

# Kieselkalke der Schweiz: Charakterisierung eines Rohstoffs aus geologischer, petrographischer, wirt- schaftlicher und umweltrelevanter Sicht

CHRISTOPH BÄRTSCHI

Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie

herausgegeben in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Geotechnischen Kommission (SGTK)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landestopografie swisstopo

# Kieselkalke der Schweiz: Charakterisierung eines Rohstoffs aus geologischer, petrographischer, wirt- schaftlicher und umweltrelevanter Sicht

CHRISTOPH BÄRTSCHI

Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie  
herausgegeben in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Geotechnischen Kommission (SGTK)

63 Textfiguren, 20 Tabellen und 6 Anhänge



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Landestopografie swisstopo**



**ETH** Zürich  
sc | nat <sup>+</sup>

Swiss Academy of Sciences  
Akademie der Naturwissenschaften  
Accademia di scienze naturali  
Académie des sciences naturelles

#### **Empfehlung für die Angabe in einem Literaturverzeichnis**

BÄRTSCHI, C. (2012): Kieselkalke der Schweiz: Charakterisierung eines Rohstoffs aus geologischer, petrographischer, wirtschaftlicher und umwelt-relevanter Sicht. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 97.

#### **Wissenschaftliche Leitung**

Dissertation ETH Zürich Nr. 19451 / 2011 Departement Erdwissenschaften, ETH Zürich

Referent: Prof. Dr. Max W. Schmidt

Korreferenten: Dr. Rainer Kündig, Dr. Cédric Thalmann, Prof. Bernhard Grobety, Prof. Kurosch Thuro

#### **Finanzielle Unterstützung**

Die vorliegende Arbeit wurde durch den Verband Schweizerischer Hartsteinbrüche (VSH) unterstützt.

#### **Redaktion und Layout**

Thomas Burri, Schweizerische Geotechnische Kommission (SGTK)

Edith Steiner, swisstopo

#### **Hinweis für den Benutzer**

Für Text und Illustrationen zeichnet inhaltlich der Autor alleine verantwortlich.

#### **Herausgeber**

© 2012, Bundesamt für Landestopografie, CH-3084 Wabern. – Alle Rechte vorbehalten.

Übersetzungen und analoge oder digitale Vervielfältigungen dieses Dokuments oder von Teilen davon, die nicht ausschliesslich dem privaten Eigengebrauch dienen, sind nur mit Erlaubnis des Herausgebers gestattet.

Das Bundesamt für Landestopografie swisstopo ist ein Unternehmensbereich der armasuisse.

ISSN 0582-1630

ISBN 978-3-302-40069-3



MIX

Papier

FSC FSC® C030149

## Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Die Schweizerische Geotechnische Kommission (SGTK) freut sich, die vorliegende Arbeit von Christoph Bärtschi in ihrer Geotechnischen Serie zu publizieren. Initiiert und begleitet durch die SGTK wurde die Arbeit im Rahmen einer Dissertation am Institut für Geochemie und Petrologie an der ETH Zürich bei Prof. M. Schmidt ausgeführt und 2011 abgeschlossen.

Die Arbeit entstand im Zusammenhang mit einer langjährigen Diskussion zwischen der Industrie, Behörden und Umweltverbänden über die Versorgung der Schweiz mit Hartsteinen – einer für die Schweizer Verkehrsinfrastrukturbauten wichtigen Rohstoffgruppe. Grund dieser teilweise kontrovers geführten Diskussion war die Überlagerung von Nutzungs- und Schutzansprüchen beim Abbau von Hartsteinen.

In der Arbeit wird der Kieselkalk – als mengenmässig wichtigster Vertreter der Hartsteine – aus wissenschaftlicher, wirtschaftlicher und umweltrelevanter Sichtweise behandelt. Die bisherigen geologisch-geotechnischen Grundlagen dieser Gesteinsgruppe wurden kompiliert und mit aktuellen Methoden der Analytik erweitert. Insbesondere der mineralogischen Charakterisierung und der technischen Ge-

steinsprüfung wurde in der Arbeit ein hoher Stellenwert beigemessen. Als Synthese ergibt sich ein Vorschlag, wie sich die bisherigen Prüfverfahren auf einfache und nachvollziehbare Art vereinfachen und weiterentwickeln lassen.

Die Resultate der Arbeit erlauben die bisher meist nur subjektiv wahrnehmbaren Qualitätsunterschiede von Hartstein- bzw. Kieselkalkprodukten (z.B. Bahnschotter) auf eine wissenschaftlich fundierte Basis zu stellen. Damit wird die Arbeit für die Praxis zu einem wertvollen Nachschlagewerk. Es ist zu hoffen, dass die vorgeschlagenen Prüfverfahren zukünftig verwendet werden.

