



# Erkundung von hochreinem Quarz – High Purity Quartz (HPQ)



geologie





## **Erkundung von hochreinem Quarz – High Purity Quartz (HPQ)**

Bearbeiter:  
E. Linhardt, A. Gebhardt, G. Mandelsperger

45 Seiten, 21 Abbildungen, 8 Tabellen, Augsburg 2016

## Impressum

Erkundung von hochreinem Quarz – High Purity Quartz (HPQ)

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

Fax.: 0821 9071-5556

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Referat 105, Elmar Linhardt, Anja Gebhardt, Gerhard Mandelsperger

### Redaktion:

LfU, Referat 105, Elmar Linhardt, Anja Gebhardt

### Bildnachweis:

Oleksiy Mark - Fotolia: Silikon-Wafer (Titelbild rechts);

LfU

### Stand:

Januar 2016

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird die Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Druckschrift wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Sachstand</b>	<b>6</b>
2.1	Projektanlass und Projektinhalt	6
2.2	Bisheriger Kenntnisstand	6
2.3	Anforderungsprofil	8
2.4	Potenzielle Erkundungsgebiete	8
<b>3</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten</b>	<b>10</b>
3.1	Lagerstättenbewertung nach Archiv-Unterlagen	10
3.2	Auswahl Zielgebiete, Geländebefahrung und Probenahme	13
3.2.1	Meta-Pegmatite der Zone von Erbendorf-Vohenstraus	14
3.2.2	Albit-Pegmatoide der Münchberger Gneismasse	17
3.2.3	Mesozoische Quarzsand-Lagerstätten	20
3.2.4	Gangquarz – Lagerstätte Pfahl	23
3.3	Chemisch – mineralogische Analytik der Quarz-Rohstoffe	24
3.4	Rohstoffgeologische Auswertung	26
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Vorräte und Wirtschaftlichkeit</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>Prognose</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>36</b>
	<b>Literatur</b>	<b>37</b>
	<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>40</b>
	<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	<b>42</b>
	<b>Erklärung von Fachbegriffen</b>	<b>43</b>
	<b>Anhang</b>	<b>44</b>



# 1 Zielsetzung

Hochreiner Quarz (engl. high purity quartz – abgekürzt HPQ) wird u. a. als Füllmaterial für Bausteine von integrierten Schaltkreisen (Mikrochips), für die Herstellung hochlicht- und energietransmissiver Gläser sowie für die Hydrothermalsynthese von Quarz-Einkristallen eingesetzt.

Das nachfolgend aus diesen hochreinen Quarz-Einkristallen hergestellte Quarzglas hat eine optimale, einzigartige Kombination mechanischer, optischer, thermischer und physikalischer Eigenschaften. Deshalb wird dieser temperatur- und säurestabile, lichtdurchlässige und hochreine Werkstoff besonders bei zahlreichen Prozess-Schritten für die Herstellung von Mikrochips genutzt. Unter anderem bilden komplette Linsensysteme aus blasenfreiem, optisch höchst reinem und homogenem Quarzglas, hergestellt aus hochreinem Quarz, die winzigen Chip-Strukturen ab und verkleinern diese konturenscharf auf die zu belichtenden Oberflächen der Silizium-Wafer (optische Mikrolithografie), wodurch erst die Herstellung immer kleinerer Chipstrukturen (integrierte Schaltkreise mit über einer Milliarde Schaltelemente) ermöglicht wird.

Produkte aus hochreinem Quarz finden sich neben optischen Linsen für genannte high-tech-Anwendungen u. a. auch in Teleskopen und Analysengeräten, in Mobiltelefonen und DV-Peripherie-Geräten (Scanner, Drucker), in medizinischen und technischen Lasern sowie in Fotokameras und Flachbildschirmen.

Wegen dieser breiten Anwendungspalette im Hochtechnologie-Bereich bei rapide steigendem Bedarf liegt der Marktpreis für hochreinen Quarz – je nach Qualität – derzeit bei 5.000 bis 15.000 Euro je Tonne. Der jährliche Bedarf weltweit an Qualitäten mit Reinheit > 99,99 Gew.-% beträgt 30.000 t (MOORE 2005).

Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Untersuchung zeigen, ob und in welcher Größenordnung Lagerstätten in Bayern vorliegen, die potenziell zur Herstellung von hochreinem Quarz geeignet und aus heutiger Sicht wirtschaftlich abbaubar sind.

## 2 Sachstand

### 2.1 Projektanlass und Projektinhalt

Quarz tritt in Bayern in einer Vielzahl von Lagerstätten unterschiedlicher Genese auf. Neben Quarz-Sanden und Quarz-Sandsteinen im sedimentären Umfeld findet er sich lagerstättenbildend in Form magmatischer Bildungen als Hydrothermalquarz (z. B. Pfahl und Nebenpfähle), als Pegmatitquarz (z. B. Hagendorf-Süd, Hühnerkobel) sowie gesteinsbildend in metamorphen Gesteinen (Quarzite).

Mit Sondermitteln und im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (StMWi) wurden potenzielle Vorkommen von hochreinem Quarz erkundet und untersucht. Durch das LfU-Referat 105 „Wirtschaftsgeologie, Bodenschätze“ wurden dazu zunächst umfangreiche Literatur- und Archivdaten recherchiert und bewertet, Geländebefahrungen und Probenahmen sowie Analytik durchgeführt und die Befunde montanhistorisch, mineralogisch-petrographisch, geochemisch und rohstoffgeologisch zusammengefasst und bewertet.

Sämtliche raumbezogenen, stratigraphisch-petrographischen sowie mineralogischen Daten der Untersuchungen wurden nach erfolgter Bemusterung und Beprobung in das Bodeninformationssystem (BIS) des LfU eingepflegt.

### 2.2 Bisheriger Kenntnisstand

Silizium und Sauerstoff sind die häufigsten Elemente der oberen Erdkruste. Sie treten „chemisch gebunden“ und gesteinsbildend vorwiegend zusammen in Form von Silikaten, wie den Feldspäten, Glimmern, Pyroxenen oder Amphibolen auf (hier mit einer Vielzahl anderer „Krusten“-Elemente, wie Mg, Fe, Al, Alkalien und Erdalkalien kombiniert). Daneben finden sich die beiden Elemente Silizium und Sauerstoff zusammen als mehr oder weniger reines Siliziumdioxid in Form der gesteinsbildenden Mineralgruppe „Quarz“.

Nach derzeitigem wissenschaftlichen Stand existieren wirtschaftlich interessante Vorkommen von hochreinem Quarz vorwiegend in der Bildungsform Bergkristall (Einkristalle), als hydrothermaler Gangquarz (monomineralisch mit polykristallinem Gefüge) und als Bestandteil polymineralischer, grob- bis riesenkörniger Gesteine (sog. Pegmatit-Quarz). Bergkristall und Gangquarz stellen dabei oft bereits schon sehr reines Siliziumdioxid dar (Menge und Reinheit > 99 Gew.-%), während der – mengenmäßige – Quarzanteil in Pegmatit-Vorkommen nur einige Prozent, bei unterschiedlicher Reinheit des Quarzes betragen kann.

Bei der erforderlichen Verarbeitung (Aufbereitung) von einem natürlichen Quarz-Rohstoff hin zu hochreinem Quarz werden alle Elemente außer Silizium und Sauerstoff als Fremdelemente angesehen. Ziel ist die Herstellung eines Granulates mit einer Reinheit von möglichst 99,995 Gew.-%  $\text{SiO}_2$  und darüber. Heute auf dem Markt erhältliche hochreine Quarz-Granulate, die aus natürlichem Quarz hergestellt wurden, enthalten nur wenige Milligramm je Kilogramm (ppm) an Fremdelementen, vorwiegend als Al, Ti, Fe, Ca und Alkalimetalle.

Vor allem bei der Mikrochip-Herstellung sind hochreine Qualitäten unerlässlich. Denn schon geringe Verunreinigungen radioaktiver Elemente (u. a. Uran, Thorium), die im Quarz-Füllmaterial von Mikrochips enthalten sind, führen durch Emission von Alphateilchen zu unerwünschten „soft-errors“ in den Mikrochips. Daher werden beispielsweise in hochreinem Quarz, der als Füllstoff in der Halbleiterindustrie verwendet wird, für Uran 1 Millionstel Gramm je Kilogramm (ppb) sowie für Thorium 6 ppb als



höchste tolerierbare Konzentrationen angesehen. Führende Hersteller von hochreinem Quarz spezifizieren sogar noch niedrigere Konzentrationen (GÖTZE, MÖCKEL 2012).

Als hochreinen Quarz bezeichnet die Industrie zusammenfassend Quarz, der weniger als 50 ppm an Gesamtverunreinigungen bzw. Fremdelementen aufweist (MÜLLER et al. 2007A und 2007B).

Die Fremdelemente liegen im natürlichen Quarz in folgenden Formen vor (LARSEN et al. 2000):

- Als einzelne Ionen im Gitter des Quarzkristalls oder auf Zwischengitterplätzen.
- Als chemischer Bestandteil von eigenständigen, eingewachsenen Fremdmineralen, z. B. Rutil, Zirkon und Glimmer.
- Als Salze in wässriger Lösung in Einschlüssen innerhalb des Kristalls (Mehrphaseneinschlüsse fest-flüssig-gasförmig; „gefüllte Hohlräume“), hier vorwiegend Alkalien enthaltend.

Abhängig von der geologischen Entstehungsart werden generell sowohl die Konzentration als auch die Verteilung und die Bindungsformen verunreinigender Spurenelementgehalte in Quarz bestimmt. Mit abnehmender Häufigkeit sind Al, Ti, Li, H, Na, K, Ca, Fe, P, Ge, Ga und B die häufigsten Spurenelemente in natürlichem Quarz (DEER, HOWIE, ZUSSMAN 1980; FLEM et al. 2002). Die Spurenelementkonzentration in Quarz wird dabei überwiegend von den Bildungstemperaturen und dem Druck sowie von der chemischen Zusammensetzung der fluiden Phase bzw. der Schmelze, aus der der Quarz primär kristallisierte, kontrolliert. Werden saure, SiO<sub>2</sub>-übersättigte magmatische Gesteinsabfolgen (von Granodioriten, über Graniten zu Pegmatiten und Hydrothermalgängen hin) betrachtet, finden sich im allgemeinen die besten Quarzqualitäten demgemäß in den „niedrigtemperierten“ Gesteinsgliedern dieser Bildungsreihe, den hydrothermalen Quarzgängen.

Eine nachfolgende metamorphe Überprägung und Alteration Quarz-führender Primärgesteine kann sowohl eine interne Umverteilung als auch eine sekundäre Aufnahme und/oder idealerweise ein Ausstreuen bzw. ein „Ausheilen“ von Spurenelementen und Gitterdefekten im Quarz bewirken.

JUNG (1992) beschreibt nur die Elemente Al, B, Ge, Fe, H, K, Li, Na, P und Ti als echte Strukturgebundene Verunreinigungen, während Ca, Cr, Cu, Mg, Mn, Pb, Rb und U demnach ausschließlich von mikroskopisch kleinen Fest- und Flüssigkeitseinschlüssen verursacht werden.

Nach jüngeren Studien enthält hydrothermal gebildeter Quarz generell niedrige Titan-Gehalte (< 20 ppm), er kann aber auch etliche 1.000 ppm Aluminium enthalten. Bei Temperaturen über 500 °C gebildeter Quarz enthält generell über 50 ppm Titan. Aluminium und die zum Ladungsausgleich analog eingebauten Kationen Li<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> und H<sup>+</sup> können aus dem Quarzgitter bei Metamorphose-Bedingungen > 350 °C und Drucken > 1,5 kbar ausgetrieben werden, wobei das strukturell gebundene Titan überwiegend erhalten bleibt (MÜLLER et al. 2002).

Für die Beurteilung im Hinblick auf eine potenzielle Verwendbarkeit nach o. g. Maßgaben ist entscheidend, dass natürlich vorkommender Quarz die enormen Qualitätsanforderungen der verarbeitenden Industrie nicht immer „von Natur aus“ erfüllt. Oft auftretende primäre, natürliche Einschlüsse von Flüssigkeiten, Gasen und Mineralen in Quarzen müssen nachträglich erst durch aufwändige Aufbereitungs- und Abtrennungs-Verfahren (z. B. mittels Attrition, Hochspannungs-Impulszerkleinerung, Flotation, Hochgradienten-Magnetscheidung, Säurelaugung, Kalzinierung etc.) beseitigt werden. Fremdatome im Kristallgitter des Quarzes lassen sich dabei jedoch grundsätzlich nicht vollständig, auch mittels sehr zeitaufwändiger und teurer Verfahren entfernen. Jeder Aufbereitungsschritt zu einer höherwertigen, weniger kontaminierten Qualität ist im gleichen Sinn mit höheren Kosten verbunden. Deswegen ist das erklärte Ziel durch die primäre Gewinnung möglichst unkontaminierter, chemisch

reiner Quarzqualitäten die nachfolgenden Produktionsaufwände und –Kosten auf ein Minimum zu reduzieren.

Die typische Korngröße hochreiner, marktfähiger Quarzgranulate beträgt 0,1 mm bis 0,3 mm. Hochreiner Quarz zählt aufgrund seiner besonderen Bedeutung im Bereich der Hochtechnologie zu den strategisch wichtigen Mineralen.

Die Firma Unimin Corp. / Sibellco in North Carolina (USA) dominiert momentan den weltweiten Markt für hochreinen Quarz mit einem Marktanteil von 90–95 %. Eine nachrangige Rolle spielen die weniger hochwertigen Produkte der Firmen Norwegian Crystallites in Drag, West Norwegen und die Firma JSC Polar Quartz im SE Ural. Diese Firmen können den stetig steigenden Bedarf kaum noch decken. Derzeit werden deshalb Vorkommen, die sich zur Herstellung hochreinen Quarzes eignen könnten, u. a. in Angola, Argentinien, Australien, China, Namibia, Norwegen, Saudi Arabien und der Türkei erkundet (MOORE 2005).

## 2.3 Anforderungsprofil

Auf dieser theoretischen Informationsgrundlage wurde zunächst ein Anforderungsprofil für den potenziellen Rohstoff anhand mehrerer Kriterien (mit aufsteigender Bedeutung und Wertigkeit) erstellt und schließlich das rohstoffgeologische Explorationsziel des Projektes definiert, wobei möglichst viele der folgenden Kriterien zutreffen sollten. Gesucht werden demnach

- Vorkommen, die bei möglichst geringem bis keinem Raumwiderstand abgebaut werden können (keine konkurrierenden raumplanerischen, städtebaulichen, wasserwirtschaftlichen, naturschutzfachlichen Nutzungen).
- Vorkommen bzw. Lagerstätten mit möglichst einfacher Erschließ- und Nutzbarkeit (möglichst als Übertage-Abbau).
- Vorkommen, die möglichst in vorhandenen, regionalplanerisch schon gesicherten Rohstoff-Vorrang- (VR) bzw. –Vorbehaltsgebieten (VB) liegen.
- möglichst vorhandene, in Betrieb befindliche Infrastruktur an wenigen, räumlich konzentrierten Abbaustellen bzw. Abbaustellen, die zum Aufbau und Betrieb einer solchen geeignet sind.
- möglichst große, potenziell über Jahre nutzbare Lagerstätten (wirtschaftlich rentable Kubaturen).
- möglichst geringer Gewinnungs- und Aufbereitungsaufwand bei möglichst hohem, gleichbleibenden Quarz-Gehalt im Fördergut.
- möglichst hohe primäre Quarz-Reinheit (Kontaminationen < 50 ppm) bei gleichbleibender Qualität. Dabei sind partikuläre Verunreinigungen (Mineraleinschlüsse) eher tolerierbar als gitter- bzw. strukturegebundene Verunreinigungen.

Somit hat das Erkundungsprogramm das Ziel zu klären, ob und wo in Bayern nach o. g. Vorgaben Vorkommen bzw. Lagerstätten vorhanden sind, die sich zur Gewinnung bzw. zur wirtschaftlichen Herstellung von hochreinem Quarz grundsätzlich eignen könnten.

## 2.4 Potenzielle Erkundungsgebiete

Nach o. g. Maßgaben und auf Grundlage aktuellen geologischen Wissensstandes wurden nachfolgende Zielgebiete in die engere Wahl für eine Vorbewertung bzw. für weitergehende rohstoffgeologische Erkundungsarbeiten gezogen:

1. hydrothermale, gangförmige Quarzvorkommen: Pfahl und seine Nebenpfähle, Bayerischer Wald.
2. Feldspat-Quarz-Pegmatite im Bayerischen Wald, Oberpfälzer Wald und dem Fichtelgebirge.
3. Quarz-führende Meta-Pegmatite im Raum Windischeschenbach (Zone Erbdorf-Vohenstrauß, ZEV).
4. Quarz-führende Albit-Pegmatoide der Münchberger Gneismasse (MüMa).
5. Quarz-führende metamorphe Gesteine (Nordteil der MüMa): Quarzite, Kieselschiefer, Phycoden-quarzit, Orthogneise der Liegend- und Hangendserie.
6. Quarz-führende metamorphe Gesteine des Fichtelgebirges sowie des Hinteren Bayerischen Waldes: Quarzite.
7. Sedimentäre Quarzsand-Lagerstätten des Mittleren Buntsandstein, Rhätsandstein, gebleichte Sande des Dogger  $\beta$ , der Kreide sowie des Keuper.

Lokale Quarzgänge im Fichtelgebirge und in anderen bayerischen Kristallingebieten mit gelegentlichem Auftreten von „klaren“ Bergkristallen wurden wegen bekannter Engräumigkeit der Vorkommen („Rucksack-Lagerstätten“) für diese Betrachtung nicht berücksichtigt.

### 3 Durchgeführte Arbeiten

#### 3.1 Lagerstättenbewertung nach Archiv-Unterlagen

Die nach o. g. Vorinformationen als möglich und sinnvoll erscheinenden Zielgebiete wurden nachfolgend iterativ bewertet und weiter konkretisiert.

