsch (1928) korrekt sein, eher eine Mächtigkeit von über 400 m anzunehmen ist.

**Genese**

Der Semmeringquarzit kann gemäß Faupl (1970a) und Tollmann (1977) zeitlich eindeutig in die untere Trias gestellt werden. Letzterer setzt ihn mit den Werfener Schichten des Südalpins gleich. Ab dem Perm wurde die variszisch gebildete Landoberfläche erodiert. Diese permisch erodierten Sedimente lagerten sich vor allem als flachmarine Strandsande der Tethys in der Untertrias ab. Die Annahme eines flachmarinen Faziesraumes stützen die Funde von Schräg- und Kreuzschichtungen bzw. Rippelmarkenstrukturen innerhalb des Semmeringquarzites (Kirchmayer 1961). Die starke SE-NW Transgression der Tethys führte zu einer Verzahnung der flachmarinen Sedimente mit Sedimenten der kontinentalen Rinnen und Becken (Krainer 1993). Die Diagenese und Metamorphose geht mit der eoalpidischen Gebirgsbildung einher. Der Metamorphosehöhepunkt liegt im Campan (Dallmeyer et al.

1998). Es kann von einer im Altmiozän beginnenden und bis heute andauernden Vergrusung der Quarzite ausgegangen werden (Weixelberger 1991).

**IV) Marmor, Dolomit, Rauwacke (Anisium–Ladinium):**

Der Kalkmarmor kommt in dunkelgrauer, weißer und rosa Färbung vor und kann präziser als Kalzitmarmor angesprochen werden. Im Aufschluss stellt er sich von dünnbankig bis hin zu massig dar. Häufig finden sich sekundär gebildete Glimmerbeläge auf den Schieferungsflächen. Teilweise zeigen die Kalkmarmore proximal zum kristallinen Basement ein grobkörnigeres Gefüge (Schuster & Ilickovic 2015). In den Kalkmarmoren sind Fossilfunde in Form von Crinoiden aus dem Anis bekannt und in den Dolomitmarmoren wurden Diploporen aus dem Ladin beschrieben (Tollmann 1977). Die Dolomitmarmore kommen in verschiedenen Grautönen vor und sind im Vergleich zum Kalkmarmor generell feinkörniger ausgebildet. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der bituminöse Geruch, der manchmal beim Aufschlagen des Gesteins auftritt. Die Rauwacken dürften sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit sekundär aus den Kalkmarmoren und Dolomiten gebildet haben (Schuster & Ilickovic 2015).

### 2.2.1 Vorau-Decke

Die Vorau-Decke stellt die liegendste Einheit des SSD dar und gliedert sich in zwei Teilbereiche. Bei Fischbach befindet sich das **Fischbacher Fenster** vollständig innerhalb der hangenden Stuhleck-Kirchberg-Decke (KWD) und östlich davon der **Waldbachkomplex** zwischen der Stuhleck-Kirchberg-Decke und der liegenden Wechsel-Decke (SWD). Die Vorau-Decke wurde in der späten Kreide gegen NE unter grünschieferfaziellen Bedingungen auf die Wechsel-Decke aufgeschoben, was auch interne nach N gerichtete Aufschiebungen belegen (Krondorfer et al. 2015). Während dieser Aufschiebung bildete die Vorau-Decke eine überkippte Antiklinale mit einem Kern aus Metapeliten und einer Überlagerung von Orthogneisen (teilw. Mikroklinaugengneise), Hornblendegneisen (teilw. mit Granat) und Amphiboliten, aus. Die Metapelite kommen in Form von phyllonitischen Glimmerschiefern mit Albitporphyroblasten und Paragneisen vor. Sowohl die Glimmerschiefer als auch die Paragneise sind teilweise granatführend (Flügel & Neubauer 1984). Die vermutlich variszische Metamorphose der kristallinen Einheiten erreichte Bedingungen der oberen Amphibolitfazies, wobei lokal Anatexis nachgewiesen wurde (Faupl 1970b). Bei der retrograden eoalpidischen Metamorphose wurden Teile der Hornblendegneise und Amphibolite in Grünschiefer umgewandelt (Schuster & Ilickovic 2015).

**Waldbachkomplex**

Das kristalline Basement bei Waldbach wird als Waldbachkomplex bezeichnet. Ihm lagern permotriassische Metasedimente und permische Metavulkanite transgressiv auf (Faupl 1970b). Der

gesamte Komplex erstreckt sich in NW-SE Richtung zwischen Rettenegg und Grafendorf bei Hartberg über eine Länge von rund 25 km und erreicht eine Breite von bis zu 13 km. Die Metasedimente und Metavulkanite zwischen Waldbach und Rettenegg am nördlichen W-Rand des Komplexes erreichen eine Länge von ca. 10 km und eine maximale Breite von ca. 2 km. Die nördliche Abgrenzung bei Rettenegg wird seit der Arbeitstagung 2015 in Frage gestellt (Schuster & Ilickovic 2015). Auf die bisherige Abgrenzung durch einen Karbonatzug der Wechsel-Decke (SWD) bei Rettenegg, folgen in nördlicher Richtung wieder Semmeringquarzite, die bis dato zur Wechsel-Decke gezählt wurden. Sollten diese aber Teil der Vorau-Decke sein, würde das N-Ende 6 km weiter nördlich am Pfaffensattel liegen (Abbildung 8) (Schuster & Ilickovic 2015). Vor allem die Tatsache, dass die Metakonglomerate des Semmerinquarzites im Fischbacher Fenster petrographisch ident mit jenen des Pfaffensattels sind, stützt eine Einordnung innerhalb der Vorau-Decke (Kirchmayer 1960).

**Fischbacher Fenster**

Das Fischbacher Fenster erstreckt sich von Falkenstein bis nach Piregg mit einer N-S Ausdehnung von ca. 7,5 km und einer maximalen Breite von ca. 4 km. Dieses Fenster des SSD liegt vollständig unter der tektonisch hangenden Stuhleck-Kirchberg-Decke des KWD. Im Gegensatz zum Bereich bei Waldbach ist im Fischbacher Fenster nur die permomesozoische Auflage aufgeschlossen, die im Fenster größtenteils aus Semmeringquarzit besteht. Weiters treten Metaquarzporphyr und im nördlichen bzw. nordwestlichen Randbereich Karbonate auf (Abbildung 8). Nennenswerte Reste der neogenen Sedimentauflage befinden sich heute zwischen den Gipfeln des Reithkogels und des Mittleren Waldriegels (Matura & Schuster 2014, Schuster & Ilickovic 2015).

Eine Ar-Ar Altersdatierung von Hellglimmern aus dem Semmeringquarzit ergab ein Alter von 82 Ma, welches vermutlich dem eoalpidischen Metamorphosehöhepunkt des Semmeringquarzites entspricht und somit als Kristallisationsalter interpretiert werden kann (Dallmeyer et al. 1998, Schuster & Ilickovic 2015).

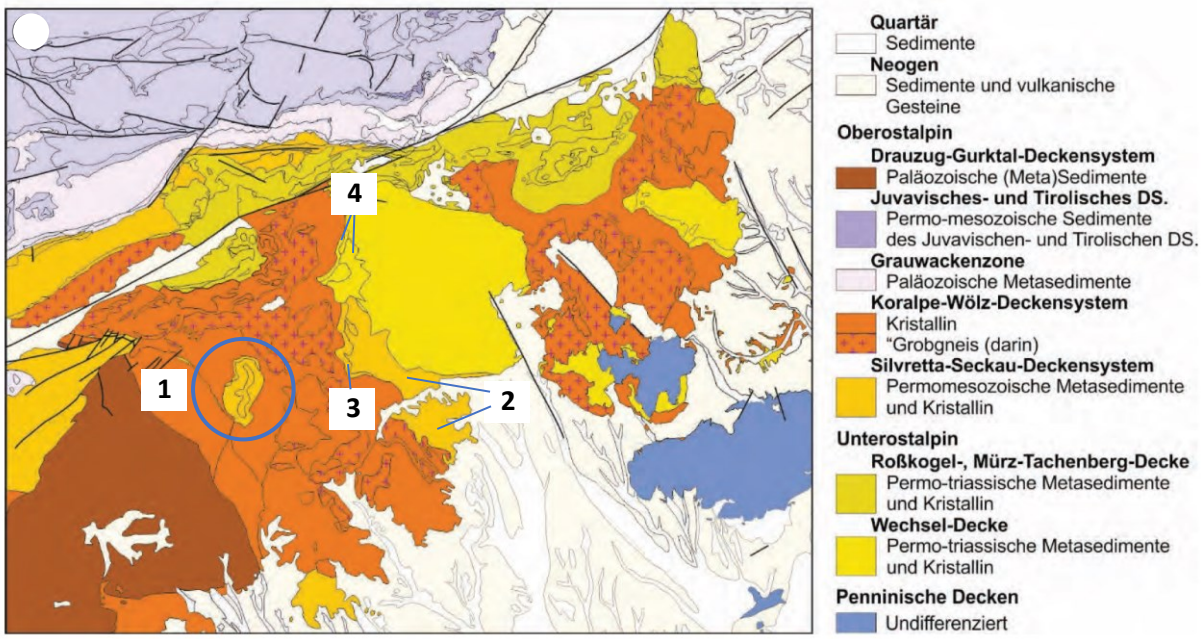


*Abbildung 8: Die tektonischen Einheiten am Ostrand der Ostalpen gemäß Schmid et al. (2004) und Froitzheim et al. (2008). Die Vorau-Decke setzt sich aus der permomesozoischen Bedeckung im Fischbacher Fenster (1), dem Kristallin des Waldbachkomplexes (2) und der ihm auflagernden permomesozoischen Bedeckung zusammen (3). Der Bereich der Wechsel-Decke nördlich des Waldbachkomplexes dürfte wahrscheinlich Teil der Vorau-Decke sein (4) (modifiziert nach Schuster & Ilickovic 2015).*

Im Norden schließt eine WSW-ENE streichende Störung an den Rahmen des Fischbacher Fensters an. In dieser mehrere Meter mächtigen Kataklasezone wurden triassische Karbonate aus dem Fischbacher Fenster einige Kilometer nach ENE verschleppt. Obwohl aus den Kataklasiten keine Schersinnindikatoren abgeleitet werden können, kann nach Analyse des Kartenbildes von einem sinistralen Versatz ausgegangen werden. Da sich im Süden des Fensters mit der Anger-Piregg-Störung eine korrespondierende Störung mit Kataklasiten befindet, kann davon ausgegangen werden, dass sich durch Interaktion dieser beiden Störungen das Fischbacher Fenster geöffnet hat. Sollte dies der Falls sein, muss die Bewegung abschiebend sinistral gegen Westen stattgefunden haben (Abbildung 9). Die Freilegung des Fensters dürfte eine postkretazische mehrphasige Entwicklungsgeschichte haben (Schuster & Ilickovic 2015).

Das Gebiet im Nahbereich des Steinbruches Friesenbichler ist durch eine großräumige Antiklinale gekennzeichnet (Heritsch 1928). Der Steinbruch liegt im flach nach Osten einfallenden Schenkel dieser Falte.

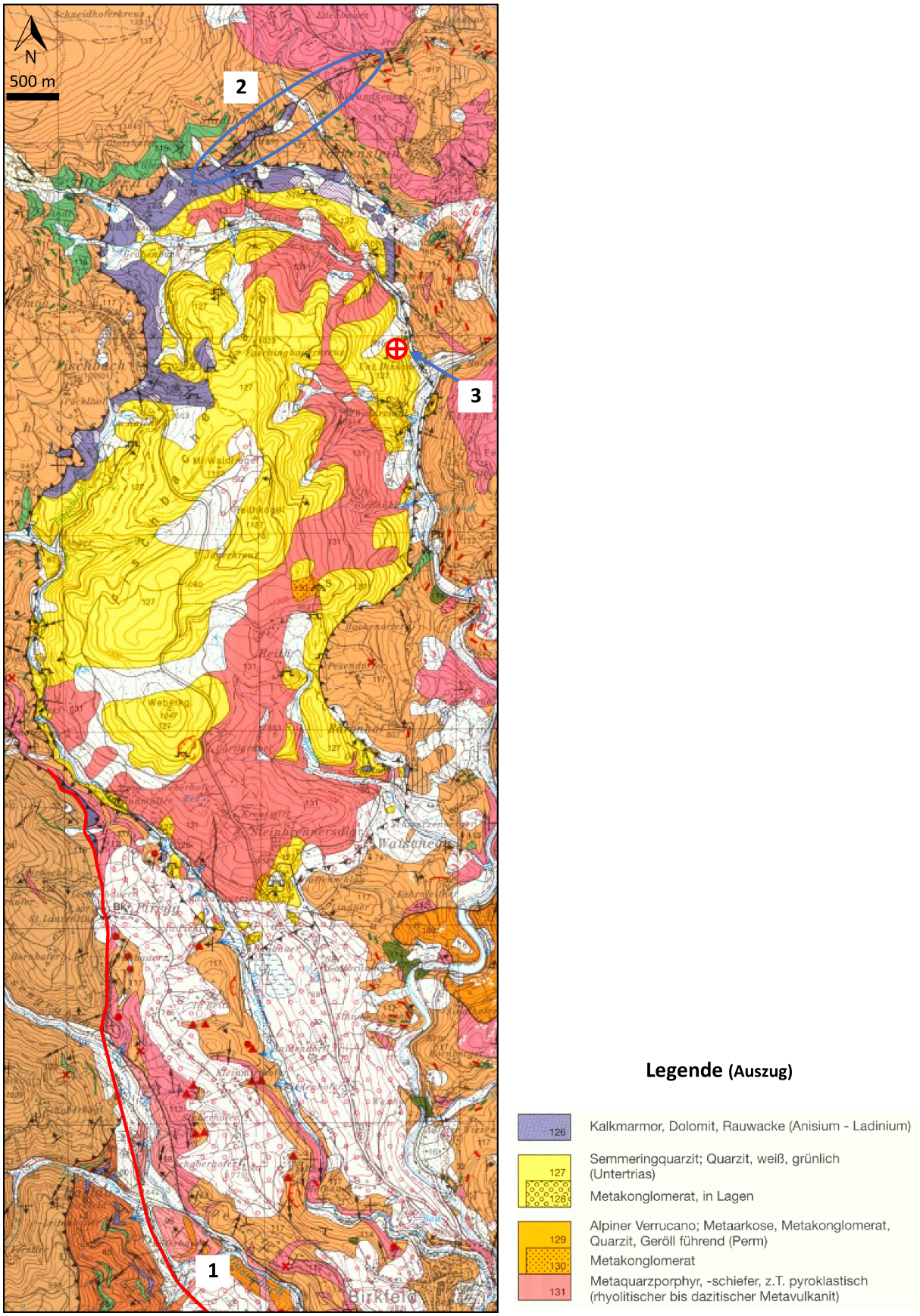


*Abbildung 9: Geologische Detailkarte (Auszug aus dem Kartenblatt 135 Birkfeld) des Fischbacher Fensters und den umgebenden Störungen – Anger-Piregg-Störung (1) und der Störung am Nordrand des Fischbacher Fensters mit verschleppten Karbonaten (2). Der Stbr. Friesenbichler befindet sich am NE-Rand des Fensters (3) mit Abbaurichtung nach SW (modifiziert nach Matura & Schuster 2014).*

## 2.3 Koralpe-Wölz-Deckensystem

Das KWD stellt die geologisch höchste Einheit im betrachteten Gebiet dar und wird hier durch die Stuhleck-Kirchberg-, Rabenwald-, Exenberg-, Radegund- und Waxenegg-Decke aufgebaut. Alle Einheiten sind durch das Fehlen der permomesozoischen Metasedimente und Metavulkanite gekennzeichnet (Abbildung 7). Die kristallinen Einheiten bestehen hauptsächlich aus permischen Magmatiten. Die maßgeblichen Metamorphosen fanden im Perm und in der Kreide (eoalpidisch) statt und erreichten Bedingungen der oberen Grünschieferfazies oder der Amphibolitfazies (Schuster & Ilickovic 2015).

# 3 Methodik

## 3.1 Geländearbeit

Im Zuge der Geländearbeit wurde nach einer Erstbefahrung des Stbr. Friesenbichler im Frühjahr 2023, eine Detailkartierung im Maßstab 1 : 1 000 im Sommer 2023 durchgeführt. Zweck dieser Kartierung war einerseits einen Überblick über die lokal im Semmeringquarzit vorkommenden Lithologien zu bekommen und andererseits die Art des Vorkommens der hochreinen Quarzite genau zu beschreiben und aufzunehmen. Zusätzlich zur Kartierung der Lithologien wurden Störungen, Schieferung und Klüftung aufgenommen. Raumbezogene Daten wurden mit dem Programm Locus GIS der Firma Asamm Software mit einer Genauigkeit von ±3 m bestimmt. Die geologische Karte wurde mit QGIS Version 3.32 „Lima“ erstellt.

Die korrekte und detaillierte Kartierung diente als Basis für die darauffolgende repräsentative Probennahme. Es wurden insgesamt 43 Proben aus 29 Punkten genommen, um alle Lithologien abzudecken, wobei das Hauptaugenmerk auf den hochreinen Varietäten lag. Auf Grund des kleinteiligen Aufbaus der hochreinen Quarzite wurde von einer Rasterbeprobung abgesehen. Für die Probengewinnung war ein Geologenhammer ausreichend.

### 3.1.1 Portable LIBS

Direkt nach der Probennahme wurden die Handstücke im Gelände mittels eines portablen SciAps Z-903 LIBS-Gerätes geochemisch analysiert. Hierfür ist eine möglichst glatte, staubfreie und trockene Oberfläche der Probe zu gewährleisten. Bei der nur wenige Sekunden dauernden Messung wird ein 140x140 µm großer Bereich mit 42 Einzelspots abgerastert. Die Kalibration wurde am Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre durchgeführt. Für die Kalibration wurden RFA-Daten von Quarz-Pulverpresslingen (Semmeringquarzit, „Rittiser“-Quarzit, $SiO_2$-Aufbereitungsrückstände, Quarzknauer aus dem Rabenwald), die im Zuge der Prospektionsarbeit innerhalb des MRI_Quarz Projektes gewonnen wurden, herangezogen. Die Messwerte aus der RFA wurden bei den LIBS-Messungen der jeweiligen Pulverpresslinge als Sollwert für die Kalibration herangezogen. Somit sind die LIBS-Analyseergebnisse als semiquantitativ zu bewerten. Im Zuge dieser Arbeit werden die im Gelände gewonnenen LIBS-Ergebnisse mit einer im Labor an den identischen Proben durchgeführten RFA verglichen und interpretiert.

## 3.2 Multielektroden-Widerstandsmessung

Im Herbst 2023 wurde eine Multielektroden-Widerstandsmessung im Stbr. Friesenbichler durchgeführt. Es wurde ein Profillinie auf ET 5 gemessen. Die Länge der Profillinien betrug 184 m mit einem Elektrodenabstand von 2 m (Messkonfiguration: Gradient+Dipol Dipol). Die Stromstärke des

eingebrachten elektrischen Stroms lag im niedrigen 1 bis 2-stelligen mA-Bereich. Als Messgerät wurde die Eigenentwicklung „GEOMON4D-IP“ von GeoSphere Austria verwendet. Die Inversionsrechnungen wurden mit den Programmen „Res2DInv“ und „EarthImager“ ebenfalls von GeoSphere Austria durchgeführt. Ziel der Messungen ist es, die geophysikalische Abgrenzbarkeit von hochreinen Quarziten zu anderen Lithologien zu evaluieren, um eventuell geoelektrische Messungen für zukünftige Prospektionen auf die hochreinen Varietäten zu nutzen.

## 3.3 RFA-WDS

Zu Beginn der Probenaufbereitung wurden die Proben mit einem Handfäustel in Stücke mit max. 0,5 cm Kantenlänge aufgeschlagen. Um Fe-Kontaminationen zu vermeiden, wurden die Handstücke jeweils innerhalb von zwei unbenutzten Probenbeuteln aus Kunststoff aufgeschlagen. Danach wurde das Probenmaterial in einer Retsch „PM 100“ WC(+Co)-Kugelmühle trocken zehn Minuten lang analysefein aufgemahlen. Anschließend wurden die Proben ca. 24 h im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Zwischen den folgenden Einwaagen wurden die Proben im Exsikkator aufbewahrt. Alle Einwaagen erfolgten mit einer Genauigkeit von ±0,0005 g.

Im nächsten Schritt wurden ca. 2,5 g Material in Keramiktiegel eingebracht, gewogen und dann im Muffelofen 3 h lang bei 1050 °C geglüht um daraufhin den Glühverlust (LOI) durch erneutes Wiegen zu bestimmen. Vor dem Einwiegen in den Platin-Schmelztiegel wurden die Proben in einem Achat-Mörser aufgelockert. Für die Herstellung der Schmelztabletten wurden in einen Platintiegel 8 g Flussmittel (66,67 % Lithiumtetraborat, 32,83 % Lithiummetaborat, 0,50 % Lithiumiodid) der Firma Malvern Panalytical und 1 g geglühtes Probenpulver eingewogen, mit einem Glasstab homogenisiert und anschließend im Schmelzofen „Eagon 2“ der Firma Malvern Panalytical bei 1200 °C aufgeschmolzen. Die gegossenen und abgekühlten Schmelztabletten wurden am Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre der Montanuniversität Leoben wellenlängendispersiv mit dem RFA-Spektrometer „Axios“ der Firma Malvern Panalytical analysiert.

Die erste RFA-Kalibration für die Messungen wurde mit dem Standard GeoBT der Int. Ass. of Geoanalysts durchgeführt. Da dieser nur für geringe $SiO_2$-Gehalte geeignet ist, wurden die $SiO_2$-Werte mit der Kalibration WROXI (Metallstandards) der Firma Malvern Panalytical korrigiert. Ebenso wurden die Fe-Gehalte nach diesem Standard ausgewertet. Ringversuche zwischen der Firma Stoelzle Oberglas GmbH und dem Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre haben gezeigt, dass die mit dieser Kombination der Standards gewonnenen Werte, exakt den Messungen der Firma Stoelzle Oberglas GmbH entsprechen.

Zusätzlich zur RFA wurde eine Probe am Lehrstuhl für Erdölgeologie der Montanuniversität Leoben mittels Röntgendiffraktometer analysiert.

## 3.4 Mikroskopie

Insgesamt wurden 16 polierte Dünnschliffe und ein polierter Dickschliff für eine mineralogische Bestimmung angefertigt. An den Dünnschliffen wurden jeweils mindestens 450 Einzelpunkte bei zehnfacher Vergrößerung und gekreuzten Polarisatoren ausgezählt, um einen Modalbestand zu ermitteln. Die Unterscheidung zu Quarz/Feldspat erwies sich mikroskopisch als schwierig und wurde deshalb am REM durchgeführt. Die Bestimmung der Akzessorien wurde zusätzlich zur optischen Mikroskopie am REM verrichtet.

Die Schliffe wurden im Durch- und Auflicht an einem Olympus BX40 Polarisationsmikroskop untersucht. Die Aufnahme von Fotos erfolgte mit einem Digitalmikroskop des Typs Keyence VHX-6000.

## 3.5 REM-EDS

Für die Bestimmung der Akzessorien und des Feldspatgehaltes bzw. der Art der Feldspäte, wurden energiedispersive Messungen am Rasterelektronenmikroskop durchgeführt (Tabelle 2). Vor den Messungen wurden die Schliffe mit Kohlenstoff bedampft.

| | |
|---|---|
| REM-EDS | Zeiss EVO MA 10 |
| Detektor | Bruker Nano XFlash 430-M |
| Messspannung | 15 kV |
| Messabstand | 8,5-12 mm |
| Software | Bruker Esprit Standalone |

*Tabelle 2: REM-EDS Messparameter und Software*

## 3.6 Statistik

Die Statistikdiagramme wurden mit Microsoft Excel erstellt. Werte unter der Nachweisgrenze wurden für die Medianerstellung mit der Hälfte der Nachweisgrenze angenommen.

### 3.6.1 Bland-Altman-Plot

Für den Methodenvergleich wird ein Bland-Altman-Plot herangezogen (Bland & Altman 1986). Dieser Plot erlaubt einen graphischen vergleich zweier Messmethoden. Im Fall dieser Arbeit werden die Ergebnisse eines portablen LIBS-Gerätes ($S_1$) und des „Goldstandards“ einer Labor-RFA ($S_2$) miteinander verglichen. Da mit dem LIBS-Gerät nur einzelne Bereiche am Handstück gemessen werden können, erfolgt der Vergleich mit der RFA nur an lithologisch reinsortigen Proben, um quantitative Aussagen treffen zu können. Im Punktdiagramm eines Bland-Altman-Plots werden die Mittelwerte zweier Messungen (x-Achse) gegen die Differenzen der beiden Messungen (y-Achse) von den unterschiedlichen Messmethoden in einem kartesischen Koordinatensystem aufgetragen. Die Formel der einzelnen Punkte lautet somit je Messung:

$$S(x,y) = \left( \frac{S_1 + S_2}{2}, (S_1 - S_2) \right)$$

Für die Interpretation werden zusätzlich der Mittelwert der Differenz und der Mittelwert der Differenz ±1,96-mal der Standardabweichung der Differenz als drei Linien dargestellt.

Bei der optischen Evaluierung des Diagrammes kann auf einen Blick die Schwankungsbreite der Abweichungen festgemacht werden, und ob einzelne Werte außerhalb der akzeptablen Abweichung liegen. Liegen die Differenzen der Mittelwerte generell über oder unter Null, kann man erkennen, ob eine Messmethode generell zu hohe oder zu tiefe Werte misst. Sollte die Abweichung der Methoden nicht von der Höhe der Messwerte abhängen, erstreckt sich die Punktwolke parallel zur x-Achse. Wenn die Streuung der Abweichungen direkt mit der Höhe der Werte korreliert, ist eine Aufweitung der Punktwolke in die eine oder andere Richtung erkennbar.

# 4 Ergebnisse

## 4.1 Geologisch-lagerstättenkundliche Beschreibung

### 4.1.1 Lithologien

Die Lagerstätte ist aus Lithologien der permotriassischen Metasedimente des Semmeringquarzites aufgebaut. Die Abgrenzung der Lithologien erfolgte im Gelände nach Korngröße, optischem Farbeindruck und mineralischer Vergesellschaftung. Korngrößen über 2 mm wurden den Konglomeraten zugeordnet und darunter den Metasandsteinen. In den weißen und grünen Quarziten sind keine Körner makroskopisch erkennbar. Hier wurde die Unterscheidung auf Grund des geringeren Glimmergehaltes der weißen Quarzite getroffen. Die glasigen Quarzite sind durch die glasige Matrix zu erkennen. Zusätzlich zum Tagebau wurden die Nahbereiche kartiert. Auf Grund der schlechten Aufschlusssituation nördlich des Abbaus, können zur Geologie in diesem Bereich keine gesicherten Aussagen getroffen werden. Die Ergebnisse der Detailkartierung im Maßstab 1 : 1 000 sind in Abbildung 10 dargestellt (Koordinatensystem: EPSG:4326 - WGS 84). Die transparent dargestellten Bereiche wurden anhand der gewonnenen geologischen Erkenntnisse interpretiert.

Da eine liegend/hangend Unterscheidung auf Grund der kleinräumigen Einschaltungen unterschiedlicher Lithologien als wenig sinnhaft erscheint, erfolgt die Beschreibung nach der Qualität als Quarz-Rohmaterial, beginnend mit der minderwertigsten.

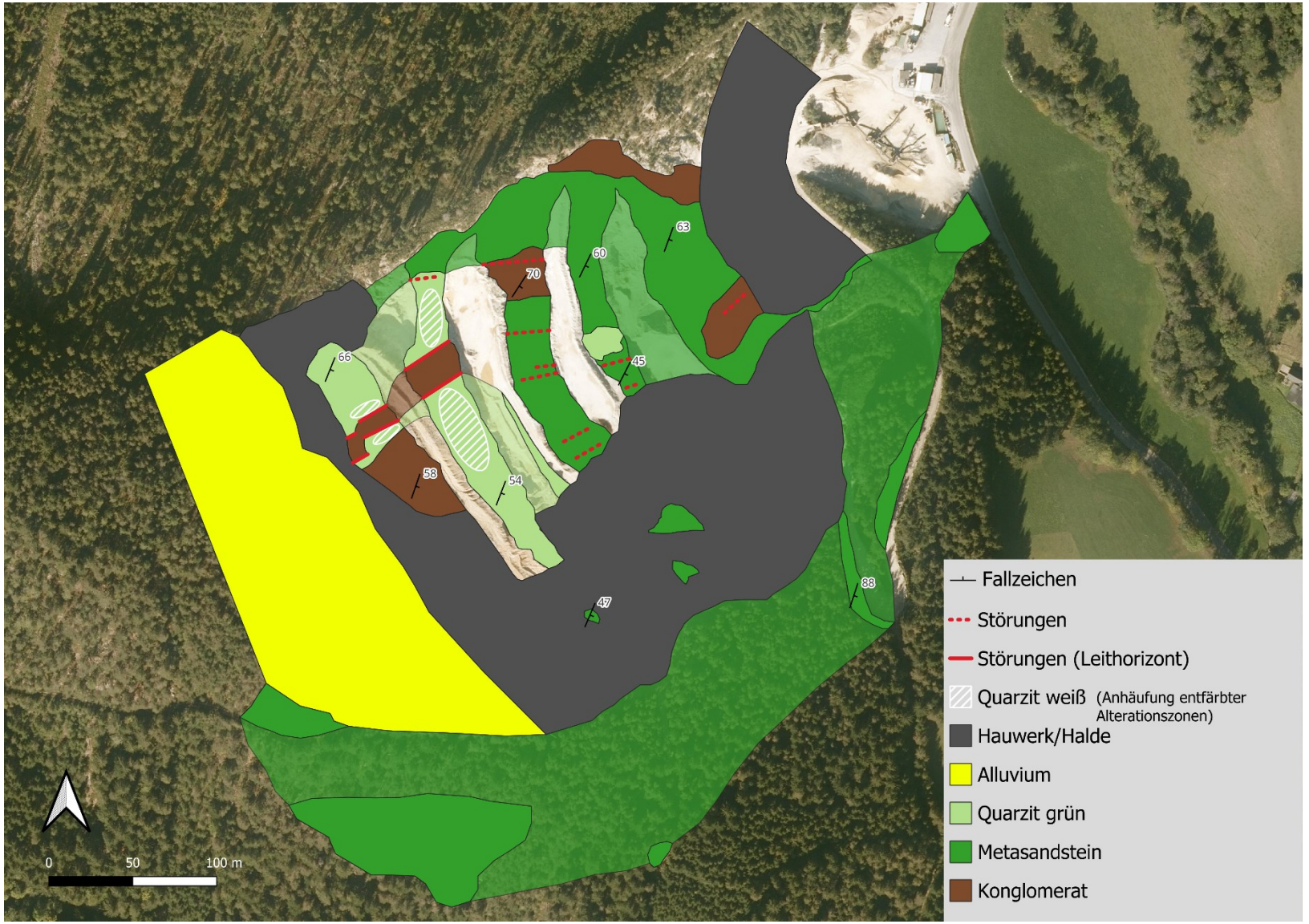


*Abbildung 10: Geologische Karte des Stbr. Friesenbichler. Ergebnisse der Detailkartierung auf Basis des Abbaufortschrittes im Sommer 2023.*

#### *4.1.1.1 Meta-Quarzkonglomerat*

Im Steinbruch finden sich an mehreren Stellen konglomeratische Einschaltungen (in den Metasandsteinen und grünen Quarziten) mit Mächtigkeiten zwischen 5 und 60 m. Die generelle Farbe im Handstück reicht von hell- bis dunkelgrün. Die Komponenten in der feinkörnigen Matrix (Muskovit, Quarz, teilw. Serizit) sind mäßig bis gut gerundet und erreichen maximale Größen von 6 cm. Diese Gerölle sind reine Quarze mit Färbungen von reinweiß bis hin zu rosa/hellviolett (Abbildung 11). Zusätzlich treten vereinzelt schwarze Gesteinsbruchstücke mit Längen bis zu 5 cm auf. Schörl konnte als Hauptmineral dieser Gesteinsbruchstücke identifiziert werden. Als Hauptgefügemerkmal ist eine Schieferung mit einem Schieferungflächenabstand von 1-3 mm deutlich erkennbar. Die konglomeratischen Einschaltungen liegen konkordant zum generellen Einfallen.

Auf den Etagen 4, 5 und 6 ist das Konglomerat beidseitig durch konkordante Störungen begrenzt und stellt einen Leithorizont dar. Auffallend ist die stärkere Schieferung und der dunklere Farbeindruck des Konglomerates in diesem Störungsbereich. Dieser wird durch den höheren Glimmergehalt in der Matrix und eine tiefgreifende rostige Verwitterung bedingt. Im Vergleich dazu zeigen die übrigen Bereiche, die nicht mit begrenzenden Störungen assoziiert sind, keine rostige Verwitterung.

Der SE-Bereich des Konglomerates auf ET 5 ist inhomogen aufgebaut und weist geringmächtige Lagen (<1 m) von Metasandstein und grünem Quarzit auf.

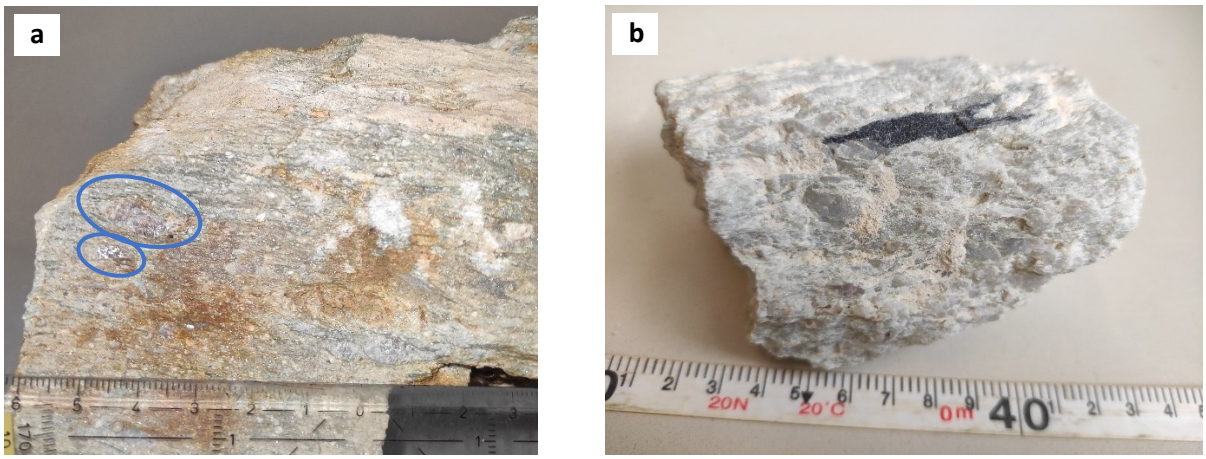


*Abbildung 11: a) Meta-Quarzkonglomerat aus dem Störungsbereich ET 5 mit zerbrochenen rosa Quarzgeröllen (blaue Ellipsen). Probe MZ-QZ-7. b) Meta-Quarzkonglomerat aus dem nördlichsten Bereich ET 1. Probe MZ-QZ-27.*

Am N-Ende der ET 1 und 2 befindet sich ein ca. 10 m breiter Bereich mit vollständig vergrustem reinweißem sandigem Gestein mit minimaler Kohäsion (Abbildung 12). Vollständig verwittert überlagert dieses Material als kohäsionsloser Sand teilweise das Konglomerat in diesem Bereich.