Der vorliegende Band ergänzt in der Geotechnischen Serie die Publikationen Nr. 45 (A. Stahel: Untersuchungen an schweizerischen Strassenbaugesteinen) und Nr. 91 (C. Thalmann: Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial) sowie weitere Bände, welche sich mit mechanischen, mineralogischen und chemischen Eigenschaften von Gesteinen befassen. Für den Text, die Tabellen und Figuren ist der Autor allein verantwortlich.

Zürich, im Januar 2012

Die Schweizerische Geotechnische Kommission





# Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission . . .	3	A 7.2 Dünnschliffbeschreibungen: Kieselkalk des Helvetischen Valanginiens (Frühe Kreide) . . . . .	62
Kurzfassung . . . . .	6	A 7.3 Dünnschliffbeschreibungen: Kieselkalk der Moltrasio-Formation (Lias der Südalpen) . . . . .	64
Abstract . . . . .	7	A 7.4 Dünnschliffbeschreibungen: Kieselkalke der Préalpes médianes (Lias) . . . . .	68
1. Einleitung . . . . .	8	8. Qualitative und quantitative Mineralphasenanalyse (Röntgendiffraktometrie, XRD) . . . . .	71
1.1 Hintergrund . . . . .	8	8.1 Hintergrund und Problemstellung . . . . .	71
1.2 Problemstellung, Ziel der Arbeit . . . . .	8	8.2 Theoretische Grundlagen . . . . .	71
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	9	8.3 Resultate . . . . .	77
2. Hartsteine der Schweiz . . . . .	10	8.4 Diskussion . . . . .	82
2.1 Definition der Hartsteine . . . . .	10	8.5 Folgerungen . . . . .	84
2.2 Die Hartsteinvarietäten der Schweiz . . . . .	10	9. Verkieselung der Kieselkalke . . . . .	88
2.3 Vergleich: Hartsteine im Ausland . . . . .	14	9.1 Hintergrund und Problemstellung . . . . .	88
3. Hartsteinprodukte und deren Verwendung . . . . .	15	9.2 Kieselsäure: Herkunft und biogene Bindung . . . . .	88
3.1 Einleitung . . . . .	15	9.3 Quarzgehalt in den Kieselkalken . . . . .	89
3.2 Produkte . . . . .	15	9.4 Lösung von detritischem Quarz . . . . .	89
3.3 Produktionsmengen . . . . .	15	9.5 Verkieselung der Kieselkalke . . . . .	89
3.4 Bedarf . . . . .	16	9.6 Diskussion . . . . .	92
3.5 Historische Anwendungsbereiche von Kieselkalk . . . . .	17	9.7 Folgerungen . . . . .	95
3.6 Heutige Verwendung von Kieselkalk . . . . .	18	Anhang: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von angeätzten Kieselkalkproben in fünf verschiedenen Massstäben bis 2000fache Vergrösserung . . . . .	96
3.7 Produktinnovationen . . . . .	20	10. Einachsige Druckfestigkeit von Kieselkalken . . . . .	106
4. Abbau von Hartstein . . . . .	22	10.1 Hintergrund und Problemstellung . . . . .	106
4.1 Abbaustandorte . . . . .	22	10.2 Probenauswahl und -vorbereitung . . . . .	106
4.2 Interessenkonflikte . . . . .	23	10.3 Versuchsdurchführung/Messanordnung . . . . .	106
5. Die Kieselkalkvorkommen der Schweiz . . . . .	31	10.4 Messkalibrierungen und -korrekturen . . . . .	106
5.1 Einteilung der Kieselkalke . . . . .	31	10.5 Erfasste Messgrössen . . . . .	109
5.2 Der Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation . . . . .	31	10.6 Resultate . . . . .	109
5.3 Kieselkalk des Helvetischen Valanginiens . . . . .	32	10.7 Diskussion . . . . .	111
5.4 Kieselkalk der Moltrasio-Formation . . . . .	33	10.8 Folgerungen . . . . .	114
5.5 Kieselkalke der Préalpes médianes . . . . .	34	11. Abrasivität und Brechbarkeit . . . . .	115
5.6 Verkieselte Gesteine im nahen Ausland . . . . .	35	11.1 Hintergrund und Problemstellung . . . . .	115
6. Probenentnahme . . . . .	41	11.2 Methode . . . . .	115
6.1 Grundlagen für die Probenentnahme . . . . .	41	11.3 Probenauswahl und -aufbereitung . . . . .	117
6.2 Probenentnahmestellen . . . . .	41	11.4 Resultate . . . . .	117
7. Makroskopische und mikroskopische Untersuchung der Kieselkalke . . . . .	44	11.5 Diskussion . . . . .	122
7.1 Hintergrund . . . . .	44	11.6 Folgerungen . . . . .	129
7.2 Methodik . . . . .	44	12. Schlussfolgerungen und Ausblick . . . . .	130
7.3 Allgemeine makroskopische Beobachtungen . . . . .	44	12.1 Schlussfolgerungen . . . . .	130
7.4 Allgemeine mikroskopische Beobachtungen . . . . .	45	12.2 Ausblick . . . . .	131
7.5 Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation (Hauterivien) . . . . .	46	Anhang A: Normen und Bestimmungen . . . . .	133
7.6 Kieselkalk des Helvetischen Valanginiens . . . . .	47	Anhang B: Kartenmaterial . . . . .	134
7.7 Kieselkalk der Moltrasio-Formation (Südalpen) . . . . .	48	Anhang C: Übersichtstabelle technisch-wissenschaftlicher Teil . . . . .	135
7.8 Kieselkalke der Préalpes médianes . . . . .	49	Anhang D: Röntgendiffraktogramme (XRD) . . . . .	140
7.9 Folgerungen . . . . .	51	Anhang E: Zusatzinformation Radioaktivität von Kieselkalk . . . . .	156
Anhang: Dünnschliffbeschreibungen von ausgewählten Kieselkalkproben . . . . .	52	Literaturverzeichnis . . . . .	157
A 7.1 Dünnschliffbeschreibungen: Helvetische Kieselkalk-Formation (Hauterivien, Frühe Kreide) . . . . .	52	Verdankungen . . . . .	160