##### Bewertungsschritt 1

Hierbei werden Vorkommen und Lagerstätten nach äußeren räumlich – geographische Faktoren, nach ihrer Geologie, Größe und Mächtigkeit, nach Inhalt und potenziellen Vorräten, der Abbausituation, der Zugänglichkeit sowie der raumordnerischen Gesamtsituation nach Literatur und Archivunterlagen zusammengefasst bewertet:

1. hydrothermale Gangvorkommen (Pfahl, Nebenpfähle): Großlagerstätte für Quarz mit überwiegend mittlerer Qualität, mehrere aktive Gewinnungsstellen, z. T. ausgewiesene Rohstoff-Vorbehalts- (VB) und -Vorrang-(VR)-Gebiete (regionalplanerisch gesichert ca. 32 ha für VB bzw. ca. 114 ha für VR): **positiv**
  
2. Feldspat-Quarz-Pegmatite (Bayerischer Wald, Oberpfälzer Wald, Fichtelgebirge): sehr kleinräumige, überwiegend geringstmächtige Einzellagerstätten in mehreren Arealen, gleiche Bildungsgeschichte (variskisch), typische Granitpegmatite mit teilweise hohen Anreicherungen inkompatibler Elemente; sehr geringe zu erwartende Kubaturen hinsichtlich Quarz, zum Großteil historisch (hinsichtlich Feldspat aber auch im Hinblick auf Quarz zur Glasherstellung) abgebaut, Lage in Naturparks bzw. im Nationalpark; überwiegend untertägige Erschließung bzw. Wiederaufnahme erforderlich; keine regionalplanerische Sicherung; hoher Raumwiderstand: **negativ**
  
3. Meta-Pegmatite (ZEV): historischer Feldspat-Abbau in vielen, gering- bis geringstmächtigen Vorkommen; damals explorierte Vorräte sind nahezu quantitativ abgebaut. Rest-Potenziale bzw. bislang unentdeckt gebliebene Lagerstätten wären das Ziel weiterer Prospektions- bzw. Untersuchungsarbeiten; alle Abbaue sind lange eingestellt und ihre Infrastruktur beseitigt. Lage historischer Vorkommen ist zum Großteil bekannt bzw. rekonstruierbar; teilweise noch regionalplanerisch in Form eines Rohstoff-Vorbehalts-Gebietes gesichert: **eingeschränkt positiv**
  
4. Albit-Pegmatoide (MüMa): viele bekannte und (überwiegend untertägig) bebaute Einzelvorkommen, jeweils überwiegend kleinst- bis kleindimensionierte Lagerstätten; davon sind die mittleren und großen Lagerstätten nahezu vollständig abgebaut, Rest-Potenziale bzw. bislang unentdeckt gebliebene Lagerstätten wären das Ziel weiterer Prospektions- bzw. Untersuchungsarbeiten; der Bergbau wurde Ende der 1970iger Jahre eingestellt und die Infrastruktur beseitigt, die regionalplanerische Sicherung ist komplett aufgehoben: **eingeschränkt positiv**
  
5. Metamorphe Gesteine, Quarzite (Nordteil der MüMa), Kieselschiefer, Phycodenquarzit, Orthogneise der Liegend- und Hangendserie: sehr kleinräumige, geringstmächtige kartographisch ausgehaltene Gesteinseinheiten in Wechsellagerung mit verschiedensten metamorphen Gesteinen, geringste erzielbare Kubaturen bei relativ hohem Flächenbedarf, Lage in Naturpark, hoher Raumwiderstand: **negativ**

6. Quarzite Raum Schönwald / Fichtelgebirge; Muscovit-Quarzite im Waldsassener Schiefergebirge, Quarzite Rittsteig-Lam (Bayer. Wald): sehr kleinräumige, geringstmächtige kartographisch ausgehaltene Gesteins-Einheiten in Wechsellagerung mit verschiedensten metamorphen Gesteinen, geringste erzielbare Kubaturen bei relativ hohem Flächenbedarf, Lage in Naturparken bzw. Nationalpark Bayerischer Wald, hoher Raumwiderstand: **negativ**
7. Sedimentäre Sand-Lagerstätten in Nordbayern (mittlerer Buntsandstein, Sandsteinkeuper, quartärzeitlich umgelagerter Sandsteinkeuper, Rhätolias, Dogger und Kreide) sowie Sand- und Kies-Lagerstätten in Südbayern (u. a. Molasse): viele aktive Gewinnungsstellen, ausgewiesene VR- und VB-Gebiete (insgesamt ca. 4.786 ha in Nordbayern, ca. 21.900 ha in Südbayern): **positiv**

## Bewertungsschritt 2

Ausschlaggebend für diese Bewertung sind geochemisch-genetische Faktoren nach Archiv- bzw. Literaturangaben sowie die rohstoffliche Qualität nach Vorinformationen (sofern vorhanden):

1. hydrothermale Gangvorkommen (Pfahl und Nebenpfähle): U. a. nach STRUNZ (1971) und PEUCKER (1989) weisen die Pfahl-Quarze hohe Gehalte an Fremdverunreinigungen wie von Ti, Fe, Na, K, Ca, Rb, Sr und Ba auf. Aufgrund der massiven kryptokataklastischen Überprägung sind sie für den Fremdelement-Einbau (strukturell) und –Einschluß (partikulär) prädestiniert, die vielfach auftretenden Fluideinschlüsse sind K- und Ca-betont. Die maximale Reinheit einzelner Partien liegt zwischen 99,27 Gew.-% SiO<sub>2</sub> und 99,88 Gew.-% SiO<sub>2</sub> (WEINIG et al. (1984), S. 81); eine intensive qualitätsmäßige Vorselektion bei Gewinnung und eine umfangreiche Aufbereitung zur Steigerung der Reinheit hinsichtlich hochreinem Quarz wäre demzufolge erforderlich: **eingeschränkt positiv**
2. Feldspat-Quarz-Pegmatite (Bayerischer Wald, Oberpfälzer Wald, Fichtelgebirge): typische „Granitpegmatite“ mit hohen Gehalten inkompatibler Elemente (u. a. Th, U, B, etc.); Quarz mit SiO<sub>2</sub> – Gehalten zwischen 99,37 Gew.-% SiO<sub>2</sub> und 99,63 Gew.-% (Bsp. Bayerischer Wald: SCHAAF, SPERLING, MÜLLER-SOHNUS (2008)): **negativ**
3. Meta-Pegmatite (ZEV): syntektonisch-synkinematisch als relativ späte Mobilisate der amphibolitfaziellen Metamorphose gebildet (STRUNZ, FORSTER, TENNYSON (1975); STETTNER (1992); FISCHER (1968)), prognostisch mit relativ geringen Gehalten von Fremdelementen: **positiv**
4. Albit-Pegmatoide (MüMa): Nach EMMERT & STETTNER (1968) sowie FISCHER (1968) handelt es sich um spättektonisch-syntektonisch überprägte Gesteine (Mobilisate) mit massig-zertrümmert-rekristallisierter Textur; die Pegmatoide sind unzoniert; sie enthalten undulös, verzerrt-verbogen-granoblastische Quarzkörner mit maximaler Korngröße von 2 cm, Gehalt beträgt durchschnittlich ca. 20 Vol.-% Quarz in allen Pegmatoiden; eine einfache Mineralogie (Na-betonter Plagioklas, Muskovit, Quarz), herrscht vor, deswegen sind vermutlich auch nur geringe bis geringste Gehalte an störenden Neben- und Übergemengteilen (d. h. U, Th sowie andere inkompatible Elemente) vorhanden. Insgesamt handelt es sich um diaphoretisch - anatektisch bei hohen Drücken (hoher Wasser-Gehalt, hoher Wasser-Partialdruck) und Temperaturen zwischen 500 °C und 600 °C gebildete Mobilisate: **positiv**

5. Metamorphe Gesteine, Quarzite (Bildungsbereich bei  $T > 350\text{ °C}$  und  $p > 1.5\text{ kbar}$ ): Im Nordteil der MüMa gelegen; Kieseliefer, Phycodenquarzit, Orthogneise der Liegend- und Hangendserie sind retrograd (diaphtoretisch) überprägte Gesteine; dabei wurden mehrfach saure Lösungen zugeführt bei zeitgleicher Abfuhr basischer Ionen sowie unter Kristallisation mit Durchbewegung in verschiedenen Phasen; dadurch erfolgte eine Zerschering, Granulierung und Kristallisation über alle Stadien der Diaphthese, wobei die Orthogneise entstanden (Nordteil MüMa); dadurch potenziell sehr hohe Gehalte inkompatibler Elemente in den beteiligten Quarzen: **negativ**
6. Quarzite Raum Schönwald / Fichtelgebirge; Muskovit-Quarzite / Waldsassener Schiefergebirge, Quarzite / Rittsteig-Lam (diese polymetamorph!): paragenetisch verbunden mit den Gesteinen der sog. „Bunten Gruppe“; ehemals tonig-sandig-mergelige Schichtglieder (teilweise euxinischer Bildungsbereich!), tektonisch und polymetamorph (amphibolitfaziell) überprägt; nach Sedimentations- und Metamorphose-Geschichte potenziell hohe Gehalte an störenden Neben- und Übergemengteilen in den beteiligten Quarzen: **negativ**
7. Sedimentäre Sand- und Kies-Lagerstätten (u. a. Mittlerer Buntsandstein, Rhätsandstein, Kreide, Molasse): überwiegend Abtragungsschutt (mit angereichertem Quarz) von Kristallingesteinen (überwiegend aus Graniten und Metamorphiten) variskischen Alters unterschiedlichster Provenienz (siehe oben); dadurch prognostisch hohe und höchste Gehalte unerwünschter Elementgehalte in den angereicherten Quarzen; Beispiel für „reinen“ Quarz der Molasse („Siliziumquarz“ 95,00–99,50 Gew.-%  $\text{SiO}_2$ ; SCHMID, PANWITZ, POSCHLOD (2013)): **negativ**

Auf Grundlage dieser Vorbewertung (Bewertungsschritte 1 und 2) ist in den bayerischen Kristallinaren allenfalls in den vor genannten Meta-Pegmatiten bzw. Albit-Pegmatoiden (Nr. 3 und 4), wegen ihrer besonderen Genese ggf. auch partienweise im Pfahlquarz (Nr. 1) ein theoretisch gewinnbares Quarzpotenzial mit niedrigen bis niedrigsten Konzentrationen von Störelementen zu erwarten (Tab. 1).

Tab. 1: Bewertungsdiagramm mit vorläufigem Ergebnis.

Vorkommen (potenzielle Erkundungsgebiete)	Äußere geographisch-geologische Faktoren (Bewertung 1)	Genetisch-geochemische Faktoren (Bewertung 2)	Mögliches und nutzbares Potenzial
1	+	(+)	ja
2	-	-	nein
3	(+)	+	ja
4	(+)	+	ja
5	-	-	nein
6	-	-	nein
7	+	-	vielleicht

Für die weitere geochemische Konkretisierung wurden deswegen vorrangig Proben der Meta-Pegmatite bzw. Albit-Pegmatoide sowie stichprobenartig auch Proben aus Pfahlquarz (augenscheinlich reine Stücke) ausgewählt und chemisch analysiert (Nr. 1, 3 und 4).

Da belastbare Analysendaten zu (aufbereiteten und aufgereinigten) Quarzen aus sedimentären Lagerstätten Nordbayerns (Mittlerer Buntsandstein, Dogger  $\beta$ , Rhätolias, Keuper, Kreide) fehlen wurden zusätzlich, trotz mittelmäßiger Vorbewertung. (Tab. 1), exemplarisch Proben nach oben aufgeführten Methoden ausgewählt, im Labor-Maßstab aufgereinigt und analysiert (Nr. 7).

### 3.2 Auswahl Zielgebiete, Geländebefahrung und Probenahme

Im Zuge des sog. „metamorphic refinements“ (SORENSEN 2007) können geeignete primäre Quarzvorkommen durch – polyphase – metamorphe Ereignisse unter Beteiligung von Fluiden sowie mittels mehrfachen Lösungs- und Kristallisationsakten in sekundäre, chemisch reinere Quarze überführt werden. Diese Bildungsbedingungen spielten erwiesenermaßen bei den syntektonisch- synki-

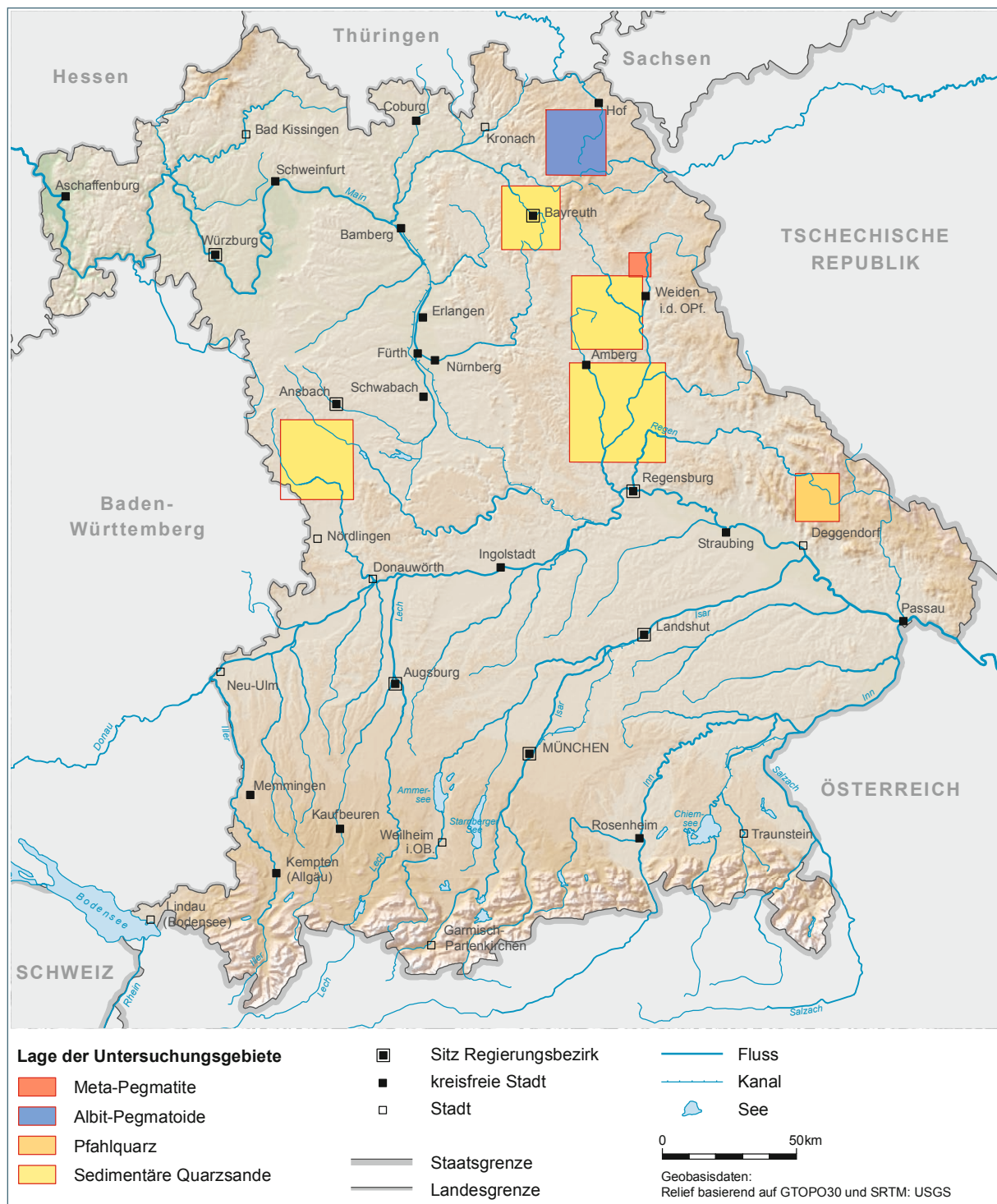


Abb. 1: Übersicht der Untersuchungsgebiete für hochreinen Quarz (HPQ) in Bayern.

nematisch gebildeten Meta-Pegmatiten und Albit-Pegmatoiden eine maßgebliche Rolle (GLODNY et al. 1998). Sie wurden deswegen für die weitere Untersuchung bevorzugt ausgewählt, mehrtägig befahren, rohstoff-geologisch untersucht und zusammen mit vorliegenden Archivdaten (mineralogisch-geochemische-lagerstättenkundliche Untersuchungen im Rahmen diverser Diplom- und Doktorarbeiten sowie gutachterlicher Stellungnahmen) bewertet (siehe Abb. 1: Übersicht Untersuchungsgebiete; Abb. 2 und Abb. 4 Probenahmegebiete).

Zudem wurden auch augenscheinlich reine, handgeklaubte Partien aus mehreren Aufschlüssen des Pfahls für eine weitere Konkretisierung eines möglichen Potenzials untersucht und bewertet (siehe Abb. 1: Übersicht Untersuchungsgebiete; Abb. 12 Probenahmegebiet).

Mesozoische Sedimente (Quarz-Sande bzw. Mübsandsteine) wurden bislang noch nicht hinsichtlich eines HPQ-Potenzials detailliert untersucht. Ihre Genese und Provenienz aus überwiegend erodierten, variskischen Plutonen und unterschiedlichsten Metamorphiten macht das Vorhandensein hochreiner Quarzqualitäten im Vornherein eher unwahrscheinlich (bis unmöglich). Dennoch wurden, da belastbare Analysendaten weitgehend fehlen, aus abgetrennten, handgeklaubten und aufgereinigten Sedimentproben Quarz-Konzentrate exemplarisch untersucht und in die nachfolgende Bewertung mit einbezogen (siehe Abb. 1: Übersicht Untersuchungsgebiete; Abbildungen 7, 8, 9 und 10 Probenahmegebiete).

### 3.2.1 Meta-Pegmatite der Zone von Erbdorf-Vohenstrauss

Montanhistorisch-petrographisch-lagerstättenkundliche Beschreibung: Den geologischen Rahmen dieser Meta-Pegmatite bilden die metamorphen Gesteine der Zone von Erbdorf-Vohenstrauss (=ZEV, syn. Neustädter Scholle). Alle Pegmatite dieses Raumes sind gemeinsam mit den Gneisen des Rahmengesteins verfaltet. Das primäre Pegmatit-Material wurde dabei teilverflüssigt und ist, begleitet von diversen Mineral-Um- und -Neubildungen, wieder neu auskristallisiert. Es entstanden dabei texturierte Meta-Pegmatite mit reliktschen Quarzkernen der früheren, zonierten Pegmatite (LINHARDT 2000B). Daraus resultiert ein insgesamt sehr heterogener Lagerstättenaufbau, der schon bei der zurückliegenden Rohstoff-Förderung einen hohen, selektiven Gewinnungs- und Trennungsaufwand erforderlich machte.

Die Grubenbetriebe im Raum Windischeschenbach gingen überwiegend in untertägigen Abbauen auf teilweise stockartig verdickte, langlinsige Körper bis 50 m Länge bei Mächtigkeiten bis max. ca. 5 m nach (Abb. 2). Ein bergmännischer Abbau erfolgte zuletzt in der Grube Maier / Püllersreuth (1954–1967) sowie in der Grube Gertrud / Klobenreuth (ca. 1952 bis eingeschränkt 1984). Weitere, kurzlebige Gruben (z. T. schon Ende des 19. Jahrhunderts in Abbau stehend) wurden schon weit früher u. a. wegen Erschöpfung der Vorräte eingestellt (u. a. Gruben Mandt, Klara, Wilma und Barbarahof).

Laut aktuell gültigem Regionalplan, RP Region 6 existiert noch ein Vorbehaltsgebiet für Feldspat, FS 07 „Nördlich Wendersreuth“. Es überdeckt einen ehemaligen Abbauswerpunkt (Grubenbereiche „Mandt“ sowie „Wilma“). Siehe dazu auch nachfolgende Abb. 2.