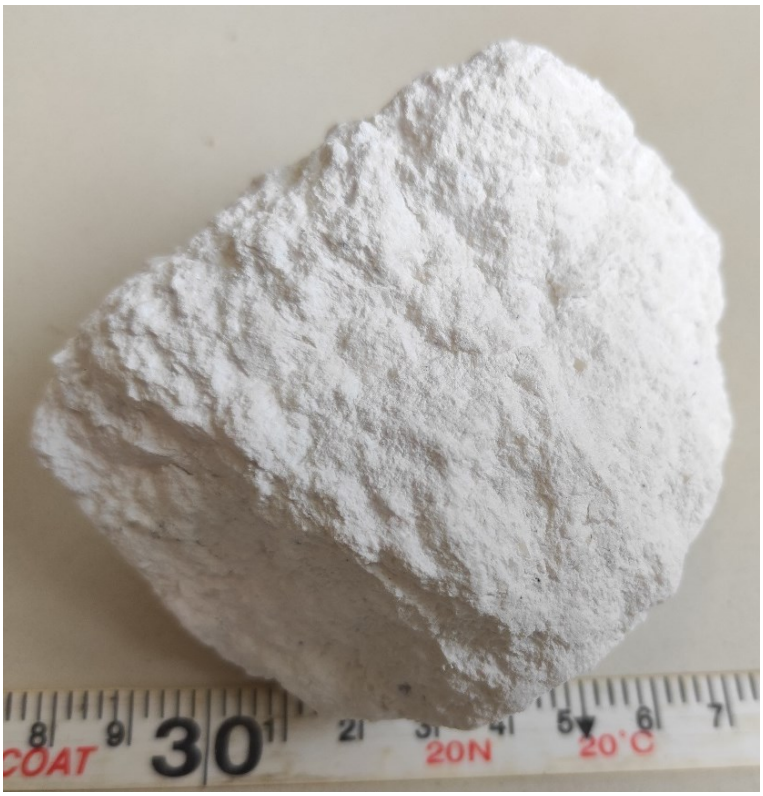


*Abbildung 12: Vollständig vergrustes blütenweißes Material. Probe MZ-QZ-19.*

#### *4.1.1.2 Metasandstein*

Der grundsätzlich kompakte Metasandstein baut den Großteil des Abbaus und der umliegenden Bereiche auf. Er tritt teilweise massig und teilweise mit einer leichten Schieferung im cm-Bereich auf. Als Unterscheidungsmerkmal zu den anderen Lithologien kann die Korngröße der Metasandsteine von 2 mm bis hin zu gerade noch im Handstück erkennbaren einzelnen Körnern herangezogen werden. Die Hauptgemengteile sind Quarz und Hellglimmer. Nebengemengteile und Akzessorien sind im Handstück nur selten erkennbar. Mit höherem Quarzgehalt zeigen die Metasandsteine ein zuckerkörniges Gefüge (Abbildung 13). Die Farben reichen von einem leichten Dunkelgrün bis hin zu grau-grün. In einigen Fällen wittern die Metasandsteine oberflächlich leicht rostig an. Auf den Kluftflächen sind häufig Mn-Dendriten zu finden.

Die zur Schieferung konkordante Bankung bewegt sich von 0,5 m bis zum cm-Bereich. In Bereichen der engständigeren Bankung ist ein grobplattiger Bruch der Metasandsteine erkennbar (Abbildung 14).

*Abbildung 13: Metasandstein im Handstück. ET 0. Probe MZ-QZ-19.*

*Abbildung 14: Bruchwand Metasandstein ET 1. Enger werdende Bankung vom Hangenden ins Liegende. Blick in Richtung SW parallel zum generellen Streichen. Blick auf geringmächtige laterale Alterationszonen um Kluftschar 1.*

Zusätzlich zu unverfüllten tektonischen Klüften, können im Metasandstein zwei Arten von Klüften unterschieden werden. Einerseits treten mit Quarz verheilte und zum Metasandstein scharf abgegrenzte Klüfte einer ersten Generation auf. Die maximale Breite beträgt 3 cm. Die Quarze darin zeigen eine höhere Kompetenz als das Nebengestein. Zum anderen treten jüngere Klüfte mit beidseitigen diffus ausgebildeten Alterationszonen auf. Die Breite der Alteration beträgt beidseitig gesamt maximal 20 cm und hat ein Ausbleichen der Metasandsteine zur Folge. Die ausgebleichten Bereiche zeigen eine geringere Kompetenz und brechen quaderförmig im cm-Bereich (Abbildung 15). Der Farbeindruck der Bruchwand ist auf Grund der helleren Alterationen generell heller bei Blickrichtung parallel zum Streichen und somit normal auf eine Kluftrichtung (vgl. Abbildung 14 u. Abbildung 15). Der Zentralbereich dieser Klüfte dürfte ursprünglich, anschließend an die Alteration, mit glasigem Quarz im mm- cm-Bereich verheilt gewesen sein, jedoch ist reliktisch nur mehr vollständig vergrustes Material in situ zu sehen. Anders als in den grünen Quarziten lassen sich in den Metasandsteinen keine Alterationszonen in den Flächen parallel zur Schieferung finden. Am N-Ende der ET 1 und 2 befindet sich ein ca. 10 m breiter Bereich mit vollständig vergrustem reinweißem sandigem Lockergestein minimaler Kohäsion.

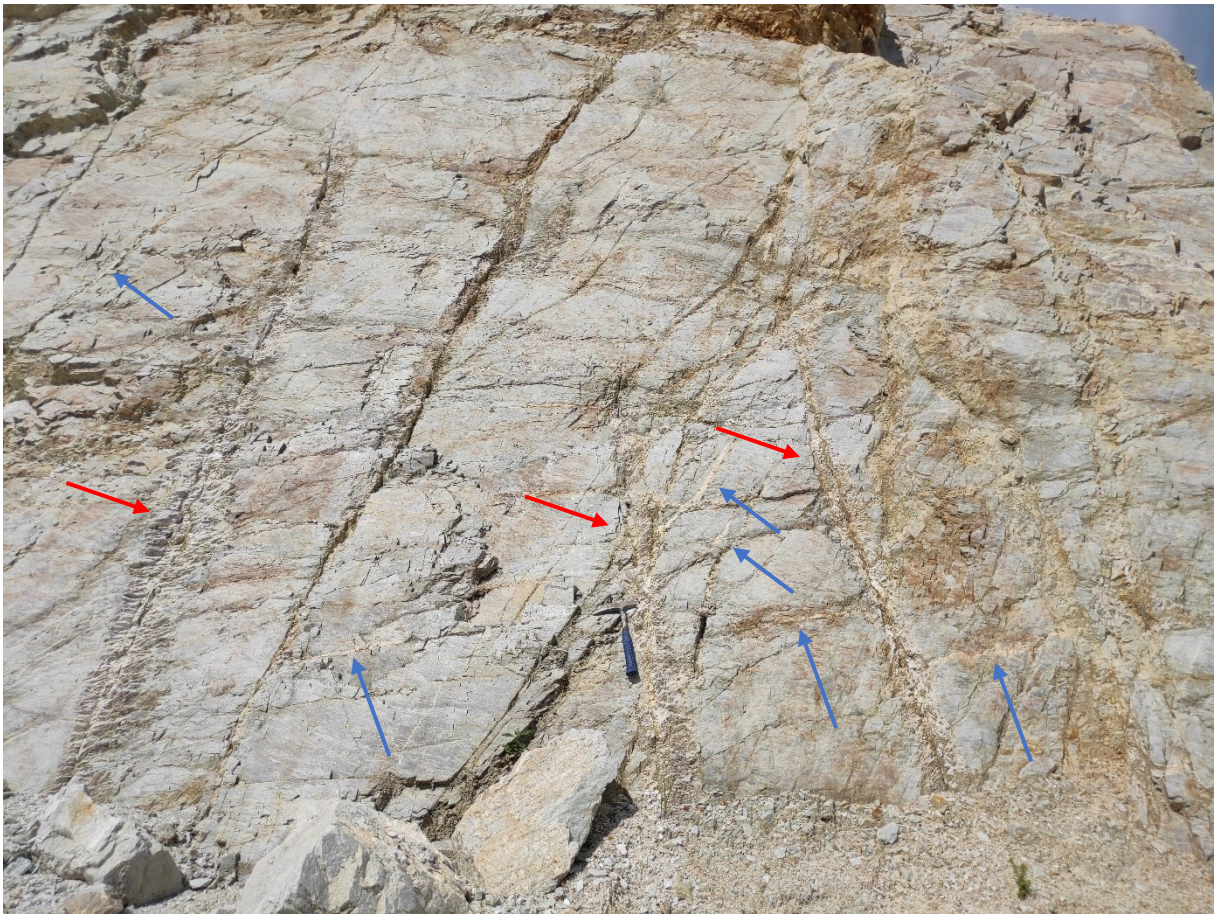

*Abbildung 15: Bruchwand Metasandstein ET 1. Kluftarten im Metasandstein: a) Scharf abgegrenzt und mit Quarz verheilt (blaue Pfeile), b) Klüfte mit bis zu 20 cm breiten Alterationszonen (rote Pfeile). Blickrichtung normal zum Streichen in Richtung der Kluftschar 1.*

Im gesamten Abbau konnte an nur einer Stelle im Zentralbereich des Metasandsteins auf ET 1 das Phänomen einer Glimmeranreicherung zwischen der ausgebleichten Zone und dem Nebengestein beobachtet werden (Abbildung 16).

*Abbildung 16: Kluft mit Glimmeranreicherung zwischen der ausgebleichten Zone und dem Metasandstein. Bruchwand ET 1.*

#### *4.1.1.3 Grüner Quarzit und hochreine Varietäten*

Der grüne Quarzit erscheint im Handstück massig in einem hellen weiß-grün bis grau-grün. Eine Schieferung ist im Handstück nur leicht erkennbar, wobei aber manchmal bereits makroskopisch eine Einregelung der Hellglimmer festzustellen ist. Im Aufschluss ist eine der Schieferungsrichtung entsprechende Schichtung im cm-Bereich deutlich erkennbar. Makroskopisch besteht der grüne Quarzit, ebenso wie der Metasandstein, aus Quarz und Hellglimmer. Der grüne Quarzit ist durch makroskopisch nicht mehr erkennbare Körner und dem geringeren Hellglimmergehalt abgrenzbar. Abgesehen von einem kleinen Bereich auf ET 2, grenzt er direkt an beide Seiten der Störungen des konglomeratischen Leithorizontes an. Der grüne Quarzit baut den Großteil von ET 4 und die nördlichen Bereiche von ET 5 und 6 auf. Der oftmals rostbraune Farbeindruck der Bruchwände stammt nicht von der Verwitterung der Quarzite, sondern von Einwaschungen aus den auflagernden Bodenhorizonten und deren Vegetation (Alluvium in Abbildung 10).

Der grüne Quarzit ist geprägt durch entfärbte Alterationszonen in beiden Hauptkluftrichtungen. Zusätzlich finden sich derartige Alterationszonen auch parallel einhergehend mit den Schieferungsflächen. Während die Mächtigkeiten der ausgebleichten Zonen in den Kluftrichtungen durchgehend unter 1 m liegen, erreichen sie konkordant zur Schieferung Mächtigkeiten von über 1 m. Darüber hinaus befinden sich auf ET 4 und 5 auf beiden Seiten der Störungen bis zu 6 m mächtige, direkt angrenzende Alterationszonen in den grünen Quarziten (Abbildung 17). Diese vier beschriebenen Zonen ausgebleichter Quarzite stellen die hochreinen Varietäten dar und werden fortan als weiße Quarzite angesprochen. Der Kontakt weißer/grüner Quarzit ist immer diffus ausgebildet (Abbildung 18). Häufig ist die Verheilung der Klüfte mit Quarz, der ein glasiges Gefüge zeigt, noch intakt. Dieser glasige Quarz ist in seiner Qualität als Rohmaterial noch über die weißen Varietäten zu stellen (Abbildung 19). Die Mächtigkeiten der Verheilungen reichen von wenigen mm bis zu 0,5 m. Ist die Verheilung nicht mehr intakt erscheint sie blütenweiß und vollständig vergrust (Abbildung 20).

*Abbildung 17: Anhäufung entfärbter Alterationszonen auf ET 5. Zusätzlich zu den Alterationen in Kluft- und Schieferungsrichtung, sieht man mehrere m mächtige Alterationsbereiche, die beidseitig direkt an die Störungen des konglomeratischen Leithorizontes angrenzen. Blickrichtung Süden.*

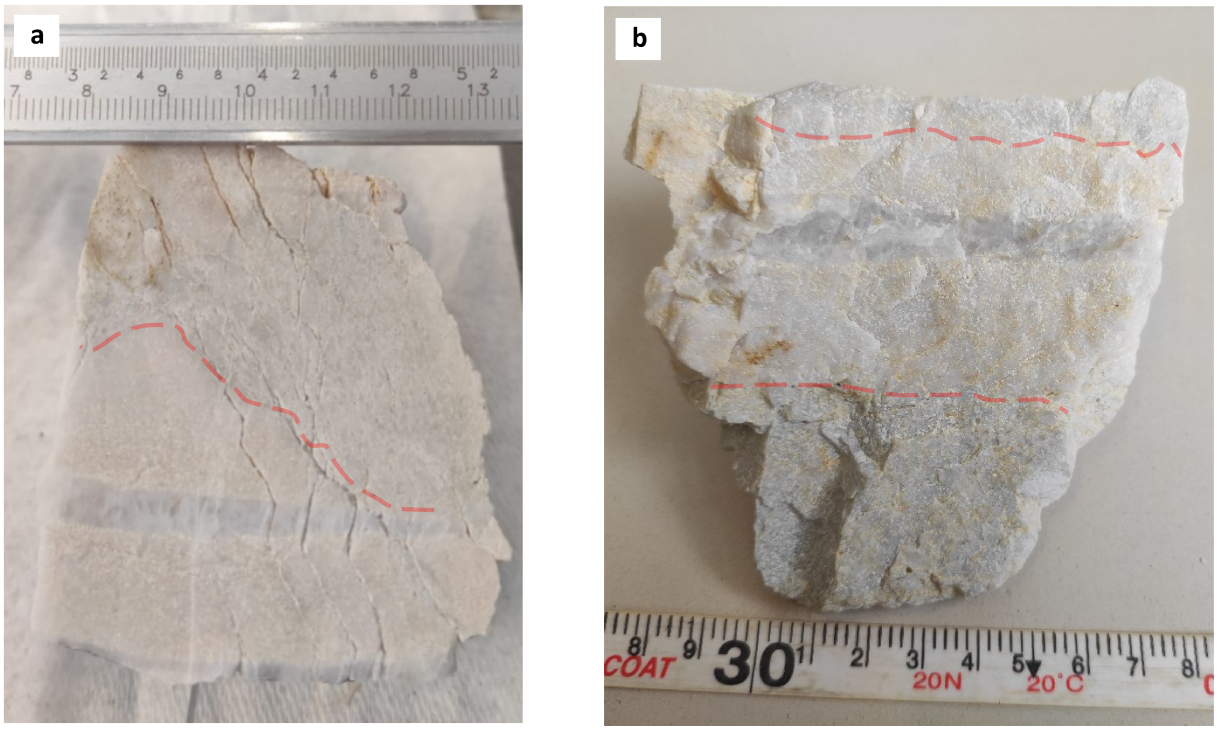


*Abbildung 18: Diffus ausgebildete entfärbte Alterationszonen mit noch vollständig vorhandener glasiger Verheilung im Handstück. Die Kontaktzone weiß/grün ist strichliert angedeutet. a) Probe MZ-QZ-8B. b) Probe MZ-QZ-4B*

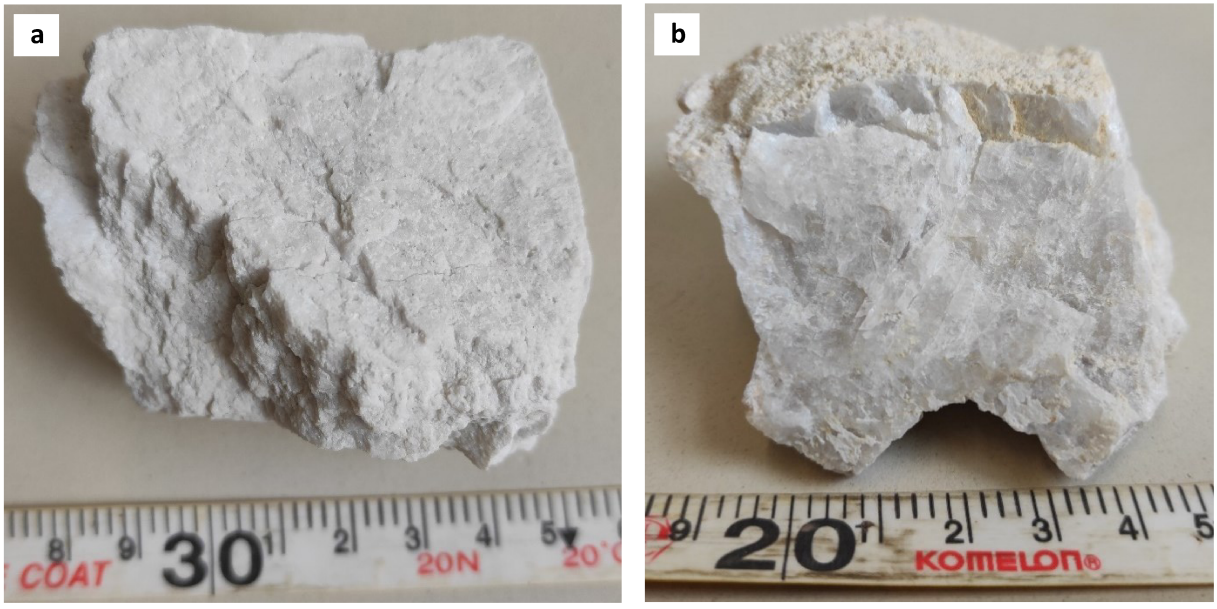


*Abbildung 19: Hochreine Quarzite im Handstück. a) Quarzit weiß Probe MZ-QZ-23A. b) Quarzit glasig Probe MZ-QZ-4B.*

*Abbildung 20: Kluft im grünen Quarzit auf ET 4. Der Alterationsbereich mit hochreinen weißen Quarziten erstreckt sich >1 m (blauer Pfeil). Die ehemals glasige Verheilung der Kluft ist vollständig vergrust (roter Pfeil).*

Die weißen Quarzite entsprechen in ihren Gefügemerkmalen, mit Ausnahme der Schieferung, den grünen Quarziten. Die weißen Quarzite zeigen im Handstück meist keine Schieferung auf Grund des sehr niedrigen Glimmergehaltes. Die Farbe ist reinweiß, was auch auf einen sehr niedrigen Glimmergehalt schließen lässt. Auffällig ist die schon im Gelände merkbare geringere Masse der weißen Quarzite. Dies dürfte der Ausbildung einer sekundären Porosität einhergehend mit der Alteration geschuldet sein. Die glasigen Quarzite der Kluftverheilungen erscheinen im Handstück weiß bis hellgrau. Die einzelnen Kristalle sind milchig bis leicht durchscheinend. Einzelne Quarz-kristalle erreichen Größen von bis zu 0,7 cm (Abbildung 25).

Da die hochreinen Varietäten nur in den oben genannten Zonen vorkommen, waren sie nicht als eigene Formation kartierbar. Es finden sich jedoch Bereiche in welchen diese Alterationen in den grünen Quarziten gehäuft vorkommen. Sie sind in der geologischen Karte des Tagebaus (Abbildung 10) auf den ET 4 und 5 als „Quarzit weiß“ zusammengefasst und ausgewiesen.

Im Drohnenbild entsprechen die hellsten Bereiche den grünen Quarziten (Abbildung 21). Man erkennt eindeutig den konglomeratischen Leithorizont. Die Anhäufungen hochreiner Quarzite sind megaskopisch hier im Bild nur an einer Stelle erkennbar. Im Liegenden der Störung auf ET 5 sind sie

von den grünen Quarziten durch den helleren Farbeindruck abgrenzbar. Weiters ist die nicht-rostige Verwitterung der weißen Quarzite erkennbar.

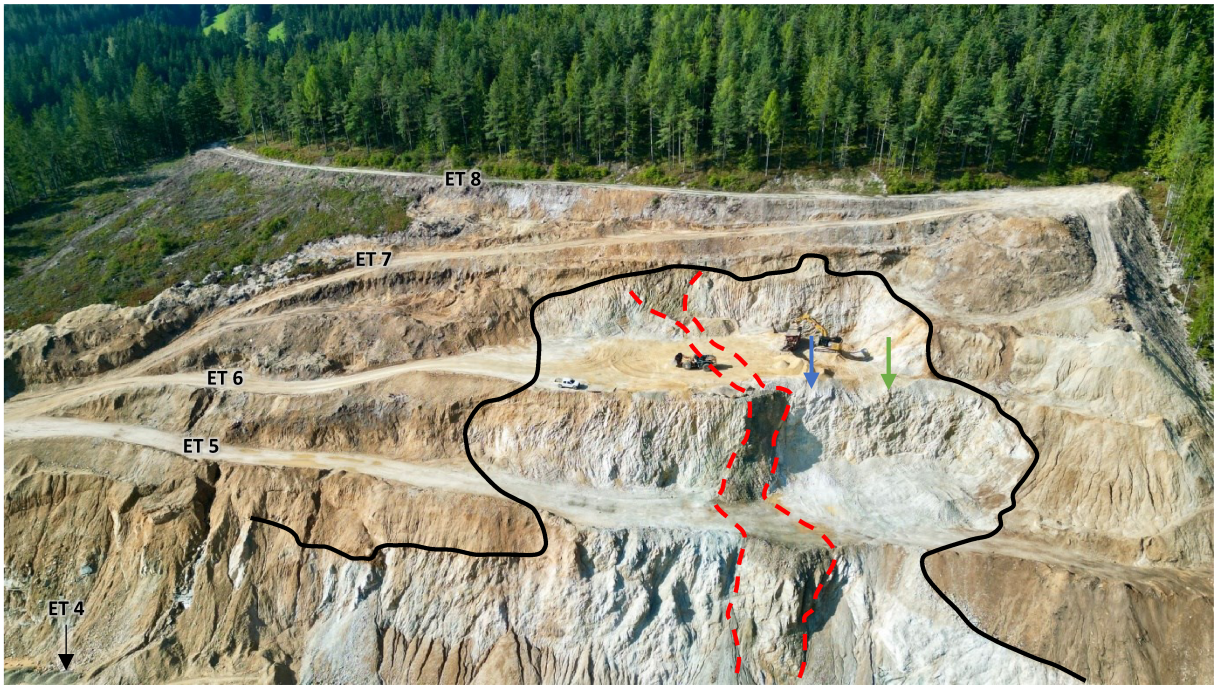


*Abbildung 21:Drohnenbild der ET 5-8 und des höheren Bereiches der ET 4. Generelles Schichteinfallen in Richtung des linken Bildrandes. Der konglomeratische Leithorizont (rot strichliert) und der grüne Quarzit (schwarz umrandet) sind eindeutig erkennbar. Im Liegenden der Störung auf ET 5 ist ein ca. 6 m breiter Bereich mit vorwiegend hochreinen Quarziten (blauer Pfeil) vom grünen Quarzit (grüner Pfeil) megaskopisch abgrenzbar. Abbildung 17 zeigt eine Detailaufnahme des Störungsbereiches auf ET 5. (Drohnenbild: W. Haidinger)*

### 4.1.2 Tektonik

Die metamorph ausgebildete Schieferung ist parallel zum primär- sedimentären Flächengefüge orientiert. Das generelle Einfallen schwankt nur minimal und kann mit 116° ±7° Richtung ESE angegeben werden. Der Einfallswinkel beträgt in den liegendsten Einheiten rund 65°, verflacht sich dann in Richtung Hangendes auf durchschnittlich 51° und steigt danach im Metasandstein außerhalb des Abbaus auf 88° an. Hier läge eine Interpretation als offene geneigte Falte mit Vergenz zur Haupteinfallsrichtung ESE nahe. Die Synklinale würde sich somit im Zentralbereich des Tagebaus befinden. Weiters gibt es im Tagebau zahlreiche kleinräumige Falten 2. Ordnung. Teilweise werden die Faltenschenkel durch Störungen abgeschnitten (Abbildung 22). Die Faltenachsen dieser kleinräumigen Falten sind parallel zur Schieferungsrichtung orientiert. Zusätzlich zur Schieferung konnten zwei Kluftscharen identifiziert werden. Die zwei Kluftscharen sind gemittelt nach 035/64 bzw. 258/70 (Clar-Werte) orientiert.

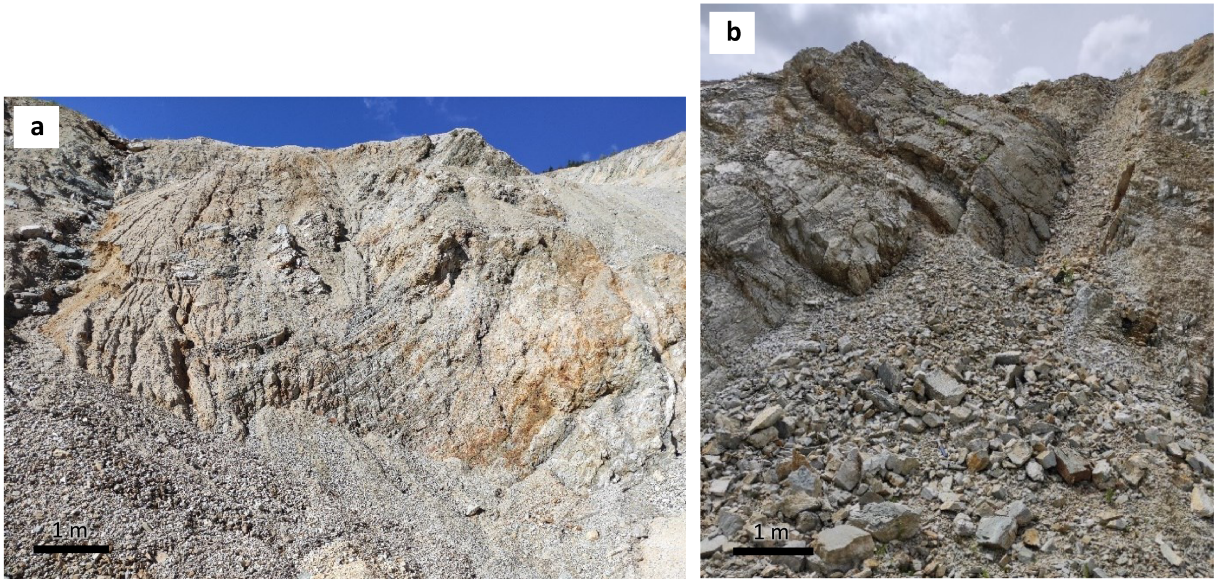


*Abbildung 22: a) Offene Synklinale ET 1. b) In sich verfalteter Faltenschenkel durch Störung abgeschnitten. S-Bereich ET 1.*

Die Klüftung kann als engständig bis dicht in zwei Richtungen beschrieben werden. Sie resultiert in einer kleinblockigen und kleinwürfeligen Gebirgsfazies, wobei die Mehrzahl der Klüfte geschlossen ist. Im verwendeten Maßstab konnten 16 Störungen mit zerscherten Bereichen >1 m kartiert werden. Lediglich die Störungen am konglomeratischen Leithorizont fungieren auch als Formationsgrenzen. Im gesamten Abbaubereich kommen unzählige kleinere Störungen vor. Alle Störungen sind schichtparallel ausgebildet. Folglich haben sie sich aus den Schwächezonen bedingt durch die primäre Schichtung gebildet. Hinsichtlich der Bewegungsrichtung können auf Grund des leichtbrüchigen und verwitterten Materials an den Störungsflächen, keine gesicherten Aussagen getroffen werden. Auf der geologischen Karte (Abbildung 10) sind die Abweichungen der Orientierung der Störungen zu den Streichrichtungen der Fallzeichen der Bruchwandneigung und der Bruchwandorientierung geschuldet.

## 4.2 Mikroskopie

Die mikroskopische Beschreibung basiert auf gesammelten Analysen im Durchlicht, Auflicht und REM. In Tabelle 5 und Tabelle 6 in Anhang B1 befindet sich eine Übersicht der Schliffe und der darin enthaltenen Mineralphasen. Die Messwerte ausgewählter REM-Analysen sind Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15 in Anhang B3 zu entnehmen.