## Kurzfassung

In der Schweiz werden heute vorwiegend drei Gesteine zur Herstellung von Hartsteinprodukten verwendet: Kieselkalk, Flysch- und Molassesandsteine. Nicht alle Varietäten dieser Gesteine weisen Hartsteincharakter auf. Potenzielle Hartsteinvorkommen konzentrieren sich entlang des nördlichen Alpenrandes, wo gegenwärtig an 11 Standorten Hartsteine abgebaut werden. Auf Grund von überlagernden Nutzungs- und Schutzansprüchen ergeben sich oft Probleme betreffend der geeigneten Standortwahl für Hartsteinbrüche.

Diese Studie befasst sich mit Kieselkalcken der Schweiz. Wegen ihrer grossen geographischen Verbreitung und der guten industriellen Eignung stellen sie das grösste Potenzial für qualitativ hochwertige Hartsteinprodukte dar. In dieser Arbeit werden die Kieselkalke petrographisch untersucht, charakterisiert und verglichen. Zur Anwendung kommen dabei mineralogisch-petrographische sowie technische Methoden.

Die Kieselkalke der Schweiz lassen sich nach paläogeographischer Herkunft und Ablagerungszeitraum in vier Varietäten unterteilen. Zwei Varietäten finden sich entlang des nördlichen Alpenrandes (Helvetikum) und wurden in der Frühen Kreide abgelagert. Es handelt sich dabei um die Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation (Haute-rivien) sowie um Kieselkalke des helvetischen Valanginiens. Die beiden anderen Varietäten wurden im Lias gebildet und finden sich in den Südalpen in der Moltrasio-Formation sowie in verschiedenen Lias-Decken der Préalpes médianes.

Makroskopisch können einzelne varietätsspezifische Merkmale der grundsätzlich feinkörnigen Kieselkalke beobachtet werden. Die Differenzierung der Varietäten ist im Dünnschliff, im Röntgendiffraktogramm (XRD) und im Rasterelektronenmikroskop (REM) schwieriger. Unabhängig von der Varietät können die Kieselkalke im Dünnschliff nach dem Sedimentgefüge klassifiziert werden. Dabei bewährt sich die Klassifikation nach DUNHAM (1962), wobei drei Typen unterschieden werden können: Mudstones, Wackestones und Packstones. Im Weiteren können im orientierten Dünnschliff Faktoren erfasst werden, welche u. a. das Verhalten der Kieselkalke gegenüber mechanischer Beanspruchung erklären können. Vor allem die Erfassung von potenziellen Schwachzonen ist aussagekräftig. Potenzielle Schwachzonen verlaufen schichtparallel oder schichtdiskordant und werden von sekundär gewachsenem Pyrit begleitet.