Bekannt und vermutlich auch abgebaut wurden einige dieser Vorkommen schon im 19. Jahrhundert, wie bei GÜMBEL (1868) vermerkt ist. Explorationsmaßnahmen im größeren Stil (mittels Schurfgräben, Stollen und Schächten), kleinräumige Abbauersuche sowie die betriebliche Gewinnung von Feldspat erfolgten in diesem Gebiet als letzte große Welle bergbaulicher Aktivität in NO-Bayern noch zwischen Mitte der 40er bis Mitte der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts. Unterstützt durch ausgedehnte staatliche Fördermaßnahmen (GAB-Projekte ab 1952; GAB (1963), GLA (1953)) arbeiteten hier überwiegend kleine, kurzlebige Betriebe, die aufgrund der gefundenen Feldspat-Qualitäten sowie der Engräumigkeit und Heterogenität der Lagerstätten jedoch oft nicht wirtschaftlich und sel-



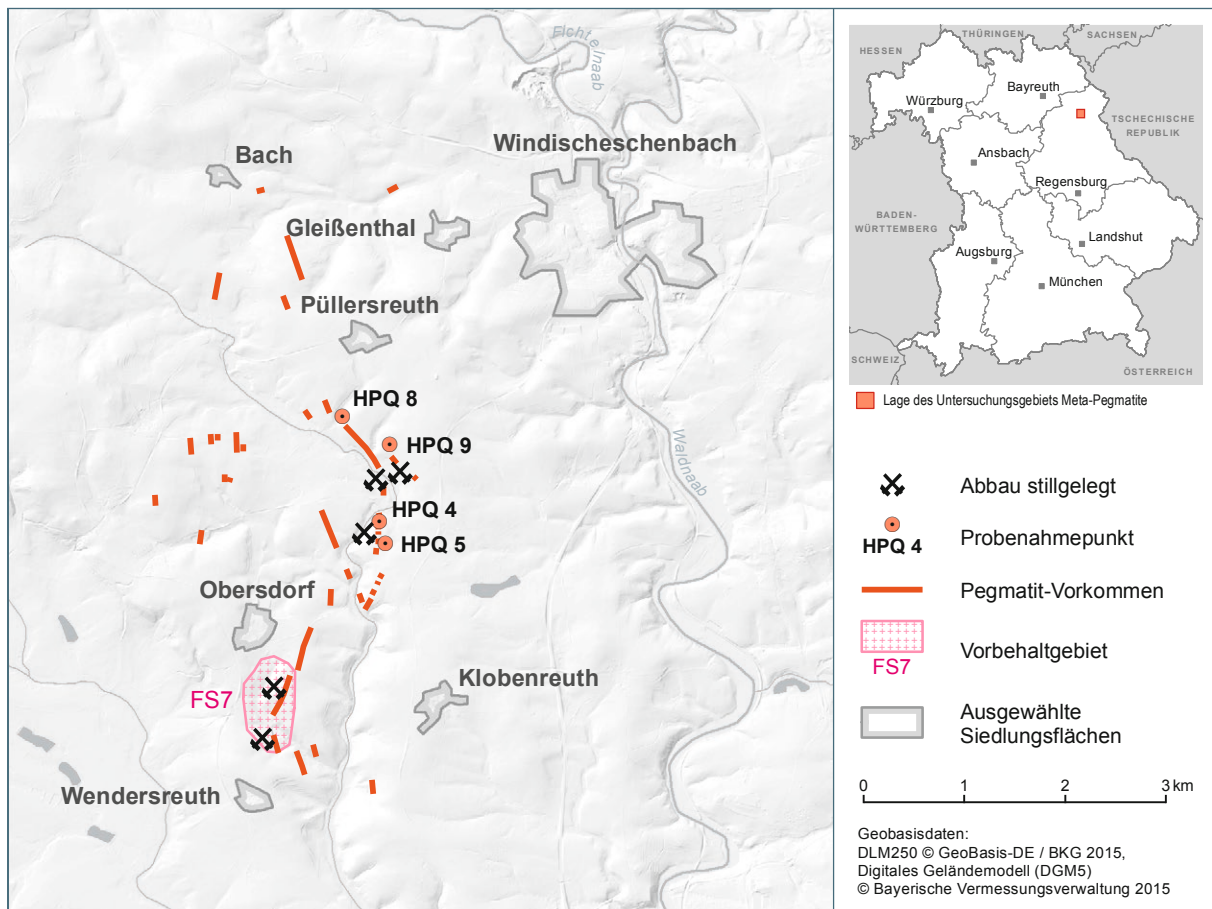


Abb. 2: Die wichtigsten Meta-Pegmatit-Vorkommen SW Windischeschenbach samt ehemaligen Förderpunkten (als dicke Striche bzw. Punkte) sowie Probenahmepunkten; von N nach S: Grube Maier (S Püllersreuth), Gruben Gertrud und Klara (NW Klobenreuth) sowie Gruben Mandt und Wilma (S Obersdorf); Vorbehaltsgebiet für Feldspat FS 07, N Wendersreuth (Kreuzsignatur; Abfrage RISBY, 2015).

ten über das Explorationsstadium hinaus geführt werden konnten. Die Meta-Pegmatit-Mächtigkeiten in der nördlichen Häufungszone des Verbreitungsgebietes lagen im Allgemeinen bei 2 m bis 6 m, wobei in linsenartig verdickten Bereichen auch stellenweise ein Mehrfaches erreicht wurde. Die am Ostrand gelegenen Vorkommen erreichten teilweise mehr als 20 m Mächtigkeiten.

Das Fördergut aus Probeschürfen und Abbauen der ab 1952 prospektierten Pegmatite (ca. 20 Einzelvorkommen, davon 12 näher untersucht) war mineralogisch relativ monoton zusammengesetzt und enthielt überwiegend, bis auf wenige lokale Ausnahmen, nur Kalifeldspat (Mikroclin- bzw. Orthoklasperthit), Plagioklas (Albit), Quarz sowie reichlich Muskovit (Abb. 3: Rohprobe, HPQ 5).

Die mittleren Quarzgehalte lagen je nach Areal und Abbaustelle zwischen ca. 25 M.-% und ca. 35 M.-%. Trotz einer im Rahmen dieser Untersuchungsarbeiten festgestellten „sehr geringen Fündigkeit“ und der damaligen Einstufung als „nur teilweise wirtschaftlich gewinnbare Einzelvorkommen“ erfolgte zwischen ca. 1945 und 1967 ein betrieblicher Abbau anfänglich an 8, später an 5 Punkten. Alle größeren, explorierten Lagerstätten zusammengefasst wurden die wahrscheinlichen Gesamtvorräte an Roh-Pegmatit in der Größenordnung von rund 100.000 t angegeben, wovon nach Auswertung der verfügbaren Firmenangaben (u. a. Arbeitsberichte, GAB-Abrechnungen, Stellungnahmen) auch der Großteil davon abgebaut und vermarktet wurde.



Abb. 3: Meta-Pegmatit (Rohprobe, HPQ 5), Grube Klara / NW Klobenreuth.

Der Bergbau in diesem Gebiet ging überwiegend auf Masse- bzw. Glasur-Feldspat, untergeordnet auch auf „Pegmatit“, Feldspat und Quarz als unplastischer Misch-Rohstoff für die Porzellanindustrie. Das bedeutet, dass Quarz immer zusammen mit Feldspat gewonnen, in unterschiedlichen Gehaltsstufen am Endprodukt beteiligt war und mitvermarktet wurde (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Vermarktete Produktqualitäten für Feldspat-Konzentrate aus Roh-Pegmatit im Raum Windischeschenbach (GLA 1953).

Bezeichnung	Gehalt Feldspat (Gew.-%)	Gehalt Quarz (Gew.-%)
Glasurspat	95	5
Massespat	bis 75	bis 25
Pegmatit	55–60	40–45

Die Bergbauaktivität in diesem Gebiet ist insgesamt geprägt von diversen Firmengründungen, Betriebsauffassungen sowie Neuanfängen an alten Stellen, die oft einher gingen bzw. dicht aufeinander folgten. Von den vielen Betreibern im Lauf der Jahre blieben schließlich nur wenige, die kontinuierlich über einige Jahre an insgesamt 5 Abbaupunkten produzieren konnten. Aufgrund der z. T. ungünstigen geologischen Gegebenheiten, der fehlenden Infrastruktur (geringer Mechanisierungsgrad, keine technische Aufbereitung, überwiegend nur Handklaubung des Fördergutes), dem geringen Eigenkapital der Firmen usw. waren die Standort- und Betriebsbedingungen insgesamt als eher ungünstig einzustufen. Als Namen der größeren beteiligten Unternehmen bzw. Betreiber sind u. a. die „Gesellschaft zur Erschließung der niederbayerischen und oberpfälzer Bodenschätze oHG, Regensburg (ENOB)“, die Firma „Maier Mineraliengesellschaft oHG, Kleingundertshausen“, die „Niederbayerische – oberpfälzische Mineralwerke Gleissenthal“, „Gottfried Feldspat GmbH“, Großheirath sowie die „Oberpfalz Bergbau AG“, München und „Mandt Mineralmahlwerk“ / Wunsiedel zu nennen. Der überwiegende Teil dieser Firmen sind als typische Nachkriegsgründungen einzustufen, Einträge bzw. Unterlagen im Bayerischen Wirtschaftsarchiv (München) sind nicht vorhanden (Anfrage Bayer. Wirtschaftsarchiv, 2000; Recherche und Auswertung Archivbestand des ehemaligen Bergamtes Amberg; Staatsarchiv Amberg, LINHARDT 2000A, unveröffentl.; LINHARDT 2000B).

Mit der Stilllegung der beiden letzten Gruben Maier / Püllersreuth und Gertrud / Klobenreuth wegen Erschöpfung der Vorräte bzw. Unrentabilität wurde schließlich der Feldspat-Bergbau im Raum Windischeschenbach ganz eingestellt.

Resultat: An den 9 befahrenen Pegmatit-Vorkommen (teilweise einzelne Areale von mehreren ha Größe) mit ehemaligen Abbauen sind nur noch in wenigen (4) spärliche Spuren des früheren Bergbaus erhalten geblieben. Das Gelände ist in allen Fällen weitgehend planiert, Tiefbaue sind verschlossen und samt Halden eingeebnet, Tagebaue sind verfüllt und das Gelände nachfolgend forst-, land- bzw. teichwirtschaftlich genutzt. Außer gelegentlichen Lesesteinen (Haldenmaterial) an ehemaligen Abbauorten konnten auch in der weiteren Umgebung mit auskartierten kleineren Pegmatitvorkommen keine Hinweise auf diese Lagerstätten mehr erbracht werden. Das Potenzial für unverritzte Meta-Pegmatite in der Größenordnung der ehemals bebauten Lagerstätten bzw. für wirtschaftlich noch nutzbare Lagerstätten-Reste des früheren Bergbaus gilt daher insgesamt als weitgehend erloschen.

### 3.2.2 Albit-Pegmatoide der Münchberger Gneismasse

Montanhistorisch-petrographisch-lagerstättenkundliche Beschreibung: Die Albit-Pegmatoide der Münchberger Gneismasse (MüMa) werden als linsenförmige Vorkommen bis maximal 150 m Länge bei Mächtigkeiten bis max. ca. 15 m beschrieben. Ein Abbau erfolgte zuletzt bei Friedmannsdorf bis 1978 (Tiefbau „Friedmannsdorf I“); kleinere, kurzlebige Grubenbetriebe wurden schon früher eingestellt. Die größte Grube lag bei Zettlitz (Lübnitz 1947–1954), weitere größere Gruben wurden bei Seulbitz (1953–1955), Gefrees (1957–1967), Witzleshofen (I: 1959–1963; II: 1958–1959), Tengersreuth (1956–1959), Bösenneck (1955–1958) und Streitau (Bärenbühl 1938–1945) betrieben. Die jeweiligen Gesamtfördermengen dieser Gruben (ohne Friedmannsdorf) lagen überwiegend zwi-

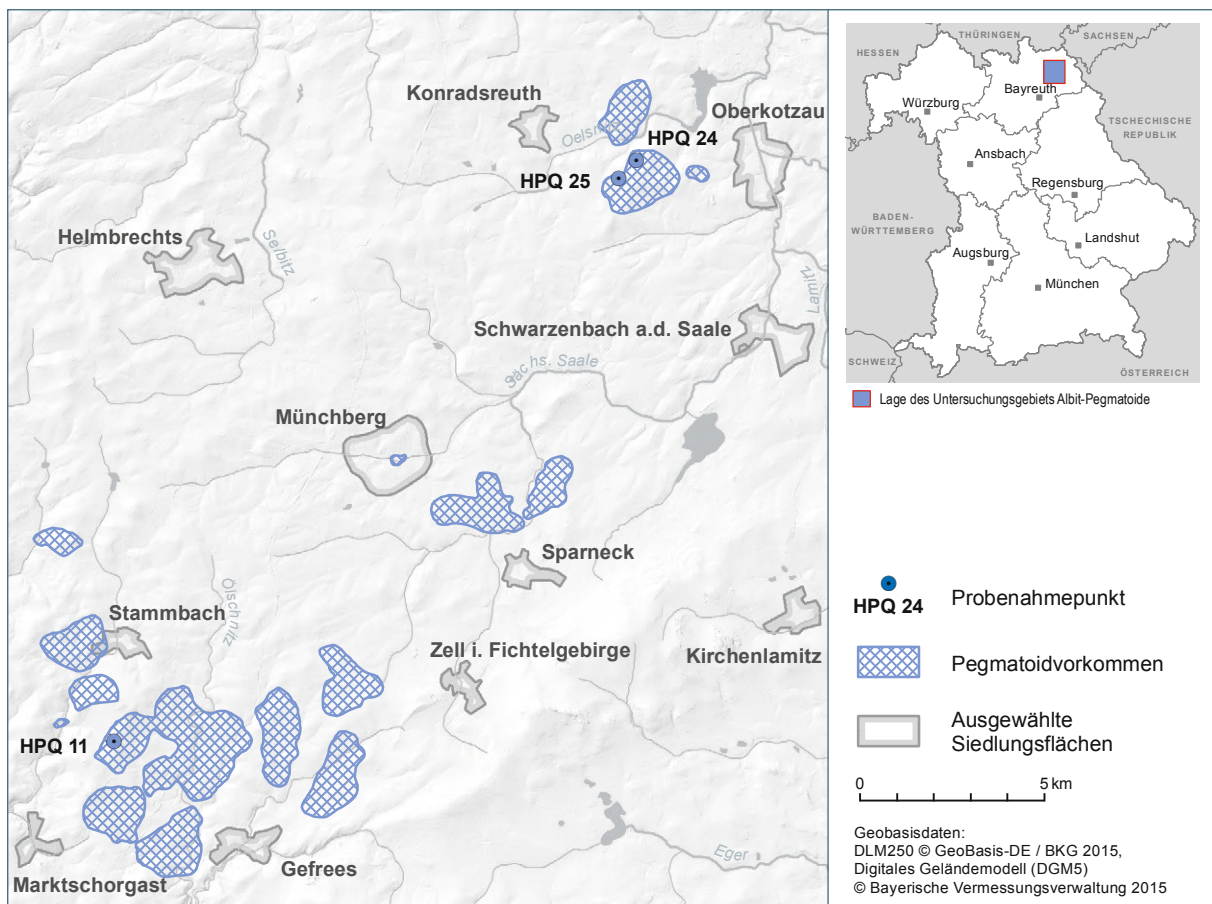


Abb. 4: Die wichtigsten Albit-Pegmatoid-Vorkommen als Häufungsgebiete im Raum Münchberg (Nach: BAUBERGER 1957).

schen ca. 5.000 t und maximal ca. 20.000 t. Zusätzlich produzierten 10 Kleinst-Betriebe in diesem Zeitraum jeweils Rohpegmatit-Mengen von wenigen 100 t bis maximal ca. 1.000 t gesamt pro Grube. Für überwiegend klein- und kleinstdimensionierte Einzelvorkommen (teilweise in Häufungsgebieten konzentriert) dieser Albit-Pegmatoide werden von BAUBERGER 1957 am SE-Rand der Münchberger Gneismasse zwischen Marktschorgast, Gefrees und Stammbach sowie am NE-Rand zwischen Konradsreuth und Oberkotzau insgesamt 417 Lokationen genannt (Abb. 4). Als wirtschaftlich interessante und teilweise beschürfte bzw. auch bebaute Lagerstätten werden insgesamt ca. 30 Pegmatoide beschrieben, u. a. Autengrün, Oberperfdt, Fattigau, Schwarzenbach / Saale, Seulbitz, Wulmersreuth, Weissdorf, Mechlenreuth, Münchberg, Grosslosnitz, Friedmannsdorf, Zettlitz, Witzleshofen, Bechertshöfen, Lübnitz, Wundenbach, Grünstein, Bucheckeinzel, Gefrees, Bösenack, Ölschnitz, Stammbach, Weissenstein / Stammbach, Mödlenreuth, Metzlesdorf, Hampelhof, Tennersreuth, Streitau, Falls, Marktschorgast und Kesselberg (nach: GLA 1956 und 1957a, b; BAUBERGER 1957; DILL 1979; ROST 1960). Siehe dazu auch Abb. 4 und Abb. 5 (geographische Lage, Häufungsgebiete und Lage ehemaliger Abbaue).

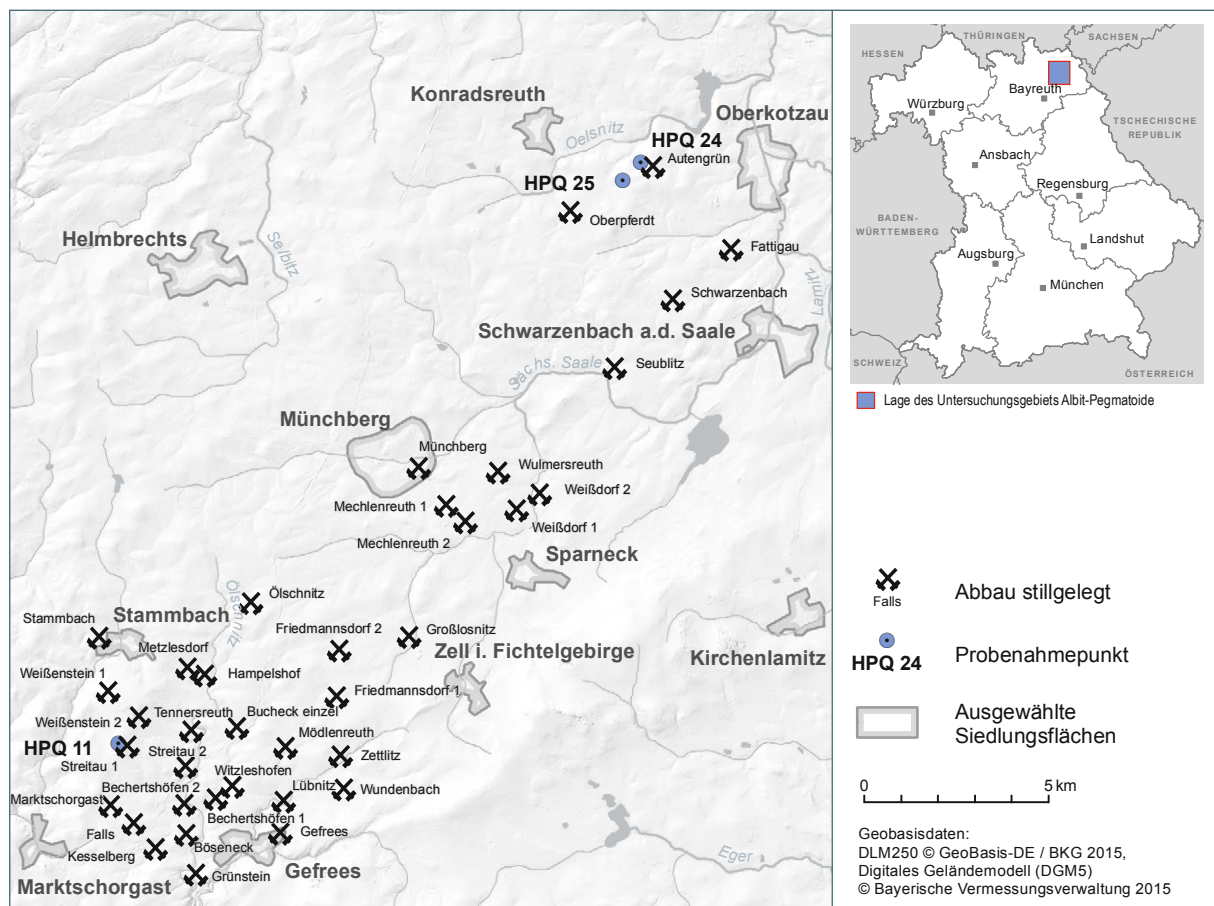


Abb. 5: Lage ehemaliger Schurfe und Feldspat-Gruben in der MüMa (nach: GLA 1956, 1957A und 1957B).