### 4.2.1 Quarz

Der Quarzgehalt nimmt in den Proben mit besser werdender Qualität vom Meta-Quarzkonglomerat bis hin zum glasigen Quarzit zu. Sind die Quarzkörner in den Konglomeraten noch willkürlich ausgerichtet, nimmt das planare Gefüge in Schieferungsrichtung von den Metasandsteinen über die

grünen Quarzite bis zu den weißen Quarziten zu (Abbildung 23). Die Schieferung ist zwar erkennbar aber nur schwach ausgebildet. Die Quarzkristalle in den glasigen Anteilen zeigen ein sekundär ausgebildetes planares Gefüge normal auf die Hauptspannungsrichtung der tektonischen Beanspruchung (Abbildung 24). Die Korngrößen der Quarzkristalle nehmen mit steigender Qualität zu. In den glasigen Kluftfüllungen erreichen sie 0,7 cm maximalen Durchmesser (Abbildung 25). Die Korngrößen der Quarzkristalle im Metasandstein bewegen sich zwischen 2 mm und Silt-Korngröße. Je nach Lithologie sind die Durchmesser recht homogen. Die durchschnittlichen Korngrößen der Quarzkristalle je Lithologie sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Die Quarze sind bis auf wenige Ausnahmen undulös auslöschend und zeigen Tripelpunkte und Lamellen. Diese Attribute sind allesamt Anzeichen einer Rekristallisation. Die einzelnen Körner sind xenomorph ausgebildet. Das Gefüge in den hochreinen Varietäten kann als pflasterartig beschrieben werden.

| | [mm] |
|---|---|
| Konglomerat (Geröll) | 10-60 |
| Konglomerat (Matrix) | 0,055 |
| Metasandstein | 0,1 |
| Quarzit grün | 0,18 |
| Quarzit weiß | 0,28 |
| Quarzit glasig | 3 |

*Tabelle 3: Durchschnittliche Quarzkorngrößen nach Lithologien*

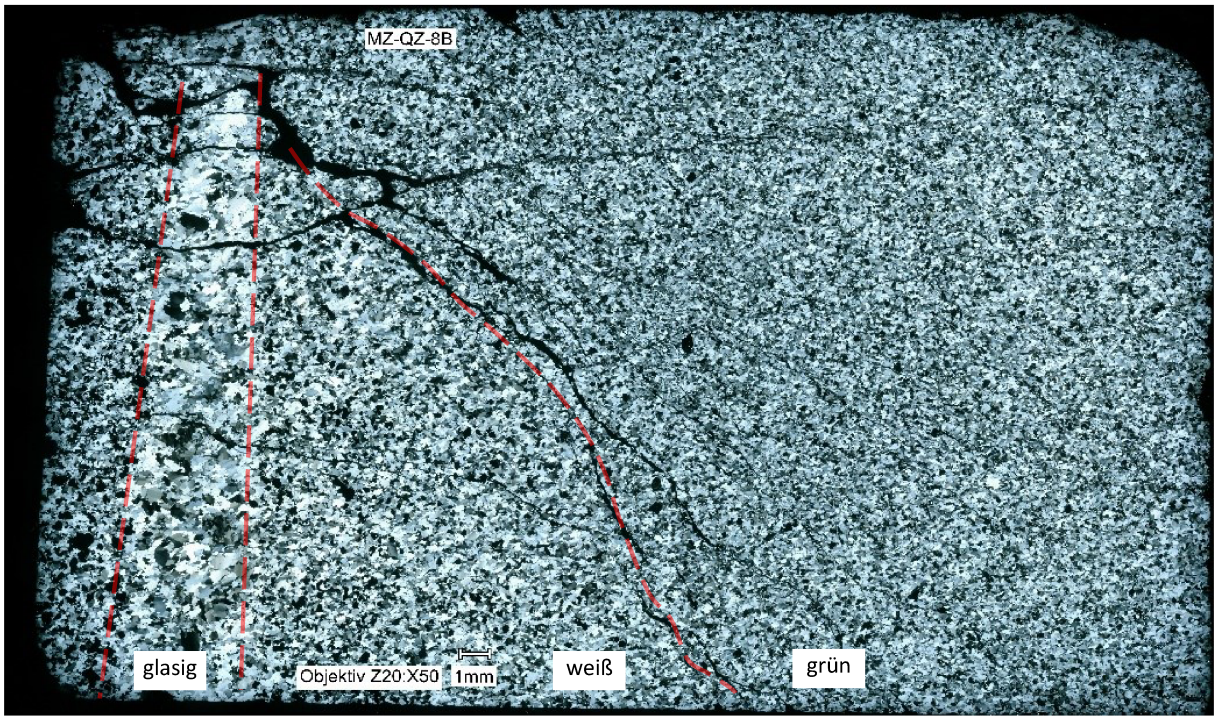


*Abbildung 23: xN. Komplette Abfolge glasige Kluftfüllung – weißer Quarzit – grüner Quarzit im Dünnschliff der Probe MZ-QZ-8B. Die abnehmende Korngröße mit schlechter werdender Qualität ist gut erkennbar. Vgl. mit Handstück Abbildung 18 a).*

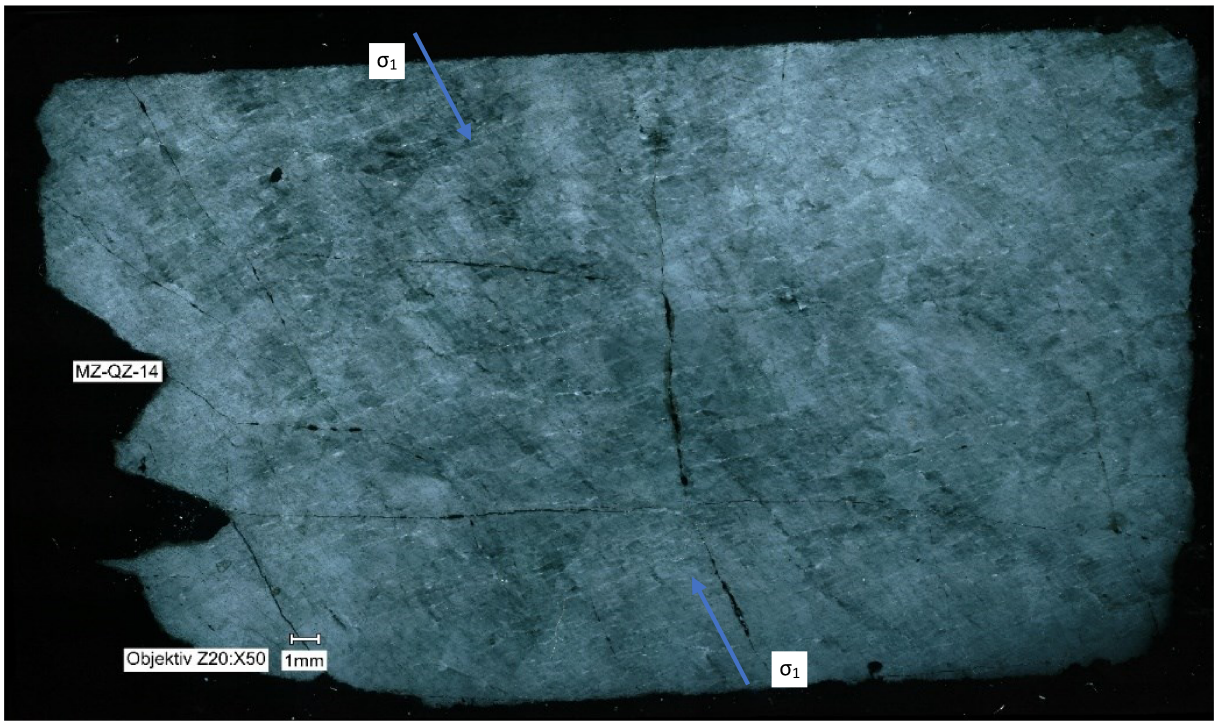


*Abbildung 24: xN. Hochreiner glasiger Quarzit. Probe MZ-QZ-14. Die schwer erkennbaren Einzelkörner sind der Schnittlage geschuldet. Die Brüche als sekundär ausgebildetes planares Gefügemerkmal sind normal auf die tektonisch Hauptspannungsrichtung ($\sigma_1$) ausgerichtet.*

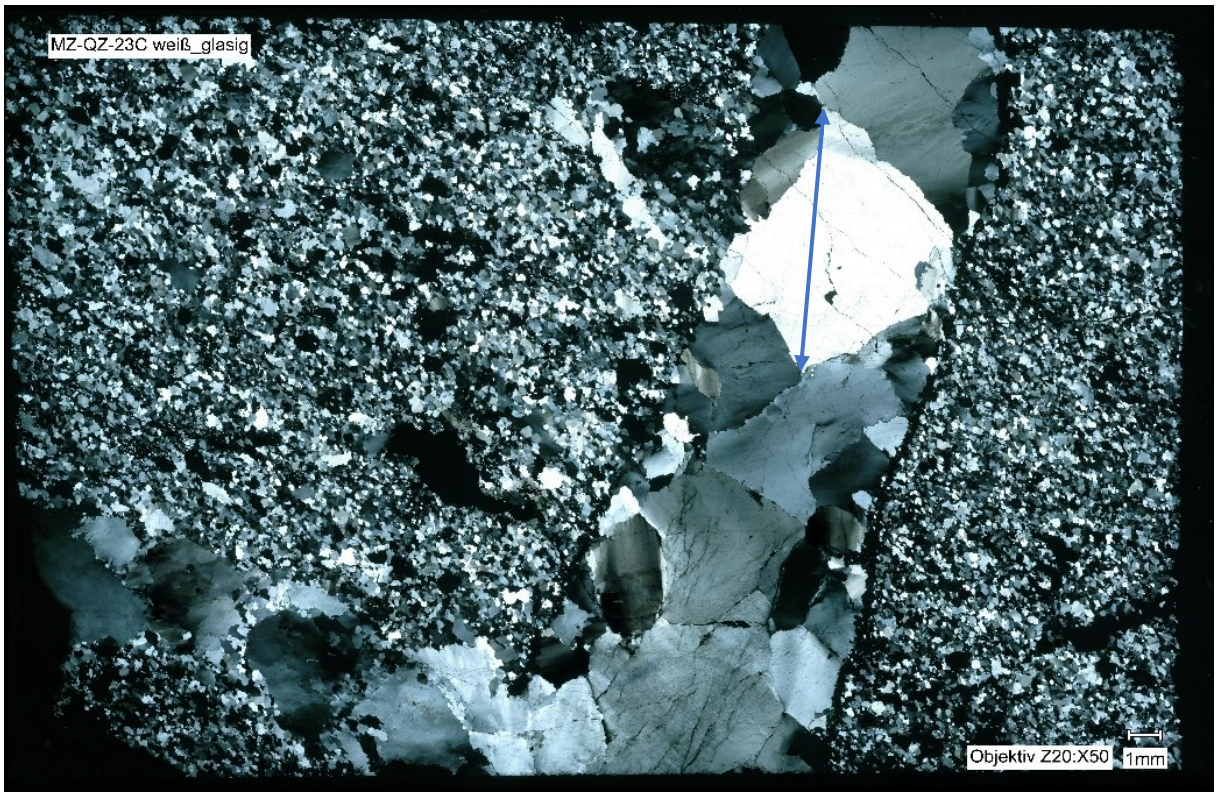


*Abbildung 25: xN. Zwei sich kreuzende glasige Gänge im Schliff MZ-QZ-23C. Das mit 0,7 cm größte gefundene Quarzkorn ist markiert. Die glasigen Quarzkristalle lassen keine Wachstumsrichtung oder Elongation erkennen.*

### 4.2.2 Hellglimmer

Die Hellglimmer treten bis auf die glasigen Quarzite als phengitische Muskovite in allen Lithologien auf. Sie sind tafelig, blättrig und hypidiomorph ausgebildet. Vereinzelt erreichen die Hellglimmerkristalle in den Konglomeraten und in den Metasandsteinen Korngrößen von 0,2 mm Länge. Da fast alle Glimmer unter 0,1 mm vorliegen, können sie grundsätzlich als Serizit angesprochen werden (Abbildung 26). Der Serizitgehalt nimmt mit steigender Qualität ab. In den weißen Quarziten treten nur Serizit-Einzelkörner auf. In den Konglomeraten, Metasandsteinen und teilweise in den grünen Quarziten, ist eine Einregelung in Schieferungsrichtung erkennbar. Ein besonders lagiger Aufbau in Schieferungsrichtung ist im Metasandstein erkennbar. Gemäß der REM-Analysen handelt es sich genauer um phengitische Muskovite mit einem FeO-Gehalt von gemittelt 5,43 m% (SD: 0,55 m%) (Anhang B3 Tabelle 13).

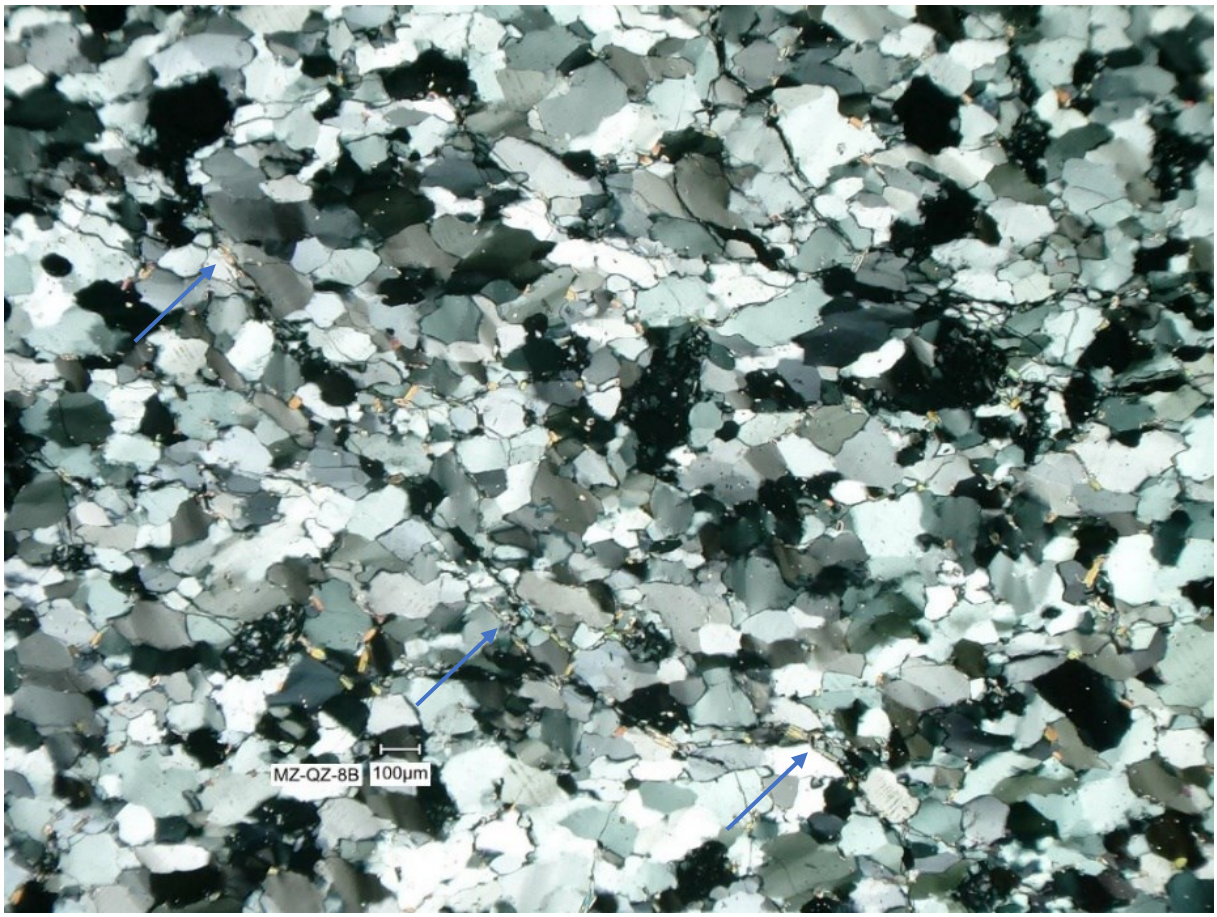


*Abbildung 26: xN. Fein verteilte Serizite (phengitischer Muskovit) im grünen Quarzit der Probe MZ-QZ-8B. Eine Einregelung ist hier nur innerhalb der Risse erkennbar.*

Es wurden zusätzlich von insgesamt 25 Hellglimmern die Atome pro Formeleinheit aus den unnormierten m%-Werten (REM-Messungen) berechnet und nach Lithologien aufgeschlüsselt (Abbildung 27). Für die Kalkulation wurde auf 22 O-Atome normiert. Die Berechnungen zeigen eine Schwankungsbreite der Si-Atome im Bereich 6,37-6,88. Die phengitischen Muskovite der Konglomerate zeigen etwas geringere Fe+Mg a.p.f.u verglichen mit den restlichen Lithologien. Die Mittelwerte der a.p.f.u. von Fe+Mg liegen bei 0,99. Der Plot von Al gegen Si zeigt einen stark absteigenden Trend. Eine Abgrenzbarkeit der Lithologien ist hier nur zum Konglomerat gegeben. Die hohen Al a.p.f.u. sind der Normierung auf 22 O-Atome geschuldet.

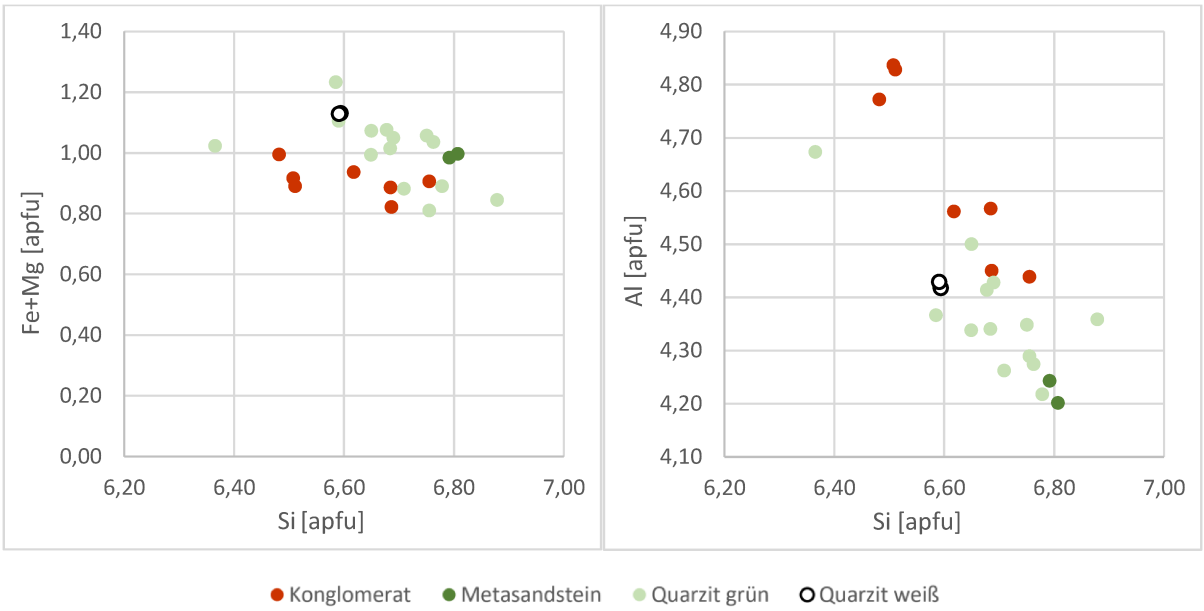


*Abbildung 27: Elementare Zusammensetzung (Atome pro Formeleinheit) der phengitischen Muskovite nach Lithologien. Analyseergebnisse in Anhang B3 Tabelle 13.*

### 4.2.3 Akzessorien

#### *4.2.3.1 Feldspat*

Feldspäte kommen bis auf das vollständig vergruste Material nur akzessorisch vor. Im Durchlicht und REM konnten sie nur in Probe MZ-QZ-16 (grüner Quarzit) gefunden werden. Es handelt sich hier um Alkalifeldspat. Die Feldspäte dürften fast vollständig, über alle Lithologien hinweg, in Kaolinit umgewandelt worden sein (Kaolinitisierung). Trotz der tiefgreifenden Alteration, zeigen die gefundenen Feldspäte zeigen keine Alterationssäume. Sie erscheinen zerbrochen und nicht orientiert (Abbildung 28). Im Anschliff des vollständig vergrusten Materials von Probe MZ-QZ-24 finden sich nur Albite. Die Albite dürften sich aus Plagioklas durch Albitisierung gebildet haben.

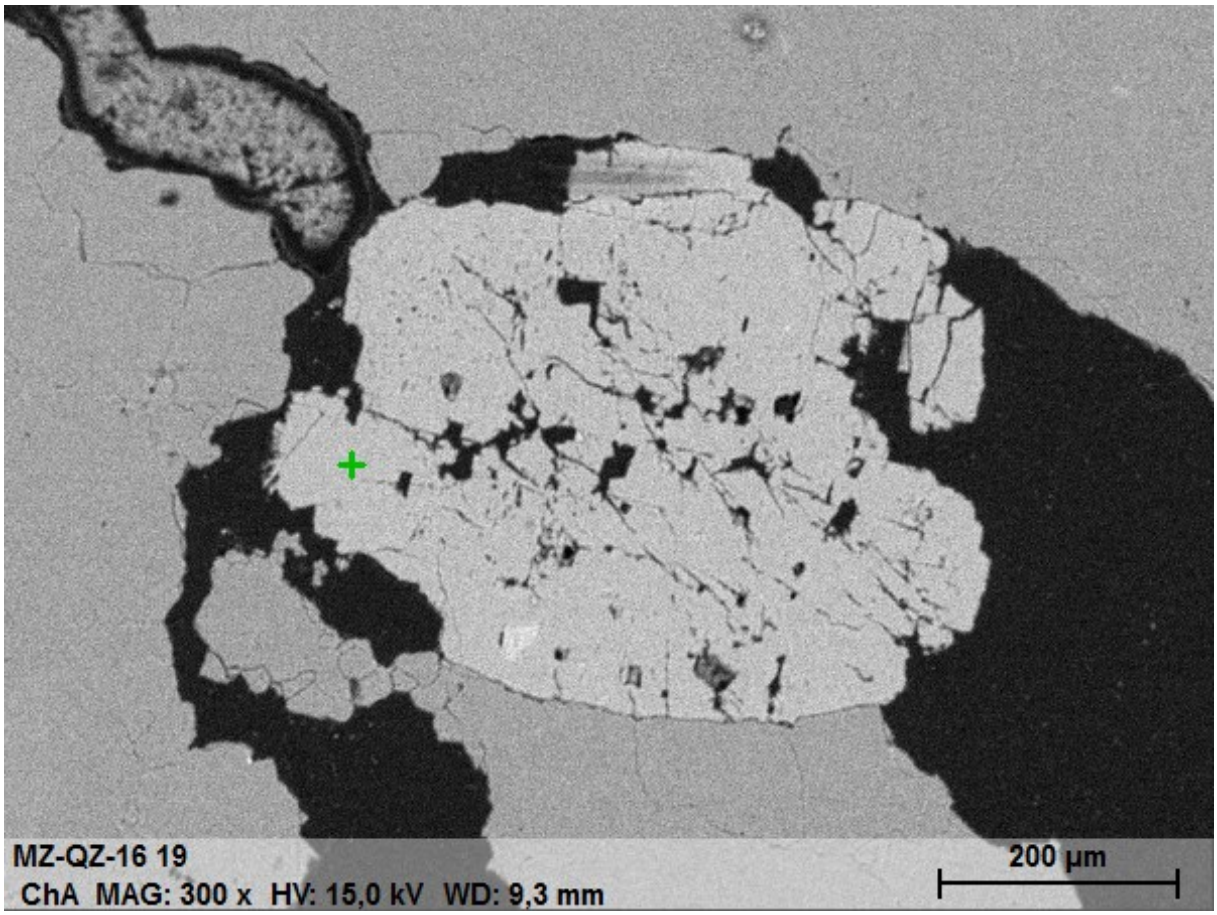


*Abbildung 28: Zerbrochener Alkalifeldspat im grünen Quarzit. Probe MZ-QZ-16 (Mess. 14).*

#### *4.2.3.2 Kaolinit*

Der Kaolinit kommt vermikular und fein geblättert in Rissen und Löchern vor (Abbildung 29). Der Kaolinit dürfte sich durch vollständige Kaolinitisierung der Feldspäte in den Hohlräumen der ehemaligen Feldspatkörner gebildet haben. Der Kaolinit kommt in den weißen Quarziten, und proximal zum diffusen Kontakt in den grünen Quarziten vor. Er kann somit direkt mit der Alteration in Verbindung gebracht werden. Im vergrusten Material kommt der Kaolinit sowohl vermikular als auch als diskrete Phase vor (Abbildung 30). Im Chemismus besteht kein Unterschied zwischen den zwei Ausbildungsarten.

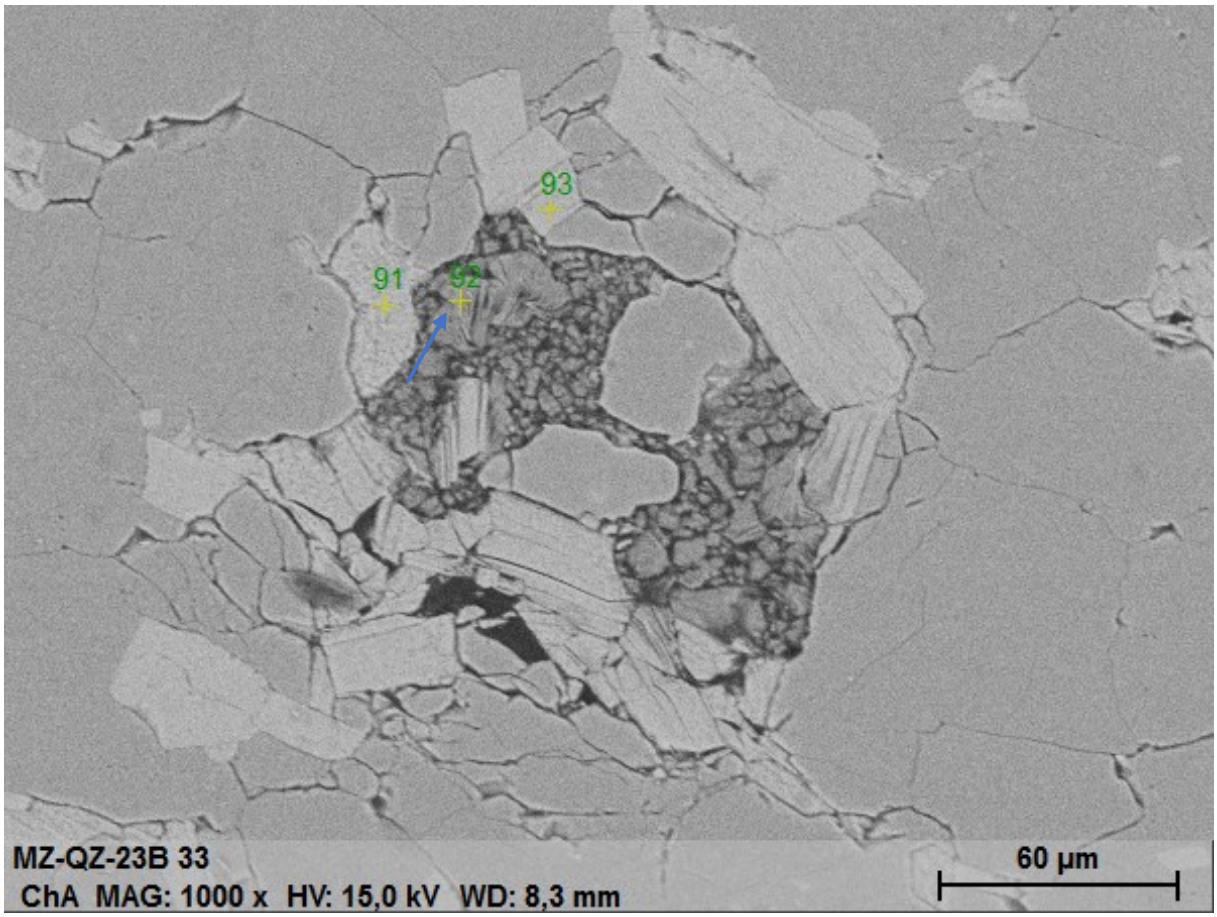


*Abbildung 29: Geblätterter vermikularer Kaolinit (Mess. 92) nach der vollständigen Kaolinitisierung von Alkalifeldspat mit phengitischen Muskoviten (Mess. 91, 93) und umgebendem Quarz. Probe MZ-QZ-23B.*

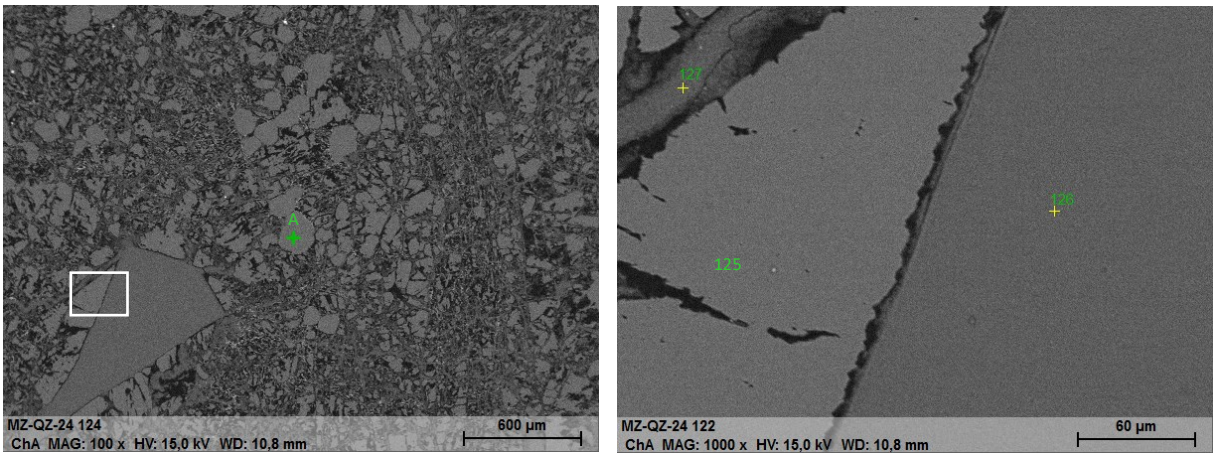


*Abbildung 30: Kaolinit mit Albit (Mess. 125) in Probe MZ-QZ-24. Kaolinit ist hier vermikular in Rissen (Mess. 127) aber auch idiomorph (Mess. 126) ausgebildet. Quarz (A). weißes Rechteck=Bildausschnitt rechts.*

#### *4.2.3.3 Ba-Minerale*

Wie schon der nicht alterierte Alkalifeldspat, wurde Baryt in der gleichen Probe MZ-QZ-16 des grünen Quarzites als Einschluss gefunden (Abbildung 31). In den alterierten weißen Quarziten lässt sich der Ba-Gehalt durch signifikante Mengen an Gorceixit erklären. Das Ba-Al-Phosphat Gorceixit [$BaAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6$] kommt idiomorph als Einzelkörner in Größen um 10 µm vor (Abbildung 32).

Seltener sieht man Gorceixit als hypidiomorphe Aggregate mit Kaoliniteinschlüssen (Abbildung 33). Generell kommt er immer mit Kaolinit assoziiert vor. Gorceixit ist ein Endglied der Goyazit- Crandallit-Gorceixit Mischkristallreihe (Dill 2001). Gorceixite im Fischbacher Fenster wurden erstmalig von Bernhard et al. (1996) beschrieben. In den gemessenen Proben liegt der CaO-Gehalt gemittelt bei 2,43 m%. In einer Probe (MZ-QZ-4C im Bereich des weißen Quarzites) wurde Sr im Gorceixit detektiert. Der Gehalt liegt hier durchschnittlich bei 6,25 m% SrO. Der Ba-Gehalt der Gorceixite liegt bei 21,51 m% im Schnitt.

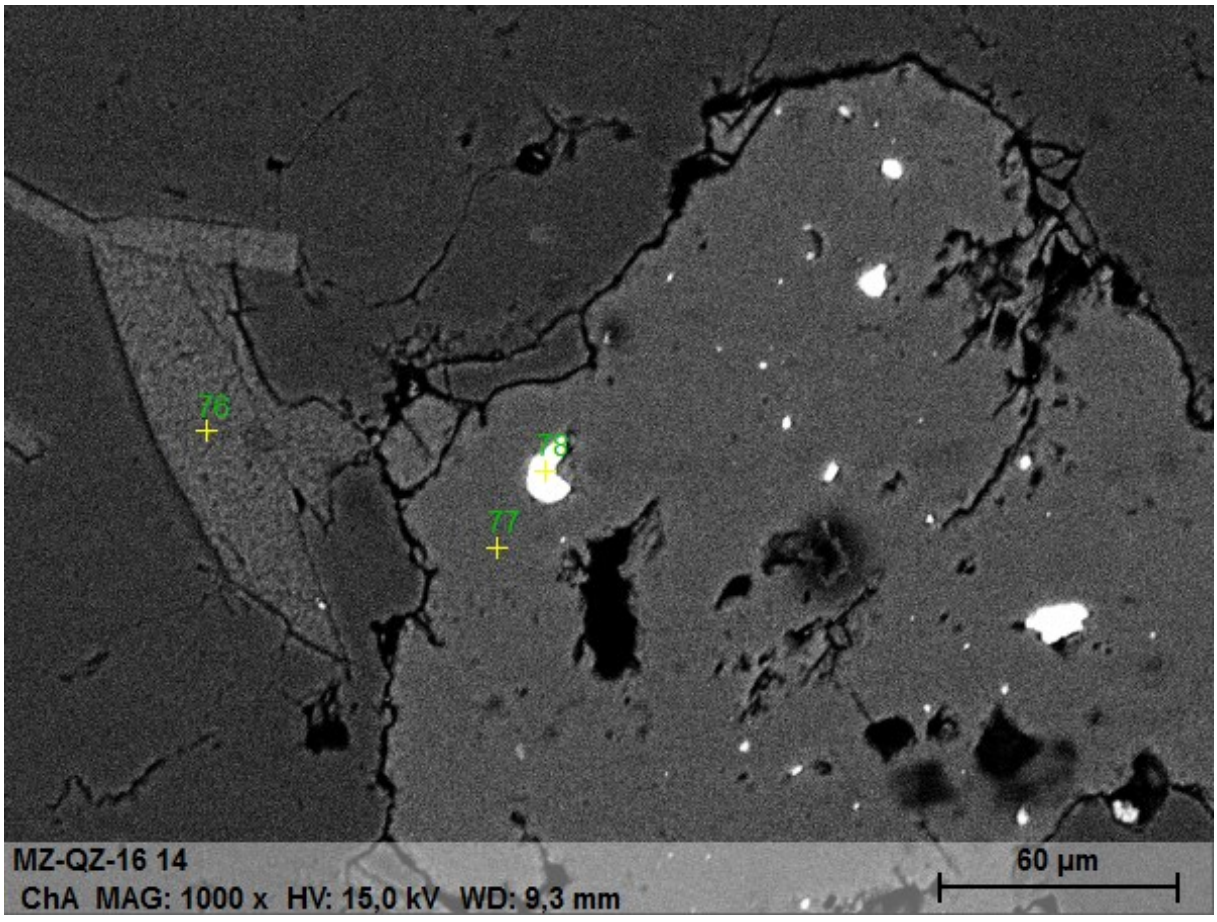


*Abbildung 31: Baryt (Mess. 78) im Alkalifeldspat (Mess. 77) der unalterierten Probe MZ-QZ-16. Phengitischer Muskovit (Mess. 76).*

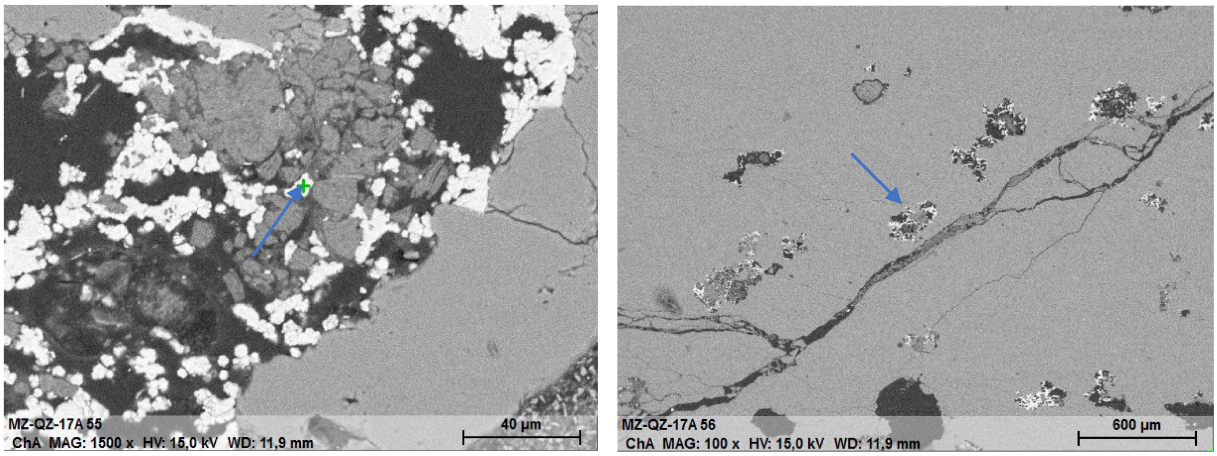


*Abbildung 32: Links: Texturen des hellen Gorceixit im REM-Bild. Rechts: Die Alterationsprodukte Gorceixit und Kaolinit sind in den Korngrenzen der Alkalifeldspat-Edukte deutlich erkennbar. Probe MZ-QZ-17A (Mess. 41).*

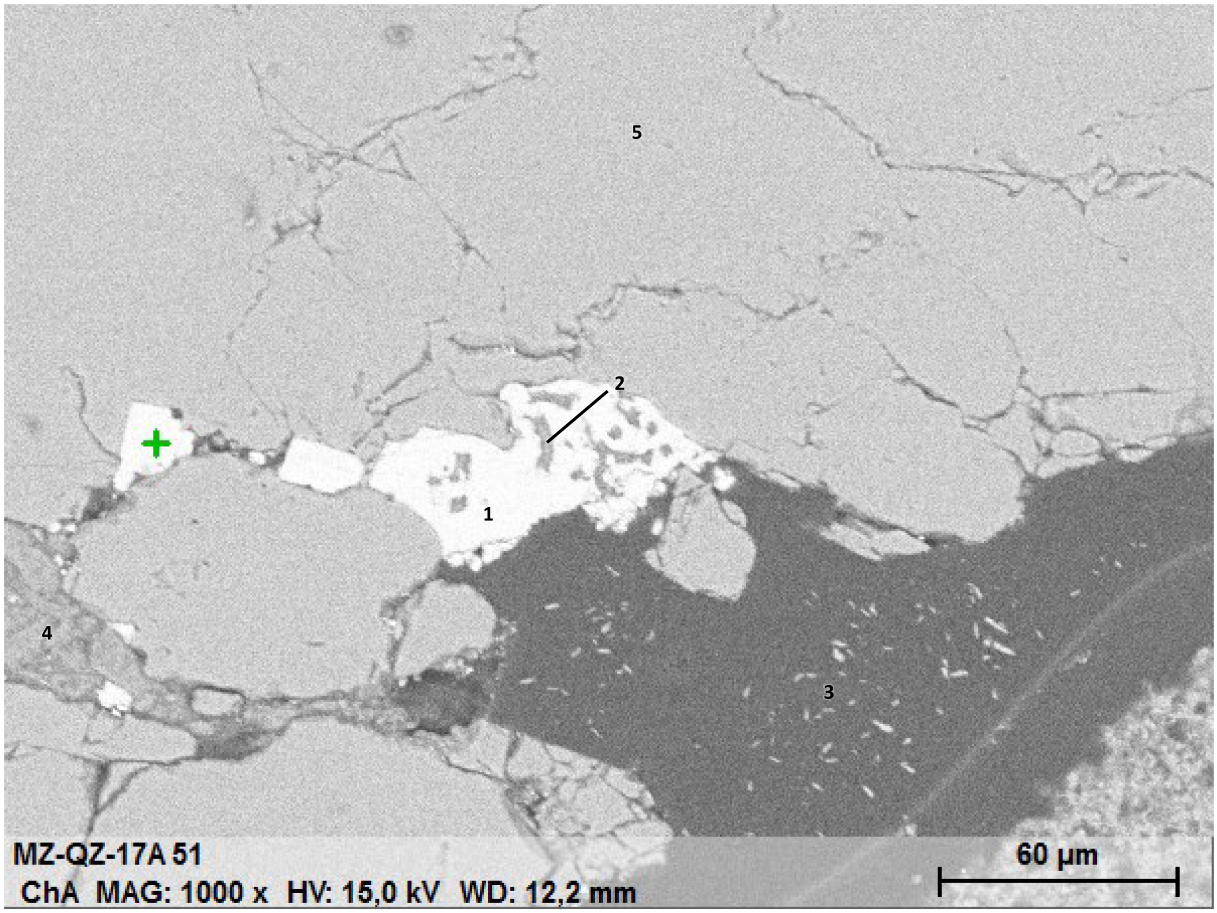


*Abbildung 33: Gorceixit Aggregate (1) mit eingeschlossenen vermikularen Kaoliniten (2). Gorceixit Einzelkörner im Harz des Schliffes (3). Kaolinit (4). Quarz (5). Probe MZ-QZ-17A.*

#### *4.2.3.4 Weitere Akzessorien*

Rutil und Zirkon treten mit Ausnahme der glasigen Quarzite über alle Lithologien hinweg akzessorisch auf. Die quantitativen Gehalte der einzelnen Lithologien können aus den RFA-Daten durch die Auswertung der Ti- bzw. Zr-Gehalte bestimmt werden. Innerhalb der Schliffe treten sie willkürlich verteilt auf. Im Metasandstein der Probe MZ-QZ-29 wurden vereinzelt Apatite gefunden (Abbildung

34). Pyrit tritt immer limonitisiert auf. Er konnte bis auf den Metasandstein in allen Lithologien nachgewiesen werden. Weiters befinden sich im weißen bzw. grünen Quarzit und im Metasandstein vereinzelt Körner von Monazit (Abbildung 35). In den Konglomeraten treten große schwarze Gesteinsbruchstücke auf, deren Hauptbestandteil unter dem REM als Schörl klassifiziert werden konnte (Abbildung 36, Abbildung 37). Kleinere Varietäten <2 mm sieht man vereinzelt auch im Metasandstein. Chlorit, der auch in den Semmeringquarziten vorkommen sollte, wurde in keiner Probe nachgewiesen.