Bei der Untersuchung des qualitativen Mineralbestands der Kieselkalke mittels XRD können maximal sechs Minerale nachgewiesen werden. Neben Kalzit und Quarz treten Ankerit, teilweise anstatt dessen Dolomit, sowie Muskowit  $2M_1$ , Pyrit und regional Chlorit auf. Die Quantifizierung der Mineralhäufigkeiten mit der Rietveld-Methode ergibt, dass Kalzit und Quarz in allen Varietäten die grössten Mengenteile ausmachen. Die Untersuchung zeigt auch, dass bereits lokal beträchtliche Unterschiede im Modalbestand bestehen können, weshalb eine regionale Voraussage der Gesteinszusammensetzung nicht möglich ist.

Für die Untersuchungen mit dem REM wird der Modalbestand berücksichtigt. An geätzten Proben kann aufgezeigt werden, dass Kieselkalke mit authigenen Quarzgehalten  $<30$  Gew.-% meist eine lokale, partielle Verkieselungen aufweisen. Mit zunehmendem Verkieselungsanteil sind quarzreiche Partien engmaschiger verbunden, wobei ab 30 Gew.-% kaum noch grössere, unverkieselte Stellen  $>100\text{ }\mu\text{m}$  auftreten. Die Verkieselung hat sowohl bei niedrigem, als auch hohem authigenen Quarzgehalt Gerüstcharakter; sie trägt wesentlich zur Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung bei.

Der Verkieselungsanteil macht sich in der einachsigen Druckfestigkeitsprüfung bemerkbar. Zwischen dem Verkieselungsanteil und der Bruchfestigkeit besteht eine lineare Abhängigkeit. So können Kieselkalke (340 MPa) gegenüber Kalksteinen (160 MPa) eine doppelt so hohe Bruchfestigkeit erreichen.

Der Verkieselungsanteil spiegelt sich auch im LCPC Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch gemäss AFNOR P 18-579 wider. Bereits ein geringer Gehalt an authigenem Quarz führt zu einer deutlich tieferen Brechbarkeit. Im Vergleich mit anderen in der Schweiz genutzten Hartsteinen zeigen drei von vier Varietäten des Kieselkalks im Durchschnitt tiefere Brechbarkeitskoeffizienten. Vor allem Wackestones treten in dieser technischen Untersuchung als die beständigsten Kieselkalke hervor.

Ein Vergleich zwischen dem Brechbarkeitsversuch und dem Los-Angeles-Prüfverfahren für Schotter gemäss EN 1097-2 zeigt, dass Hartsteine differenzierter betrachtet werden können. Der Brechbarkeitsversuch könnte als alleiniges Prüfverfahren für die Klassifizierung von harten, mittelhart und weichen Festgesteinen vorgeschlagen werden.

## Abstract

In Switzerland, predominantly three types of rock are used for the fabrication of hard rock products: siliceous limestone, Flysch sandstone and Molasse sandstone. Not all varieties of these rocks show hard rock characteristics. Potential hard rock deposits are concentrated on localities along the northern Alpine rim where 11 open cast mines are in service. Problems in choice of site for hard rock quarries often occur due to conflicts between industrial use and environmental protection.

This study investigates siliceous limestones in Switzerland. Because of their geographical extension and industrial usability, these rocks have the highest potential for high quality hard rock products. Siliceous limestones are analysed petrographically, mechanically characterised and compared. Thereby, mineralogical-petrological as well as technical methods are applied.

Depending on the paleogeographical origin and the time of deposition the Swiss siliceous limestones can be divided into four varieties which are important for their use. Out of these, two varieties are found along the Helvetic rim of the Alps and were deposited during Early Cretaceous. More precisely these are the siliceous limestones of the Helvetic Kieselkalk-Formation (Hauterivian) and those of the Helvetic Valanginian. Two other varieties formed during Early Jurassic and occur in the Moltrasio-Formation of the Southern Alps and in different Liassic nappes of the *Préalpes médianes*.

Macroscopically, specific characteristics of the fine grained siliceous limestones can be observed. The distinction of the varieties by thin sections, X-ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscope (SEM) is more difficult. In oriented thin sections, the siliceous limestones can be classified by their sedimentary texture according to DUNHAM (1962), independent of the variety. This method allows to distinguish three kinds of textures: mudstones, wackestones and packstones. Furthermore, factors influencing the behaviour of the rocks under mechanical stress are observed in thin sections. Among these, the quantification of potentially weak zones oriented parallel or oblique to the sedimentary layering and accompanied by secondary pyrite is the most significant factor.