Intensive Untersuchungen im Rahmen staatlicher Fördermaßnahmen (GAB-Projekte zwischen 1953 bis 1959; GAB 1963) zum nutzbaren Rohstoffpotenzial dieser Pegmatoide führten letztlich zu unterschiedlichen, tendenziell aber negativen Bewertungen (GLA 1959, 1957A, 1957B, 1956). Von diesen prospektierten und – teilweise negativ – vorbewerteten Vorkommen wurden dennoch zwischen 1947 und 1978 in 18 meist untertägig betriebenen Gruben insgesamt ca. 120.000 t Rohpegmatit gefördert, wobei ca. 62.000 t Rohpegmatit allein aus der Grube Friedmannsdorf I (Förderbeginn 1955, Einstellung 1978) stammten. Als höchste Abbaumenge über einen Zeitraum von 5

Jahren werden Ende 1957 aus den damals aktiven Gruben 60.000 t Rohpegmatit angegeben (BAUBERGER 1957). Die gesamte geförderte Rohpegmatit-Menge von ca. 120.000 t nach Stilllegung aller Betriebe setzte sich aus ca. 90.000 t Feldspat (Albit; ca. 75 %), ca. 24.000 t Quarz (ca. 20 %) und ca. 6.000 t Muskovit (5 %) zusammen (abgeleitet aus Werksangaben der Fa. Mandt, in: DILL 1979; MANDT 1990).

Laut Regionalplan, RP Region 5, Oberfranken-Ost von 1987 wurde den Albit-Pegmatoid-Vorkommen damals noch eine hohe wirtschaftliche Bedeutung beigemessen und sie in Form mehrerer Vorbehaltsgebiete für Feldspat gesichert (fs 1 bis fs 5; Streichung 2007 durch 5. Änderung Bodenschätze B IV 3.1). Sie überdeckten die ehemaligen Abbauschwerpunkte von Münchberg, Friedmannsdorf, Stammbach, Falls sowie Gefrees und hatten eine Gesamtfläche von ca. 3.038 ha.

Alleiniger Betreiber dieser 18 über einen längeren Zeitraum produzierenden Gruben war die Firma Franz Mandt in Krohenhammer / Wunsiedel, die am Firmensitz den Rohpegmatit (Abb. 6: Probe Albit-Pegmatoid) als mineralischen Rohstoff für die keramische Industrie (als Massezusatz, Glasurrohstoff, für keramisch gebundene Schleifscheiben u. a. Verwendungszwecke) aufbereitete und mittels Waschen, Brechen, Mahlen und Windsichtung veredelte.



Abb. 6: Albit-Pegmatoid, Rohprobe, HPQ 11, Bärenbühl / Streitau.

Da nur das störende Glimmermineral Muskovit mittels Windsichtung bei der Aufbereitung abgetrennt wurde, ist davon auszugehen, dass auch hier der geförderte Quarz zusammen mit dem Feldspat in unterschiedlichen Qualitäten aufbereitet und vermarktet wurde; von Glasurspat über Massepat bis zur Qualität „Pegmatit“, die als unplastischer Misch-Rohstoff für die Porzellanindustrie eingesetzt wurde (SINGER 1923, S.26; Tab. 2).

Resultat: An den 27 befahrenen Pegmatoid-Vorkommen (teilweise Areale von mehreren ha Größe) mit auskartierten Albit-Pegmatoiden und teils ehemaligen Abbauen sind nur noch in einem spärliche Spuren des früheren Bergbaus erhalten geblieben (Streitau). Das Gelände ist in allen sonstigen Fällen weitgehend planiert, Tiefbaue sind verschlossen, Schächte verfüllt und plombiert, Halden eingeebnet, Tagebaue verfüllt und das Gelände wieder land- und forstwirtschaftlich genutzt. Außer Haldenmaterial und gelegentlichen Lesesteinen (hier überwiegend in Form sehr unreiner Quarzmobilsate, die mit den Pegmatoiden genetisch und räumlich verknüpft sind) an ehemaligen Abbauorten und an Feldrainen konnten auch in der weiteren Umgebung der auskartierten Pegmatoid-Vorkommen keine Hinweise mehr auf diese Lagerstätten gefunden werden. Das Potenzial für unverritzte Pegmatoiden in der Größenordnung der ehemals bebauten Lagerstätten bzw. für wirtschaftlich noch nutzbare Lagerstätten-Reste des früheren Bergbaus gilt daher insgesamt als weitgehend erloschen.

### 3.2.3 Mesozoische Quarzsand-Lagerstätten

Sedimentäre Sande und Kiese aus diversen Lagerstätten des Trias / Buntsandstein und Keuper, Jura / Dogger  $\beta$ , Kreide, Tertiär / OSM sowie des Quartär werden in besonders großen Mengen überwiegend als Baurohstoffe benötigt und gewonnen. Ihr Abbau erfolgt in Bayern an ca. 1.120 Gewinnungsstellen, bei jährlichen Fördermengen von ca. 85 Mio. t (BÖRNER et al. 2012). Sie werden gezielt für die Bau-, für die Betonstein- und Zement-Industrie oder als Beiprodukt der Kaolin-Gewinnung im großen Stil gewonnen und aufbereitet, und dann als Keramik- und Glasrohstoff eingesetzt (WEINIG 1984). Entsprechend benötigte Flächen zur mittel- bis langfristigen Rohstoffversorgung sind regionalplanerisch gesichert und machen mit den derzeit ausgewiesenen Rohstoff-Vorrang- und -Vorbehalts-Gebieten insgesamt ca. 4.786 ha in Nordbayern und in Südbayern ca. 21.900 ha aus (Stand 2014). Weiterführende geologisch-petrographische sowie lagerstättenkundliche Informationen zu einzelnen Arealen bzw. Rohstoffgruppen finden sich dazu in WEINIG 1984.

Die hier untersuchten und bewerteten Proben, mit Herkunft aus nordbayerischen Lagerstätten, wurden für das Projekt „SEE I“ ab 2011 vornehmlich an aktiven Gewinnungsstellen gezogen und anschließend für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes „HPQ“ mitverwendet. Siehe dazu Abb. 1 sowie nachfolgende Abb. 7 bis 10.

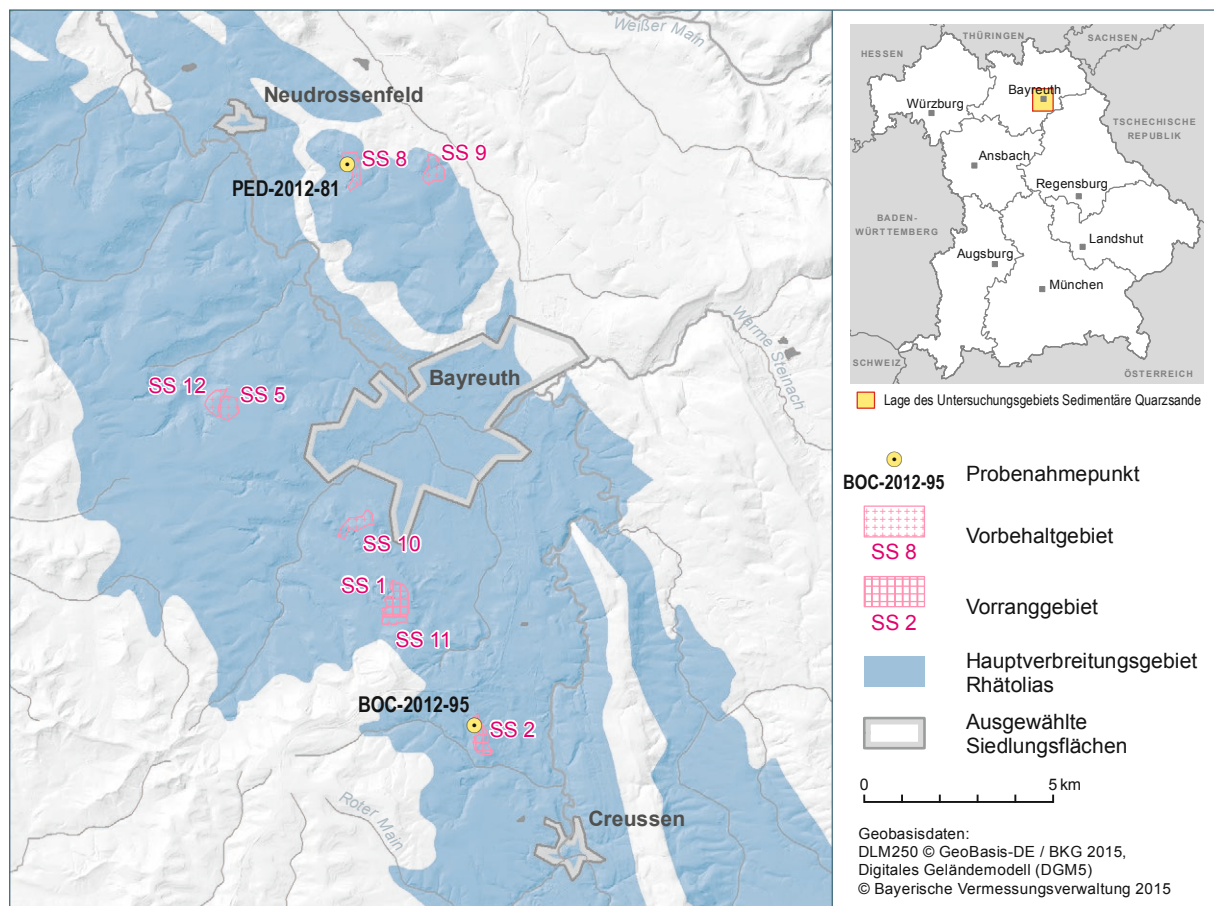


Abb. 7: Probenahmepunkte Rhätolias

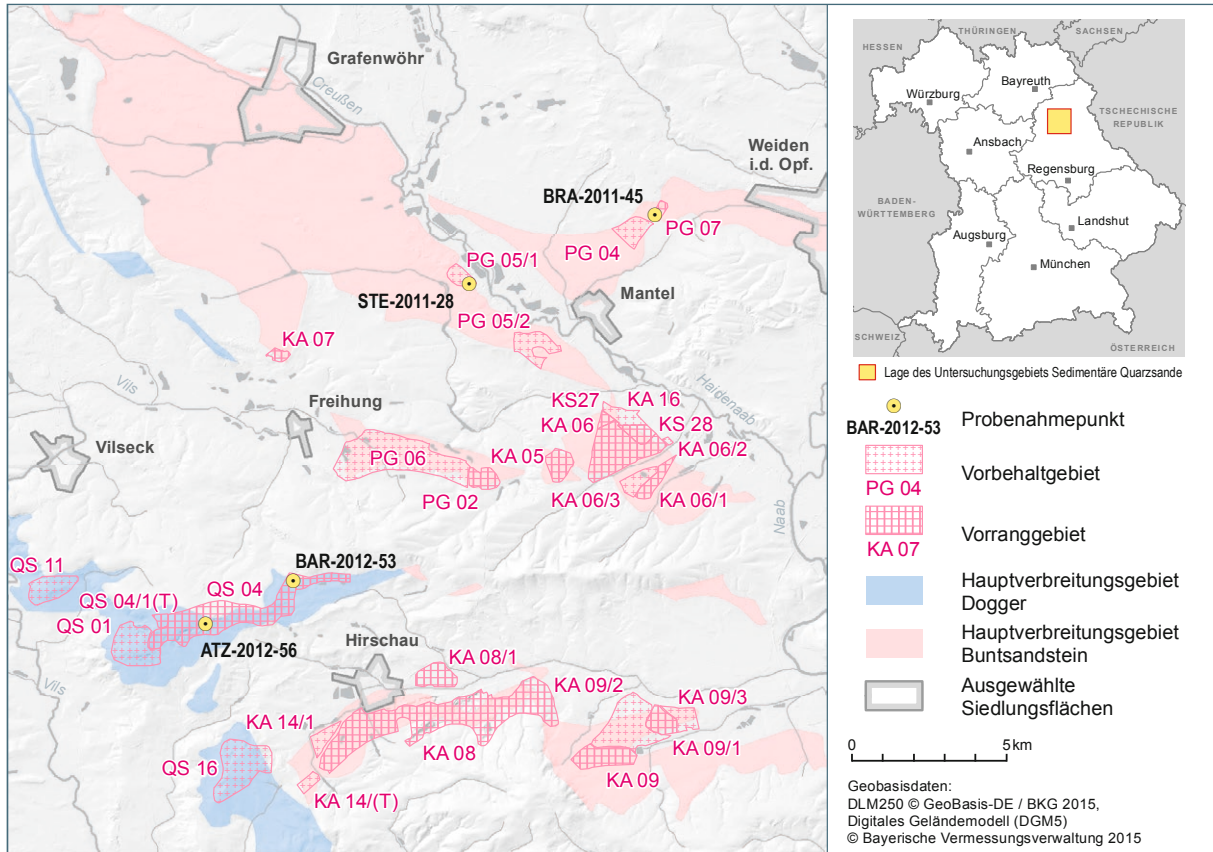


Abb. 8: Probenahmepunkte Buntsandstein und Dogger β

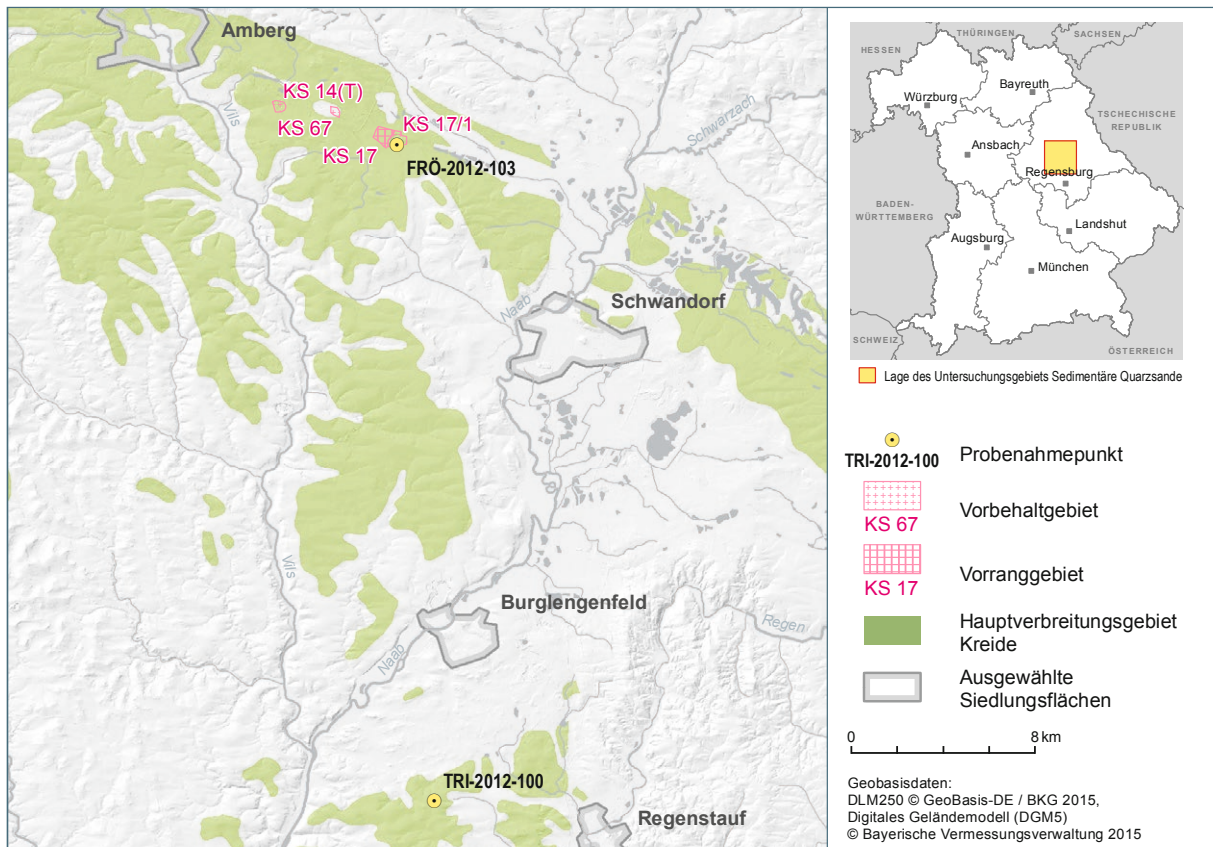


Abb. 9: Probenahmepunkte Kreide

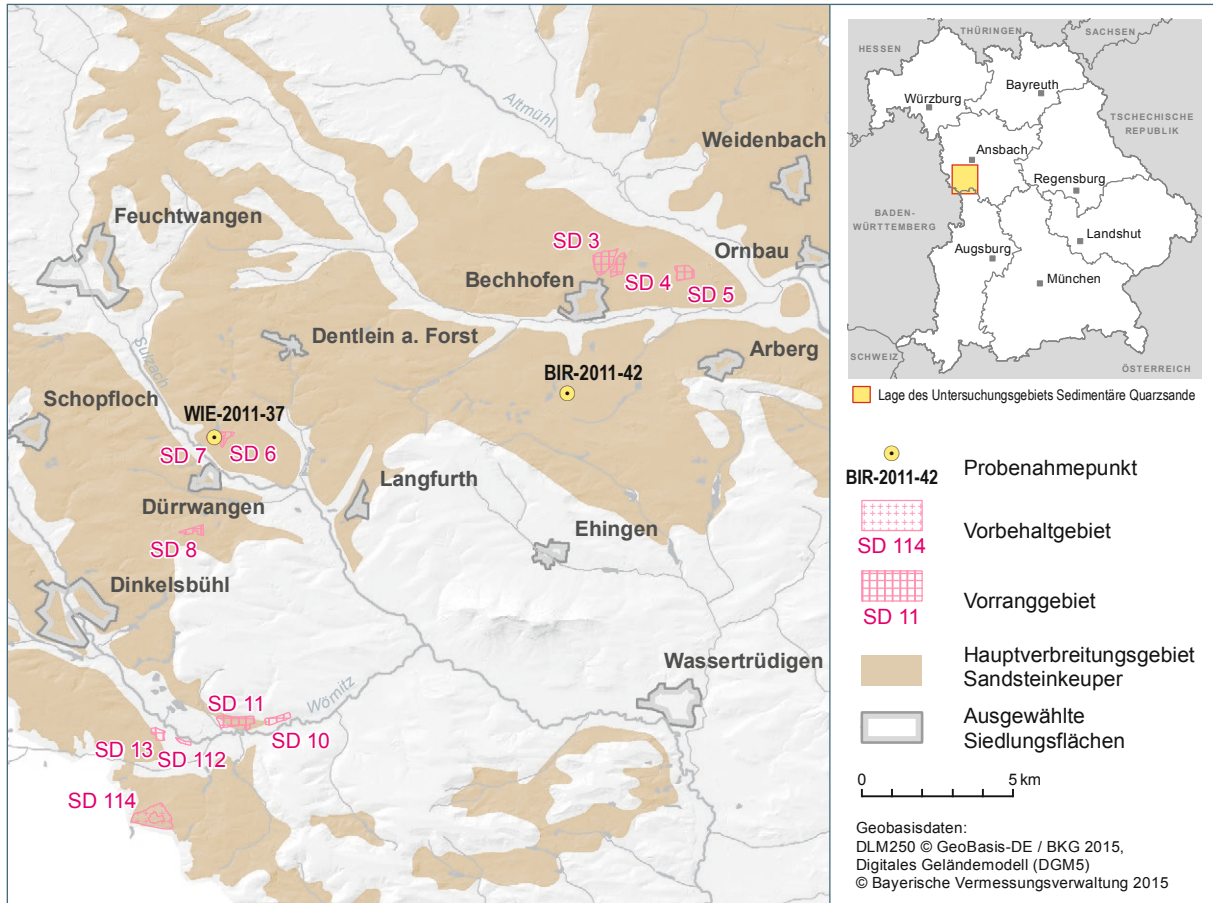


Abb. 10: Probenahmepunkte Keuper

Dazu wurden nur augenscheinlich reine Quarzsand-Proben ausgewählt. Die nachfolgende Proben-  
vorbereitung (Vorselektion, mehrstufige Siebung und Schlämmung, Dichtentrennung und hand pi-  
cking), Analytik und Bewertung erfolgte ausschließlich an diesen Proben (Abb. 11; siehe dazu auch  
nachfolgendes Kap. 3.3).