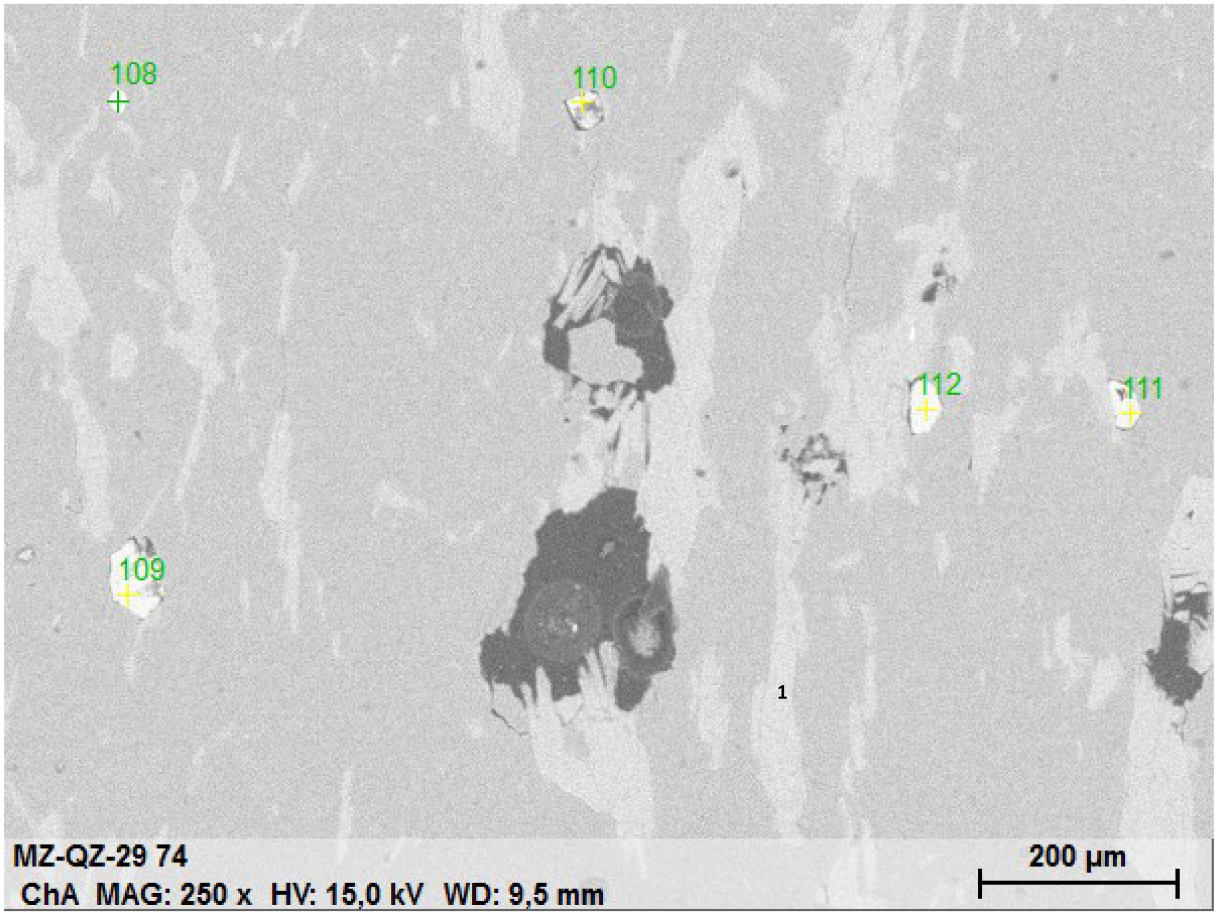


*Abbildung 34: Apatitkörner (Mess. 109-112) sind in einem Bereich im Metasandstein konzentriert. Probe MZ-QZ-29. Weiters ist der lagige Aufbau der serizitischen phengitischen Muskovite gut erkennbar (1).*

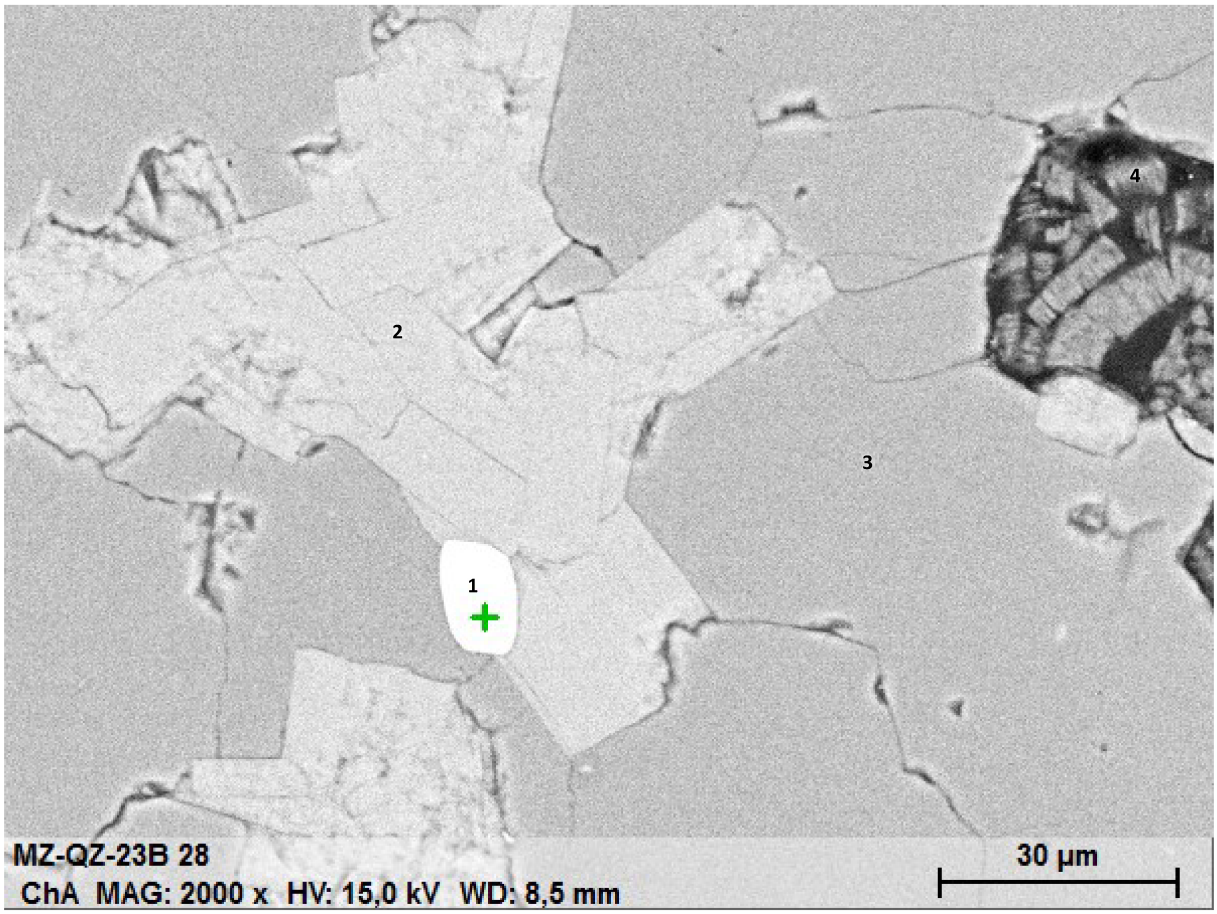


*Abbildung 35: Monazit (1, Mess. 29) im grünen Quarzit der Probe MZ-QZ-23B. Phengitischer Muskovit (2). Quarz (3). Vermikularer Kaolinit (4).*

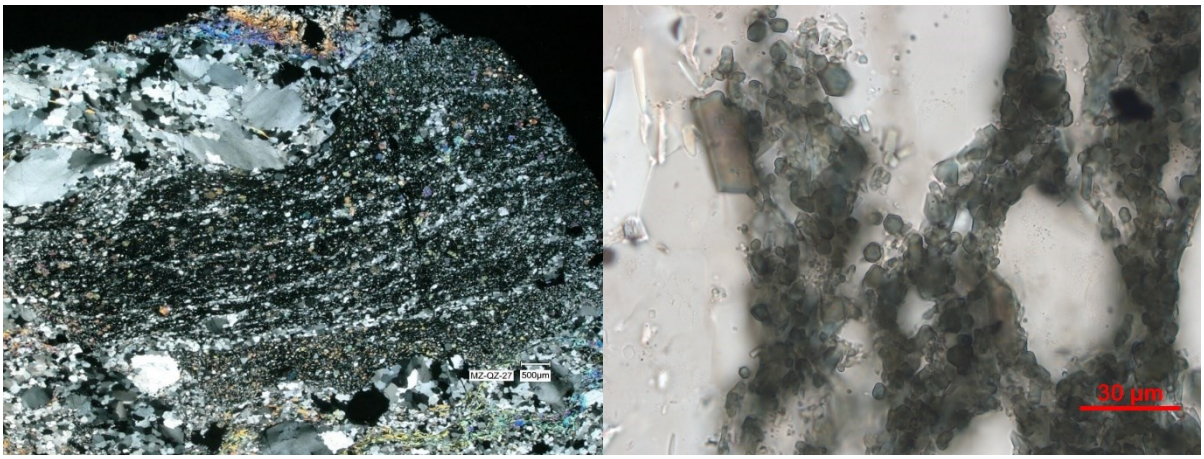


*Abbildung 36: xN. Schwarzes Gesteinsbruchstück mit Schörl als Hauptmineral im Konglomerat. Probe MZ-QZ-27.*

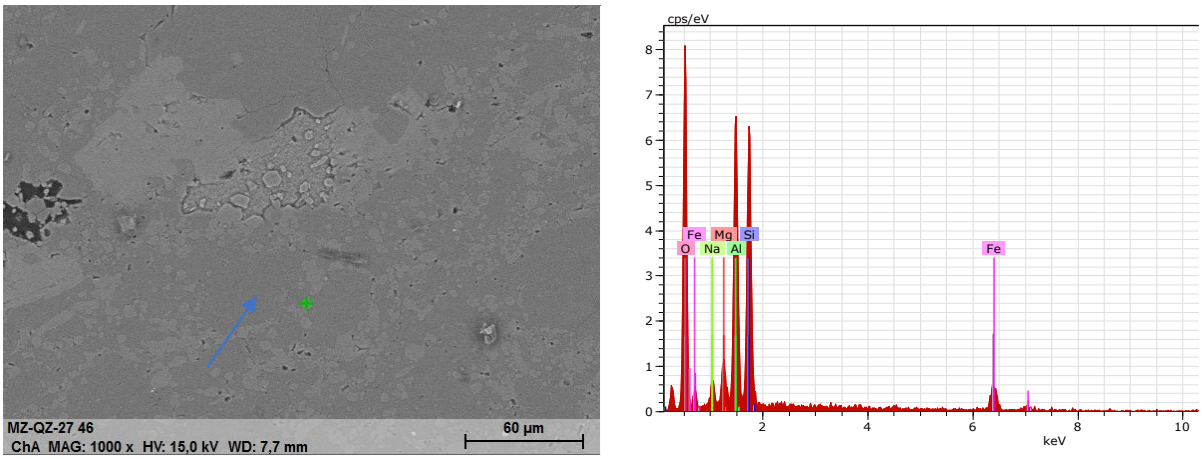


*Abbildung 37: REM-Bild und Spektrum des Gesteinsbruchstückes mit Schörl als Hauptmineral (Mess. 39, Tabelle 15 Anhang B3)*

### 4.2.4 Modaler Mineralbestand

Bei der Ermittlung des Modalbestandes durch Auszählung am Lichtmikroskop, wurde zwischen Quarz, Hellglimmer und Akzessorien unterschieden. Da die Schliffe so geringe Mengen an Kaolinit und Feldspat enthalten, wurden diese ebenfalls unter den Akzessorien zusammengefasst. Der Trend des niedrigeren Glimmergehaltes mit höherer Qualität wird grundsätzlich bestätigt. Auffallend ist, dass Schliffe aus der Alterationszone weiß/grün einen höheren Anteil an Hellglimmer und Akzessorien aufweisen als die eigentlich schlechtere Qualität der grünen Quarzite. Optisch nur schwer erkennbar, wird beim Auszählen aber deutlich, dass in den Schliffen mit diffusem Übergang in den weißen Bereichen Kaolinit und in den grünen Bereichen Hellglimmer gehäuft vorkommen. Weiters fällt auf, dass in den Metasandsteinen mit 0,2 % nur sehr geringe Mengen an Akzessorien enthalten sind (Tabelle 4). Die gesammelten Ergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt.

| Probenbez. | Lithologie | Anz. Auszählpunkte | Quarz | Hellglimmer | Akz. |
|---|---|---|---|---|---|
| MZ-QZ-1 | Konglomerat | 500 | 50,1% | 45,3% | 4,6% |
| MZ-QZ-27 | Konglomerat | 570 | 78,6% | 16,8% | 4,6% |
| MZ-QZ-19 | Metasandstein | 600 | 88,2% | 11,8% | 0,0% |
| MZ-QZ-29 | Metasandstein | 527 | 82,5% | 17,1% | 0,4% |
| MZ-QZ-11 | Quarzit grün | 475 | 98,3% | 1,7% | 0,0% |
| MZ-QZ-16 | Quarzit grün | 575 | 95,1% | 2,6% | 2,3% |
| MZ-QZ-23B | Quarzit grün/glasig | 600 | 91,8% | 8,0% | 0,2% |
| *MZ-QZ-8B* | Quarzit glasig/weiß/grün | 775 | 89,8% | 3,6% | 6,6% |
| *MZ-QZ-4C* | Quarzit weiß/grün | 491 | 93,5% | 0,8% | 5,7% |
| *MZ-QZ-23C I* | Quarzit weiß/grün | 613 | 85,0% | 10,4% | 4,6% |
| MZ-QZ-5A | Quarzit weiß/glasig | 525 | 98,7% | 0,6% | 0,8% |
| MZ-QZ-23C | Quarzit weiß/glasig | 725 | 97,4% | 0,1% | 2,5% |
| MZ-QZ-8A | Quarzit weiß | 450 | 99,8% | 0,2% | 0,0% |
| MZ-QZ-17A | Quarzit weiß | 725 | 98,8% | 0,0% | 1,2% |
| MZ-QZ-4B | Quarzit glasig | 500 | 100,0% | 0,0% | 0,0% |
| MZ-QZ-14 | Quarzit glasig | 501 | 99,8% | 0,0% | 0,2% |

*Tabelle 4: Ergebnisse der Mineralauszählung der Dünnschliffe*

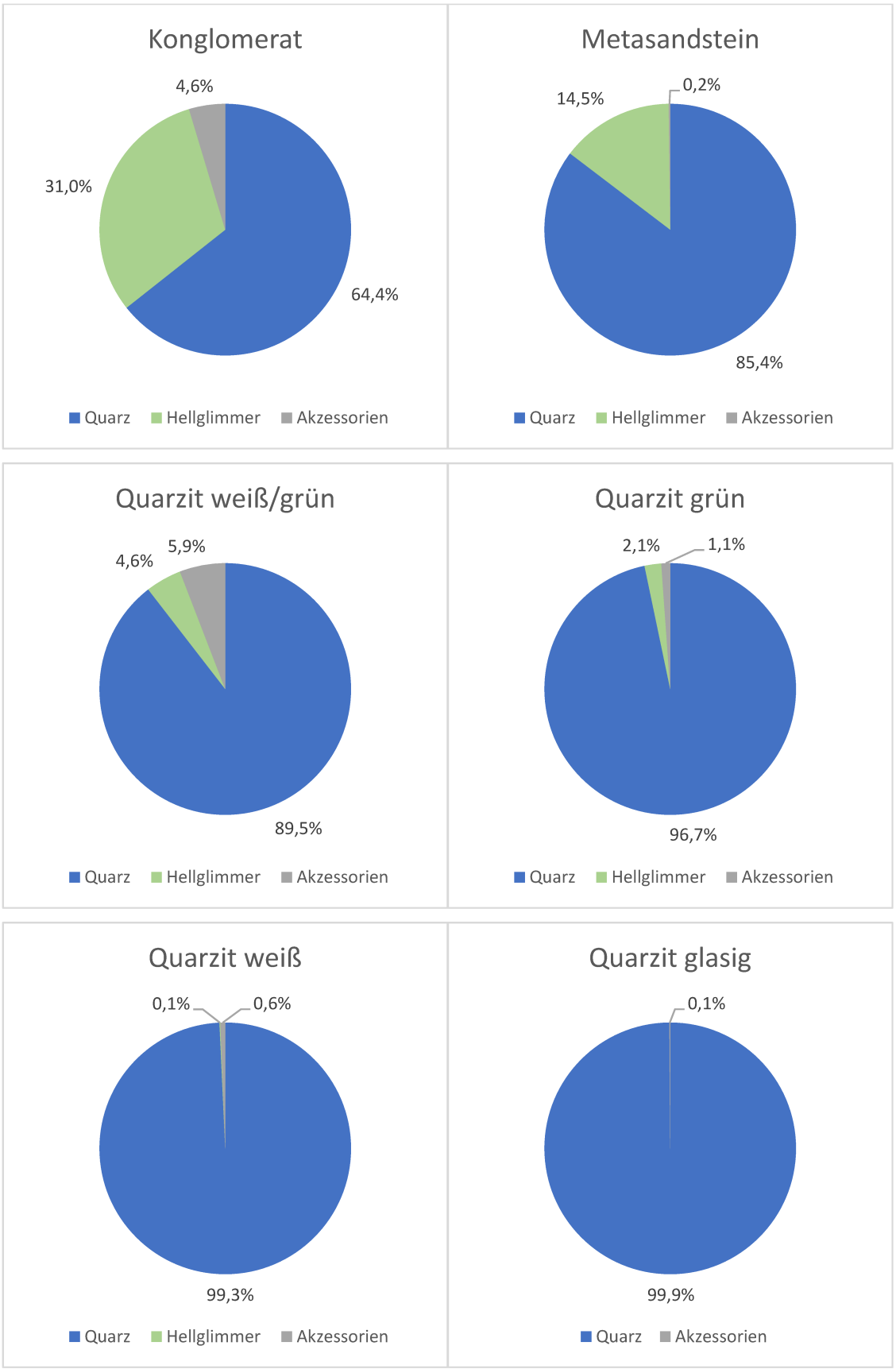


*Abbildung 38: Durchschnittliche Mineralzusammensetzung ausgewählter Lithologien in modal-%.*

## 4.3 Chemische und mineralogische Analyse

Insgesamt wurden 28 Schmelztabletten hergestellt und mittels RFA analysiert. Der größte Anteil der untersuchten Proben entfällt auf die hochreinen Varietäten um eine Einschätzung für die Eignung als Glas-Rohmaterial treffen zu können. Auswertungen die die Bezeichnung GG (Gesamtgestein) wurden nicht nach Lithologien aufgebrochen. Die im jeweiligen Handstück enthaltenen Mengen an weißem und grünem Quarzit (MZ-QZ-4C) bzw. glasigem, weißem und grünem Quarzit (MZ-QZ-22B) wurden vollständig homogenisiert und gemeinsam ausgewertet. Probe MZ-QZ-8B entspricht reinsortigem grünen Quarzit. Die Gesamtgesteinschemie der weißen Quarzite mit glasiger Kluftverheilung wurde an 5 Proben analysiert (Median GG w. + gl.) Die Einzellithologie des glasigen Quarzites (Median gl.) wurde an 4 Proben analysiert. Die Einzellithologie des weißen Quarzites (Median w.) wurde an 11 Proben analysiert. In Probenpunkt MZ-QZ-17 wurden 5 Proben auf engstem Raum genommen, um eventuelle Schwankungen des bei LIBS-Messungen sichtbar zu machen. Bei der RFA-Auswertung wurde aus diesen 5 Proben der Mittelwert herangezogen. Ansonsten wurde der Median der Messwerte verwendet, sofern nicht eine einzelne Probenbezeichnung angegeben ist. Die Probe MZ-QZ-8B wurde nach der Dünnschliffherstellung für die RFA in die einzelnen Lithologien aufgebrochen und gesondert analysiert. Zusätzlich zur RFA wurde Probe MZ-QZ-24 mittels XRD mineralogisch analysiert. In Tabelle 7, Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 in Anhang B2 befinden sich die nach Lithologien geordneten Analyseergebnisse. Co wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da es vermutlich vollständig aus dem Abrieb der Kugelmühle stammt. Eine Karte der Probennahmepunkte befindet sich in Abbildung 53 in Anhang B1.

Der bisherige Trend aus den makroskopischen, mikroskopischen, petrographischen und mineralogischen Analysen, lässt sich durch die RFA zur Gänze bestätigen. Die Qualität des Rohmaterials sinkt vom glasigen über den weißen bis hin zum grünen Quarzit. Der höhere Glimmergehalt in den grünen Quarziten erhöht den $Fe_2O_3$-Gehalt. Dies wird besonders bei den Gesamtgesteinsanalysen sichtbar. Korrespondierend sinkt der $SiO_2$-Gehalt. Grundsätzlich weisen aber alle drei Lithologien einen ausreichend hohen $SiO_2$-Gehalt von über 96,3 m% auf (Abbildung 39).

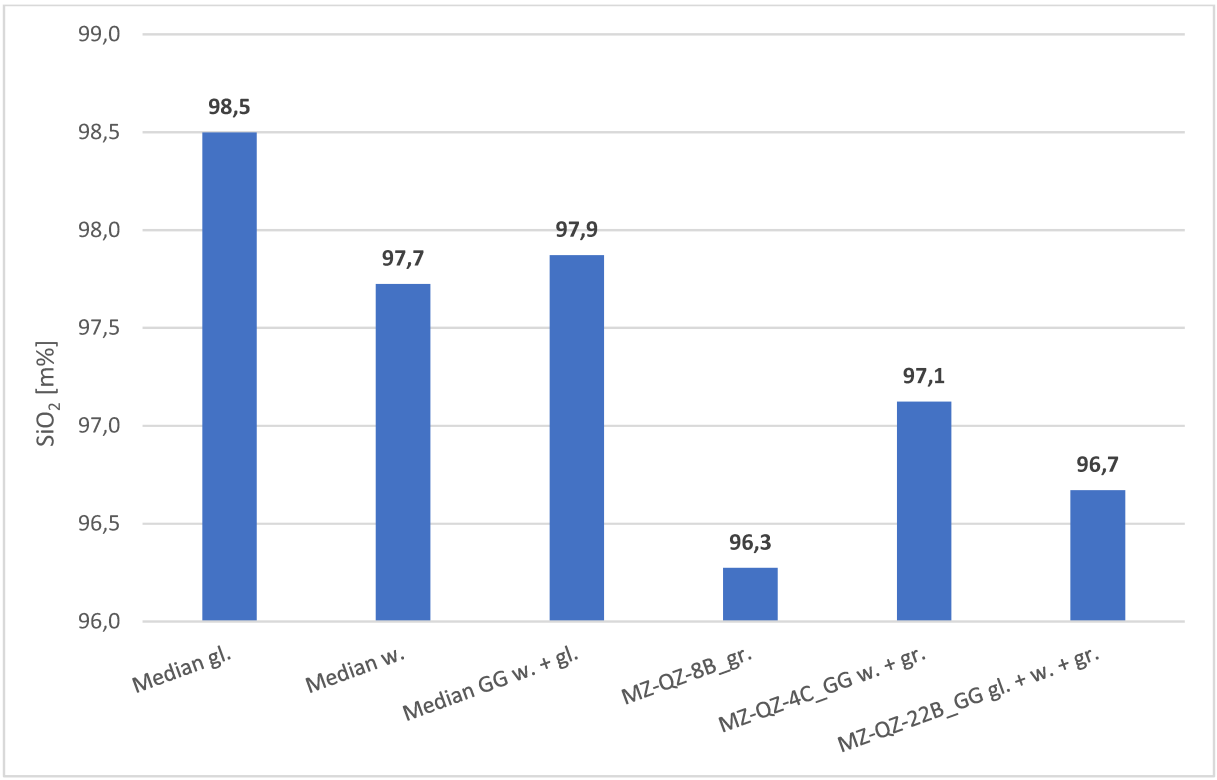


*Abbildung 39: RFA $SiO_2$ Analyseergebnisse nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün*

Die hochreinen Varietäten glasig und weiß enthalten mit 65 bzw. 309 ppm äußerst geringe Mengen an Verunreinigungen durch $Fe_2O_3$. Die Gesamtgesteinsanalyse der weißen Quarzite mit enthaltenen glasigen Gängen erreichen einen Medianwert von 168 ppm $Fe_2O_3$ (Abbildung 40). Sobald die Quarzite im Handstück erkennbare grüne Anteile aufweisen, erhöht sich der $Fe_2O_3$-Gehalt schlagartig um ca. 1 000 ppm. Generell lässt sich sagen, dass die einzelnen Lithologien sehr geringe Schwankungsbreiten aufweisen. Vor allem die glasigen Varietäten weichen mit maximal 20 ppm vom Medianwert ab.

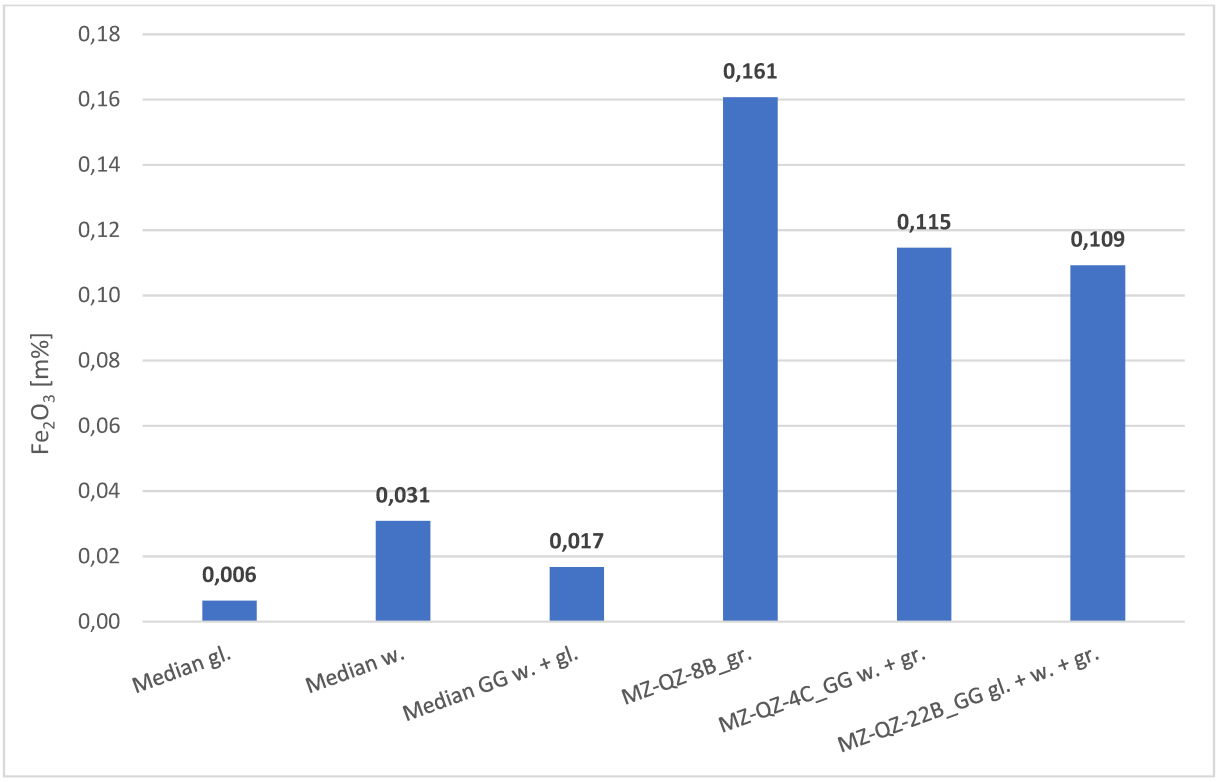


*Abbildung 40: RFA $Fe_2O_3$ Analyseergebnisse nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün*

In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind die Analyseergebnisse der Haupt- und Spurenelemente dargestellt. Auch in diesen Analysen wird die Einteilung der hochreinen Lithologien nach ihrer Qualität bestätigt. Vor allem bei den $Al_2O_3$-, $K_2O$-, $P_2O_5$-, Ba- und Pb-Gehalten ist der Einfluss der grünen Quarzite und der darin enthaltenen Hellglimmer deutlich sichtbar. Auffällig sind die erhöhten Ba- und Zr-Gehalte in den weißen Quarziten. Der Anteil an Zr stammt aus den Zirkonen. Das Ba stammt fast ausschließlich aus den Gorceixiten. Ba wurde auch in zwei Muskovit-Einzelanalysen im REM gemessen. Auf Grund des geringen Ba-Gehalts von durchschnittlich 0,045 % Ba dieser zwei Messungen und der geringen Menge an Muskoviten in den hochreinen Quarziten, ist Ba aus Muskoviten aber zu vernachlässigen.

Es ist festzuhalten, dass alle Gehalte der Haupt- und Spurenelemente in den geforderten Grenzen für die Weißglasherstellung liegen.

Die XRD-Analyse der vollständig vergrusten Probe MZ-QZ-24 ergibt auf 100 % normierte Anteile von 82 m% Albit, 14 m% Kaolinit und 4 m% Quarz. Das dazugehörige Spektrum befindet sich in Abbildung 54 in Anhang B.