Abb. 11: Auswahl aufgereinigter Quarzkonzentrate aus mesozoischen Sandlagerstätten Nordbayerns.



### 3.2.4 Gangquarz – Lagerstätte Pfahl

Der Abbau von Pfahlquarz findet derzeit nur in geringerem Umfang an drei Gewinnungsstellen statt (2015). Die Produktion daraus belief sich 2009 auf ca. 45.000 t. Wegen der großen Längserstreckung (ca. 140 km), der großen Mächtigkeit und der zu erwartenden großen Tiefererstreckung des „Pfahls“ liegt hier ein sehr hohes Potenzial für Gangquarz vor (das höchste Deutschlands, nach: BÖRNER et al. 2012), das jedoch aus naturschutzfachlicher Sicht sowie aus abbautechnischen Gründen stark begrenzt wird. Ein Übertage-Abbau wäre dort zwar theoretisch bis ca. 50–100 m Tiefe möglich, muss aber wegen der geringen Standfestigkeit des Nebengesteins oft schon bei ca. 35 m eingestellt werden. Auch ist, trotz besserer Qualitäten in der Tiefe, wegen des geringen Erlöses für den geförderten Rohstoff, ein Abbau in größeren Tiefen (ggf. auch mittels untertägiger Gewinnung) derzeit nicht rentabel durchführbar (BÖRNER et al. 2012). In gebrochener und gesiebter Form wird Pfahlquarz überwiegend als Baustoff sowie für die Glas- bzw. metallurgische Industrie (an mittels selektiven Abbau gewonnenem Material) oder, nach entsprechender Aufbereitung, auch zur Siliziumherstellung verwendet (WEINIG 1984).

Proben für die Untersuchung stammen aus aktiven Gewinnungsstellen bzw. aus einem Erkundungsschurf (siehe Abb. 12, bzw. Tab. A-6 im Anhang).

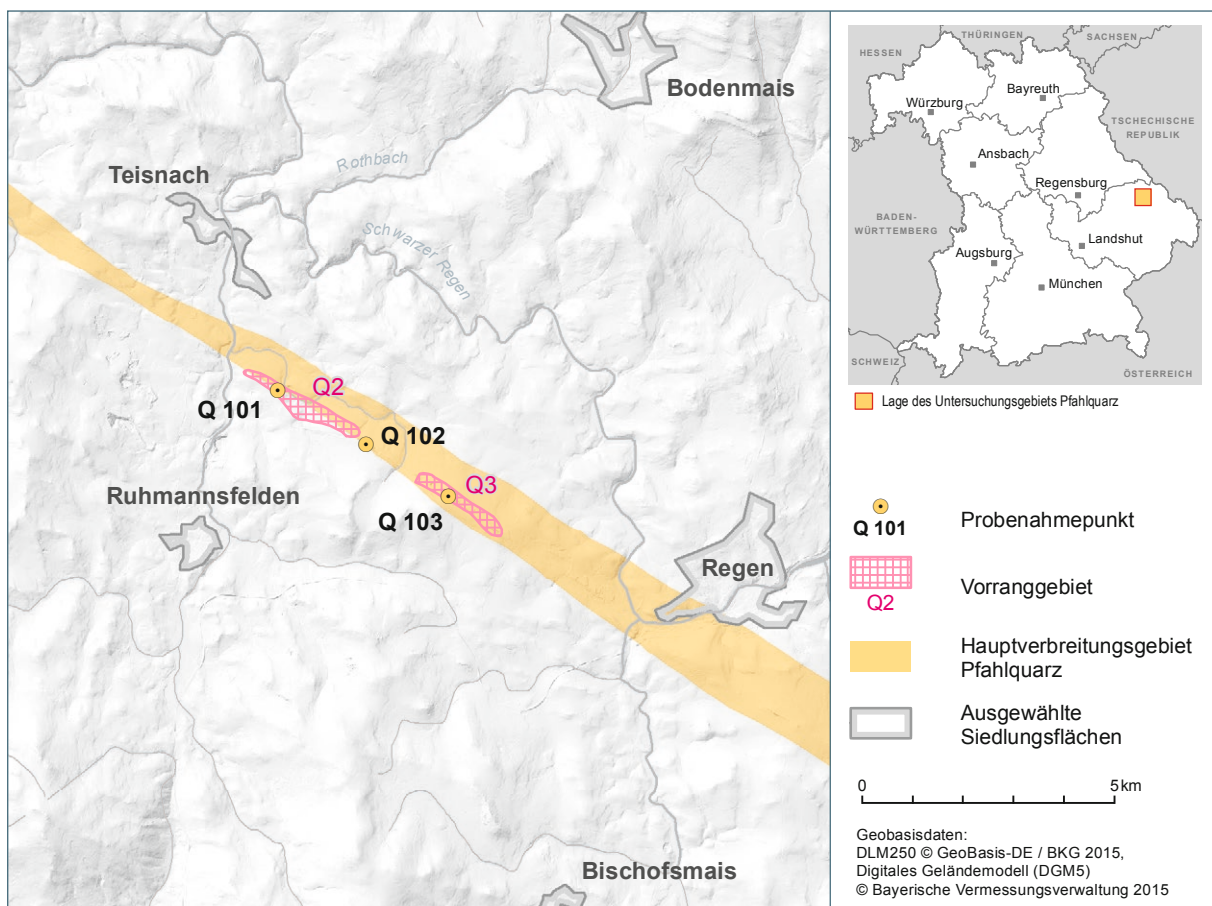


Abb. 12: Probenahmepunkte am Pfahl

Die gezogenen Proben wurden zunächst makroskopisch nach sichtbaren Verunreinigungen und dgl. vorselektiert und gereinigt; ihre anschließende Auf- und Vorbereitung erfolgte mittels nachfolgend beschriebener Methoden (Abb. 13; siehe dazu auch Kap. 3.3).



Abb. 13: Pfahl-Quarz (Probe Q 103; Steinbruch March / Regen) als Rohprobe (unten rechts) und in verschiedenen Aufbereitungsstufen (oben) bzw. als analysenfähiges Quarz-Konzentrat (unten links).

### 3.3 Chemisch – mineralogische Analytik der Quarz-Rohstoffe

#### Gesteins-Aufbereitung:

Die Aufbereitung der Festgesteins-Rohproben wurde wegen der außerordentlich hohen Qualitätsanforderungen bzw. zur Vermeidung ungewollter zusätzlicher Kontaminationen, hervorgerufen durch übliche mechanische Standardaufbereitungsverfahren (Backenbrecher, Scheibenmühle: Hartmetalleinsätze mit hohen Gehalten von Legierungsbestandteilen!), extern mittels eines modernen, nicht-mechanischen Verfahrens durchgeführt. Eingesetzt zur schonenden, effektiven und kontaminationsfreien Zerkleinerung der Rohproben wurde dafür eine elektrodynamische Hochspannungs-Impuls-fragmentierungs-Anlage (SELFRAG, Uni Frankfurt).

In einem Wasserbad werden dazu die polymineralischen Festproben Stromstößen mit Pulsanstiegszeiten von 200 ns (150 ns) bei 110 kV bis 130 kV (90–200 kV) und 15 kA (Energieeintrag des Impulses ca. 10–100 Joule / cm) ausgesetzt. Jede Sekunde werden dabei fünf Impulse in einem Hochspannungs-Pulsgenerator erzeugt (Frequenz 5 Hz; Pulszahl anfänglich 20, dann 200). Der entstehende Plasmakanal mit  $T \sim 10^4$  K erzeugt eine Druckwelle mit ca. 1.010 Pa. Die Schockwellen und Stromschläge, die durch die sehr kurze Hochspannungsentladung entstehen, bewirken, dass sich die einzelnen mineralischen Bestandteile an den Korngrenzen voneinander trennen und der ursprüngliche Festgesteinsverband komplett gelöst wird. Die Entladung läuft direkt durch den Festkörper. Dabei fließen die Ströme bevorzugt auf Bahnen, die bei kristallinen Feststoffen (Gesteinen) entlang der Korngrenzen verlaufen. Durch den Druck, der sich im Inneren der Gesteinsproben entlang dieser Unstetigkeitsstellen aufbaut, zerspringen die Komponenten explosionsartig (AMMAN SCHWEIZ AG 2006; frdl. pers. Mitt. Labor Universität Frankfurt 2014). Nach der Bearbeitung, die pro Charge (Gesamt-Gewicht je Probe ca. 1.000 g, 3 einzelne Chargen à ca. 330 g) nur wenige Sekunden dauert, liegen die mineralischen Komponenten getrennt, aber weitgehend in ihrer ursprünglichen Form und Größe vor. Das Risiko ungewollter Kontaminationen durch Kontakt mit metallischen Oberflächen ist somit ausgeschlossen.

### Proben-Vorbereitung:

Die nachfolgende Anreicherung von Quarz unter gleichzeitiger Abtrennung sowohl unerwünschter Leichtminerale (Feldspäte und Glimmer) als auch möglicher Schwerminerale (u. a. Granat, Zirkon, Titan- und Eisenminerale) aus den Mineralgemischen (fragmentierte Festgesteine sowie Lockersedimente, Korngrößenbereich 0,5–1,0 mm) wurde mittels mehrstufiger Schwerentrennung im Labormaßstab durchgeführt. Als Schwereflüssigkeit wurden dafür wässrige Lösungen aus Natrium-Polywolframat eingesetzt, die für Sedimentproben auf eine Dichte von 2,90 g/cm<sup>3</sup> und 2,64 g/cm<sup>3</sup> und für die Kristallinproben bei 2,64 g/cm<sup>3</sup> und 2,67 g/cm<sup>3</sup> eingestellt wurden (Abb. 14 und Abb. 15).

Eine nachfolgende Aufreinigung der (mehrfach gewaschenen und getrockneten) Quarz-Konzentrate mittels handpicking – Verfahren unter dem Mikroskop konnte weitestgehend die verbliebenen und sichtbaren, unerwünschten Mineralbeimengungen (opake Schwerminerale, Glimmer, Feldspäte) beseitigen.

Die anschließende Homogenisierung und Aufmahlung der Quarz-Konzentrate zu analysenfähigen Präparaten erfolgte mittels Planetenkugelmühle mit (hochabriebfesten) Achateinsätzen. Kontaminationen werden dadurch weitgehend vermieden. Die so aufgemahlene Proben wurden anschließend für die Analytik präpariert; zuerst als Pulverprobe in „fester Form“ für die RFA und anschließend bei hinreichender Reinheit in mittels Säureaufschluß gelöster Form für die ICP-OES-Analytik.

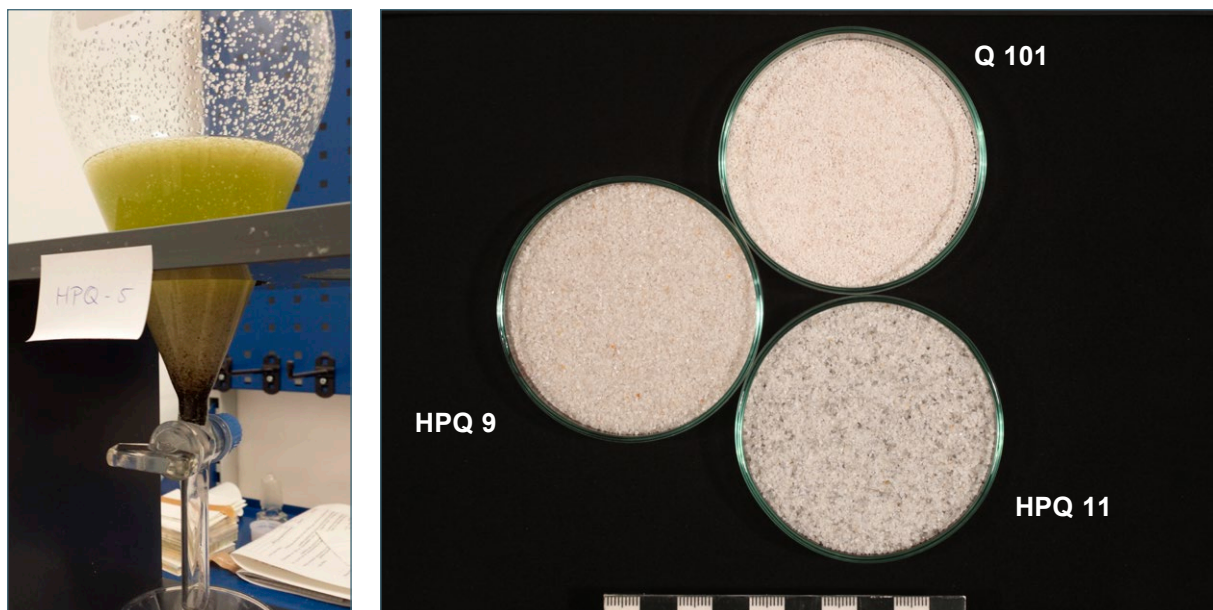


Abb. 14: Links: Anreicherung von Quarz aus fragmentierter Rohprobe mittels Dichtentrennung.

Abb. 15: Rechts: Quarzkonzentrate nach Dichtentrennung (Q 101: Pfahlquarz / Zuckenried / Patersdorf; HPQ 9: Meta-Pegmatit, Grube Maier / Windischeschenbach; HPQ 11: Albit-Pegmatoid, Grube Streitau / Gefrees).

### Chemische Analytik:

Die chemische Analytik der untersuchten Proben wurde extern mittels einer mehrstufigen Vorgehensweise durchgeführt. Zunächst erfolgte eine erste Übersichtsanalytik potenzieller Rohstoffe (screening) mittels speziell kalibrierter, wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenzanalytik (WD-RFA), nachfolgend (wo noch sinnvoll, bei Reinheiten größer ca. 99,980 Gew.-%) wurde an homogenen, repräsentativen Quarz-Chargen (Proben-Gewicht minimal je ca. 30 g) die nachweisstärkere Analytik mittels Optischer Emissionsspektrometrie (ICP-OES) durchgeführt.

Die chemische Analytik (Haupt-, Neben- und Spurenelemente mit Glühverlust, L.O.I.) beschreibt generell die Gesamtgehalte sowohl aus einer festen, pulverförmigen Probe (hier inkl.  $\text{SiO}_2$ ) als auch aus einem Säureaufschluß ( $\text{HF}$ ,  $\text{HClO}_4$ ; für ICP-OES, hier exkl.  $\text{SiO}_2$ ). Als untere Messbereichsgrenzen der „physikalischen“ Multielementanalytik (WD-RFA) wurden i. d. R. 0,00x Gew.-% für die Hauptelemente (als Oxide) und für die Neben- und Spurenelemente (in oxidischer Form) i. d. R. 0,000x Gew.-% (entsprechend  $> 1 \text{ mg/kg}$ ) erreicht. Die Bestimmungsgrenzen der lösungsgebundenen Multielementanalytik (ICP-OES) liegen i. d. R. bei 0,1 ppm für die Hauptelemente (als Oxide) und für die Neben- und Spurenelemente (elementar) werden i. d. R. zwischen 0,03 und 0,1 mg/kg (ppm!) erzielt. Analysierte und bewertete Parameter waren neben Si die strukturgebundenen Elemente Al, Fe, K, Li, P, Ti und Ge sowie die einschlussgebundenen Elemente Ca, Cr, Cu, Mg, Mn, Na, Ni, Zn und Zr.

Wegen der potenziell niedrigen Spurenelementkonzentrationen bzw. der hohen Anforderung hinsichtlich Nachweisstärke, Richtigkeit und Reproduzierbarkeit wurden jeweils, wo sinnvoll, zwei Analysendurchgänge beginnend mit WD-RFA gefolgt von dem ICP-OES - Messverfahren unter Verwendung von Suprapur-Säure-Qualitäten sowie Eichung und Plausibilisierung mit externen Standards (IOTA-Quarz 4,6, 6-SV, 8, STD, CG und STD-SV; Unimin) durchgeführt.

#### **Mineralogische Analytik:**

Auch die mineralogische Analytik sollte laut Planungen extern erfolgen; die dazu erforderlichen Untersuchungen sollten jedoch nur bei „chemisch günstig zusammengesetzten“ Quarz-Rohstoffen mit Reinheiten größer 99,990 Gew.-% hinsichtlich mineralogischer Einschlüsse (Anzahl, Größe, chemische Zusammensetzung, Verteilung) bzw. des mineralogischen Quarz-Internbaus durchgeführt werden. Ausgesuchte Verfahren waren die Polarisations - Mikroskopie (PolMik inkl. Bildauswertung), die Kathodolumineszenz (KL) – PolMik bzw. / sowie die KL – Rasterelektronenmikroskopie (REM).

### **3.4 Rohstoffgeologische Auswertung**

#### **Bewertungsschritt 3 (rohstoffliche Qualität nach aktueller geochemischer Analytik):**

Hydrothermale Gangvorkommen (Pfahl und Nebenpfähle; Position 1 der Zielgebiete): Die maximale Quarz-Reinheit einzelner Partien beträgt nach Voruntersuchung mittels RFA zwischen 99,88 Gew.-% und 99,97 Gew.-%  $\text{SiO}_2$ . In der Summe liegen die Gehalte an Fremdelementen (als Oxide; alle außer  $\text{SiO}_2$ ) bei ca. 300 mg/kg (Mittelwert), wobei Aluminiumoxid mit ca. 190 mg/kg die höchste Verunreinigung darstellt (Abb. 16). Damit konnten zum einen die Vorabergebnisse bestätigt werden und zum anderen auf dieser Grundlage eine nachweisstärkere Analytik an zwei Proben initiiert werden.