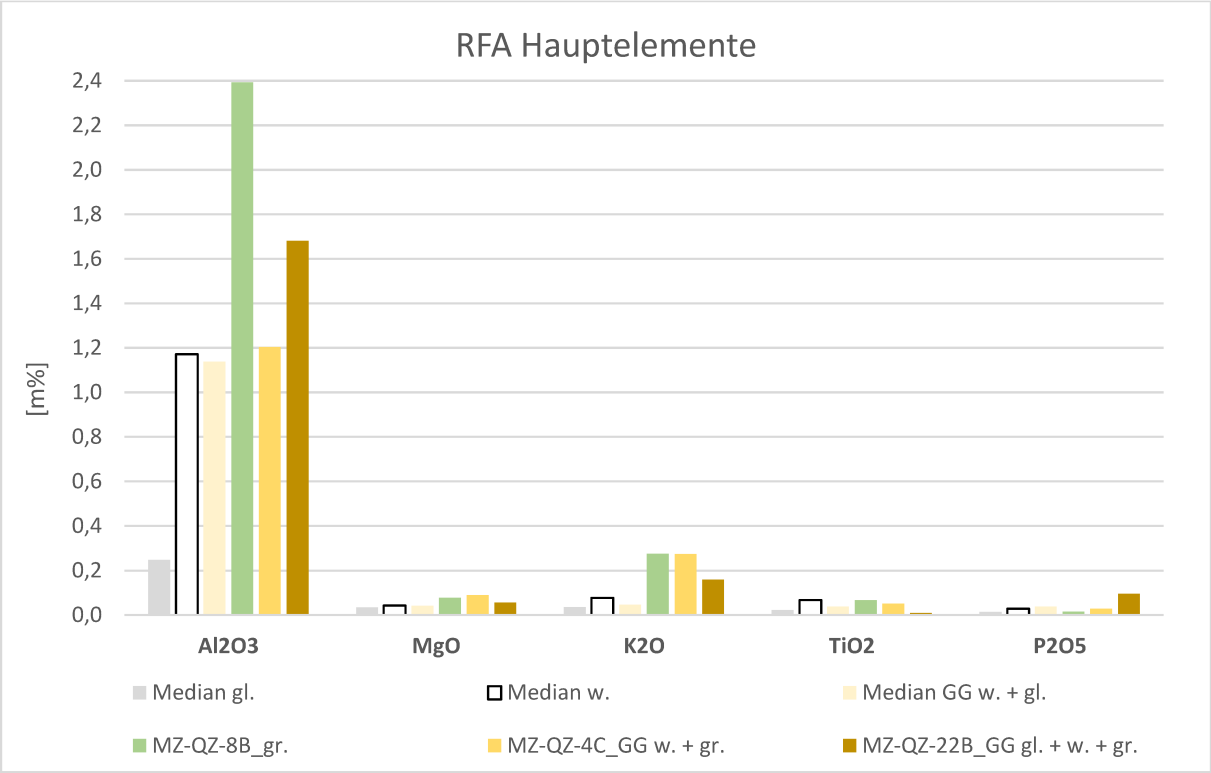


*Abbildung 41: RFA Analyseergebnisse der Hauptelemente nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün*

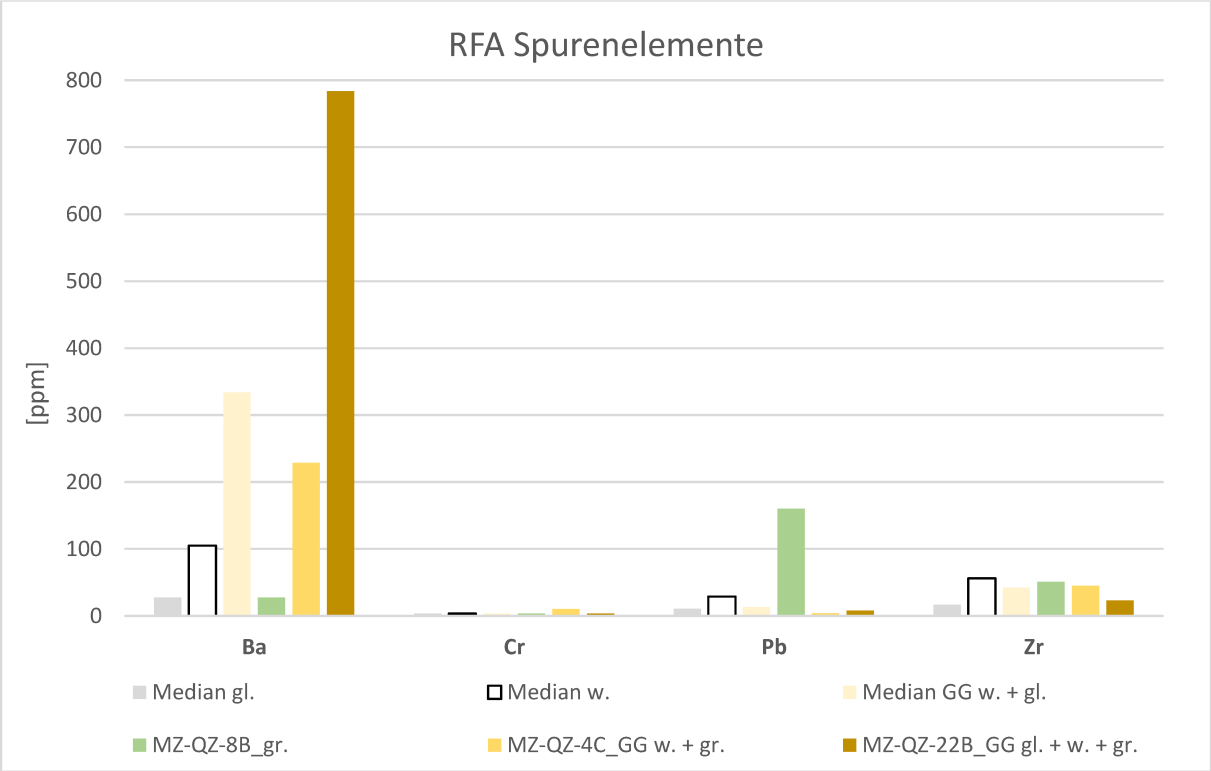


*Abbildung 42: RFA Analyseergebnisse der Spurenelemente nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün*

Die Trends aus 23 RFA-Einzelanalysen sind in Abbildung 43 dargestellt. $Al_2O_3$ und $Fe_2O_3$ zeigen eine starke Abnahme bei steigendem $SiO_2$-Gehalt. Während bei $Al_2O_3$ der Trend über alle Lithologien hinweg ähnlich stark ausgebildet ist, sieht man bei $Fe_2O_3$, dass der Trend bei den hochreinen Quarziten schwächer ausgeprägt ist. Der gemittelte $Fe_2O_3$-Gehalt bei gemeinsamer Auswertung der hochreinen Lithologien glasig, weiß und weiß+glasig liegt bei 253 ppm. Eine Korrelation von steigenden $SiO_2$-Gehalten mit sinkenden $K_2O$-, MgO- und Ba-Gehalten ist vorhanden, aber nur schwach ausgeprägt. Zudem ist der Trend bei Vergleich der einzelnen Lithologien als annähernd gleich einzustufen. Bei Gegenüberstellung der Ba-Gehalte mit den $Fe_2O_3$-Gehalten wird deutlich, dass erhöhte Ba-Gehalte mit einer Verringerung der $Fe_2O_3$-Gehalte einhergehen. Dieser Trend zeigt sich in allen Lithologien und ist besonders stark in den hochreinen Quarziten bis zu einem Ba-Gehalt von 0,09 m% ausgebildet.

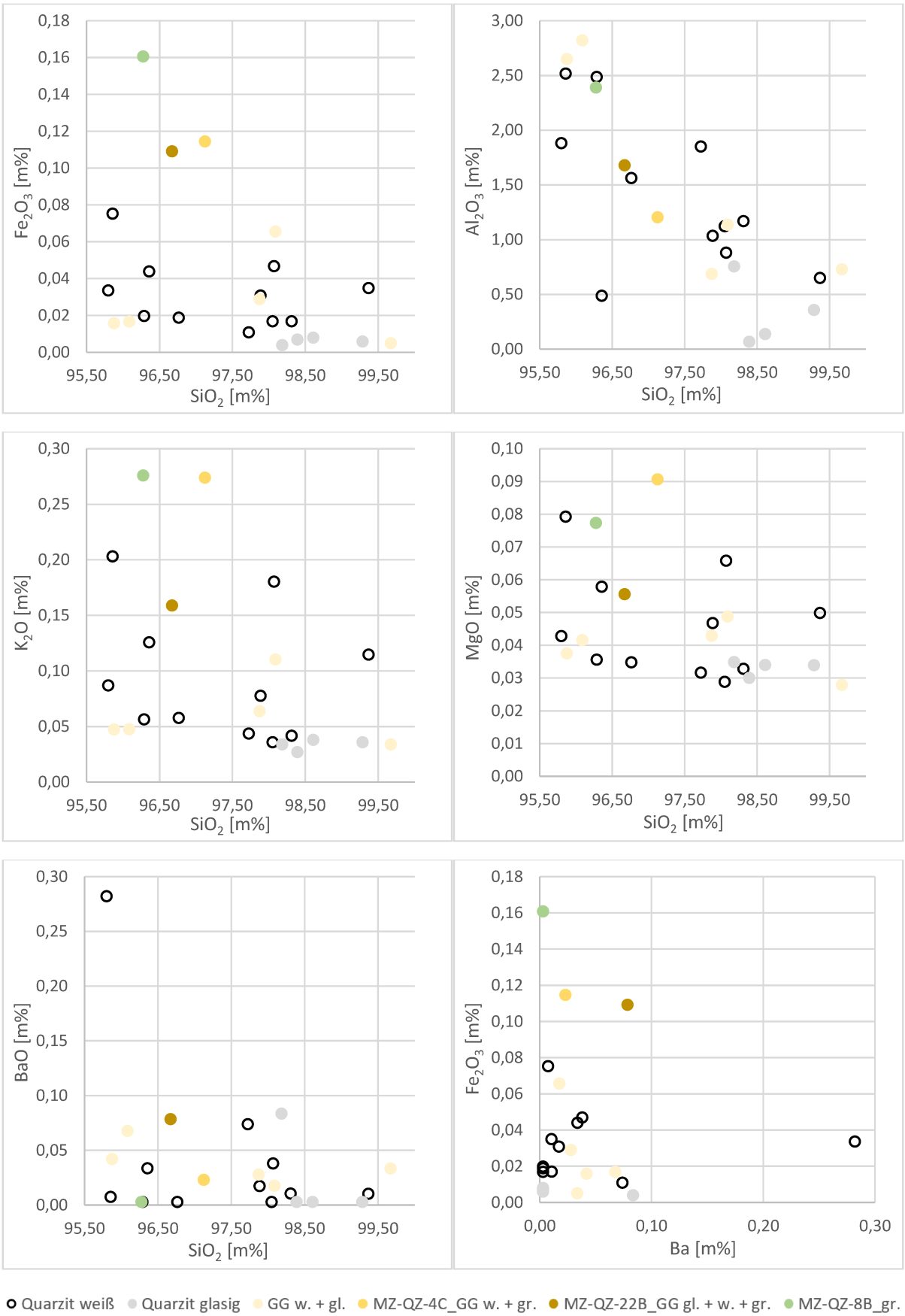


*Abbildung 43: Gegenüberstellung der $SiO_2$-, $Fe_2O_3$-, $Al_2O_3$-, $K_2O$-, MgO- und Ba-Gehalte (RFA-Messwerte) nach Lithologien*

## 4.4 Methodenvergleich – Portable LIBS vs. Labor-RFA

Für den Methodenvergleich des portablen LIBS-Gerätes mit der im Labor durchgeführten RFA wurden die Reinelementgehalte aus den RFA Analyseergebnissen berechnet. Dies ist notwendig, da mit LIBS nur die Reinelemente ausgewertet werden. Zur graphischen Darstellung wurde ein Bland-Altman-Plot gewählt. Die Nulllinie entspricht dem Messwert der RFA und somit dem tatsächlichen Gehalt. Es wurden die Elemente Si, Fe, Al, Mg, K und Ba in 3 Lithologien (glasig, weiß, grün) und insgesamt 20 Proben analysiert. Um quantitative Aussagen zu ermöglichen, wurden aus der RFA keine Gesamtgesteinsanalysen herangezogen, da mit LIBS nur einzelne Lithologien gemessen werden konnten. Die Trendlinie bezieht alle Messwerte mit ein. Die LIBS-Messwerte sind Tabelle 11 und Tabelle 12 in Anhang B2 zu entnehmen.

Alle LIBS-Messungen der Si-Gehalte liegen innerhalb der erlaubten 1,96-fachen Standardabweichung und können somit trotz der erkennbaren Streuung als richtig angesehen werden. Wird der Trend interpoliert, ergeben sich richtige Messungen in einem Bereich zwischen 41 und 48 m% Si in der Gesamtgesteinschemie. Die mit LIBS gemessenen Werte liegen durchschnittlich 0,8-0,9 m% unter dem tatsächlichen Gehalt. Die Streuung nimmt mit steigenden Gehalten zu. Die negative Abweichung vom RFA-Wert nimmt mit steigenden Gehalten leicht zu (Abbildung 44).

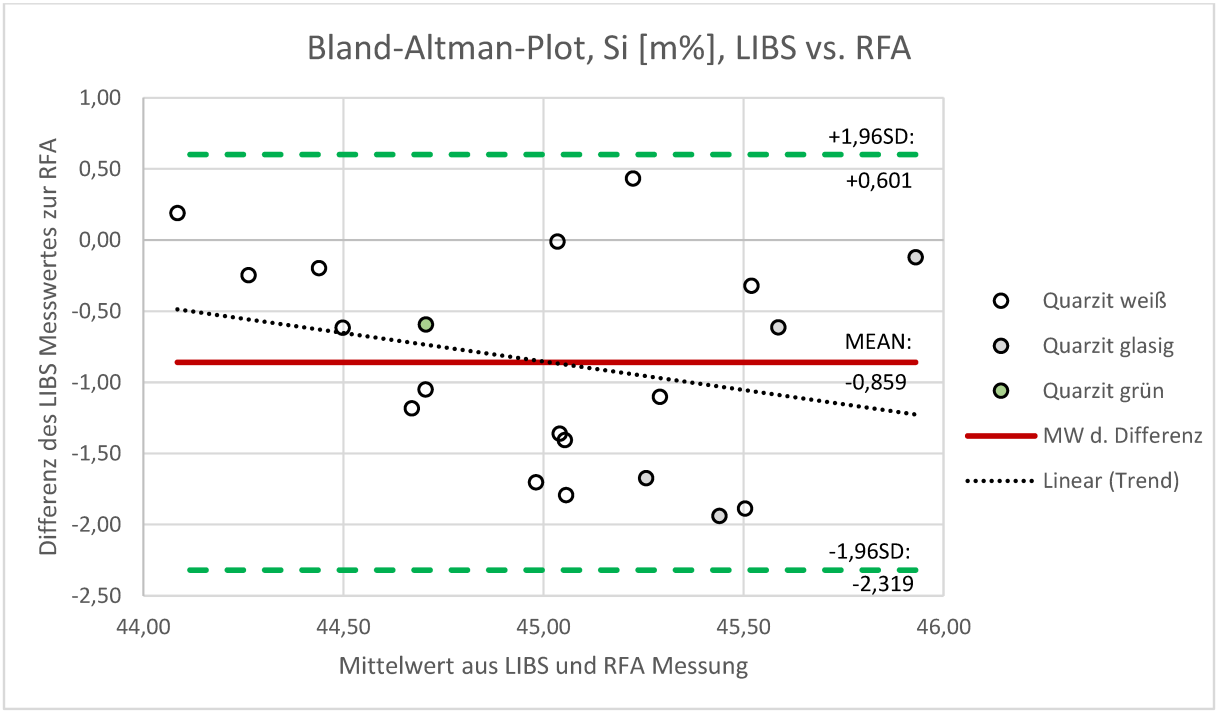


*Abbildung 44: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Si-Werte im Bland-Altman-Plot.*

Fe-Gehalte unter 0,05 m% werden mit einer sehr hohen Genauigkeit gemessen. Ab 0,05 m% nimmt die Streuung leicht zu. Die Überbestimmung von 0,133 m% im Mittel nimmt mit steigenden Gehalten

zu. Die LIBS-Messungen können bis zu einem Gehalt von 0,26 m% als richtig betrachtet werden (Abbildung 45).

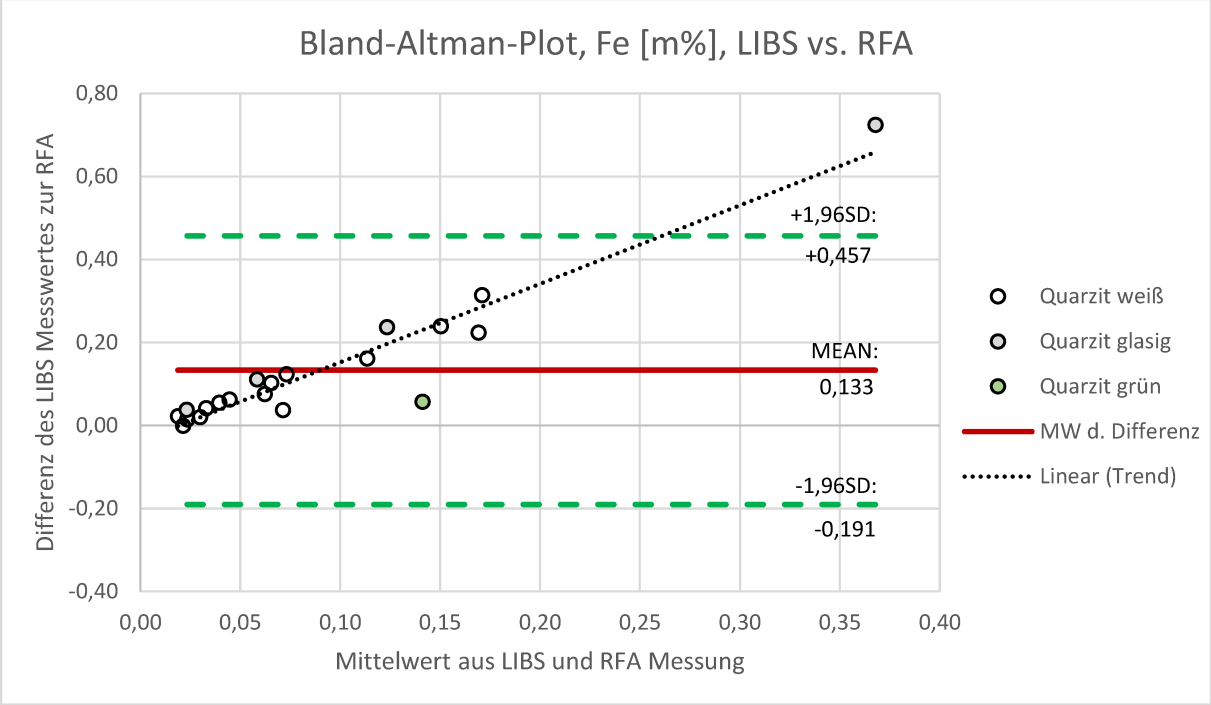


*Abbildung 45: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Fe-Werte im Bland-Altman-Plot.*

Die LIBS Al-Messwerte sind bis zu Gehalten von 0,6 m% genau. Die Richtigkeit der Messungen über diesem Gehalt wäre zwar im Plot bis zu 7 m% gegeben, jedoch ist auch die signifikante Standardabweichung bei diesen Messungen zu beachten. Demnach dürften die Werte nur bis ca. 2 m% Al richtig sein. Die Streuung korreliert nicht mit der Höhe des Messwertes und somit können die LIBS-Werte grundsätzlich als präzise angenommen werden. Die Überbestimmung steigt mit höheren Gehalten stark an und ist durchschnittlich mit 3,035 m% recht hoch (Abbildung 46).

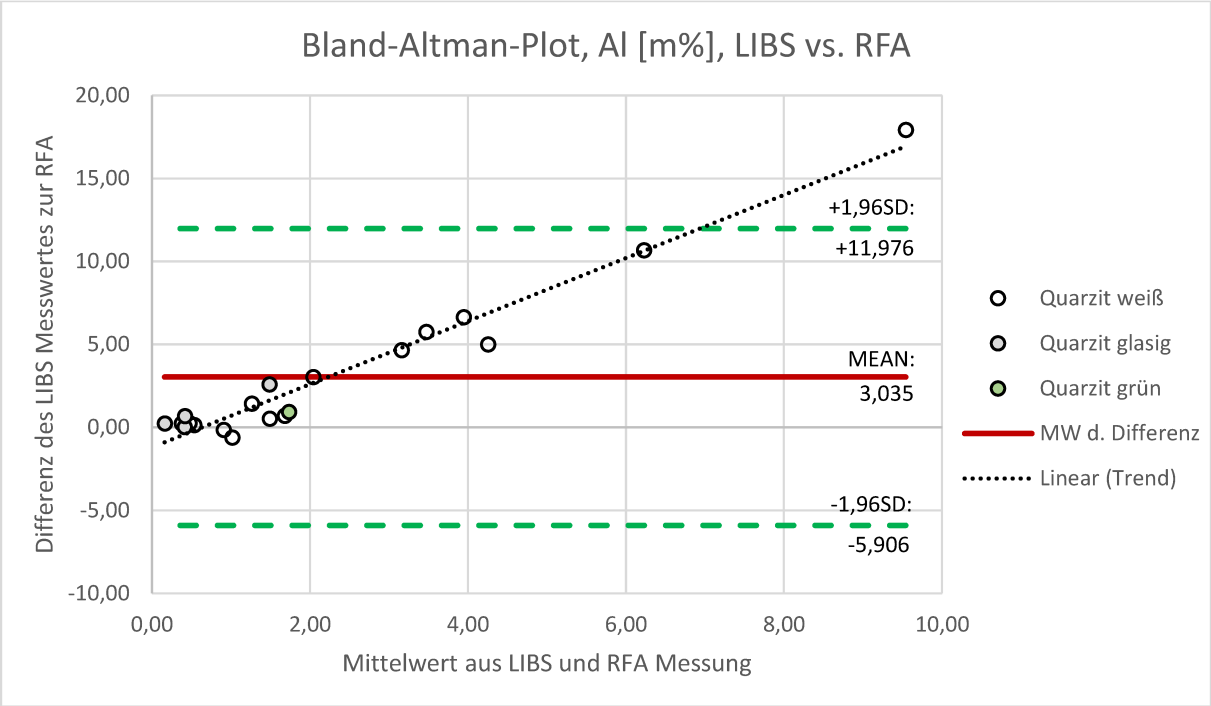


*Abbildung 46: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Al-Werte im Bland-Altman-Plot.*

Auffällig bei den Mg-Messwerten ist, dass unter 0,02 m% generell unterbestimmt wird. Mit steigenden Gehalten nehmen auch die Überbestimmung und die Streuung zu. Im Mittel allerdings weisen LIBS-Messungen des Mg-Gehaltes im Vergleich zu den anderen ausgewerteten Elementen mit 0,006 m% die geringste Abweichung zur RFA auf. Die Messwerte können nach Interpolation im Bereich 0-0,07 m% als richtig betrachtet werden (Abbildung 47).

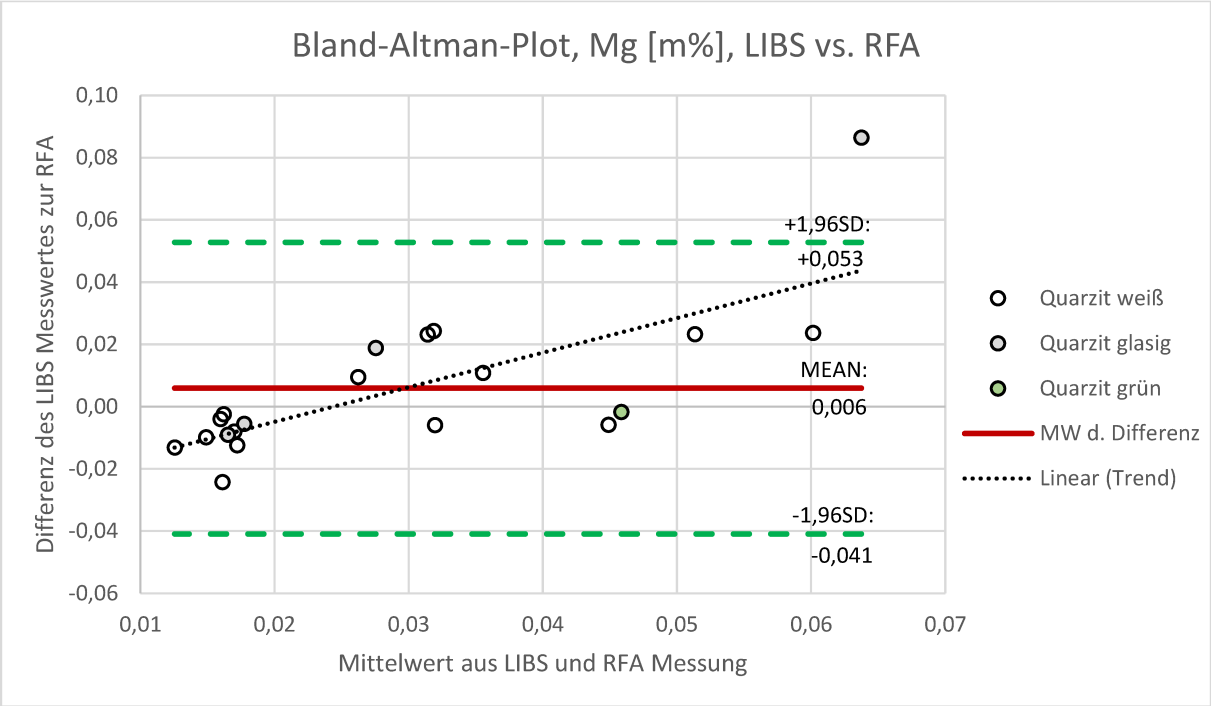


*Abbildung 47: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Mg-Werte im Bland-Altman-Plot.*

K zeigt die geringste Neigung der Trendlinie, was darauf schließen lässt, dass die Abweichung zum tatsächlichen Gehalt nur minimal von der Höhe der Werte abhängig ist. Allerdings liegt die durchschnittliche Überbestimmung bei 0,424 m%. Zusätzlich gibt es einen Ausreißer, der sich nicht mit steigendem oder fallendem Trend korrelieren lässt. Aus diesen Gründen sollten die LIBS-Messwerte für K, trotz des generellen Plots innerhalb der 1,96-fachen Standardabweichung, als nicht richtig aufgefasst werden (Abbildung 48).

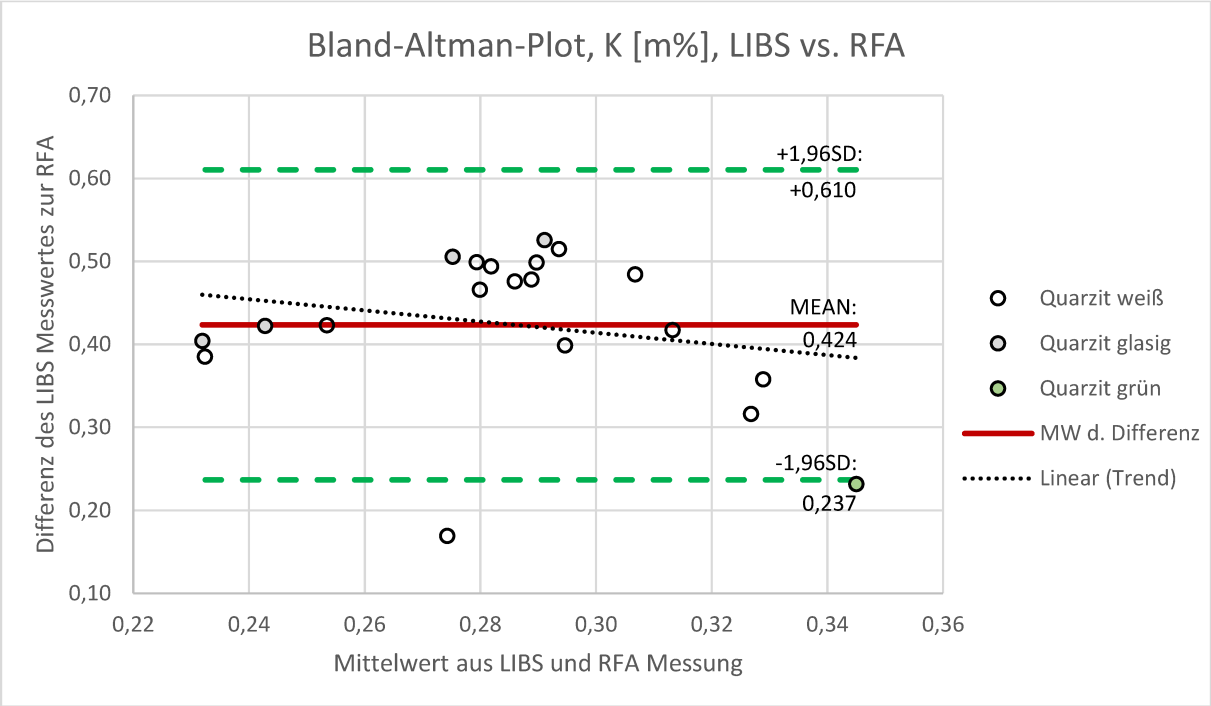


*Abbildung 48: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen K-Werte im Bland-Altman-Plot.*

Der Methodenvergleich zeigt, dass LIBS bis zu Ba-Werten von 0,04 m% genau misst. Die Messwerte können bis 0,24 m% als richtig angesehen werden. Ba wird mit 0,047 m% leicht unterbestimmt, wobei die Unterbestimmung sowie die Streuung mit steigenden Gehalten zunimmt (Abbildung 49).

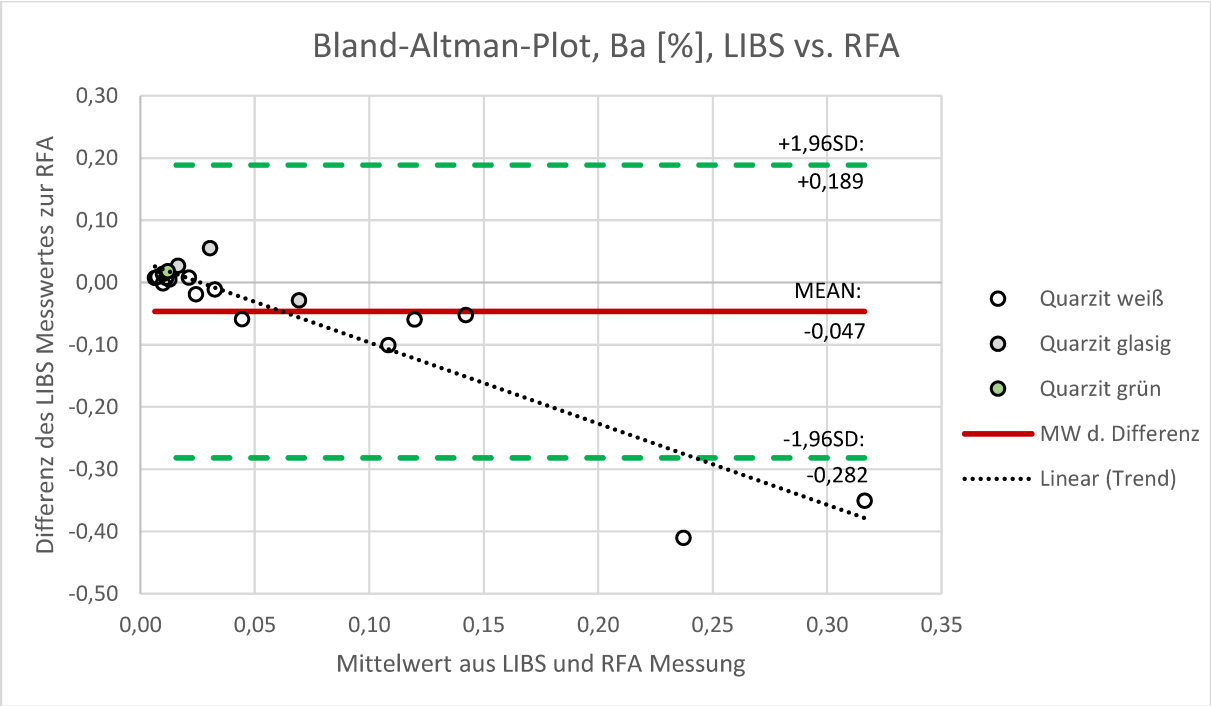


*Abbildung 49: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Ba-Werte im Bland-Altman-Plot.*

## 4.5 Multielektroden-Widerstandsmessung

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse über die mineralische Zusammensetzung der Gesteine, sollten hauptsächlich die phengitischen Muskovite die leitende Mineralphase in den einzelnen Lithologien sein. Wie bereits erwähnt, sinkt der Muskovitanteil mit steigender Qualität. Folglich müssten die unterschiedlichen Lithologien gut voneinander abgrenzbar sein. Die geophysikalische Messung wurde auf ET 6 mit einer Länge von 184 m durchgeführt (Abbildung 50). Die Ergebnisse sind in Abbildung 51 dargestellt. Abbildung 55 und Abbildung 56 in Anhang B4 zeigen die Ergebnisse der Inversionsrechnungen.

Grundsätzlich ist der konglomeratische Leithorizont durch einen geringeren spezifischen Widerstand gut abgrenzbar. Für die Nutzung als Prospektionsmethode auf Anhäufungen entfärbter Alterationszonen, wäre allerdings eine Unterscheidung grüner/weißer Quarzit notwendig. Im Liegenden der Störung stimmt das Tiefenprofil mit dem kartierten Bereich an weißen Quarziten überein. Die hochreinen Quarzite zeigen hier Widerstände von bis zu 100 kΩm. Im Hangenden dagegen, dürfte die Auflösung der Messung nicht ausreichen, um einzelne Bereiche an hochreinen Quarziten auszuweisen. Wie in 4.1.1.1 beschrieben kommen in diesem Bereich alle gefundenen Lithologien sehr kleinräumig vor. Die Alterationszonen reichen nicht über Breiten von 1 m hinaus. Für die Detektion, ob die hochreinen Varietäten im grünen Quarzit gehäuft vorkommen, wäre der SE-Bereich auf ET 4 am besten geeignet.

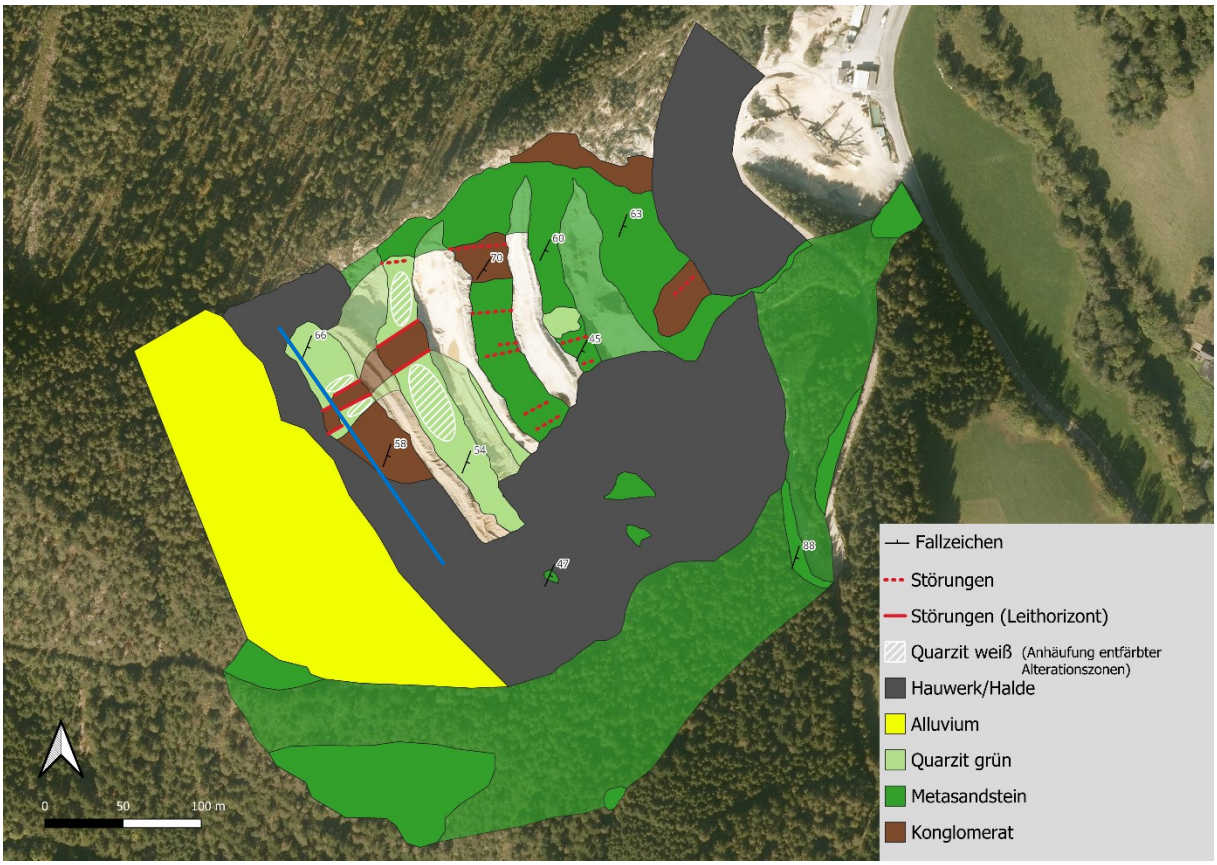


*Abbildung 50: Profillinie (blau) der Widerstandsmessung mit 184 m Länge auf ET 6.*

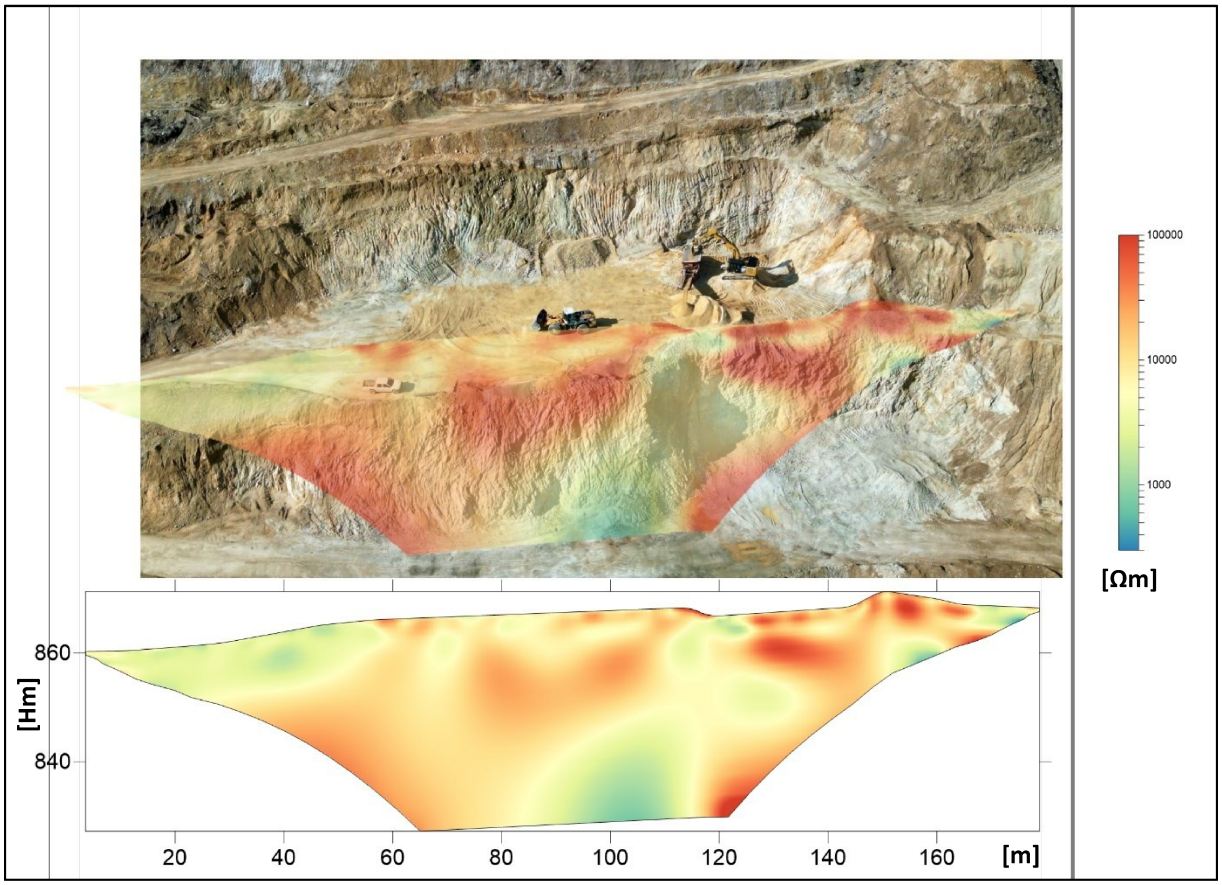


*Abbildung 51: Ergebnisse der Widerstandsmessung auf ET 6 inklusive Projektion auf das Drohnenbild (modifiziert nach Römer & Pfeiler 2024).*

# 5 Interpretation & Diskussion

## 5.1 Die Semmeringquarzitlagerstätte des Stbr. Friesenbichler

### 5.1.1 Mineralogie

Die Reinheit der Gesteine lässt sich direkt aus Korrelation der gesammelten geochemischen Daten mit den mikroskopischen Analysen ableiten. Dies bestätigt auch die Einteilung der Qualitäten nach der optischen Farbgebung der einzelnen Lithologien. Als Hauptmineral ist Quarz vorherrschend, der über alle gefundenen Lithologien hinweg zwischen 64,4 und 99,9 % das Hauptgemengteil der Gesteine ausmacht. Die Gerölle in den Konglomeraten zeigen häufig eine leicht rosa Färbung, wobei die Quarze in der Matrix keine Färbung zeigen. Ebenso sind die Quarzkristalle im Metasandstein, grünen und weißen Quarzit, nicht gefärbt und somit frei von Verunreinigungen. Im glasigen Quarzit wurde als einzige Verunreinigung ein Korn limonitisierten Pyrits gefunden. Während in den Konglomeraten die dunklere Farbgebung auch durch rostige Anwitterung und dem Vorkommen dunklerer Minerale (Schörl, gefärbte Quarze), bewirkt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die phengitischen Muskovite für die Färbung in den restlichen Lithologien verantwortlich sind. Sie sind auch das einzige Nebengemengteil, dass nicht akzessorisch auftritt. Folglich kann eine Qualitätsminderung direkt am höheren Hellglimmergehalt und dem dadurch steigenden Eisengehalt festgemacht werden. Die phengitischen Muskovite zeigen in allen Lithologien einen ähnlichen FeO-Gehalt von gemittelt 5,43 m% (SD: 0,55 m%) (Tabelle 13 Anhang B3).

Der phengitische Muskovit als Zwischenglied in der Muskovit-Seladonit Mischkristallreihe, kann als sogenanntes „Phengitbarometer“ für die Abschätzung der Metamorphosebedingungen herangezogen werden (Massonne & Schreyer 1987). Trotz der eher breiten Streuung der Si a.p.f.u., die durch das REM selbst bedingt sein könnte, sollte von einer gemeinsamen grünschieferfaziellen Metamorphose der Lithologien ausgegangen werden. Eine Abgrenzung des Konglomerates ist bei Betrachtung der a.p.f.u-Verhältnisse Si gegen Al möglich. Das in einigen Muskoviten nachgewiesene Ba ist in Anbetracht der Gesamtgesteinschemie zu vernachlässigen. Ebenso spielen die Ti-Gehalte in einigen Muskoviten bei Gesamtbetrachtung keine Rolle. Die vor allem in den weißen Quarziten erhöhten Ti-Gehalte von gemittelt 0,067 m% lassen sich durch das Schwermineral Rutil erklären. Weiters sind die mit durchschnittlich 56 ppm leicht erhöhten Zr-Werte in den weißen Quarziten durch das Vorhandensein von Zirkonen bedingt. Pb-Minerale wurden keine gefunden. Die in der Literatur erwähnten Lydite konnten nicht nachgewiesen werden (Tollmann 1977). Im Konglomerat und im Metasandstein ist jedoch Schörl als Komponente enthalten.

Die Lagerstätte ist zudem von Al-Alterationsmineralen geprägt. Als wichtigste Edukte für die Alterationen sind Alkalifeldspat und in geringerem Maße Plagioklas zu nennen. Bis auf die Metasandsteine und glasigen Quarzite kommt in allen Lithologien Kaolinit als Alterationsprodukt des Alkalifeldspates vor. Der Alkalifeldspat dürfte fast vollständig umgewandelt worden sein, da in nur einer Probe einzelne Alkalifeldspäte nachgewiesen werden konnten. Am häufigsten ist Kaolinit direkt in den weißen Alterationszonen und im vollständig vergrusten Material. Als Alterationsprodukt des Plagioklases ist im vollständig vergrusten Material Albit vorhanden. Der durch Albitisierung entstandene Albit stellt hier 82 m% des Gesamtmaterials dar. Die sandige Verwitterung dieses Materials dürfte direkt dem hohen Albitgehalt geschuldet sein. Die Verwitterungsbeständigkeit wird durch eine bei der Albitisierung entstehende sekundäre Porosität verringert. Die Alterationen zu hochreinen Quarziten kennzeichnet zusätzlich das Vorkommen von Gorceixit in den entfärbten Zonen. Die Edukte dieses Ba-Al-Phosphates sind Alkalifeldspat (Al), Baryt (Ba) und Apatit (P). Die Kristallisation des Gorceixits erfolgte nach dem Kaolinit, da sich einige Kaolinite innerhalb des Gorceixits befinden. Die Menge an enthaltenem Gorceixit kann direkt mit den Ba-Gehalten korreliert werden und schwankt in den weißen Quarziten zwischen 28 und 4916 ppm mit einem Medianwert von 105 ppm.

Während der Alteration dürfte auch eine Rekristallisation der Quarze in den Alterationszonen stattgefunden haben. Als Indiz dafür dienen die größeren Kristallgrößen im Vergleich zu den nicht alterierten Quarziten.

### 5.1.2 Alterationszonen und lithologischer Aufbau

Grundsätzlich kann von einer hydrothermalen Alteration an den Kluft- und Schieferungsflächen und an der Störung des Leithorizontes ausgegangen werden. Zeitlich ist die Alteration nach der Metamorphose einzuordnen. Die Alterationen zu hochreinen Varietäten waren nur in den grünen Quarziten zu beobachten. Die Fe-hältigen phengitischen Muskovite wurden gelöst, was zu einer Entfärbung bzw. Ausbleichung im Zuge der Alteration der Quarzite und einem diffusen Kontakt zum Nebengestein führte. Der Fe-Gehalt verringert sich dadurch von 1607 ppm auf 309 ppm $Fe_2O_3$ im Schnitt. An einer Stelle im grünen Quarzit auf ET 1 sieht man eine Anreicherung der phengitischen Muskovite am diffusen Kontakt. Im Zuge der Alteration haben sich der Kaolinit und der Gorceixit gebildet. Während sich der Gorceixit nur direkt in der Alterationszone im weißen Quarzit befindet, sieht man Kaolinit auch proximal zum Kontakt im grünen Quarzit. Da die glasige Verheilung der Klüfte rein aus Quarz besteht, ist davon auszugehen, dass die hydrothermal gelösten Elemente aus dem lokalen Fluidsystem vollständig abtransportiert und erst allochthon ausgefällt wurden.

Die entfärbten Bereiche variieren in ihren Mächtigkeiten stark. Erst die Anhäufung von Bereichen >1 m ist im Wesentlichen kartierbar. Hinzu kommen bis zu 6 m breite Alterationsbereiche um den

konglomeratischen Leithorizont. Hier dürfte der entfärbte Bereich durch störungsbedingte erhöhte Flussraten größer sein. So sieht man auch breitere Alterationsbereiche parallel zur Schieferungsrichtung im Vergleich zu den anderen Kluftrichtungen. Vor allem die Entfärbungen an der Störung legen nahe, dass sie sich zu Zeiten erhöhter tektonischer Aktivität entwickelt haben. Lokal signifikant dafür wäre die Ausbildung der Anger-Piregg-Störung im hangenden Deckensystem, welche auch zur Öffnung des Fischbacher Fensters geführt haben könnte (Schuster & Ilickovic 2015). Demnach könnten die Alterationen direkt mit der Aktivierung der Anger-Piregg-Störung zusammenhängen und mit der vollständigen Öffnung des Fischbacher Fensters geendet haben. Möglicherweise sind also solch signifikante Anhäufungen von Alterationen der Semmeringquarzite zu hochreinen Quarziten nur im Fischbacher Fenster ausgebildet.

Lokal lässt sich innerhalb der hochreinen weißen und glasigen Quarzite kein räumlicher Trend der Fe-Gehalte feststellen. Entfärbte Bereiche im cm-Bereich der Klüfte zeigen ähnlich niedrige Fe-Gehalte wie die entfärbten Quarzite proximal zur Leitstörung. Es besteht keine Korrelation zwischen dem enthaltenen Fe und der Entfernung zur Leitstörung. Ebenso ist kein Fe-Trend der weißen Quarzite nach topographischer Höhe bzw. Etagen erkennbar.

Hinsichtlich des allgemeinen lithologischen Aufbaus ist zu erwähnen, dass die Lithologien den in der Literatur erwähnten Formationen entsprechen (Tollmann 1977). Ein litoraler bis flachmariner Faziesraum kann angenommen werden. Das Konglomerat der Lagerstätte könnte aus kontinentalen fluviatilen Ablagerungen stammen und bei der Transgression der Tethys ins Hinterland zwischen die Strandsande geschaltet worden sein.

## 5.1 Angewandte Aspekte

### 5.1.1 Hochreine Quarzite als Rohmaterial für Weiß- und Buntglas

Für Aussagen über die Eignung der Quarzite muss zwischen den Einsatzbereichen Weiß- und Buntglas unterschieden werden. Die in Tabelle 1 definierten Grenzwerte dienen als Basis für die Einordnung.
Die gesamten Bereiche der kartierten grünen Quarzite wären mit $Fe_2O_3$-Gehalten zwischen 1000 und 1700 ppm passend für die Herstellung von Buntglas. Die Werte der weißen Quarzite liegen durchschnittlich bei 309 ppm. Die hochreinen weißen Quarzite wären somit passend für die Herstellung von Weißglas. Der Medianwert des $Fe_2O_3$-Gehalts der glasigen Quarzite liegt bei 65 ppm und wäre bei weitem ausreichend für Weißglas. Die häufig vorhandenen Kluftverheilung mit hochreinen glasigen Quarziten wirken sich positiv auf die Gesamtgesteinschemie aus. Die Proben von weißen Quarziten mit enthaltenen glasigen Quarziten erreichen Medianwerte von 168 ppm $Fe_2O_3$.

Man sieht grundsätzlich einen Trend der geringeren $Fe_2O_3$-Gehalte bei höheren $SiO_2$-Gehalten. Dieser Trend ist in den hochreinen Quarziten schwächer ausgeprägt. Grund hierfür dürfte die geringere Menge an enthaltenen phengitischen Muskoviten sein, woraus sich auch nur geringe Änderungen bei Betrachtung der Gesamtgesteinschemie ergeben. Da die Werte für $Na_2O$, $Al_2O_3$ und $K_2O$ sowohl in den grünen Quarziten als auch in den hochreinen Quarziten unter den geforderten Grenzen liegen, müssten sie als Zuschlagsstoffe beigemischt werden. Das vollständig vergruste Material im Bereich von Probe MZ-QZ-24 mit Kaolinit und Albit als Hauptgemengteile könnte als lokale Quelle für $Na_2O$ und $Al_2O_3$ dienen. Weiters sind teilweise erhöhte Ba-Gehalte in den weißen Quarziten zu beachten. Im Median liegen sie bei 105 ppm. Sollte aber viel Gorceixit in den Alterationszonen vorhanden sein, erreichen sie Maximalwerte von 4916 ppm. Der Vergleich der BaO- und $Fe_2O_3$-Gehalte zeigt deutlich, dass eine Erhöhung der BaO-Gehalte mit einer Verringerung der $Fe_2O_3$-Gehalte einhergeht. Dieser Trend ist in allen Lithologien zu sehen, ist aber in hochreinen Quarziten mit einem BaO-Gehalt von <0,09 m% besonders ausgeprägt.

Eine Abschätzung der Kubaturen der passenden Lithologien ist auf Grund von fehlenden Tiefeninformationen nicht möglich. Dessen ungeachtet kann aber eine Flächenabschätzung getroffen werden. 100 % der als grüne Quarzite kartierten Bereiche sind passend für die Herstellung von Buntglas. In den darin vorkommenden Anhäufungen entfärbter Alterationszonen könnten 40 % des Materials passend für die Herstellung von Weißglas sein (Abbildung 10). Weiters kommen in den grünen Quarziten und dem Konglomerat südöstlich auf ET 5 vereinzelt Klüfte mit Alterationszonen <1 m vor. Hier dürfte der Gesamtgehalt an hochreinen Quarziten geeignet für Weißglas bei 1-2 % liegen. Die Lagerstättenvorräte (Metasandstein und Quarzit grün/weiß/glasig) werden gesamt auf ca. 30 Mio. $m^3$ geschätzt (Untersweg et al. 1999). Das zum Abbau zugehörige Hoffnungsgebiet ist in Abbildung 52 ausgewiesen.

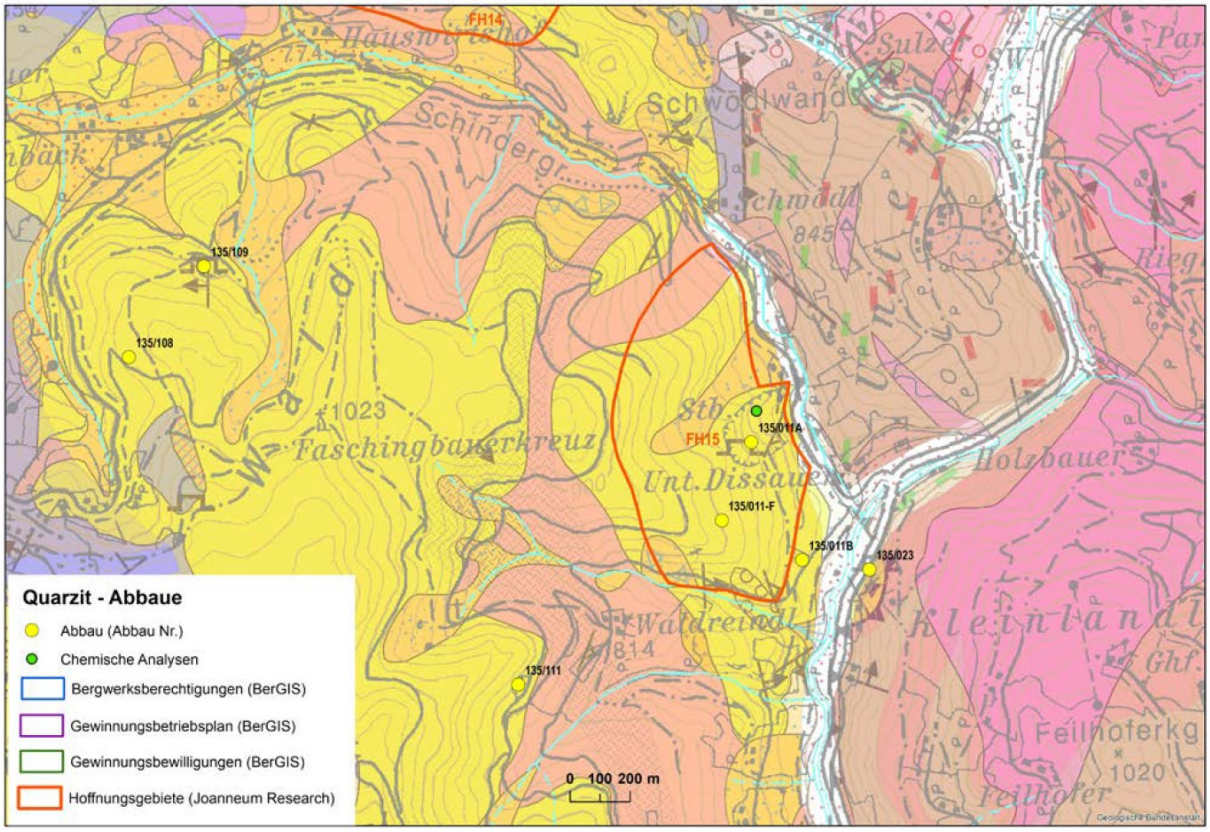


*Abbildung 52: Mit dem Stbr. Friesenbichler assoziiertes Hoffnungsgebiet FH15 (rot umrissen) (Schedl at al. 2019).*

### 5.1.2 Machbarkeitsüberlegungen

Sollte die chemische Zusammensetzung des Materials als passend für den Einsatz in der Glasindustrie angesehen werden, sind dennoch weitere Faktoren zu beachten. Angesichts des sehr kleinteiligen Aufbaus der hochreinen Lithologien dürfte höchstwahrscheinlich ein selektiver Abbau für die wirtschaftliche Gewinnung notwendig sein. Die derzeit vor Ort durchgeführten Aufbereitungsschritte umfassen mehrere Siebanlagen, einen Vor- und einen Hauptbrecher. Um die entsprechende Reinheit des selektiv abgebauten Materials zu erreichen, wären andere bzw. weitere Aufbereitungsmethoden anzuwenden. Der Platz für weitere Infrastruktur ist grundsätzlich vorhanden.

Zwischen selektivem Abbau und einer ersten Siebung wäre vermutlich kein Brechen notwendig, da die Quarzite selbst bei reißendem Abbau extrem kleinstückig brechen. Was hier von Vorteil ist, könnte allerdings bei einer nachfolgenden optischen Sortierung ein Problem darstellen, da für die Erkennung und effektive Sortierung von Quarziten eine Korngröße von 4 mm nicht unterschritten werden sollte (Huber 2016). Eine optische Sortierung dürfte sehr wahrscheinlich notwendig sein, da trotz selektiven Abbaus, signifikante Mengen an grünen Gesteinsanteilen mit phengitischen Muskoviten im Hauwerk vorhanden sein dürften. Weiters wäre darauf zu achten, dass eisenfreie Brecher bzw. Brecher ohne färbende metallische Komponenten in allen Aufbereitungsschritten eingesetzt werden. Bei einem Einsatz von Eisenbrechern könnte für die Entfernung von verbliebenem Eisenabrieb eine Salzsäurewäsche oder ein Magnetabscheider genutzt werden.

Hinsichtlich des weiteren Explorationsvorgehens werden Kernbohrungen für eine tatsächliche Kubaturabschätzung empfohlen.

Das aufbereitete Material müsste via Silo-LKW nach Köflach transportiert werden. Die Distanz bei einer Route über Birkfeld, Weiz und Gleisdorf liegt bei ca. 113 km. Bei einem Transport über die S6 und S35 liegt die Distanz bei 147 km.

## 5.2 Portable LIBS vs. Labor-RFA

Die mit LIBS im Abbau gemessenen Elementgehalte können innerhalb der tatsächlichen Werte aus der RFA interpretiert werden. Die eindeutigen Trends der Si- und Mg-Analysen lassen zudem eine Interpolation zu. Vorweg ist anzumerken, dass alle Messungen an Quarziten mit >96 m% $SiO_2$ durchgeführt wurden. Somit könnten Aussagen über die Eignung des portablen LIBS-Gerätes als geochemische Untersuchungsmethode im Gelände für andere Gesteinsarten mit einem weitaus geringerem Quarzgehalt nicht korrekt sein. Es ist festzuhalten, dass für richtige LIBS-Messungen im Gelände, zuvor eine Kalibration mit chemischen Laboranalysen desselben Materials erfolgen muss.

Zusammenfassend ergeben sich richtige Messwerte in folgenden Grenzen der realen Gehalte im Gestein:

| | |
|---|---|
| Si: | 41-48 m% |
| Fe: | 0-0,26 m% |
| Al: | 0-2 m% |
| Mg: | 0-0,07 m% |
| Ba: | 0-0,24 m% |

Besonders niedrige Fe-Gehalte <0,05 m% sind mit einer sehr hohen Genauigkeit messbar. Die Al-Messwerte zeigen generell eine sehr hohe Standardabweichung und über Gehalten von 2 m% eine signifikante Überbestimmung. Sie können daher nur bis zu diesem Wert als richtig angesehen werden. Die K-Auswertung im Bland-Altman-Plot lassen eine mittlere Überbestimmung von 0,424 m%, eine hohe Streuung und keinen klaren Trend erkennen. Die Messwerte des K sind somit die einzigen, die mittels LIBS nicht richtig bestimmt werden konnten.

Prinzipiell stellt das portable LIBS-Gerät eine gute Alternative zu gängigen portablen chemischen Analysegeräten dar. Vorteile sind vor allem die Analysemethode ohne radioaktive- und ohne Röntgenstrahlung, die Schnelligkeit der Analyse und die sehr einfache Probenvorbereitung bzw. Anwendung.

## 5.3 Multielektroden-Widerstandsmessungen als Prospektionsmethode

Auf Grund der simplen mineralischen Zusammensetzung der Quarzite, sollte sich die elektrische Widerstandsmessung als Prospektionsmethode gut eignen. Die phengitischen Muskovite stellen mit ihrem Fe-Gehalt die einzige leitende Phase in den grünen und hochreinen Quarziten dar. Die teilweise leitenden Eigenschaften der akzessorischen Minerale sind wegen der geringen Gehalte zu vernachlässigen. Wird die durchgeführte Widerstandsmessung auf Basis der modalen Zusammensetzungen interpretiert, lässt sich eine Abgrenzung zum Konglomerat sehr einfach treffen. Vermutlich dürften auch Bereiche des Metasandsteines abgrenzbar sein. Die 14,5 modal-% Hellglimmer (phengitischer Muskovit) liegen doch weit über den Gehalten der grünen Quarzite (2,1 modal-%). Die Unterscheidung zwischen grünen und weißen bzw. glasigen Quarziten erscheint komplexer. Bei Auswertung der geoelektrischen Daten in Korrelation mit den kartierten Bereichen, lässt sich ein ca. 6 m breiter Bereich hochreiner Quarzite abgrenzen (Abbildung 51). Im kleinteiligeren Bereich südöstlich der Störung belaufen sich die Breiten der hochreinen Quarzite auf unter 1 m. Bereiche mit höheren Widerständen lassen sich hier zwar gut erkennen, jedoch ist fraglich, ob es sich dabei tatsächlich um relevante Anhäufungen der entfärbten Zonen handelt. Von ET 5 aus könnten die Alterationszonen auf ET 4 und die im SE folgenden grünen Quarzite ohne nennenswerte Alterationen in einer zweiten Profillinie in Zukunft gemessen werden. Eventuell ist hier eine Abgrenzung der zwei Lithologien möglich und die Methode der Multielektroden-Widerstandsmessung erweist sich als adäquate Prospektionsmethode auf hochreine Quarzite.

# 6 Conclusio

Die Semmeringquarzitlagerstätte des Stbr. Friesenbichler GmbH Nfg & Co KG kann geologisch dem Semmering-Wechsel-Deckensystem und darin der Vorau-Decke zugeordnet werden. Lokal ist sie im Fischbacher Fenster aufgeschlossen. Die Öffnung des Fensters dürfte mit der Aktivierung der Anger-Piregg-Störung einher gegangen sein. Im Fenster tritt ausschließlich die permomesozoische Bedeckung der kristallinen Einheiten zu Tage. Die im Tagebau vorliegenden Einheiten können als permotriassische Metasedimente zusammengefasst werden. Im Zuge der Detailkartierung konnte die Lagerstätte lithologisch in drei Hauptformationen eingeteilt werden: Meta-Quarzkonglomerat, Metasandstein und grüner Quarzit. Alle Einheiten fallen mit 116° ±7° Richtung ESE ein. Großtektonisch kann von einer offenen geneigten Falte mit Vergenz in Richtung des generellen Schichteinfallens, mit der Synklinale im zentralen Abbaubereich, ausgegangen werden. Eine Unterscheidung der Lithologien ist einerseits durch die Korngröße (Meta-Quarzkonglomerat: >2 mm, Metasandstein: <2 mm, grüner Quarzit: keine makroskopisch erkennbaren Körner) und dem zum grünen Quarzit hin heller werdenden Farbeindruck möglich. Mineralogisch stellen Quarz und phengitische Muskovite die Haupt- bzw. Nebengemengteile dar. Akzessorisch treten Albit, Alkalifeldspat, Apatit, Baryt, Gorceixit, Kaolinit, Monazit, limonitisierter Pyrit, Rutil und Zirkon auf. Der heller werdende Farbeindruck kann direkt mit einem geringeren Hellglimmergehalt korreliert werden. Die phengitischen Muskovite enthalten durchschnittlich 5,43 m% (SD: 0,55 m%) FeO und stellen die maßgebende Fe-führende Mineralphase dar. Da der Fe-Gehalt das Hauptkriterium für die Einordung als geeignetes Rohmaterial für die Weiß- bzw. Buntglasherstellung darstellt, kann eine Qualitätseinstufung direkt am Hellglimmergehalt erfolgen. Die phengitischen Muskovite der grünen Quarzite wurden durch post-metamorphe hydrothermale Alterationen von 2,1 modal-% auf 0,1 modal-% verringert. Die Alteration hatte eine Entfärbung und Rekristallisation der betroffenen Zonen zur Folge und führte zur Ausbildung der weißen Quarzite. Die gelösten Elemente wurden aus dem Fluidsystem abtransportiert und erst allochthon ausgefällt. Häufig ist die glasige Verheilung der Klüfte (99,9 modal-% $SiO_2$) nach der Alteration noch intakt. Die weißen und glasigen Lithologien können als hochreine Quarzite eingestuft werden. Als Indikatorminerale der Alterationszonen konnten Kaolinit und Gorceixit identifiziert werden. Während die Mächtigkeiten der Alterationszonen, die mit Klüften assoziiert sind, im Bereich 1 mm - 1 m liegen, erreichen sie konkordant zur Bankung teilweise Mächtigkeiten >1 m. Darüber hinaus befinden sich lateral zu den Störungen des Leithorizontes bis zu 6 m mächtige Alterationszonen. Die Alterationen dürften mit der Öffnung des Fischbacher Fensters einhergegangen sein. Die Ausbildung der Alterationszonen bedingt einen sehr kleinräumigen Aufbau, wodurch nur vier Bereiche von Anhäufungen entfärbter Alterationszonen als Übersignatur kartiert werden konnten. Diese befinden sich proximal zum Leithorizont auf den Etagen 4 und 5. Eine Korrelation zwischen Breite der Alterationszonen und Grad der Entfärbung konnte nicht gefunden werden. Nicht vorhandene Tiefeninformationen lassen keine

Kubaturabschätzung zu, jedoch kann der Anteil an hochreinen Quarziten in den grünen Quarziten auf 1-2 % und in den darin enthaltenen Anhäufungszonen auf 40 % geschätzt werden. Angesichts des kleinräumigen Aufbaus wäre bei Betrachtung der Gewinnungsmethode, von einem selektiven Abbau auszugehen. Weiters dürfte eine optische Sortierung zum Zwecke der Aufbereitung notwendig sein.

Die RFA-Daten zeigen eindeutig, dass die weißen und glasigen Quarzite mit 309 ppm bzw. 65 ppm $Fe_2O_3$ (Median) passend für die Herstellung von Weißgläsern sind. Bei einer gemeinsamen Analyse der weißen Quarzite mit der häufig vorkommenden intakten Kluftverheilung werden Werte von 168 ppm $Fe_2O_3$ (Median) erreicht. Die Qualität der grünen Quarzite ist mit 1000-1700 ppm $Fe_2O_3$ ausreichend für die Buntglasherstellung. Die $Na_2O$-, $Al_2O_3$- und $K_2O$-Gehalte liegen unter den geforderten Grenzen. $TiO_2$, $P_2O_5$, Cr, Pb und Zr zeigen keine signifikant erhöhten Werte. Die erhöhten Ba-Werte in den Alterationszonen sind dem Ba-Al-Phosphatmineral Gorceixit geschuldet. Die weißen Quarzite erreichen einen Medianwert von 105 ppm und einen Maximalwert von 4916 ppm Ba. Zusätzlich konnte ein Trend zu geringeren $Fe_2O_3$-Werten bei erhöhten Ba-Gehalten identifiziert werden.

Nach Auswertung der portablen LIBS-Messwerte im Vergleich zur Labor-RFA mittels Bland-Altman-Plot, kann von richtigen LIBS-Messungen innerhalb folgender Grenzen des Gesamtgesteinschmemismus ausgegangen werden: Si: 41-48 m%, Fe: 0-0,26 m%, Al: 0-2 m%, Mg: 0-0,07 m%, Ba: 0-0,24 m%. K konnte vermutlich nicht richtig bestimmt werden. Fe-Gehalte unter 0,05 m% werden mit einer sehr hohen Genauigkeit gemessen.

Die Nutzung einer Multielektroden-Widerstandsmessung als Prospektionsmethode erweist sich grundsätzlich als sinnvoll. Fe in Muskoviten stellt die einzige leitende Phase in den hochreinen Varietäten dar. Anhand der gewonnenen Daten lassen sich die grünen Quarzite von den Lithologien des Metasandsteines und des Konglomerates abgrenzen. Anhäufungen von Alterationen zu hochreinen Quarziten innerhalb der grünen Quarzite lassen sich auf Basis des höheren Widerstandes im Prinzip ausweisen. Bei geringmächtigen Alterationszonen von <1 m dürfte die Auflösung einer Multielektroden-Widerstandsmessung allerdings zu gering sein, um sie eindeutig ausweisen zu können.

Im Hinblick auf das weitere Explorationsvorgehen im Stbr. Friesenbichler, sollte ein Kernbohrprogramm geplant und durchgeführt werden, um gesicherte Aussagen über die Kubatur und die Tonnagen der hochreinen Quarzite zu ermöglichen.

# Anhang A

## A1 Literaturverzeichnis


Bernhard F., Hoinkes G., Mogessie A., Postl W., Taucher J. (1996): Phosphate paragenesis in the "Semmeringquarzit" and related quartz veins of the Lower Austroalpine "Fischbach" window, north-eastern Styria Austria. *Mitt. Österr. Mineral. Gesell.* (141), S. 66–67.

Bland J.M. & Altman D.G. (1986): Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet (London, England)* 1 (8476), S. 307–310.

Cornelius H.P. (1952): Die Geologie des Mürztalgebietes. (Erläuterungen zu Blatt Mürzzuschlag 1 : 75.000). *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* (Sb. 4), 96 S. Wien.