Ergebnisse der Nachuntersuchung mittels ICP-OES: Bei den mit erweitertem Parameterumfang (31 Struktur- und Einschlussgebundene Elemente, ohne  $\text{SiO}_2$ ) und höherer Nachweisstärke gemessenen Proben liegen die mittleren Oxid-Gehalte der Fremdverunreinigungen bei ca. 0,045 Gew.-% (entsprechend ca. 450 ppm gesamt); davon beschreiben  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit ca. 326 ppm,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mit ca. 15 ppm, CaO mit ca. 19 ppm und die Alkalien ( $\text{Na}_2\text{O}$  und  $\text{K}_2\text{O}$ ) mit ca. 36 ppm (Mittelwert) die höchsten Werte (Abb. 17). In elementarer Form ausgedrückt entsprechen die genannten oxidischen Gehalte im Mittel ca. 170 ppm Al, ca. 10 ppm Fe, ca. 14 ppm Ca und ca. 28 ppm Alkalien. Die gemittelte Gesamtsumme aller bestimmten Fremdverunreinigungen beträgt hier ca. 261 ppm.

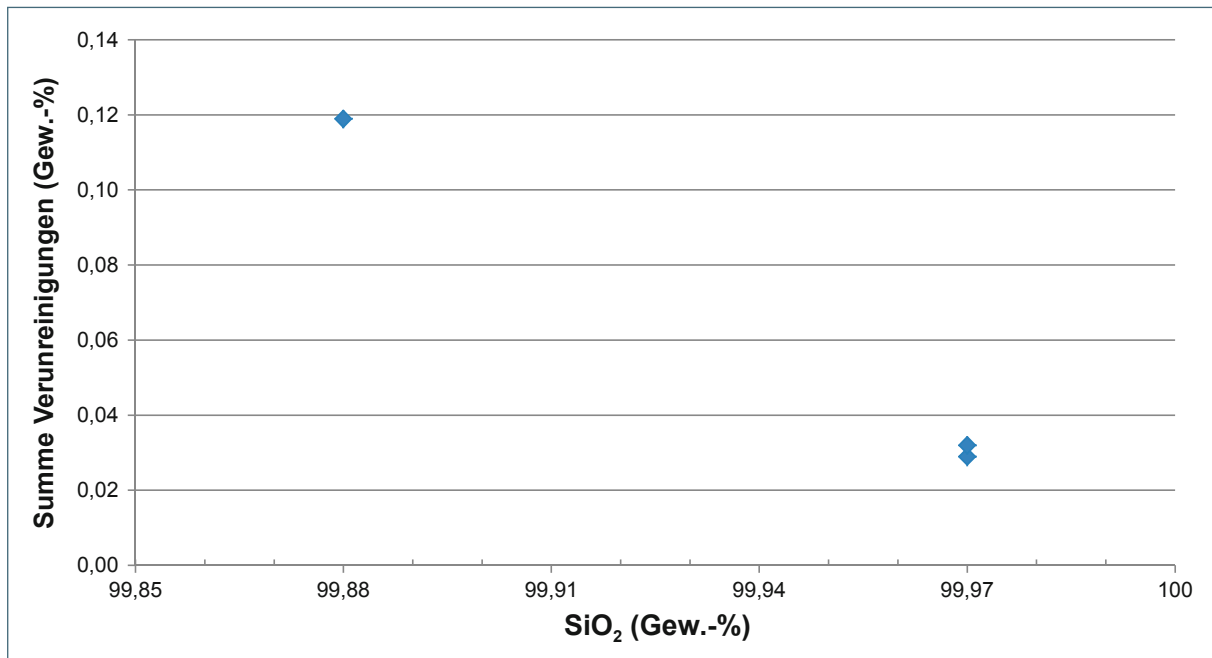


Abb. 16: SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an Pfahlquarz-Proben. Bestimmung mittels WD-RFA, Gehalte in Oxid-Gew.-%.

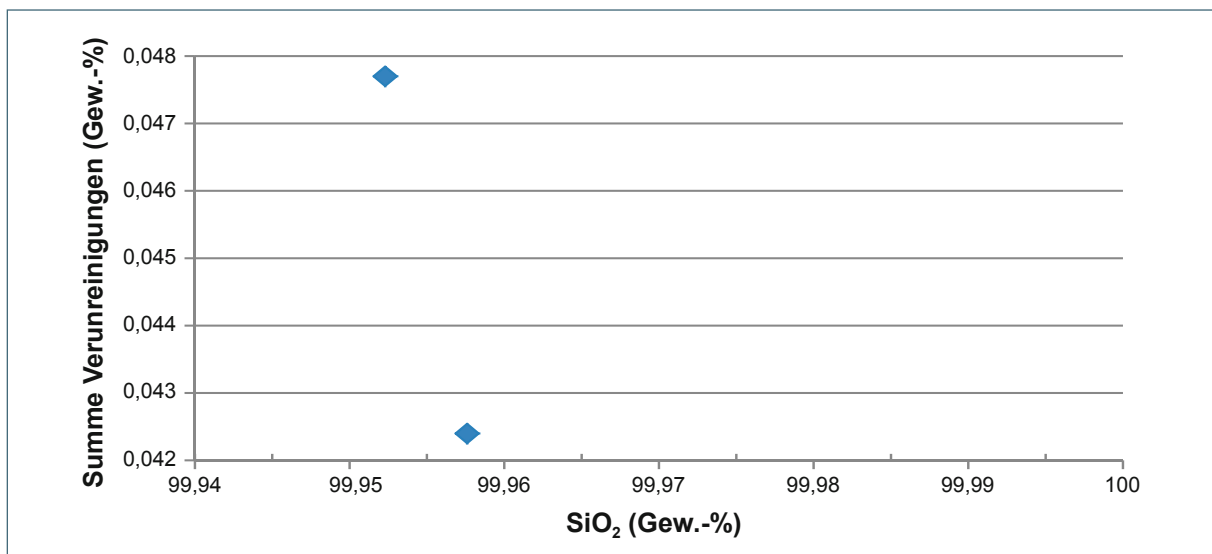


Abb. 17: Errechnete SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an ausgewählten Pfahlquarz-Proben. Bestimmung mittels ICP-OES, Gehalte in Oxid-Gew.-%.

Meta-Pegmatite (ZEV; Position 3 der Zielgebiete): Die Gehalte von Fremdelementen (als mittlere Oxidgehalte; alle außer SiO<sub>2</sub>) liegen hier in der Größenordnung von ca. 3.700 mg/kg, bedingt überwiegend durch hohe Eisen- (ca. 100 mg/kg), Aluminium- (ca. 1.700 mg/kg) und Alkalien-Gehalte (ca. 1.710 mg/kg) (Abb. 18). Nur eine Probe erbrachte in der Voruntersuchung kleinere Fremdelementgehalte von ca. 1.200 mg/kg und wurde daher für eine verfeinerte Analytik ausgesucht. Vermutlich werden die Verunreinigungen von im Labormaßstab nicht oder nur schwer abtrennbaren Einschlüssen von Glimmern und Feldspäten in Quarz hervorgerufen.

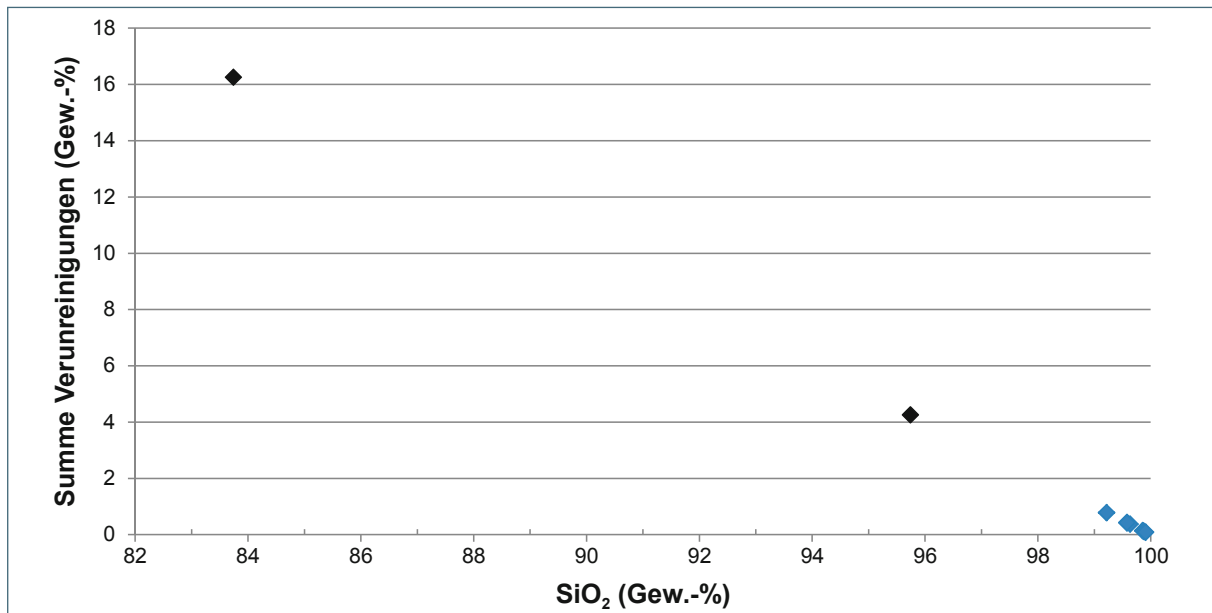


Abb. 18: SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an Albit-Pegmatoid- (schwarzes Symbol) und Metapegmatit-Proben (blaues Symbol). Bestimmung mittels WD-RFA, Gehalte in Oxid-Gew.-%.

Albit-Pegmatoide (MüMa; Position 4 der Zielgebiete): Ähnlich den vorgenannten finden sich in der Voruntersuchung bei diesen Proben sehr hohe und stark schwankende Gehalte an Verunreinigungen (als mittlere Oxidgehalte; alle außer SiO<sub>2</sub>), vor allem von Eisen (ca. 540 mg/kg), Aluminium (ca. 28.400 mg/kg), Alkalien (ca. 34.330 mg/kg) und Kalzium (ca. 5.030 mg/kg), was ebenso auf Einschlüsse von Glimmern und Feldspäten in Quarz hindeutet (Abb. 18). Nur eine Probe erbrachte in der Voruntersuchung niedrigere Fremdelementgehalte von ca. 900 mg/kg und wurde daher für eine verfeinerte Analytik ausgesucht.

Ergebnisse der Nachuntersuchung (mittels ICP-OES) zweier günstig zusammengesetzter Proben aus Meta-Pegmatit und Albit-Pegmatoid: Bei den mit erweitertem Parameterumfang (31 Struktur- und Einschlussgebundene Elemente, ohne SiO<sub>2</sub>) und höherer Nachweisstärke gemessenen Proben liegen die Oxid-Gehalte der Fremdverunreinigungen zwischen ca. 0,089 Gew.-% und ca. 0,135 Gew.-% (entsprechend ca. 890 bis 1.350 ppm Oxide gesamt). Davon beschreiben Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (zwischen ca. 420 ppm und 807 ppm), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (zwischen ca. 25 ppm und 89 ppm), TiO<sub>2</sub> (zwischen ca. 6 und 28 ppm), Na<sub>2</sub>O (zwischen 120 und 356 ppm) und K<sub>2</sub>O (zwischen ca. 38 und 89 ppm) die höchsten Werte (Abb. 19). Elementar ausgedrückt liegt Al zwischen ca. 222 und 427 ppm, Fe zwischen ca. 17 und 62 ppm, Ti zwischen 3 und 17 ppm, Na zwischen 89 und 264 ppm und K zwischen 31 und 74 ppm (gesamt gemittelt, mit allen bestimmten Elementen ca. 694 ppm).

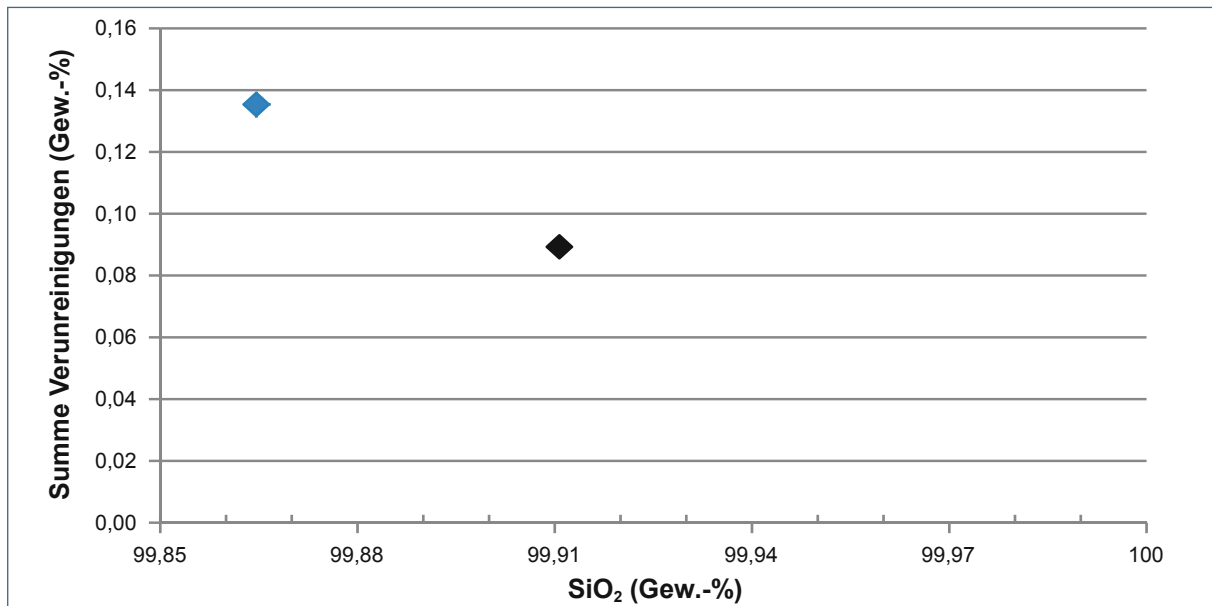


Abb. 19: Errechnete SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an ausgewählten Albit-Pegmatoid- (schwarzes Symbol) und Metapegmatit-Proben (blaues Symbol). Bestimmung mittels ICP-OES, Gehalte in Oxid-Gew.-%.

**Sedimentäre Quarzsand-Lagerstätten (Position 7 der Zielgebiete):** Die Gehalte an Fremdelementen (als mittlere Oxidgehalte; alle außer SiO<sub>2</sub>) liegen hier zwischen maximal ca. 16.500 mg/kg und minimal ca. 1.630 mg/kg, im Mittel bei ca. 4.600 mg/kg (Abb. 20). Nur zwei Proben, eine aus dem dogger β, eine aus dem Rhätolias waren mit ca. 1.630 mg/kg bzw. 2.340 mg/kg Fremdverunreinigungen am günstigsten und wurden nachuntersucht. Insgesamt resultieren die hohen Werte an Fremdverunreinigungen aus den hohen mittleren Gehalten an Aluminium (ca. 2.080 mg/kg), Eisen (ca. 500 mg/kg), den Alkalien (ca. 710 mg/kg), Kalzium (ca. 150 mg/kg) und Titan (ca. 290 mg/kg), die vermutlich durch Einschlüsse von Glimmern, Feldspäten und Schwermineralen sowie zusätzlich durch Eisen-Oxid-Häutchen auf den Korn-Oberflächen hervorgerufen werden.

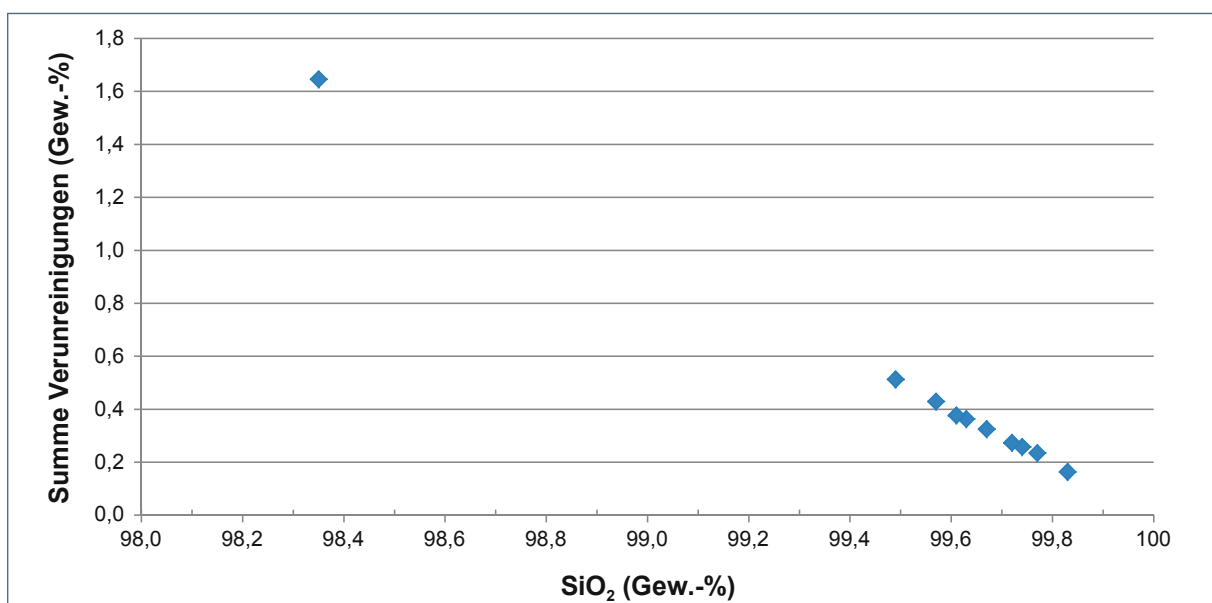


Abb. 20: SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an Proben sedimentärer Quarzsande. Bestimmung mittels WD-RFA, Gehalte in Oxid-Gew.-%.

Ergebnisse der Nachuntersuchung (mittels ICP-OES) zweier Proben aus Quarz-Sanden: Bei den mit erweitertem Parameterumfang (31 Struktur- und Einschlussgebundene Elemente, ohne  $\text{SiO}_2$ ) und höherer Nachweisstärke gemessenen Proben liegen die Fremdoxid-Gehalte zwischen ca. 1.855 ppm und 1.980 ppm gesamt (entsprechend ca. 0,185 bis 0,198 Gew.-% Gesamtverunreinigungen). Davon machen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (zwischen ca. 830 und 1.210 ppm),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (zwischen 176 ppm und 288 ppm),  $\text{TiO}_2$  (zwischen 151 ppm und 169 ppm) sowie  $\text{K}_2\text{O}$  (zwischen 75 ppm und 141 ppm) und  $\text{Na}_2\text{O}$  (zwischen 33 ppm und 61 ppm) den größten Teil der Verunreinigungen aus (Abb. 21). Elementar ausgedrückt liegt Al zwischen ca. 439 und 639 ppm, Fe zwischen ca. 123 und 202 ppm, Ti zwischen 91 und 102 ppm, Na zwischen 24 und 45 ppm sowie K zwischen 62 und 117 ppm (gesamt gemittelt, mit allen bestimmten Elementen ca. 1.165 ppm).