Dallmeyer R.D., Handler R., Neubauer F., Fritz H. (1998): Sequence of Thrusting Within A Thick-Skinned Tectonic Wedge: Evidence From 40 Ar/ 39 Ar and Rb-Sr Ages From the Austroalpine Nappe Complex of the Eastern Alps. *The Journal of Geology* 106 (1), S. 71–86. DOI: 10.1086/516008.

Dill H.G. (2001): The geology of aluminium phosphates and sulphates of the alunite group minerals: a review. *Earth-Science Reviews* 53 (1-2), S. 35–93. DOI: 10.1016/S0012-8252(00)00035-0.

Faupl P. (1970a): Zur Geologie des NW-Abschnitts des Wechselgebietes zwischen Trattenbach (Nö) und Fröschnitz (Stmk.) – Österreich. *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.*, S. 27–70.

Faupl P. (1970b): Zur Geologie und Petrographie des südlichen Wechselgebietes. *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien* (63), S. 22–51. Wien.

Flügel H.W. & Neubauer F. (1984): Erläuterungen zur geologischen Karte der Steiermark. *Geologische Bundesanstalt*, 127 S. Wien.

Froitzheim N., Plasienka D., Schuster R. (2008): Alpine tectonics of the Alps and Western Carpathians. *The Geology of Central Europe. Volume 2: Mesozoic and Cenozoic*, S. 1141–1232. Geol. Soc. London. DOI: 10.1144/CEV2P.6.

Gaal G. (1966): Geologie des Roßkogelgebietes W Mürzzuschlag (Steiermark). *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.* (16), S. 105–148.

Huber R. (2016): Weiterentwicklung optischer Sortiertechnik und Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten in der Aufbereitung primärer und sekundärer Rohstoffe. Dissertation. Montanuniversität, Leoben.

Kirchmayer M. (1960): Der Semmeringquarzit, ein interessantes Problem. *Mitt. Abt. Mineralogie-Joanneum* (2), S. 18–19. Graz.

Kirchmayer M. (1961): Wasser-Wellenfurchen im Semmering-Quarzit, Steiermark, Österreich. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, S. 65-71. Stuttgart.

Krainer K. (1993): Late- and Post-Variscan Sediments of the Eastern and Southern Alps. In: J. F. von Raumer und Franz Neubauer (Hg.): Pre-Mesozoic geology in the Alps. Berlin, New York: Springer-Verlag, S. 537–564. DOI: 10.1007/978-3-642-84640-3_32.

Krondorfer M., Schuster R., Ilickovic T., Iglseder C., Leiter C., Schober A., Bichler M., Wimmer-Frey I. (2015): Exkursion 2 (23.09.2015): Waldstandorte und Ostalpine Einheiten im Bereich östlich der Anger-Piregg-Störung. *Arbeitstagung 2015 der Geologischen Bundesanstalt*, S. 232–240.

Massonne H.-J. & Schreyer W. (1987): Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz. *Contr. Mineral. and Petrol.* 96 (2), S. 212–224. DOI: 10.1007/BF00375235.

Matura A. & Schuster R. (2014): Geologische Karte der Republik Österreich 1 : 50.000 - 135 Birkfeld. *Geologische Bundesanstalt.* Wien.

Mitterdorfer T. (2024): Exploration auf hochwertige Quarzrohstoffe im Osten Österreichs. Bachelorarbeit. *Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre.* Montanuniversität, Leoben.

Römer A. & Pfeiler S. (2024): Geoelektrik Quarzitsteinbruch Völlegg.- Beitrag der Kompetenzeinheit Oberflächennahe Geophysik zum Zwischenbericht 2023 für das Projekt "MRI-Quarz - Untersuchung von Vorkommen hochwertiger Quarzrohstoffe im südöstlichen Bundesgebiet" im Rahmen der Mineralrohstoffinitiative (MRI) - Forschungspartnerschaften Mineralrohstoffe. *ill. wiss. Archiv. Geosphere Austria,* 14 S. Wien.

Schedl A., Heinrich M., Knoll T., Lipiarski P., Rabeder J. (2019): Datenaufbereitung und Dokumentation hochwertiger Quarzressourcen (Quarzsand, Quarzit, Pegmatit/Gangquarz) im Großraum Köflach. Geologische Bundesanstalt. Wien (Zl. Bestellung 1504 16906).

Schmid S.M., Fügenschuh B., Kissling E., Schuster R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geol. Helv.* 97 (1), S. 93–117. DOI: 10.1007/s00015-004-1113-x.

Schuster R., Kurz W., Krenn K., Fritz H. (2013): Introduction to the Geology of the Eastern Alps. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* (99), 285 S. Wien.

Schuster R. (2015): Zur Geologie der Ostalpen. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* Band 64, S. 143–165. Wien.

Schuster R. & Ilickovic T. (Hg.) (2015): Arbeitstagung 2015 der Geologischen Bundesanstalt - Geologie der Kartenblätter GK50 ÖK 103 Kindberg und ÖK 135 Birkfeld. Mitterdorf im Mürztal 21. - 25. September 2015. Geologische Bundesanstalt, 269 S.

Tollmann A. (1977): Geologie von Österreich - Band I: Die Zentralalpen. *Geologisches Institut der Universität Wien*, 766 S. Wien.

Untersweg T., Beyer A., Plass N., Pöschl M., Schwendt A. (1999): Rohstoffsicherung Steiermark 2. Teil: Bezirke Bruck/Mur, Feldbach, Fürstenfeld, Hartberg, Judenburg, Knittelfeld, Leoben, Mürzzuschlag, Voitsberg.- Unveröffentl. Bericht Joanneum Research in Gem. m. A. Beyer, Rohstoffsicherung Steiermark i. A. *Amt d. Steiermärkischen Landesregierung*, 142 S. Graz.

Vetters W. (1970): Zur Geologie des SW-Abschnittes des Wechselgebietes zwischen Rettenegg und Feistritzsattel (Steiermark, Österreich). *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.* (19), S. 71–102. Wien.

Weixelberger G. (1991): Beitrag zur Weisserdprospektion im Nordostsporn der Zentralalpen (Niederösterreich und Steiermark). *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.* (37), 118 S. Wien.

## A2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektgebiet des Projektes MRI_Quarz. Ausgewiesen sind alle bekannten Quarzit-Abbaue und Vorkommen. 14 aktive Abbaue wurden zur weiteren Beprobung vorgeschlagen (Schedl at al. 2019). ..... 9

Abbildung 2: Geographische Lage der Quarzit-Prospektionslokalitäten, die im Zuge des Projektes besucht und beprobt wurden (Orthofoto; www.basemap.at; Abfrage: 21.10.2023). ..... 10

Abbildung 3: Geographische Verortung des Explorationsziels – Stbr. Friesenbichler (Basiskarte; www.basemap.at; Abfrage: 21.10.2023). ..... 11

Abbildung 4: Semmeringquarzit Tagebau Stbr. Friesenbichler mit den Etagen 0 bis 8. Stand: 2021. Vor allem die ET 5,6 und 7 wurden zwischen 2021 und Ende 2023 weiter aufgefahren. Der Baumbestand zwischen ET 7 und 8 ist mittlerweile gerodet. Der SE-Bereich des Tagebaus wird hauptsächlich zur Befahrung und als Halde genutzt. (Orthofoto; www.basemap.at; Abfrage: 21.10.2023). ..... 12

Abbildung 5: Geologisch-tektonische Übersicht des Kartenblattes 135 Birkfeld (Matura & Schuster 2014). Die Lage des Stbr. Friesenbichler innerhalb der Vorau-Decke (11) ist markiert. ..... 13

Abbildung 6: Das SWD, SSD und KWD (rote Balken) im tektonischen Kontext der Ostalpen, inklusive Metamorphosegrad, Metamorphosehöhepunkt und Zeitpunkt des Einbaus in den ostalpinen Deckenstapel (rote Zahlen). Das Bajuvarische-Deckensystem kommt im betrachteten Gebiet nicht vor. (modifiziert nach Schuster et al. 2013). ..... 14

Abbildung 7: Schematische Darstellung des Deckenbaus des Großraumes zwischen Graz und Semmering. Die Bezeichnungen orientieren sich an Schmid et al. 2004 (modifiziert nach Schuster & Ilickovic 2015). Der Stbr. Friesenbichler kann in die permomesozoische Bedeckung der Vorau-Decke eingeordnet werden. ..... 15

Abbildung 8: Die tektonischen Einheiten am Ostrand der Ostalpen gemäß Schmid et al. (2004) und Froitzheim et al. (2008). Die Vorau-Decke setzt sich aus der permomesozoischen Bedeckung im Fischbacher Fenster (1), dem Kristallin des Waldbachkomplexes (2) und der ihm auflagernden permomesozoischen Bedeckung zusammen (3). Der Bereich der Wechsel-Decke nördlich des Waldbachkomplexes dürfte wahrscheinlich Teil der Vorau-Decke sein (4) (modifiziert nach Schuster & Ilickovic 2015). ..... 20

Abbildung 9: Geologische Detailkarte (Auszug aus dem Kartenblatt 135 Birkfeld) des Fischbacher Fensters und den umgebenden Störungen – Anger-Piregg-Störung (1) und der Störung am Nordrand des Fischbacher Fensters mit verschleppten Karbonaten (2). Der Stbr. Friesenbichler befindet sich am NE-Rand des Fensters (3) mit Abbaurichtung nach SW (modifiziert nach Matura & Schuster 2014). ..... 21

Abbildung 10: Geologische Karte des Stbr. Friesenbichler. Ergebnisse der Detailkartierung auf Basis des Abbaufortschrittes im Sommer 2023. ..... 28

Abbildung 11: a) Meta-Quarzkonglomerat aus dem Störungsbereich ET 5 mit zerbrochenen rosa Quarzgeröllen (blaue Ellipsen). Probe MZ-QZ-7. b) Meta-Quarzkonglomerat aus dem nördlichsten Bereich ET 1. Probe MZ-QZ-27. ..... 29

Abbildung 12: Vollständig vergrustes blütenweißes Material. Probe MZ-QZ-19. ..... 30

Abbildung 13: Metasandstein im Handstück. ET 0. Probe MZ-QZ-19. ..... 31

Abbildung 14: Bruchwand Metasandstein ET 1. Enger werdende Bankung vom Hangenden ins Liegende. Blick in Richtung SW parallel zum generellen Streichen. Blick auf geringmächtige laterale Alterationszonen um Kluftschar 1. ..... 31

Abbildung 15: Bruchwand Metasandstein ET 1. Kluftarten im Metasandstein: a) Scharf abgegrenzt und mit Quarz verheilt (blaue Pfeile), b) Klüfte mit bis zu 20 cm breiten Alterationszonen (rote Pfeile). Blickrichtung normal zum Streichen in Richtung der Kluftschar 1. ..... 32

Abbildung 16: Kluft mit Glimmeranreicherung zwischen der ausgebleichten Zone und dem Metasandstein. Bruchwand ET 1. ..... 33

Abbildung 17: Anhäufung entfärbter Alterationszonen auf ET 5. Zusätzlich zu den Alterationen in Kluft- und Schieferungsrichtung, sieht man mehrere m mächtige Alterationsbereiche, die beidseitig direkt an die Störungen des konglomeratischen Leithorizontes angrenzen. Blickrichtung Süden. ..... 34

Abbildung 18: Diffus ausgebildete entfärbte Alterationszonen mit noch vollständig vorhandener glasiger Verheilung im Handstück. Die Kontaktzone weiß/grün ist strichliert angedeutet. a) Probe MZ-QZ-8B. b) Probe MZ-QZ-4B ..... 35

Abbildung 19: Hochreine Quarzite im Handstück. a) Quarzit weiß Probe MZ-QZ-23A. b) Quarzit glasig Probe MZ-QZ-4B. ..... 35

Abbildung 20: Kluft im grünen Quarzit auf ET 4. Der Alterationsbereich mit hochreinen weißen Quarziten erstreckt sich >1 m (blauer Pfeil). Die ehemals glasige Verheilung der Kluft ist vollständig vergrust (roter Pfeil). ..... 36

Abbildung 21:Drohnenbild der ET 5-8 und des höheren Bereiches der ET 4. Generelles Schichteinfallen in Richtung des linken Bildrandes. Der konglomeratische Leithorizont (rot strichliert) und der grüne Quarzit (schwarz umrandet) sind eindeutig erkennbar. Im Liegenden der Störung auf ET 5 ist ein ca. 6 m breiter Bereich mit vorwiegend hochreinen Quarziten (blauer Pfeil) vom grünen Quarzit (grüner Pfeil) megaskopisch abgrenzbar. Abbildung 17 zeigt eine Detailaufnahme des Störungsbereiches auf ET 5. (Drohnenbild: W. Haidinger) ..... 37

Abbildung 22: a) Offene Synklinale ET 1. b) In sich verfalteter Faltenschenkel durch Störung abgeschnitten. S-Bereich ET 1. ..... 38

Abbildung 23: xN. Komplette Abfolge glasige Kluftfüllung – weißer Quarzit – grüner Quarzit im Dünnschliff der Probe MZ-QZ-8B. Die abnehmende Korngröße mit schlechter werdender Qualität ist gut erkennbar. Vgl. mit Handstück Abbildung 18 a). ..... 40

Abbildung 24: xN. Hochreiner glasiger Quarzit. Probe MZ-QZ-14. Die schwer erkennbaren Einzelkörner sind der Schnittlage geschuldet. Die Brüche als sekundär ausgebildetes planares Gefügemerkmal sind normal auf die tektonisch Hauptspannungsrichtung ($\sigma_1$) ausgerichtet. 40

Abbildung 25: xN. Zwei sich kreuzende glasige Gänge im Schliff MZ-QZ-23C. Das mit 0,7 cm größte gefundene Quarzkorn ist markiert. Die glasigen Quarzkristalle lassen keine Wachstumsrichtung oder Elongation erkennen. ..... 41

Abbildung 26: xN. Fein verteilte Serizite (phengitischer Muskovit) im grünen Quarzit der Probe MZ-QZ-8B. Eine Einregelung ist hier nur innerhalb der Risse erkennbar. ..... 42

Abbildung 27: Elementare Zusammensetzung (Atome pro Formeleinheit) der phengitischen Muskovite nach Lithologien. Analyseergebnisse in Anhang B3 Tabelle 13. ..... 43

Abbildung 28: Zerbrochener Alkalifeldspat im grünen Quarzit. Probe MZ-QZ-16 (Mess. 14). ..... 44

Abbildung 29: Geblätterter vermikularer Kaolinit (Mess. 92) nach der vollständigen Kaolinitisierung von Alkalifeldspat mit phengitischen Muskoviten (Mess. 91, 93) und umgebendem Quarz. Probe MZ-QZ-23B. ..... 45

Abbildung 30: Kaolinit mit Albit (Mess. 125) in Probe MZ-QZ-24. Kaolinit ist hier vermikular in Rissen (Mess. 127) aber auch idiomorph (Mess. 126) ausgebildet. Quarz (A). weißes Rechteck=Bildausschnitt rechts. ..... 45

Abbildung 31: Baryt (Mess. 78) im Alkalifeldspat (Mess. 77) der unalterierten Probe MZ-QZ-16. Phengitischer Muskovit (Mess. 76). ..... 46

Abbildung 32: Links: Texturen des hellen Gorceixit im REM-Bild. Rechts: Die Alterationsprodukte Gorceixit und Kaolinit sind in den Korngrenzen der Alkalifeldspat-Edukte deutlich erkennbar. Probe MZ-QZ-17A (Mess. 41). ..... 47

Abbildung 33: Gorceixit Aggregate (1) mit eingeschlossenen vermikularen Kaoliniten (2). Gorceixit Einzelkörner im Harz des Schliffes (3). Kaolinit (4). Quarz (5). Probe MZ-QZ-17A. ..... 47

Abbildung 34: Apatitkörner (Mess. 109-112) sind in einem Bereich im Metasandstein konzentriert. Probe MZ-QZ-29. Weiters ist der lagige Aufbau der serizitischen phengitischen Muskovite gut erkennbar (1). ..... 48

Abbildung 35: Monazit (1, Mess. 29) im grünen Quarzit der Probe MZ-QZ-23B. Phengitischer Muskovit (2). Quarz (3). Vermikularer Kaolinit (4). ..... 49

Abbildung 36: xN. Schwarzes Gesteinsbruchstück mit Schörl als Hauptmineral im Konglomerat. Probe MZ-QZ-27. ..... 50

Abbildung 37: REM-Bild und Spektrum des Gesteinsbruchstückes mit Schörl als Hauptmineral (Mess. 39, Tabelle 15 Anhang B3) ..... 50

Abbildung 38: Durchschnittliche Mineralzusammensetzung ausgewählter Lithologien in modal-% ... 52

Abbildung 39: RFA $SiO_2$ Analyseergebnisse nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün ..... 54

Abbildung 40: RFA $Fe_2O_3$ Analyseergebnisse nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün ..... 55

Abbildung 41: RFA Analyseergebnisse der Hauptelemente nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün ..... 56

Abbildung 42: RFA Analyseergebnisse der Spurenelemente nach Lithologien. GG=Gesamtgestein, gl.=glasig, w.=weiß, gr.=grün ..... 56

Abbildung 43: Gegenüberstellung der $SiO_2$-, $Fe_2O_3$-, $Al_2O_3$-, $K_2O$-, MgO- und Ba-Gehalte (RFA-Messwerte) nach Lithologien ..... 58

Abbildung 44: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Si-Werte im Bland-Altman-Plot. ..... 59

Abbildung 45: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Fe-Werte im Bland-Altman-Plot. ..... 60

Abbildung 46: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Al-Werte im Bland-Altman-Plot. ..... 61

Abbildung 47: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Mg-Werte im Bland-Altman-Plot. ..... 62

Abbildung 48: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen K-Werte im Bland-Altman-Plot. ..... 63

Abbildung 49: Vergleich der durch LIBS und RFA gemessenen Ba-Werte im Bland-Altman-Plot. ..... 63

Abbildung 50: Profillinie (blau) der Widerstandsmessung mit 184 m Länge auf ET 6. ..... 65

Abbildung 51: Ergebnisse der Widerstandsmessung auf ET 6 inklusive Projektion auf das Drohnenbild (modifiziert nach Römer & Pfeiler 2024). ..... 66

Abbildung 52: Mit dem Stbr. Friesenbichler assoziiertes Hoffnungsgebiet FH15 (rot umrissen) (Schedl at al. 2019). ..... 71

Abbildung 53: Probennahmepunkte im Stbr. Friesenbichler (Orthofoto; www.basemap.at; Abfrage: 28.01.2024) ..... 86

Abbildung 54: XRD-Spektrum von Probe MZ-QZ-24 ..... 90

Abbildung 55: Geoelektrikprofil Stbr. Friesenbichler ET 6. Ergebnis der Inversionsrechnung mit Res2DInv (Römer & Pfeiler 2024). ..... 96

Abbildung 56: Geoelektrikprofil Stbr. Friesenbichler ET 6. Ergebnis der Inversionsrechnung mit EarthImager (Römer & Pfeiler 2024). ..... 97

## A3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Qualitätsanforderungen der Quarzsande für die Herstellung von Weiß- bzw. Buntglas. Chemische Analysen (RFA) der Firma Stoelzle Oberglas GmbH. Hauptkriterium für den Einsatz als Weißglas-Rohmaterial sind $Fe_2O_3$-Gehalte unter 300 ppm. ..... 7

Tabelle 2: REM-EDS Messparameter und Software ..... 25

Tabelle 3: Durchschnittliche Quarzkorngrößen nach Lithologien ..... 39

Tabelle 4: Ergebnisse der Mineralauszählung der Dünnschliffe ..... 51

Tabelle 5: Probenverzeichnis und angewandte Untersuchungsmethoden (Ab=Albit, Afs=Alkalifeldspat, Ap=Apatit, Brt=Baryt, Gcx=Gorceixit, Kln=Kaolinit, Mnz=Monazit, Py=lim. Pyrit, Rt=Rutil, Srl=Schörl, Zrn=Zirkon) ..... 84

Tabelle 6: Probenverzeichnis und angewandte Untersuchungsmethoden (Fortsetzung) ..... 85

Tabelle 7: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (1/4) ..... 87

Tabelle 8: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (Fortsetzung, 2/4) ..... 88

Tabelle 9: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (Fortsetzung, 3/4) ..... 89

Tabelle 10: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (Fortsetzung, 4/4) ..... 90

Tabelle 11: Portable LIBS-Messergebnisse ..... 91

Tabelle 12: Portable LIBS-Messergebnisse (Fortsetzung) ..... 92

Tabelle 13: REM-EDS Elementgehalte (oxidisch) der phengitischen Muskovite nach Lithologien in m% (Mess. Nr. in Klammer) und Berechnungen der Atome pro Formeleinheit (norm. 22 O-Atome). ..... 93

Tabelle 14: REM-EDS Elementgehalte (oxidisch) der enthaltenen Minerale in m% (Mess. Nr. in Klammer) und Berechnungen der Atome pro Formeleinheit für Albit und Alkalifeldspat (Normalisierung auf 8 O-Atome). ..... 94

Tabelle 15: REM-EDS Elementgehalte (oxidisch) der enthaltenen Minerale in m% (Mess. Nr. in Klammer) (Fortsetzung) ..... 95

# Anhang B

## B1 Probenverzeichnis & Karte

| Probenbez. | Lithologie | Bemerkung | Koordinaten (N) | Koordinaten (O) | Akzessorien | Schliff | LIBS | XRF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MZ-QZ-1 | Konglomerat | aus Störungszone | 47,43824618 | 15,68509672 | Py, Rt, Srl, Zrn | x | | |
| MZ-QZ-2 | Quarzit grün | | 47,43804617 | 15,68523922 | | | | |
| MZ-QZ-3 | Quarzit grün | | 47,43846711 | 15,68496796 | | | | |
| MZ-QZ-4A | Quarzit weiß | | 47,43842798 | 15,68493980 | | | x | x |
| MZ-QZ-4B | Quarzit glasig | | 47,43842798 | 15,68493980 | keine Akz. | x | x | x |
| MZ-QZ-4C | Quarzit weiß/grün | nur diffuse Alteration | 47,43842798 | 15,68493980 | Gcx, Kln, Rt, Zrn | x | x | x |
| MZ-QZ-4D | Quarzit weiß/glasig | | 47,43842798 | 15,68493980 | | | x | x |
| MZ-QZ-5A | Quarzit weiß/glasig | 3 LIBS-Messungen am gleichen HS an unterschiedliche Stellen im weißen Bereich | 47,43849388 | 15,68505863 | Gcx, Kln, Mnz, Rt, Zrn | x | x | x |
| MZ-QZ-5B | Quarzit weiß/glasig | | 47,43849388 | 15,68505863 | | | x | x |
| MZ-QZ-5C | Quarzit weiß/glasig | | 47,43849388 | 15,68505863 | | | x | x |
| MZ-QZ-6 | Quarzit grün | | 47,43814855 | 15,68568393 | | | | |
| MZ-QZ-7 | Konglomerat | aus Störungszone | 47,43847189 | 15,68530955 | | | | |
| MZ-QZ-8A | Quarzit weiß | | 47,43853136 | 15,68523956 | Gcx, Kln, Rt, Zrn | x | x | x |
| MZ-QZ-8B | Quarzit glasig/weiß/grün | Komplette Abfolge in einem HS, Schliff über diese Abfolge, für RFA in Einzellithologien aufgebrochen | 47,43853136 | 15,68523956 | Gcx, Kln, Py, Rt, Zrn | x | x | 3 Proben |
| MZ-QZ-9 | Quarzit weiß | | 47,43829067 | 15,68550103 | | | x | x |
| MZ-QZ-10 | Metasandstein | | 47,43923252 | 15,68574695 | | | | |
| MZ-QZ-11 | Quarzit grün | | 47,43916427 | 15,68572090 | Kln, Rt, Zrn | x | | |
| MZ-QZ-12 | Quarzit weiß | | 47,43890976 | 15,68581156 | | | x | x |
| MZ-QZ-13 | Quarzit weiß | | 47,43847076 | 15,68600139 | | | x | x |

*Tabelle 5: Probenverzeichnis und angewandte Untersuchungsmethoden (Ab=Albit, Afs=Alkalifeldspat, Ap=Apatit, Brt=Baryt, Gcx=Gorceixit, Kln=Kaolinit, Mnz=Monazit, Py=lim. Pyrit, Rt=Rutil, Srl=Schörl, Zrn=Zirkon)*

| Probenbez. | Lithologie | Bemerkung | Koordinaten (N) | Koordinaten (O) | Akzessorien | Schliff | LIBS | XRF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MZ-QZ-14 | Quarzit glasig | | 47,43846400 | 15,68598900 | Py | x | x | x |
| MZ-QZ-15 | Quarzit weiß/glasig | | 47,43837090 | 15,68609909 | | | x | x |
| MZ-QZ-16 | Quarzit grün | | 47,43835626 | 15,68608234 | Afs, Brt, Rt, Zrn | x | | |
| MZ-QZ-17A | Quarzit weiß | 5 Messungen an 5 HS aus diesem Probennahmepunkt | 47,43826698 | 15,68618411 | Gcx, Kln, Py, Rt, Zrn | x | x | x |
| MZ-QZ-17B | Quarzit weiß | | 47,43826698 | 15,68618411 | | | x | x |
| MZ-QZ-17C | Quarzit weiß | | 47,43826698 | 15,68618411 | | | x | x |
| MZ-QZ-17D | Quarzit weiß | | 47,43826698 | 15,68618411 | | | x | x |
| MZ-QZ-17E | Quarzit weiß | | 47,43826698 | 15,68618411 | | | x | x |
| MZ-QZ-18 | Konglomerat | aus Störungszone | 47,43906437 | 15,68810611 | | | | |
| MZ-QZ-19 | Metasandstein | | 47,43930850 | 15,68778812 | Rt, Srl, Zrn | x | | |
| MZ-QZ-20 | Quarzit grün | | 47,43801998 | 15,68632706 | | | | |
| MZ-QZ-21A | Quarzit weiß | | 47,43853143 | 15,68596935 | | | x | x |
| MZ-QZ-21B | Quarzit glasig | | 47,43853143 | 15,68596935 | | | x | x |
| MZ-QZ-22A | Quarzit weiß | | 47,43842801 | 15,68604246 | | | x | x |
| MZ-QZ-22B | Quarzit glasig/weiß/grün | Komplette Abfolge | 47,43842801 | 15,68604246 | | | x | x |
| MZ-QZ-23A | Quarzit weiß | | 47,43873289 | 15,68586245 | | | x | x |
| MZ-QZ-23B | Quarzit grün/glasig | scharf abgegrenzt | 47,43873289 | 15,68586245 | Kln, Mnz, Py, Rt, Zrn | x | | |
| MZ-QZ-23C | Quarzit glasig/weiß/grün | Komplette Abfolge | 47,43873289 | 15,68586245 | Gcx, Kln, Py, Rt, Zrn | 2 Schliffe | | |
| MZ-QZ-24 | Quarzit aufgegrust | | 47,43955192 | 15,68656869 | Ab, Gcx, Kln, Mnz, Rt, Zrn | 2 Anschliffe | | x |
| MZ-QZ-25 | Quarzit weiß | | 47,43883055 | 15,68657748 | | | x | x |
| MZ-QZ-26 | Quarzit grün | | 47,43881543 | 15,68657895 | | | | |
| MZ-QZ-27 | Konglomerat | Außerhalb der Störungszone | 47,43963759 | 15,68703482 | Kln, Py, Rt, Srl, Zrn | x | | |
| MZ-QZ-28 | Quarzit grün | | 47,43870851 | 15,68731968 | | | | |
| MZ-QZ-29 | Metasandstein | Außerhalb des Abbaubereiches | 47,43745182 | 15,68902625 | Ap, Mnz, Rt, Srl, Zrn | x | | |

*Tabelle 6: Probenverzeichnis und angewandte Untersuchungsmethoden (Fortsetzung)*

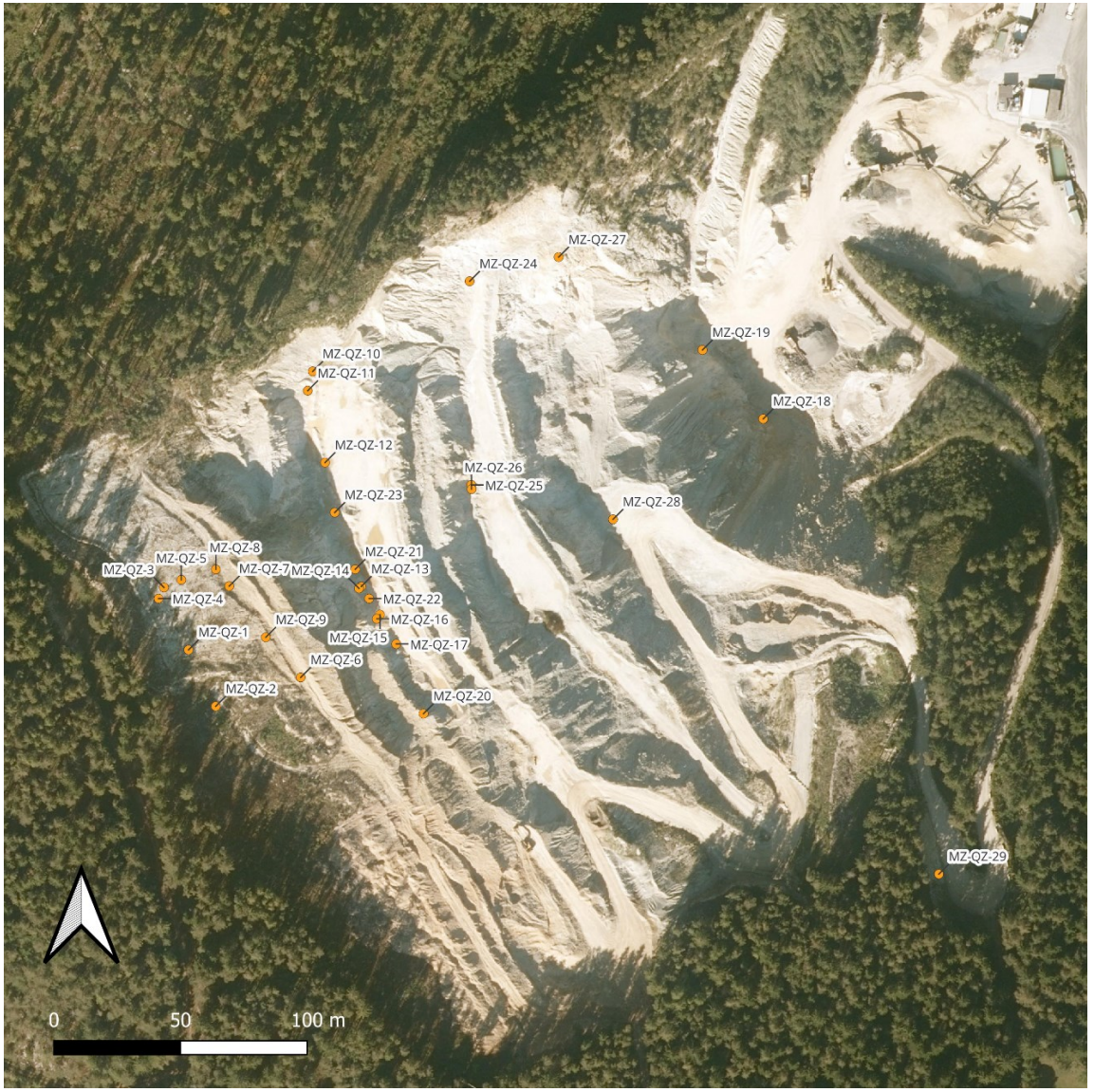


*Abbildung 53: Probennahmepunkte im Stbr. Friesenbichler (Orthofoto; www.basemap.at; Abfrage: 28.01.2024)*

## B2 Chemische und mineralogische Analysen

| Probenbez. | LOI | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | MnO | CaO | MgO | Na2O | K2O | P2O5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% |
| **MZ-QZ-4A** | 0,44 | 97,89 | 0,09 | 1,04 | 0,0309 | 0,002 | <16ppm | 0,05 | <58ppm | 0,08 | 0,03 |
| **MZ-QZ-8A** | 0,59 | 96,76 | 0,04 | 1,56 | 0,0189 | 0,001 | <16ppm | 0,03 | <58ppm | 0,06 | 0,02 |
| **MZ-QZ-8B-weiß** | 1,06 | 96,29 | 0,07 | 2,49 | 0,0198 | 0,001 | <16ppm | 0,04 | <58ppm | 0,06 | 0,02 |
| **MZ-QZ-9** | 1,01 | 97,72 | 0,21 | 1,85 | 0,0109 | 0,001 | 0,01 | 0,03 | <58ppm | 0,04 | 0,11 |
| **MZ-QZ-12** | 0,44 | 98,31 | 0,04 | 1,17 | 0,0169 | 0,001 | <16ppm | 0,03 | <58ppm | 0,04 | 0,03 |
| **MZ-QZ-13** | 0,16 | 96,35 | 0,10 | 0,49 | 0,0439 | 0,001 | <16ppm | 0,06 | <58ppm | 0,13 | 0,04 |
| **MZ-QZ-17A** | 0,99 | 95,28 | 0,13 | 2,32 | 0,0198 | <10ppm | 0,03 | 0,03 | <58ppm | 0,05 | 0,51 |
| **MZ-QZ-17B** | 1,20 | 94,11 | 0,11 | 3,31 | 0,0820 | 0,001 | 0,01 | 0,08 | <58ppm | 0,23 | 0,19 |
| **MZ-QZ-17C** | 0,84 | 94,95 | 0,03 | 1,69 | 0,0228 | <10ppm | 0,02 | 0,03 | <58ppm | 0,05 | 0,44 |
| **MZ-QZ-17D** | 0,44 | 96,83 | 0,05 | 1,10 | 0,0159 | <10ppm | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,17 |
| **MZ-QZ-17E** | 0,47 | 97,81 | 0,06 | 1,00 | 0,0279 | 0,001 | 0,01 | 0,04 | <58ppm | 0,06 | 0,17 |
| **MZ-QZ-21A** | 0,21 | 99,37 | 0,03 | 0,65 | 0,0349 | 0,001 | <16ppm | 0,05 | <58ppm | 0,11 | 0,03 |
| **MZ-QZ-22A** | 0,53 | 98,05 | 0,02 | 1,12 | 0,0169 | 0,002 | <16ppm | 0,03 | <58ppm | 0,04 | 0,01 |
| **MZ-QZ-23A** | 0,96 | 95,86 | 0,08 | 2,52 | 0,0753 | 0,001 | 0,00 | 0,08 | <58ppm | 0,20 | 0,02 |
| **MZ-QZ-25** | 0,31 | 98,07 | 0,02 | 0,88 | 0,0469 | 0,001 | <16ppm | 0,07 | 0,00 | 0,18 | 0,04 |
| **MZ-QZ-4B** | 0,40 | 98,18 | 0,02 | 0,76 | 0,0040 | 0,002 | 0,01 | 0,03 | <58ppm | 0,03 | 0,10 |
| **MZ-QZ-8B-glasig** | 0,21 | 99,28 | 0,02 | 0,36 | 0,0060 | 0,002 | <16ppm | 0,03 | <58ppm | 0,04 | 0,01 |
| **MZ-QZ-14** | 0,02 | 98,61 | <19ppm | 0,14 | 0,0080 | 0,001 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,04 | 0,01 |
| **MZ-QZ-21B** | 0,00 | 98,39 | 0,02 | 0,07 | 0,0070 | 0,001 | <16ppm | 0,03 | <58ppm | 0,03 | 0,01 |

*Tabelle 7: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (1/4)*

| Probenbez. | LOI | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | MnO | CaO | MgO | Na2O | K2O | P2O5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% | m% |
| **MZ-QZ-4D** | 0,32 | 97,87 | 0,03 | 0,69 | 0,0289 | 0,001 | <16ppm | 0,04 | <58ppm | 0,06 | 0,04 |
| **MZ-QZ-5A** | 1,17 | 95,87 | 0,09 | 2,65 | 0,0158 | 0,001 | 0,00 | 0,04 | <58ppm | 0,05 | 0,05 |
| **MZ-QZ-5B** | 1,10 | 96,08 | 0,13 | 2,82 | 0,0168 | 0,001 | <16ppm | 0,04 | <58ppm | 0,05 | 0,08 |
| **MZ-QZ-5C** | 0,30 | 99,67 | 0,04 | 0,73 | 0,0050 | 0,001 | <16ppm | 0,03 | <58ppm | 0,03 | 0,04 |
| **MZ-QZ-15** | 0,46 | 98,09 | 0,03 | 1,14 | 0,0657 | 0,002 | 0,00 | 0,05 | <58ppm | 0,11 | 0,03 |
| **MZ-QZ-4C** | 0,35 | 97,12 | 0,05 | 1,20 | 0,1146 | 0,002 | <16ppm | 0,09 | <58ppm | 0,27 | 0,03 |
| **MZ-QZ-22B** | 0,70 | 96,67 | 0,01 | 1,68 | 0,1092 | 0,001 | 0,00 | 0,06 | <58ppm | 0,16 | 0,10 |
| **MZ-QZ-8B grün** | 0,79 | 96,27 | 0,07 | 2,39 | 0,1607 | 0,002 | <16ppm | 0,08 | <58ppm | 0,28 | 0,01 |
| **MZ-QZ-24** | 7,33 | 57,74 | 0,18 | 26,79 | 0,1084 | <10ppm | 0,09 | 0,02 | 5,81 | 0,08 | 0,74 |

*Tabelle 8: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (Fortsetzung, 2/4)*

| Probenbez. | Ba | Ce | Cr | Cu | Ga | La | Nb | Ni | Pb | Rb | Sr | Th | V | Y | Zn | Zr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| **MZ-QZ-4A** | 171 | <51 | 10 | <7 | <4 | <40 | 4 | <4 | 18 | 13 | 8 | <9 | <6 | <3 | <5 | 56 |
| **MZ-QZ-8A** | <55 | <51 | 9 | <7 | <4 | <40 | 4 | <4 | <8 | 15 | 6 | <9 | <6 | <3 | <5 | 42 |
| **MZ-QZ-8B-weiß** | <55 | <51 | <7 | <7 | 5 | <40 | 5 | <4 | 72 | 15 | 5 | <9 | <6 | <3 | <5 | 81 |
| **MZ-QZ-9** | 738 | 104 | 12 | <7 | 8 | 52 | 13 | <4 | 8 | 13 | 36 | 20 | 9 | <3 | <5 | 168 |
| **MZ-QZ-12** | 105 | <51 | <7 | <7 | 5 | <40 | 5 | <4 | 29 | 17 | 7 | <9 | <6 | <3 | <5 | 39 |
| **MZ-QZ-13** | 335 | <51 | 7 | <7 | 5 | <40 | 4 | <4 | 93 | 15 | 12 | <9 | 8 | <3 | <5 | 83 |
| **MZ-QZ-17A** | 4916 | <51 | 18 | <7 | 6 | <40 | 4 | <4 | 25 | 14 | 58 | 12 | 10 | <3 | <5 | 172 |
| **MZ-QZ-17B** | 1681 | 69 | 12 | <7 | 6 | <40 | 7 | <4 | 9 | 21 | 25 | 12 | 9 | <3 | <5 | 242 |
| **MZ-QZ-17C** | 4423 | <51 | <7 | <7 | <4 | <40 | 7 | <4 | 87 | 15 | 49 | 9 | <6 | <3 | <5 | 154 |
| **MZ-QZ-17D** | 1584 | <51 | <7 | <7 | <4 | <40 | <3 | <4 | 39 | 13 | 17 | 9 | 7 | <3 | <5 | 51 |
| **MZ-QZ-17E** | 1495 | 58 | 8 | <7 | 4 | <40 | 4 | <4 | 24 | 14 | 19 | 11 | <6 | <3 | <5 | 64 |
| **MZ-QZ-21A** | 103 | <51 | <7 | <7 | 6 | <40 | 5 | <4 | 65 | 18 | 8 | <9 | <6 | <3 | <5 | 34 |
| **MZ-QZ-22A** | <55 | <51 | <7 | <7 | <4 | <40 | 4 | <4 | <8 | 12 | 3 | <9 | <6 | <3 | <5 | 21 |
| **MZ-QZ-23A** | 73 | <51 | <7 | <7 | 6 | <40 | 5 | <4 | 12 | 21 | 4 | 14 | 7 | <3 | <5 | 65 |
| **MZ-QZ-25** | 380 | <51 | <7 | <7 | 4 | <40 | 4 | <4 | 63 | 21 | 6 | <9 | <6 | <3 | <5 | 35 |
| **MZ-QZ-4B** | 835 | <51 | <7 | <7 | 5 | <40 | 5 | <4 | <8 | 17 | 31 | <9 | <6 | <3 | <5 | 29 |
| **MZ-QZ-8B-glasig** | <55 | <51 | 10 | <7 | <4 | <40 | <3 | <4 | 17 | 15 | 4 | <9 | <6 | <3 | <5 | 5 |
| **MZ-QZ-14** | <55 | <51 | <7 | <7 | <4 | <40 | 4 | <4 | 63 | 14 | 6 | <9 | <6 | <3 | <5 | <2 |
| **MZ-QZ-21B** | <55 | <51 | <7 | <7 | <4 | <40 | <3 | <4 | <8 | 12 | 4 | <9 | <6 | <3 | <5 | <2 |

*Tabelle 9: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (Fortsetzung, 3/4)*

| Probenbez. | Ba | Ce | Cr | Cu | Ga | La | Nb | Ni | Pb | Rb | Sr | Th | V | Y | Zn | Zr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| **MZ-QZ-4D** | 279 | <51 | <7 | <7 | <4 | <40 | 3 | <4 | <8 | 14 | 8 | <9 | <6 | <3 | <5 | 42 |
| **MZ-QZ-5A** | 419 | <51 | 17 | <7 | 5 | <40 | 4 | <4 | 16 | 14 | 19 | <9 | <6 | <3 | <5 | 64 |
| **MZ-QZ-5B** | 675 | <51 | <7 | <7 | 8 | <40 | 6 | <4 | <8 | 13 | 26 | <9 | 9 | <3 | <5 | 79 |
| **MZ-QZ-5C** | 334 | <51 | <7 | <7 | 6 | <40 | 3 | <4 | 13 | 13 | 10 | <9 | <6 | <3 | <5 | 7 |
| **MZ-QZ-15** | 174 | <51 | 8 | <7 | <4 | <40 | 4 | <4 | 79 | 17 | 8 | <9 | <6 | <3 | <5 | 34 |
| **MZ-QZ-4C** | 229 | <51 | 10 | <7 | <4 | <40 | 3 | <4 | <8 | 22 | 10 | <9 | <6 | <3 | <5 | 45 |
| **MZ-QZ-22B** | 784 | <51 | <7 | <7 | <4 | <40 | 3 | <4 | 8 | 20 | 17 | <9 | <6 | <3 | <5 | 23 |
| **MZ-QZ-8B grün** | <55 | <51 | <7 | <7 | 6 | <40 | <3 | <4 | 160 | 22 | 4 | 13 | <6 | <3 | <5 | 51 |
| **MZ-QZ-24** | 4686 | <51 | 17 | <7 | 35 | <40 | 7 | <4 | 15 | 13 | 184 | 11 | 16 | <3 | 13 | 59 |

*Tabelle 10: RFA-Ergebnisse nach Lithologien (Fortsetzung, 4/4)*

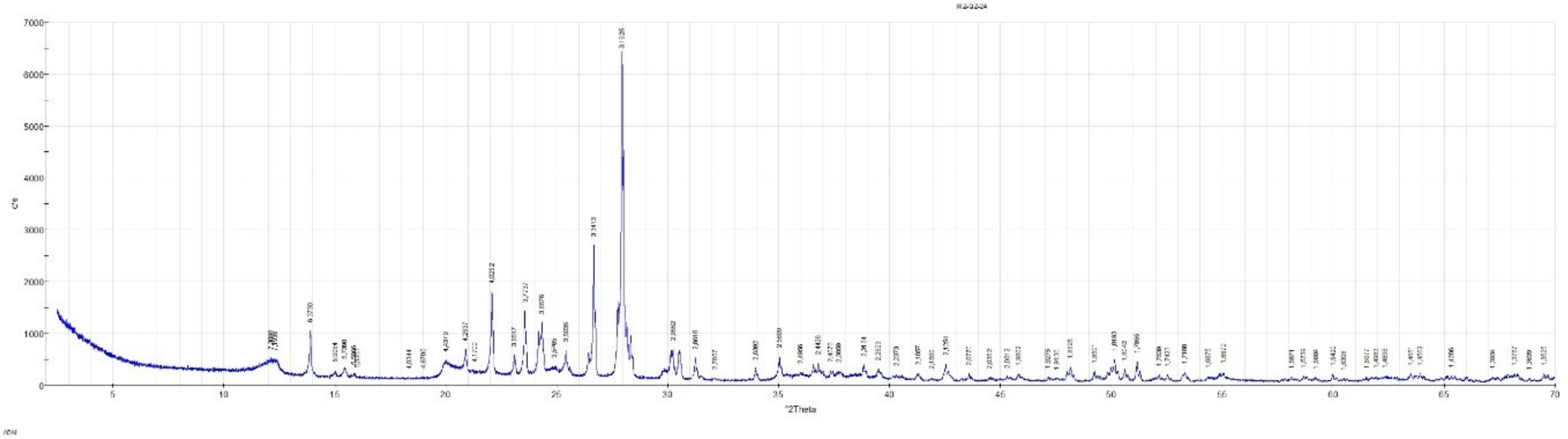


*Abbildung 54: XRD-Spektrum von Probe MZ-QZ-24*

| Probenbez. | Lithologie | Si | Al | Fe | Mg | K | Ba |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | m% | m% | m% | m% | m% | m% |
| MZ-QZ-4A | weiß | 44,35 | 1,98 | 0,021 | 0,004 | 0,549 | 0,025 |
| MZ-QZ-4B | glasig | 45,28 | 0,423 | 0,114 | 0,012 | 0,554 | 0,055 |
| MZ-QZ-4C | weiß | 44,18 | 1,85 | 0,484 | 0,057 | 0,307 | 0,022 |
| MZ-QZ-4C | grün | 44,17 | 2,26 | 0,432 | 0,081 | 0,307 | 0,036 |
| MZ-QZ-4D | glasig | 44,26 | 2,66 | 0,091 | 0,011 | 0,555 | 0,02 |
| MZ-QZ-4D | weiß | 44,16 | 4,11 | 0,148 | 0,028 | 0,493 | 0,037 |
| MZ-QZ-5A | weiß | 44,14 | 8,23 | 0,07 | 0,013 | 0,529 | 0,017 |
| MZ-QZ-5A | weiß | 44,08 | 16,04 | 0,189 | 0,041 | 0,444 | 0,029 |
| MZ-QZ-5A | weiß | 44,12 | 8,2 | 0,141 | 0,02 | 0,506 | 0,035 |
| MZ-QZ-5B | glasig | 44,63 | 0,532 | 0,341 | 0,011 | 0,555 | 0,011 |
| MZ-QZ-5B | weiß | 38,19 | 18,1 | 0,077 | 0,005 | 0,529 | 0,017 |
| MZ-QZ-5C | glasig | 46,92 | 0,248 | 0,188 | 0,002 | 0,562 | 0,008 |
| MZ-QZ-5C | weiß | 44,34 | 2,79 | 0,044 | 0,005 | 0,559 | 0,017 |
| MZ-QZ-8A | weiß | 44,18 | 5,49 | 0,076 | 0,013 | 0,524 | 0,01 |
| MZ-QZ-8B | glasig | 44,47 | 2,78 | 0,042 | 0,015 | 0,434 | 0,058 |
| MZ-QZ-8B | weiß | 45,44 | 0,716 | 0,117 | 0,031 | 0,513 | 0,017 |
| MZ-QZ-8B | grün | 44,41 | 2,2 | 0,17 | 0,045 | 0,461 | 0,021 |
| MZ-QZ-9 | weiß | 45,36 | 0,838 | 0,03 | 0,006 | 0,551 | 0,015 |
| MZ-QZ-12 | weiß | 44,16 | 7,27 | 0,067 | 0,01 | 0,529 | 0,009 |
| MZ-QZ-13 | weiß | 45,03 | 0,493 | 0,27 | 0,029 | 0,522 | 0,015 |
| MZ-QZ-14 | glasig | 44,42 | 0,764 | 0,73 | 0,107 | 0,454 | 0,03 |
| MZ-QZ-15 | weiß | 47,26 | 0,69 | 0,034 | 0,002 | 0,558 | 0,07 |
| MZ-QZ-17A | weiß | 44,34 | 1,75 | 0,328 | 0,044 | 0,465 | 0,141 |
| MZ-QZ-17B | weiß | 44,18 | 6,76 | 0,281 | 0,072 | 0,359 | 0,116 |
| MZ-QZ-17C | weiß | 44,14 | 11,56 | 0,031 | 0,014 | 0,539 | 0,032 |
| MZ-QZ-17D | weiß | 44,08 | 18,5 | 0,135 | 0,043 | 0,425 | 0,058 |
| MZ-QZ-17E | weiß | 44,36 | 3,56 | 0,04 | 0,011 | 0,528 | 0,09 |

*Tabelle 11: Portable LIBS-Messergebnisse*

| Probenbez. | Lithologie | Si | Al | Fe | Mg | K | Ba |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | m% | m% | m% | m% | m% | m% |
| MZ-QZ-21A | weiß | 44,56 | 0,599 | 0,1 | 0,041 | 0,494 | 0,015 |
| MZ-QZ-21B | glasig | 45,87 | 0,283 | 0,242 | 0,037 | 0,528 | 0,01 |
| MZ-QZ-22A | weiß | 44,13 | 6,35 | 0,054 | 0,015 | 0,529 | 0,012 |
| MZ-QZ-22B | glasig | 44,87 | 0,458 | 0,237 | 0,031 | 0,532 | 0,018 |
| MZ-QZ-22B | weiß | 44,23 | 1,39 | 0,522 | 0,062 | 0,474 | 0,05 |
| MZ-QZ-23A | weiß | 44,19 | 2,03 | 0,09 | 0,042 | 0,485 | 0,015 |
| MZ-QZ-25 | weiß | 44,74 | 0,601 | 0,194 | 0,063 | 0,508 | 0,027 |

*Tabelle 12: Portable LIBS-Messergebnisse (Fortsetzung)*

## B3 REM-EDS Messungen

| Muskovit [m%] | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | FeO | MgO | Na2O | K2O | BaO | | Muskovit [apfu] | Si | Ti | Al | Fe | Mg | Na | K | Ba |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MZ-QZ-27 (100) | 45,84 | 0,00 | 25,56 | 5,17 | 1,23 | 0,16 | 9,60 | 0,00 | | MZ-QZ-27 (100) | 6,75 | 0,00 | 4,44 | 0,64 | 0,27 | 0,05 | 1,80 | 0,00 |
| MZ-QZ-27 (35.1) | 51,88 | 0,00 | 30,08 | 5,81 | 1,36 | 0,00 | 10,87 | 0,00 | | MZ-QZ-27 (35.1) | 6,68 | 0,00 | 4,57 | 0,63 | 0,26 | 0,00 | 1,79 | 0,00 |
| MZ-QZ-27 (35.2) | 50,88 | 0,00 | 32,09 | 5,24 | 1,87 | 0,08 | 9,84 | 0,00 | | MZ-QZ-27 (35.2) | 6,51 | 0,00 | 4,84 | 0,56 | 0,36 | 0,02 | 1,61 | 0,00 |
| MZ-QZ-27 (36) | 51,17 | 0,00 | 32,20 | 4,06 | 2,42 | 0,49 | 9,66 | 0,00 | | MZ-QZ-27 (36) | 6,51 | 0,00 | 4,83 | 0,43 | 0,46 | 0,12 | 1,57 | 0,00 |
| MZ-QZ-27 (37) | 51,08 | 0,00 | 28,85 | 5,34 | 1,22 | 0,04 | 13,47 | 0,00 | | MZ-QZ-27 (37) | 6,69 | 0,00 | 4,45 | 0,58 | 0,24 | 0,01 | 2,25 | 0,00 |
| MZ-QZ-27 (38) | 50,88 | 0,00 | 29,76 | 6,25 | 1,33 | 0,19 | 11,59 | 0,00 | | MZ-QZ-27 (38) | 6,62 | 0,00 | 4,56 | 0,68 | 0,26 | 0,05 | 1,92 | 0,00 |
| MZ-QZ-27 (99) | 48,96 | 0,00 | 30,59 | 5,39 | 2,02 | 0,67 | 9,43 | 0,00 | | MZ-QZ-27 (99) | 6,48 | 0,00 | 4,77 | 0,60 | 0,40 | 0,17 | 1,59 | 0,00 |
| MZ-QZ-19 (131) | 47,77 | 0,00 | 25,02 | 5,59 | 1,56 | 0,00 | 11,96 | 0,00 | | MZ-QZ-19 (131) | 6,81 | 0,00 | 4,20 | 0,67 | 0,33 | 0,00 | 2,17 | 0,00 |
| MZ-QZ-29 (55) | 47,47 | 0,00 | 25,17 | 5,39 | 1,59 | 0,00 | 11,70 | 0,00 | | MZ-QZ-29 (55) | 6,79 | 0,00 | 4,24 | 0,64 | 0,34 | 0,00 | 2,13 | 0,00 |
| MZ-QZ-4C (62) | 44,50 | 0,00 | 24,96 | 5,92 | 1,49 | 0,00 | 9,90 | 0,00 | | MZ-QZ-4C (62) | 6,68 | 0,00 | 4,41 | 0,74 | 0,33 | 0,00 | 1,90 | 0,00 |
| MZ-QZ-8B (49) | 46,04 | 0,00 | 24,70 | 5,27 | 1,77 | 0,00 | 10,96 | 0,00 | | MZ-QZ-8B (49) | 6,76 | 0,00 | 4,27 | 0,65 | 0,39 | 0,00 | 2,05 | 0,00 |
| MZ-QZ-16 (1) | 47,86 | 1,42 | 29,82 | 5,69 | 1,97 | 0,34 | 10,71 | 0,00 | | MZ-QZ-16 (1) | 6,37 | 0,14 | 4,67 | 0,63 | 0,39 | 0,09 | 1,82 | 0,00 |
| MZ-QZ-16 (12) | 48,67 | 0,95 | 26,23 | 4,62 | 1,33 | 0,03 | 11,73 | 0,07 | | MZ-QZ-16 (12) | 6,76 | 0,10 | 4,29 | 0,54 | 0,27 | 0,01 | 2,08 | 0,01 |
| MZ-QZ-16 (6) | 51,30 | 0,00 | 27,59 | 4,53 | 1,69 | 0,00 | 10,05 | 0,00 | | MZ-QZ-16 (6) | 6,88 | 0,00 | 4,36 | 0,51 | 0,34 | 0,00 | 1,72 | 0,00 |
| MZ-QZ-16 (76) | 48,54 | 1,22 | 25,63 | 5,26 | 1,33 | 0,02 | 10,86 | 0,00 | | MZ-QZ-16 (76) | 6,78 | 0,13 | 4,22 | 0,61 | 0,28 | 0,01 | 1,93 | 0,00 |
| MZ-QZ-23B (30) | 47,71 | 0,75 | 26,42 | 5,54 | 1,67 | 0,11 | 11,54 | 0,03 | | MZ-QZ-23B (30) | 6,65 | 0,08 | 4,34 | 0,65 | 0,35 | 0,03 | 2,05 | 0,00 |
| MZ-QZ-23B (31) | 51,37 | 0,00 | 29,50 | 6,32 | 2,02 | 0,09 | 10,16 | 0,54 | | MZ-QZ-23B (31) | 6,65 | 0,00 | 4,50 | 0,68 | 0,39 | 0,02 | 1,68 | 0,05 |
| MZ-QZ-23B (87) | 48,18 | 0,00 | 27,06 | 5,16 | 2,18 | 0,00 | 10,49 | 0,00 | | MZ-QZ-23B (87) | 6,69 | 0,00 | 4,43 | 0,60 | 0,45 | 0,00 | 1,86 | 0,00 |
| MZ-QZ-23B (90) | 48,06 | 0,00 | 26,27 | 6,06 | 1,65 | 0,00 | 10,27 | 0,00 | | MZ-QZ-23B (90) | 6,75 | 0,00 | 4,35 | 0,71 | 0,35 | 0,00 | 1,84 | 0,00 |
| MZ-QZ-23B (91) | 46,80 | 0,00 | 25,79 | 5,29 | 1,80 | 0,28 | 11,20 | 0,83 | | MZ-QZ-23B (91) | 6,68 | 0,00 | 4,34 | 0,63 | 0,38 | 0,08 | 2,04 | 0,09 |
| MZ-QZ-23B (93) | 50,65 | 0,55 | 28,83 | 6,03 | 2,32 | 0,47 | 11,03 | 0,03 | | MZ-QZ-23B (93) | 6,59 | 0,05 | 4,42 | 0,66 | 0,45 | 0,12 | 1,83 | 0,00 |
| MZ-QZ-23B (95) | 47,27 | 0,00 | 26,60 | 6,31 | 2,40 | 0,00 | 11,79 | 0,00 | | MZ-QZ-23B (95) | 6,58 | 0,00 | 4,37 | 0,74 | 0,50 | 0,00 | 2,10 | 0,00 |
| MZ-QZ-23B (96) | 47,99 | 1,34 | 25,87 | 4,98 | 1,44 | 0,00 | 11,49 | 0,00 | | MZ-QZ-23B (96) | 6,71 | 0,14 | 4,26 | 0,58 | 0,30 | 0,00 | 2,05 | 0,00 |
| MZ-QZ-8A (63) | 48,22 | 0,00 | 27,42 | 5,31 | 2,57 | 0,00 | 12,08 | 0,00 | | MZ-QZ-8A (63) | 6,59 | 0,00 | 4,42 | 0,61 | 0,52 | 0,00 | 2,11 | 0,00 |
| MZ-QZ-17A (130) | 48,24 | 0,00 | 27,51 | 5,32 | 2,56 | 0,00 | 11,99 | 0,00 | | MZ-QZ-17A (130) | 6,59 | 0,00 | 4,43 | 0,61 | 0,52 | 0,00 | 2,09 | 0,00 |

*Tabelle 13: REM-EDS Elementgehalte (oxidisch) der phengitischen Muskovite nach Lithologien in m% (Mess. Nr. in Klammer) und Berechnungen der Atome pro Formeleinheit (norm. 22 O-Atome).*

| **Albit [m%]** | MZ-QZ-24 (122) | MZ-QZ-24 (125) |
|---|---|---|
| Na2O | 11,53 | 11,09 |
| Al2O3 | 18,26 | 16,61 |
| SiO2 | 64,21 | 60,04 |
| F | 0,00 | 0,12 |
| *Albit [apfu]* | | |
| *Na* | *1,03* | *1,06* |
| *Al* | *1,00* | *0,97* |
| *Si* | *2,97* | *2,97* |

| **Alkali-feldspat [m%]** | MZ-QZ-16 (8) | MZ-QZ-16 (14) | MZ-QZ-16 (77) |
|---|---|---|---|
| Na2O | 0,00 | 0,13 | 0,00 |
| Al2O3 | 17,07 | 18,81 | 16,75 |
| SiO2 | 67,52 | 66,26 | 66,25 |
| K2O | 15,41 | 14,80 | 15,12 |
| *Alkalifeldspat [apfu]* | | | |
| *Na* | *0,00* | *0,01* | *0,00* |
| *Al* | *0,94* | *1,03* | *0,94* |
| *Si* | *3,15* | *3,08* | *3,15* |
| *K* | *0,92* | *0,88* | *0,92* |

| **Apatit [m%]** | MZ-QZ-29 (109) | MZ-QZ-29 (110) | MZ-QZ-29 (111) | MZ-QZ-29 (112) |
|---|---|---|---|---|
| CaO | 53,26 | 56,48 | 53,15 | 52,66 |
| P2O5 | 35,54 | 34,37 | 35,61 | 35,63 |
| F | 2,50 | 1,84 | 2,57 | 2,57 |

| **Baryt [m%]** | MZ-QZ-16 (78) |
|---|---|
| BaO | 43,24 |
| SrO | 5,60 |
| SO3 | 34,50 |

| **Gorceixit [m%]** | MZ-QZ-4C (60) | MZ-QZ-4C (61) | MZ-QZ-4C (118) | MZ-QZ-8A (70) | MZ-QZ-17A (41) | MZ-QZ-17A (43) | MZ-QZ-17A (105) | MZ-QZ-24 (124) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Al2O3 | 26,91 | 28,98 | 28,89 | 41,10 | 35,86 | 33,94 | 27,78 | 32,55 |
| P2O5 | 23,76 | 21,40 | 17,07 | 26,21 | 25,53 | 32,94 | 23,30 | 23,88 |
| CaO | 2,85 | 3,08 | 3,18 | 3,42 | 2,55 | 1,51 | 0,82 | 2,04 |
| BaO | 14,31 | 10,81 | 19,08 | 17,50 | 36,06 | 31,60 | 22,55 | 20,17 |
| MgO | 0,00 | 1,66 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SrO | 5,27 | 7,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

*Tabelle 14: REM-EDS Elementgehalte (oxidisch) der enthaltenen Minerale in m% (Mess. Nr. in Klammer) und Berechnungen der Atome pro Formeleinheit für Albit und Alkalifeldspat (Normalisierung auf 8 O-Atome).*

| **Kaolinit [m%]** | MZ-QZ-4C (117) | MZ-QZ-17A (104) | MZ-QZ-23B (21) | MZ-QZ-23B (92) | MZ-QZ-24 (69) | MZ-QZ-24 (126) | MZ-QZ-24 (127) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Al2O3 | 32,53 | 29,50 | 44,96 | 29,95 | 45,23 | 32,68 | 34,59 |
| SiO2 | 41,09 | 40,18 | 55,04 | 42,51 | 54,77 | 40,13 | 39,30 |
| K2O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| **Monazit [m%]** | MZ-QZ-5A (64) | MZ-QZ-23B (29) | MZ-QZ-24 (121) | MZ-QZ-29 (54) |
|---|---|---|---|---|
| P2O5 | 35,38 | 38,14 | 28,53 | 35,22 |
| CaO | 0,00 | 1,93 | 0,00 | 0,00 |
| Ag2O | 2,13 | 5,23 | 0,00 | 0,00 |
| La2O3 | 11,28 | 14,66 | 14,74 | 14,88 |
| Ce2O3 | 30,72 | 30,86 | 21,49 | 31,35 |
| Nd2O3 | 12,65 | 9,18 | 7,82 | 12,65 |
| ThO2 | 7,83 | 0,00 | 3,16 | 5,91 |

| **lim. Pyrit [m%]** | MZ-QZ-8B (46) | MZ-QZ-14 (58) | MZ-QZ-23B (94) | MZ-QZ-27 (34) |
|---|---|---|---|---|
| FeO | 96,62 | 95,74 | 86,08 | 97,43 |
| SiO2 | 0,00 | 4,26 | 1,23 | 2,57 |

| **Rutil [m%]** | MZ-QZ-1 (113) | MZ-QZ-8B (51) | MZ-QZ-16 (7) | MZ-QZ-17A (103) | MZ-QZ-19 (56) | MZ-QZ-24 (67) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TiO2 | 107,44 | 100,00 | 102,55 | 90,69 | 100,00 | 100,00 |

| **Schörl [m%]** | MZ-QZ-27 (39) |
|---|---|
| Na2O | 2,89 |
| MgO | 4,84 |
| Al2O3 | 34,31 |
| SiO2 | 42,44 |
| FeO | 15,52 |

| **Zirkon [m%]** | MZ-QZ-16 (9) | MZ-QZ-23B (86) | MZ-QZ-23C (114) | MZ-QZ-24 (67) | MZ-QZ-27 (102) |
|---|---|---|---|---|---|
| ZrO2 | 68,41 | 64,65 | 62,60 | 68,11 | 57,33 |
| SiO2 | 31,59 | 29,94 | 29,06 | 31,89 | 28,34 |

*Tabelle 15: REM-EDS Elementgehalte (oxidisch) der enthaltenen Minerale in m% (Mess. Nr. in Klammer) (Fortsetzung)*

## B4 Multielektroden-Widerstandsmessung – Inversionsrechnungsprofile

NW SE

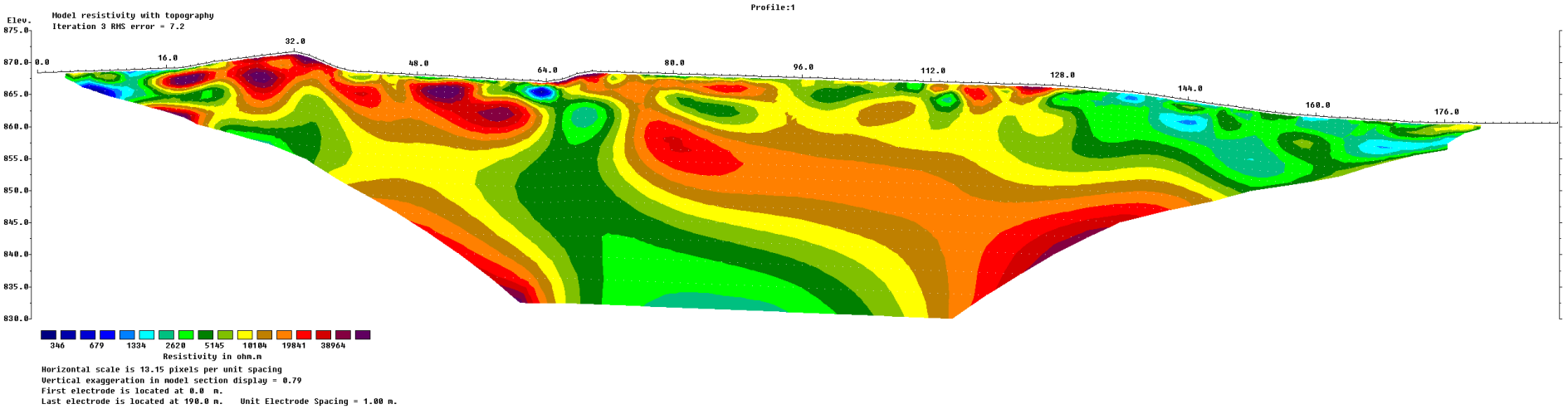


*Abbildung 55: Geoelektrikprofil Stbr. Friesenbichler ET 6. Ergebnis der Inversionsrechnung mit Res2DInv (Römer & Pfeiler 2024).*

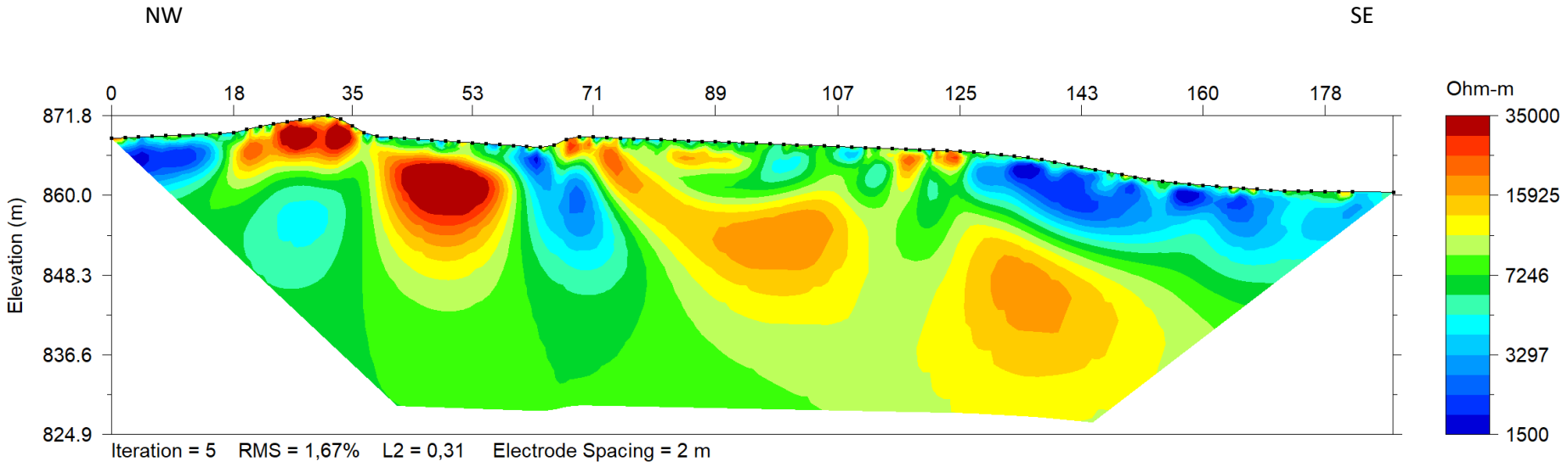


*Abbildung 56: Geoelektrikprofil Stbr. Friesenbichler ET 6. Ergebnis der Inversionsrechnung mit EarthImager (Römer & Pfeiler 2024).*