Insgesamt bestätigt die nachweisstärkere Analytik mittels ICP-OES an den ausgewählten Proben die Ergebnisse der Voruntersuchung und deutet demnach insgesamt nur bei stark vorselektiertem Material des Pfahls auf Qualitäten mit einer primären Reinheit von knapp unter 300 mg/kg Gesamtverunreinigungen (elementar) in Quarz hin.

Quarz-Qualitäten besser oder in der gesuchten Größenordnung von HPQ (als Summe der Gesamtverunreinigungen möglichst  $\leq 50$  mg/kg elementar) sind demzufolge in allen Proben nicht angezeigt.

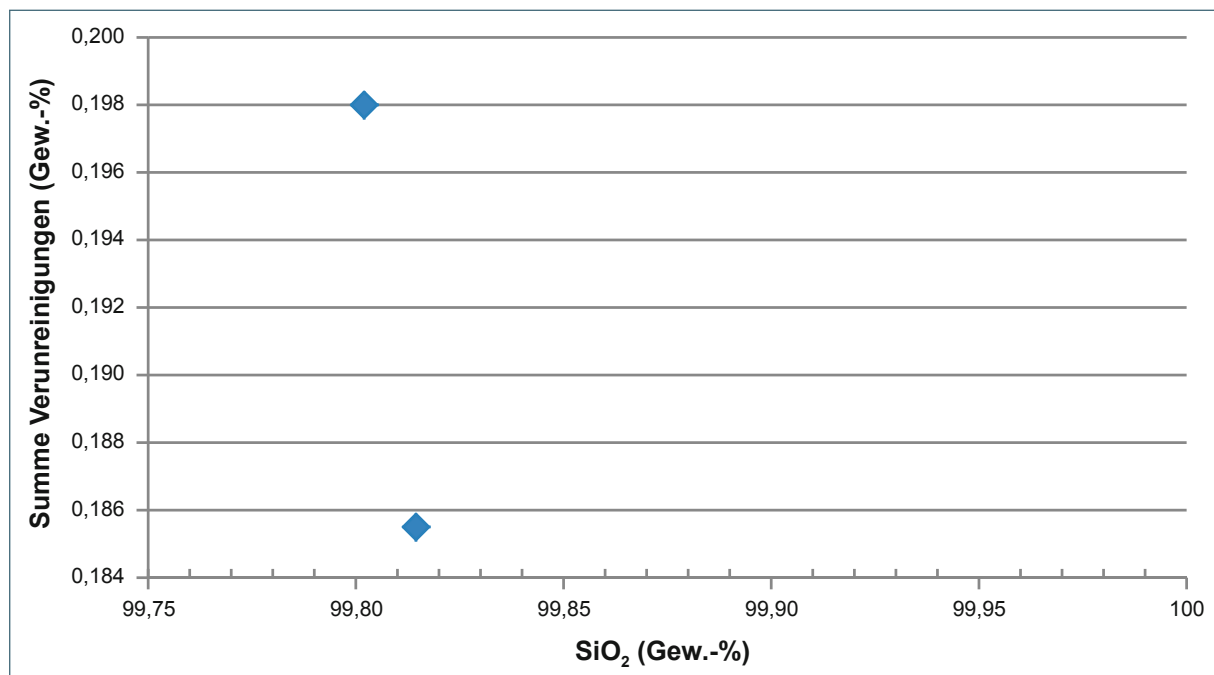


Abb. 21: Errechnete  $\text{SiO}_2$ -Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an ausgewählten Proben sedimentärer Quarzsande. Bestimmung mittels ICP-OES, Gehalte in Oxid-Gew.-%.

### Zusammenfassende Bewertung:

Bei Betrachtung aller vorliegenden Befunde (Bewertungsschritte 1 bis 2) zu den bereits reduzierten Potenzial-Gebieten im Kristallin bzw. der sedimentären Quarz-Lagerstätten sowie unter Einbeziehung der geochemischen Neu-Daten (Bewertungsschritt 3) erübrigt sich eine weitere mineralogische Untersuchung zur Konkretisierung eines vermeintlichen HPQ – Potenzials, vor allem nach jetzt dokumentierter geochemischer Qualität. Die geplanten mineralogischen Untersuchungen wurden deshalb an allen Proben ausgesetzt.



Aus chemischer Sicht kann nun insgesamt festgestellt werden, dass in keiner der chemisch untersuchten Proben der Nachweis für Quarzqualitäten erbracht werden konnte, die primär die Reinheitsforderungen von hochreinem Quarz HPQ erfüllen bzw. näherungsweise in deren Größenordnung liegen (Ausnahme Pfahlquarz).

Dies zusammen mit dem lagerstättenkundlichen Kriterium (potenziell noch verfügbare Restmengen) bei den – vorrangig untersuchten – Quarzrohstoffen des Kristallins (Meta-Pegmatite und Albit-Pegmatoide) erbringt daher als Untersuchungsergebnis des Projektes die weitgehende Nichtfündigkeit an primären HPQ-Qualitäten in bayerischen Lagerstätten.

Albit-Pegmatoid-Lagerstätten der Münchberger Gneismasse: Das damalige Bauwürdigkeitskriterium, eine zusammenhängende Lagerstätte von wenigstens 1.000 t Rohpegmatit, das die Anlage eines quasi modernen, technisierten Betriebes gelohnt hat, konnte schon nach intensiv durchgeführter Exploration in der Mitte 20. Jahrhundert nur in sehr wenigen der aufgefundenen Lagerstätten erfüllt werden. Die meisten der über mehrere Häufungsgebiete verstreuten Pegmatoid-Vorkommen lagen in der Größenordnung von weit unterhalb 100 t Gesamtinhalt; sie hatten daher weder als Einzelvorkommen noch zusammengefasst aus damaliger Sicht schon eine nennenswerte wirtschaftliche Bedeutung.

Meta-Pegmatit-Lagerstätten im Raum Windischeschenbach: Ähnliches gilt auch für diese Lagerstätten. Die minimale Größenordnung der einzelnen Lagerstätten, ihr heterogener Internbau sowie ihre Zerspitterung auf ein relativ großes Gebiet machten schon zu Betriebszeiten eine rentable Gewinnung unmöglich. Die deswegen zum Zeitpunkt der Förderung nach Lagerstätten-Größe schon wirtschaftlich ambivalent bzw. unrentabel eingestuft Betriebe würden daher aktuell (wegen geschilderter rohstoffgeologischer Einschränkungen) bei einer Wiederaufnahme als absolut perspektivlos gelten. Aus heutiger Sicht, mit einer um ein Vielfaches gestiegenen Anforderung gilt dies hinsichtlich des Hauptminerals Feldspat aber besonders hinsichtlich Quarz sowohl nach potenziell förderbarer Menge in allen Einzelvorkommen beider Areale als auch insbesondere nach heute noch gewinnbarer Rest-Menge. Wegen der Kleinräumigkeit und Zerspitterung all dieser Lagerstätten (selbst im un bebauten Zustand), wegen der kleinen und stark variablen Quarzgehalte sowie wegen der schon erfolgten, nahezu quantitativ erfolgten Abbausituation kann von einer Erschöpfung eines einmal vorhandenen Minimal-Potenzials (hinsichtlich Feldspat) gesprochen werden.

Eine Auffindung neuer, unverritzter Lagerstätten bzw. –Teile (in ähnlicher Größenordnung oder größer) ist wegen der intensiv durchgeführten, mehrjährigen bzw. mehrphasigen Explorationstätigkeit in beiden Arealen als nicht aussichtsreich einzustufen. Ein wirtschaftlich förderbares Rest-Potenzial bzw. ein unentdecktes, unerschlossenes Potenzial ist somit insgesamt nicht mehr zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit ähnlich große Lagerstätten wie die ehemals bebauten zu finden ist nach oben Gesagtem äußerst gering und bliebe damit künftig sicher auch nur noch dem Zufall überlassen. Ein Potenzial für größer dimensionierte Lagerstätten ist nach vor Gesagtem sicher insgesamt auszuschließen.

Quarz-Lagerstätte Pfahl: Etwas positiver stellen sich die Ergebnisse bei Pfahlquarz dar. Das immense Lagerstättenpotential sowie die hier dokumentierte maximale Reinheit einzelner, handgeklauter Partien (mit günstigen Fremdelement-Gehalten kleiner 300 ppm) erhöht die Wahrscheinlichkeit „Vorstufen“ an HPQ-Qualität in wirtschaftlichen Größenordnungen produzieren zu können. Insgesamt könnte hier vermutlich eine intensive qualitätsmäßige Vorselektion bei Gewinnung und eine umfangreichere Aufbereitung zur Steigerung der Reinheit hinsichtlich „Vorstufen – HP- Quartz“ beitragen bzw. wäre zur Produktion darauf abzielender Quarz-Qualitäten erforderlich. Einschränk-

kend ist jedoch die Tatsache, dass hier die Hauptverunreinigung vermutlich durch überwiegend strukturell gebundenes Aluminium hervorgerufen wird und daher nur mittels umfangreicher Aufbereitungstechnologie reduzierbar sein dürfte.

Die mesozoischen Quarzsand-Lagerstätten rangieren, wie in den Vorüberlegungen schon vermutet, mit ihren Gehalten an Verunreinigungen weit oberhalb des erforderlichen Qualitätskriteriums für HPQ (um Faktor 23 höher als gefordert!). Auch umfassende Aufbereitungsmaßnahmen könnten sehr wahrscheinlich eine wirtschaftlich rentable Gewinnung hochreiner Qualitäten daraus, trotz des großen „Angebotes“ an primären Sand-Ausgangs-Rohstoffen, nicht ermöglichen.

## 4 Ergebnisse

Nach heutigem rohstoffgeologischen Informationsstand und auf Grundlage der hohen Anforderungen an einen potenziellen Rohstoff für hochreinen Quarz kann nach derzeitigem technischen Stand eine rentable Gewinnbarkeit aus o. g. genannten, näher untersuchten Vorkommen als ausgeschlossen gelten. Eine Fündigkeit für primären, hochreinen Quarz nach Qualität und/oder nach wirtschaftlich abbaubaren (Rest-) Mengen liegt in allen betrachteten Lagerstätten Bayerns nach derzeitigem Wissensstand und den erbrachten Projektergebnissen nicht vor. Gegebenenfalls könnte in einzelnen Partien des Pfahls durch intensive Selektion bei Gewinnung, begleitet von einer engräumigen Qualitätskontrolle sowie unter Einsatz entsprechender Aufbereitungstechniken „Vorstufen“ für hochreine Qualitäten gewonnen werden. Dabei ist im Einzelfall jedoch von betriebswirtschaftlicher Seite das Verhältnis von erforderlichem Aufwand zu Nutzen zu prüfen und die entsprechend benötigten Investitionen abzuwägen.

## 5 Vorräte und Wirtschaftlichkeit

Die ohnehin schon minimalen Lagerstätten-Reste des früheren (Feldspat-) Bergbaus im Kristallin enthalten - entgegen bisherigen mineralogisch-geochemischen Einschätzungen - keinen primären HP-Quartz.

Trotz großer, verfügbarer Vorräte der sedimentären Lagerstätten in Bayern konnten hier, auch nur ansatzweise, keine primären HPQ-Qualitäten nachgewiesen werden.

Ein mögliches Potenzial stellt dagegen partienweise Pfahlquarz dar. Ob sich jedoch künftig aus selektiv gewonnenem Material wirtschaftlich nutzbare Qualitäten bzw. Vorstufen für HPQ aufbereitungstechnisch gewinnen lassen, müsste erst durch detailliertere Arbeiten (mineralogisch, anlagentechnisch, betriebswirtschaftlich) untersucht werden.

## 6 Prognose

Ausgehend von einer weiterhin steigenden Bedarfssituation von hochreinen Quarz, von einer Erschließung größerer Lagerstätten weltweit und sinkenden Kosten für Aufbereitung des Rohstoffes durch effizientere Techniken kann insgesamt angenommen werden, dass bayerische Quarz-Lagerstätten trotz ihres teilweise großen Rohstoffangebotes aber wegen ihrer „natürlichen“ Quarz-Qualitäten (weit oberhalb des HPQ-Kriteriums) daher als unbauwürdig hinsichtlich HPQ eingestuft werden müssen. Eine Wirtschaftlichkeit bei Nutzung vorhandener Potenziale, gefolgt von einer dann erforderlichen, großtechnischen Aufbereitung ist daher aus heutiger Sicht nicht gegeben. Möglicherweise stellt jedoch Pfahlquarz partienweise ein noch ungenutztes Potenzial zur Herstellung von HPQ aus primärem Material dar, was jedoch durch detailliertere betriebswirtschaftlich-anlagentechnische Untersuchungen noch geklärt werden müsste.

## 7 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass nach heutigen Anforderungen wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten von primärem hochreinen Quarz (HPQ) in Bayern nicht auftreten, die Untersuchung damit als nicht fündig eingestuft werden muss.

## Literatur

- AMMAN SCHWEIZ AG (2006): SELFRAG Labor Broschüre, 15 S., Langenthal, Schweiz.
- BAUBERGER, W. (1957): Über die „Albit-Pegmatite“ der Münchberger Gneismasse und ihre Nebengesteine. – *Geologica Bavarica* 36, BayGLA, 77 S., München.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, 1953): Schlußbericht zu GAB-Objekt 73.-11 S., München; Bestand LfU/Rohstoffarchiv: Akt „Feldspat 1“.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, 1956): Schlußbericht zu GAB-Objekt 50, Feldspatvorkommen in der Münchberger Gneismasse. 12 S., München; Bestand LfU/Rohstoffarchiv: Akt „Feldspat 3“.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, 1957A): Schlußbericht zu GAB-Objekt 50a, Feldspatvorkommen in der Münchberger Gneismasse. 11 S., München; Bestand LfU/Rohstoffarchiv: Akt „Feldspat 3“.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, 1957B): Schlußbericht zu GAB-Objekt 50b, Feldspatvorkommen in der Münchberger Gneismasse. 7 S., München; Bestand LfU/Rohstoffarchiv: Akt „Feldspat 3“.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, 1959): Schlußbericht zu GAB-Objekt 50c, Feldspatvorkommen in der Münchberger Gneismasse. 5 S., München; Bestand LfU/Rohstoffarchiv: Akt „Feldspat 3“.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LfU, 2008): Geochronologische, geochemische, petrographische und mineralogische Untersuchungen im Grundgebirge Bayerns sowie kritische Betrachtungen zu Sr-Isotopenstandards. *Geologica Bavarica* 110, 432 S., Augsburg.
- BÖRNER, A. et al. (2012): Steine- und Erden-Rohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland. – *Geol. Jb., Sonderhefte, SD 10, BGR*, 356 S., Hannover.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. (1980): An introduction to the rock forming minerals. – 528 S., Longman, London.
- DILL, H. G. (1979): Der Feldspat-Bergbau in der Münchberger Gneismasse. - *Bergbau*, 30: S. 301-304, Hattingen.
- EMMERT, U. & STETTNER, G. (1968): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern, 1 : 25.000, Blatt Nr. 5737 Schwarzenbach a.d.sächs. Saale, BayGLA, 236 S., München.
- FISCHER, G. (1968): Über das Moldanubikum der Bayerischen Oberpfalz und des bayerischen Waldes, S. 27-111, deutsche Übersetzung zu: Moldanubicum in Bavaria – Guide to the excursion. *Int. Geol. Congress, XXIII Session, Prague*.
- FLEM, B., LARSEN R. B., GRIMSTVEDT, A., MANSFLED, J. (2002): In situ analysis of trace elements in quartz by using laser ablation inductively coupled mass spectrometry. - *Chemical Geology* 182: S. 237-247, Elsevier, Amsterdam.

- GESELLSCHAFT ZUR AUFSUCHUNG VON BODENSCHÄTZEN IN BAYERN MBH (GAB, 1963): Bericht über die Aufsuchung von Mineralien und Wasser in Bayern von 1951 bis 1962. 85 S., München.
- GLODNY, J., GRAUERT, B., FIALA, J., VEJNAR, Z. & KROHE, A. (1998): Metapegmatites in the western Bohemian massif: ages of crystallisation and metamorphic overprint, as constrained by U-Pb zircon, monazite, garnet, columbite and Rb-Sr muscovite data. *Geologische Rundschau*. 87, S.124-134, Springer, Berlin.
- GÖTZE, J., MÖCKEL, R. (2012): *Quartz: Deposits, mineralogy and analytics*; 360 S., Springer, Berlin.
- GÜMBEL, C. W. VON (1868): *Geognostische Beschreibung des Königreichs Bayern. Geognostische Beschreibung des Ostbayerischen Grenzgebirges oder des Bayerischen und Oberpfälzer Waldgebirges*. – 968 S., J. Perthes, Gotha.
- JUNG, L. (ED.) (1992): *High-purity natural quartz. Part 1: High-purity natural quartz for industrial use. Library of Congress-in-Publication Data*, 538 S, New Jersey.
- LARSEN R. B., FLEM, B., DUNFAS, S., LAHAYE, Y., MANSFELD, J. (2000): LA-HR-ICP-MS analysis of quartz and principles governing the distribution and speciation of structural impurities in igneous quartz. - Report 2000.081, 42 S., Norwegian Geological Survey.
- LINHARDT, E. (2000A): *Oberpfälzer Feldspat-Bergbau im Raum Windisch Eschenbach*. – Archivrecherche (unveröffentl.), Archivbestand Bergamt Amberg, BayStArchiv Amberg.
- LINHARDT, E. (2000B): *Der Beryllpegmatit der Feldspatgrube Maier, Püllersreuth – Historischer Mineralfundpunkt in der Oberpfalz*.- LAPIS, Jg. 25, 3, S.13-23, München.
- MANDT, P. (1990): *Akt „Historie Grube Friedmannsdorf“*, Firmenarchiv Fa. Franz Mandt GmbH & Co. KG, Krohenhammer, Wunsiedel.
- MOORE, P. (2005): *High purity quartz. Industrial Minerals*, 8, 455 (August), S. 53-57, London.
- MÜLLER, A., KRONZ, A., BREITER, K. (2002): *Trace elements and growth patterns in quartz: a fingerprint of the evolution of the subvolcanic Podlesí Granite System (Krusne Hory, Czech Republic)*. *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 77/2: 135-145, Prague.
- MÜLLER, A., IHLEN, P. M., WANVIK, J. E. (2007A): *Norwegian kyanite quartzites - High purity quartz and aluminum deposits*. NGU Focus no 5 2007 (pdf).
- MÜLLER, A., IHLEN, P. M., WANVIK, J. E., FLEM, B. (2007B): *High purity quartz mineralization in kyanite quartzites, Norway – Mineralium Deposita* 42:S. 523-535, Springer.
- PEUCKER, B. (1989): *Die Geochemie des Bayerischen Pfahlquarzes*. – Diplomarbeit, 95 S., Göttingen.
- ROST, F. (1960): *Die ‚Albit-Pegmatite‘ der Münchberger Gneismasse*. - In: *Der Aufschluss*, Sonderband 8, S.122- 127, Heidelberg.



- SCHAAF, P., SPERLING, TH. & MÜLLER-SOHNUS, D. (2008): Pegmatites from the Bavarian Forest, SE Germany: Geochronology, Geochemistry and Mineralogy. – In: *Geologica Bavarica* 110, 432 S., Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg.
- SCHMID, M., PANWITZ, C., POSCHLOD, K. (2013): Erkundung von Quarzkiesen zur Verwendung in der Siliziumindustrie –UmweltSpezial, 91 S., LfU, Augsburg.
- SINGER, F. (1923): Die Keramik im Dienste von Industrie und Volkswirtschaft. 1044 S., Vieweg, Braunschweig.
- SORENSEN, B.E. (2007): Metamorphic refinement of quartz under influence of fluids during exhumation with reference to the metamorphic/metasomatic evolution observed in amphibolites: a detailed field, microtectonic and geochemical study from the Bamble sector, South Norway. – Doktorarbeit, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), 146 S., Trondheim.
- STETTNER, G. (1992): Geologie im Umfeld der kontinentalen Tiefbohrung Oberpfalz ; Einführung und Exkursionen. - Bayerisches Geologisches Landesamt ; 240 S., München.
- STRUNZ, H. (1971): Mineralien und Lagerstätten des bayerischen Waldes. – In: *Der Aufschluss*, Sonderband 21, Zur Mineralogie und Geologie des bayerischen Waldes, 212 S., Heidelberg.
- STRUNZ, H., FORSTER, A., TENNYSON, CH. (1975): Die Pegmatite in der nördlichen Oberpfalz. – In: *Der Aufschluss*, Sonderband 26, Zur Mineralogie und Mineralogie der Oberpfalz, 342 S., Heidelberg.
- WEINIG, H., DOBNER, A., LAGALLY, U., STEPHAN, W., STREIT, R. & WEINELT, W. (1984): Oberflächennahe mineralische Rohstoffe von Bayern. - *Geologica Bavarica* 86, 563 S., Bayerisches Geologisches Landesamt, München.

## Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Übersicht der Untersuchungsgebiete für hochreinen Quarz (HPQ) in Bayern.	13
Abb. 2:	Die wichtigsten Meta-Pegmatit-Vorkommen SW Windischeschenbach samt ehemaligen Förderpunkten (als dicke Striche bzw. Punkte) sowie Probenahmepunkten; von N nach S: Grube Maier (S Püllersreuth), Gruben Gertrud und Klara (NW Klobenreuth) sowie Gruben Mandt und Wilma (S Obersdorf); Vorbehaltsgebiet für Feldspat FS 07, N Wendersreuth (Kreuzsignatur; Abfrage RISBY, 2015).	15
Abb. 3:	Meta-Pegmatit (Rohprobe, HPQ 5), Grube Klara / NW Klobenreuth.	16
Abb. 4:	Die wichtigsten Albit-Pegmatoid-Vorkommen als Häufungsgebiete im Raum Münchberg (Nach: BAUBERGER 1957).	17
Abb. 5:	Lage ehemaliger Schurfe und Feldspat-Gruben in der MüMa (nach: GLA 1956, 1957A und 1957B).	18
Abb. 6:	Albit-Pegmatoid, Rohprobe, HPQ 11, Bärenbühl / Streitau.	19
Abb. 7:	Probenahmepunkte Rhätolias	20
Abb. 8:	Probenahmepunkte Buntsandstein und Dogger $\beta$	21
Abb. 9:	Probenahmepunkte Kreide	21
Abb. 10:	Probenahmepunkte Keuper	22
Abb. 11:	Auswahl aufgereinigter Quarzkonzentrate aus mesozoischen Sandlagerstätten Nordbayerns.	22
Abb. 12:	Probenahmepunkte am Pfahl	23
Abb. 13:	Pfahl-Quarz (Probe Q 103; Steinbruch March / Regen) als Rohprobe (unten rechts) und in verschiedenen Aufbereitungsstufen (oben) bzw. als analysenfähiges Quarz-Konzentrat (unten links).	24
Abb. 14:	Links: Anreicherung von Quarz aus fragmentierter Rohprobe mittels Dichte-trennung.	25
Abb. 15:	Rechts: Quarzkonzentrate nach Dichtentrennung (Q 101: Pfahlquarz / Zuckenried / Patersdorf; HPQ 9: Meta-Pegmatit, Grube Maier / Windischeschenbach; HPQ 11: Albit-Pegmatoid, Grube Streitau / Gefrees).	25
Abb. 16:	SiO <sub>2</sub> -Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an Pfahlquarz-Proben. Bestimmung mittels WD-RFA, Gehalte in Oxid-Gew.-%.	27
Abb. 17:	Errechnete SiO <sub>2</sub> -Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an ausgewählten Pfahlquarz-Proben. Bestimmung mittels ICP-OES, Gehalte in Oxid-Gew.-%.	27

- Abb. 18: SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an Albit-Pegmatoid- (schwarzes Symbol) und Metapegmatit-Proben (blaues Symbol). Bestimmung mittels WD-RFA, Gehalte in Oxid-Gew.-%. 28
- Abb. 19: Errechnete SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an ausgewählten Albit-Pegmatoid- (schwarzes Symbol) und Metapegmatit-Proben (blaues Symbol). Bestimmung mittels ICP-OES, Gehalte in Oxid-Gew.-%. 29
- Abb. 20: SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an Proben sedimentärer Quarzsande. Bestimmung mittels WD-RFA, Gehalte in Oxid-Gew.-%. 29
- Abb. 21: Errechnete SiO<sub>2</sub>-Gehalte (Abszisse) vs. Summe Verunreinigungen (Ordinate) an ausgewählten Proben sedimentärer Quarzsande. Bestimmung mittels ICP-OES, Gehalte in Oxid-Gew.-%. 30

## Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Bewertungsdiagramm mit vorläufigem Ergebnis.	12
Tab. 2:	Vermarktete Produktqualitäten für Feldspat-Konzentrate aus Roh-Pegmatit im Raum Windischeschenbach (GLA 1953).	16
Tab. A-1:	Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Hauptelemente (RFA).	44
Tab. A-2:	Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Neben- und Spurenelemente (RFA).	44
Tab. A-3:	Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Hauptelemente (ICP-OES; Oxide).	45
Tab. A-4:	Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Spurenelemente I (ICP-OES; Oxide).	45
Tab. A-5:	Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Spurenelemente II (ICP-OES; Oxide).	45
Tab. A-6:	Tabellarische Aufstellung der untersuchten Proben nach Stratigraphie und Petrographie.	45

## Erklärung von Fachbegriffen

**Anatexis** (Adj. anatektisch): teilweise oder völlige Wiederaufschmelzung eines präexistierenden (meist schon metamorphen) Gesteines unter hochgradig metamorphen Bedingungen.

**Diaphtorese** (Adj. diaphtoretisch): Vorgang, bei dem im Zuge einer retrograden Metamorphose bereits metamorphisierte Gesteine durch erneut einsetzende gebirgsbildende Vorgänge in eine höhere Tiefenstufe versetzt und damit, unter Gefüge-Deformation, in einen niedrigeren Grad der Metamorphose zurückgeführt werden.

**Granoblastisch** (Adj.): Beschreibung der vorherrschend kristalloblastischen Struktur von gesprossenen Mineralkörnern, die hierbei eher isometrisch (gleich nach allen Wachstumsrichtungen) ausgebildet sind; häufig bei Quarz und Feldspäten anzutreffen.

**Granulierung**: mechanische Kornzerlegung bzw. Kornverkleinerung.

**Kryptokataklastisch** (Adj.): verborgene, durch tektonische Beanspruchung hervorgerufene Zerkleinerungserscheinungen (spröde Deformation: Kataklaste) in und an Einzelmineralen eines Gesteins.

**Mobilisat**: der mobile, meist Quarz- und Feldspat-reiche Teilbereich eines Gesteins, der i.allg. bei einer hochgradigen Metamorphose (Migmatit-Bildung) entsteht.

**Pegmatit**: groß- bis riesenkörnige (10 mm bis > 33 mm), überwiegend aus gasreichen magmatischen Restschmelzen im pegmatitischen Stadium (600 bis 500 °C) entstandene Gesteine, die vornehmlich aus Quarz, Feldspäten, Glimmern und "seltenen" Mineralen bestehen.

**Polyphase Metamorphose** (Adj. polyphas-metamorph): mehrstufige bzw. mehrphasige Umwandlung der mineralogischen Zusammensetzung eines Gesteins durch geänderte Temperatur- und/oder Druck-Bedingungen im weitgehend festen Zustand.

**Synkinematisch-syntektonisch** (Adj.): beschreibt das zeitliche Verhältnis von Kristallisation zu Deformation eines metamorphen Gesteines im Zuge einer tektonischen Überprägung; synt.-synt. kristallisierte Mineralkörner zeigen darin oft Form- und Gitterregelung ohne kataklastische Erscheinungen.

**Variskisch** oder **variszisch** (Adj.): Gebirgsbildungsära (Faltung, Metamorphose, Granitisation), die vom Devon bis ins Perm reichte (zwischen ca. 400 und 220 Mio. Jahren).

## Anhang

Tab. A-1: Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Hauptelemente (RFA).

Probe-Nr.	SiO <sub>2</sub> (Gew.-%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Gew.-%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T) (Gew.-%)	MnO (Gew.-%)	MgO (Gew.-%)	CaO (Gew.-%)	Na <sub>2</sub> O (Gew.-%)	K <sub>2</sub> O (Gew.-%)	TiO <sub>2</sub> (Gew.-%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Gew.-%)	SO <sub>3</sub> (Gew.-%)
Atz-56	99,74	0,1344	0,0185	0,0002	0,0059	0,009	0	0,0101	0,0373	0,0004	0,0078
Bar-53	99,77	0,1229	0,0197	0,0001	0,0085	0,0089	0,0015	0,0109	0,024	0,0011	0,0039
Bir-42	99,49	0,2551	0,0462	0,0005	0,0681	0,0186	0,0197	0,0678	0,0259	0,0004	0,0022
Boc-95	99,83	0,0673	0,0307	0,0014	0,0007	0,0063	0,0048	0,005	0,0219	0,0012	0,0044
Bra-45	99,57	0,1958	0,0228	0,0004	0,0109	0,0149	0,0199	0,0947	0,0376	0,0004	0,0017
Frö-103	99,63	0,1083	0,1474	0,0004	0,0138	0,0085	0,0029	0,0452	0,0293	0,0004	0,0024
HPQ-4	99,86	0,077	0,0042	0,0006	<0,0001	0,0015	0,026	0,0205	0,0028	0,0002	0,0004
HPQ-5	99,58	0,1709	0,0099	0,0002	0,0018	0,011	0,1846	0,0369	0,0009	0,001	0,0002
HPQ-8	99,22	0,3623	0,0217	0,0005	0,0209	0,0134	0,2706	0,0876	0,0026	0,0003	0,0011
HPQ-9	99,88	0,0518	0,0028	0,0001	<0,0001	0,0017	0,0519	0,0065	0,0002	0,0015	0,0001
HPQ-11	99,91	0,0257	0,0097	0,0002	0,006	0,0148	0,0253	0,0028	0,0026	0,0012	0,0005
HPQ-24	83,74	6,7584	0,0647	0,0006	0,0382	1,1728	8,0141	0,1847	0,0061	0,001	0,0013
HPQ-25	95,74	1,7351	0,0867	0,0015	0,0275	0,3213	1,9805	0,0913	0,005	0,0009	0,0009
Ped-81	99,67	0,1838	0,0473	0,0003	0,0037	0,003	0,0105	0,0148	0,0264	0,0007	0,0061
Q-101	99,88	0,0654	0,0098	0	0,0048	0,0015	0,0243	0,0114	0,001	<0,0001	0,0007
Q-102	99,97	0,0182	0,0018	0,0002	0,0002	0,0018	0,0016	0,001	<0,0001	0,0008	0,0023
Q-103	99,97	0,0193	0,0016	0,0001	0,0019	0,002	0,0033	0,0017	<0,0001	0,0006	0,0012
Ste-28	99,61	0,1637	0,0338	0,0005	0,0165	0,0105	0,0252	0,0826	0,0322	0,0013	0,0019
Tri-100	99,72	0,1091	0,0357	0,0002	0,0149	0,0087	0,0191	0,0489	0,0191	0,0012	0,0064
Wie-37	98,35	0,7422	0,1021	0,0007	0,4462	0,0593	0,0753	0,1518	0,0338	0,0014	0,0021

Tab. A-2: Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Neben- und Spurenelemente (RFA).

Probe-Nr.	CoO (Gew.-%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Gew.-%)	CuO (Gew.-%)	NiO (Gew.-%)	PbO (Gew.-%)	SrO (Gew.-%)	WO <sub>3</sub> (Gew.-%)	ZrO <sub>2</sub> (Gew.-%)	Glühverlust (Gew.-%)	Summe (inkl. Glühverlust)
Atz-56	0	0,0007	0,0002	0	0,0207	0,0001	0,0007	0,0123	0,067	100,065
Bar-53	0	0,0011	0,0002	0	0,0174	0,0001	0	0,014	0,078	100,082
Bir-42	0,0001	0,0005	0,0002	0	0,0073	0,0001	0,0011	<0,0001	0,181	100,185
Boc-95	0	0,0001	0,0002	0	<0,0001	0	0,0049	0,019	0,102	100,100
Bra-45	0	0,0006	0,0002	0,0001	0,0089	0,0001	0,0017	0,0203	0,109	100,110
Frö-103	0,0001	0,0004	0,0002	0,0001	0,004	0,0001	0,0012	0,0003	0,14	100,135
HPQ-4	0,0001	0,0004	0,0001	0	0,0041	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,092	100,090
HPQ-5	0	0,0009	0,0002	0	0,0074	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,059	100,065
HPQ-8	0	0,0003	0,0001	0	0,0012	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,071	100,074
HPQ-9	0	0	0,0001	0	0,0041	0	<0,0001	<0,0001	0,054	100,055
HPQ-11	0	0,0005	0,0002	0,0001	<0,0001	0	<0,0001	<0,0001	0,141	100,141
HPQ-24	0,0001	0,0008	0,0002	0,0001	0,0062	0,0014	0,0006	0,0056	0,234	100,231
HPQ-25	0,0001	0,0004	0,0002	0,0001	0,003	0,0008	0,0004	0,0011	0,141	100,138
Ped-81	0,0001	0,0003	0,0001	0	0,0049	0,0001	0,001	0,0225	0,118	100,114
Q-101	0,0001	0,0005	0,0002	0	0,0016	0,0001	0,0008	0,0024	0,038	100,038
Q-102	0	0,0005	0,0001	0,0001	<0,0001	0	0,0002	0,0004	0,047	100,046
Q-103	0,0001	0	0,0002	0	<0,0001	0	0	<0,0001	0,039	100,041
Ste-28	0,0001	0,0004	0,0002	0,0001	0,001	0	0,0136	0,0062	0,152	100,152
Tri-100	0,0001	0,0007	0,0001	0	0,0041	0,0001	0,0014	0,0052	0,135	100,130
Wie-37	0,0001	0,0007	0,0002	0,0001	0,0016	0,0001	0,0019	0,0279	0,513	100,511

Tab. A-3: Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Hauptelemente (ICP-OES; Oxide).

Probe-Nr.	SiO <sub>2</sub> (errechnet; Gew.-%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T) (ppm)	MnO (ppm)	MgO (ppm)	CaO (ppm)	Na <sub>2</sub> O (ppm)	K <sub>2</sub> O (ppm)	TiO <sub>2</sub> (ppm)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)
Bar-53	99,802	1208	176	2,2	43	72	33	141	169	29
Boc-95	99,8145	829	288	21	19	58	61	75	151	32
HPQ-9	99,8646	807	25	0,8	5	19	356	89	5,7	18
HPQ-11	99,9107	420	89	1,5	41,8	146	120	38	28	<BG
Q-102	99,9523	349	15	0,6	4,7	21	19	13	1,9	<BG
Q-103	99,9576	303	14	0,3	4,8	17	15	24	5,0	<BG

Tab. A-4: Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Spurenelemente I (ICP-OES; Oxide).

Probe-Nr.	BaO (ppm)	BeO (ppm)	CeO <sub>2</sub> (ppm)	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	CuO (ppm)	Li <sub>2</sub> O (ppm)	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	GeO <sub>2</sub> (ppm)
Bar-53	28	0,1	4,9	2,4	1,2	4,2	9	0,13	<BG	<BG
Boc-95	53	0,2	8,2	3,7	0,6	3,8	17	0,18	0,5	<BG
HPQ-9	0,1	1,0	<BG	<BG	0,3	1,0	16	<BG	<BG	5
HPQ-11	1,5	<BG	<BG	<BG	<BG	0,6	<BG	<BG	<BG	<BG
Q-102	2,3	<BG	<BG	<BG	<BG	1,4	21	<BG	<BG	<BG
Q-103	4,7	<BG	<BG	<BG	<BG	2,5	11	<BG	<BG	<BG

Tab. A-5: Tabellarische Aufstellung der geochemischen Ergebnisse; Spurenelemente II (ICP-OES; Oxide).

Probe-Nr.	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	NiO (ppm)	PbO (ppm)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	SrO (ppm)	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	WO <sub>3</sub> (ppm)	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	ZnO (ppm)	ZrO <sub>2</sub> (ppm)
Bar-53	1,8	0,45	1,6	0,2	3,98	1,5	11	0,7	0,08	1,9	2,33
Boc-95	2,8	0,63	1,4	0,2	2,84	0,7	183	0,9	0,06	6,8	1,56
HPQ-9	<BG	0,16	<BG	<BG	0,13	<BG	2,5	<BG	<BG	2,4	<BG
HPQ-11	<BG	0,30	<BG	<BG	1,58	<BG	5,4	0,08	<BG	0,27	0,28
Q-102	<BG	0,49	0,5	<BG	0,44	<BG	20	0,06	<BG	0,09	0,06
Q-103	<BG	0,23	2,3	<BG	0,34	<BG	15	0,05	<BG	0,71	0,31

Tab. A-6: Tabellarische Aufstellung der untersuchten Proben nach Stratigraphie und Petrographie.

Probe-Nr.	Stratigraphie	Petrographie	RW	HW
Atz-56	Dogger β	Quarzsand	4490600	5491750
Bar-53	Dogger β	Quarzsand	4493525	5493400
Bir-42	Keuper	Quarzsand	4394120	5445220
Boc-95	Rhätolias	Quarzsand	4470559	5526437
Bra-45	Mittlerer Buntsandstein	Quarzsand	4505133	5505094
Frö-103	Kreide	Quarzsand	4500500	5473300
Ped-81	Rhätolias	Quarzsand	4467075	5541448
Ste-28	Mittlerer Buntsandstein	Quarzsand	4499114	5502840
Tri-100	Kreide	Quarzsand	4502105	5446780
Wie-37	Keuper	Quarzsand	4382447	5443797
HPQ-4	Kristallin	Meta-Pegmatit	4509372	5515354
HPQ-5	Kristallin	Meta-Pegmatit	4509433	5515138
HPQ-8	Kristallin	Meta-Pegmatit	4509006	5516394
HPQ-9	Kristallin	Meta-Pegmatit	4509477	5516121
HPQ-11	Kristallin	Albit-Pegmatoid	4477746	5553913
HPQ-24	Kristallin	Albit-Pegmatoid	4491912	5569676
HPQ-25	Kristallin	Albit-Pegmatoid	4491426	5569199
Q-101	Kristallin	Pfahl-Quarz	4573835	5430779
Q-102	Kristallin	Pfahl-Quarz	4575595	5429701
Q-103	Kristallin	Pfahl-Quarz	4577228	5428664