The investigation of the qualitative mineral assemblage by XRD reveals up to six phases. Besides calcite and quartz, ankerite, partly substituted by dolomite, as well as muscovite  $2M_1$ , pyrite and regionally chlorite are observed. Quantification by the Rietveld-Method shows that calcite and quartz represent the largest amounts in all the varieties. Locally, however, these amounts can vary strongly which makes a regional forecast of the mineralogical composition of these rocks impossible.

For the analyses by SEM, mineral amounts have to be considered. Etched samples of siliceous limestones containing <30 wt% authigenic quartz show local, partial silification. With an increasing proportion of silica, quartz-rich areas are connected in a tight 3-dimensional mesh. In samples with more than 30 wt% authigenic quartz, unsilicified areas are seldom larger than 100  $\mu\text{m}$ . Independent of the content of authigenic quartz, the silicified parts serve as framework and therefore they contribute to the resistance to mechanical stress.

Moreover, the uniaxial compressive strength is influenced by authigenic quartz. Between silification and compressive strength, a linear correlation can be observed. Thus, siliceous limestones (up to 340 MPa) can achieve almost twice the rupture strength of pure limestone (160 MPa).

Furthermore, the LCPC abrasion and refractivity test according to AFNOR P18-579 also mirrors the silification grade. Compared to limestones, in siliceous limestones already a small amount of authigenic quartz leads to an increased refractivity. Compared to other hard rocks used in Switzerland, three of the four considered varieties of siliceous limestone show lower average refractivity coefficients. In this test, especially wackestones prove to be the most durable kind of siliceous limestone.

The comparison between the refractivity test and the Los Angeles test for ballast according to EN 1097-2 reveals that these hard rocks can be viewed in a more sophisticated way. In conclusion, the refractivity test could serve as a single testing method for the classification of hard, medium hard and soft rocks.

# 1. Einleitung

## 1.1 Hintergrund

### *Hartsteine für Infrastrukturbauten*

Die Hartsteinindustrie ist in der Schweiz ein wichtiger Wirtschaftszweig: Pro Jahr werden rund 2 Millionen Tonnen felsgebrochene Hartsteinprodukte hergestellt, die vorwiegend für den Neubau und Unterhalt von Verkehrsinfrastrukturbauten verwendet werden (ASTRA, 2004). Rund 600 000 Tonnen/Jahr Hartsteine werden zu Schotter für die Bahn verarbeitet. 800 000 Tonnen/Jahr finden als Splitt in Deck- und Tragschichten von Strassen Verwendung (ARE 2008 b, c). In kleiner Menge werden Hartsteine auch in anderen, teilweise neuartigen Produkten und neuen Märkten eingesetzt.

### *Interessenkonflikte bei der Standortwahl von Hartsteinbrüchen einerseits...*

Bei der Planung und dem Betrieb von Hartsteinbrüchen stehen die Unternehmen heute neuen Herausforderungen gegenüber, insbesondere im Bereich von umweltbezogenen Schutzansprüchen. Während bis vor einigen Jahrzehnten Steinbruchbetriebe ohne grosse Einschränkungen abbauen konnten, müssen heute nationale, kantonale und kommunale Schutzobjekte sowie raumplanerische Vorgaben in der Projektplanung berücksichtigt werden. Zusammen mit Nutzungsansprüchen, die von nicht behördlicher Seite wie zum Beispiel von anderen Industrien, Organisationen und Privaten gefordert werden, hat sich eine komplexe Ausgangslage für die Erweiterung bestehender oder die Standortplanung von neuen Hartsteinbrüchen ergeben. Dies zeigt sich zum Beispiel bei Hartsteinbrüchen, die in Gebieten liegen, welche heute dem Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN) angehören. Erweiterungsprojekte in solchen Hartsteinbrüchen wurden bislang nur in Ausnahmefällen bewilligt, um einer lückenhaften Versorgung der Schweiz mit Hartsteinen entgegenzuwirken. Seit dem Erkennen der Problematik vor rund 10 Jahren werden deshalb auf nationaler Ebene Aspekte zu diesem Thema behandelt mit dem Ziel, die Versorgungslage mit Hartsteinen zu verbessern.

### *... und die Qualitätsansprüche an Hartsteinprodukte andererseits*

Anwendungsspezifisch werden Hartsteine auf deren Eignung geprüft und qualifiziert. Im Verlauf der letzten Jahrzehnte sind die Qualitätsansprüche an Hartsteine von Seiten der Abnehmer kontinuierlich gestiegen. Heute erfüllen nur noch wenige Gesteine die hohen technischen Ansprüche.

### *Der Kieselkalk*

Kieselkalk ist ein Gestein, welches als Hartstein Verwendung findet. Das Gestein überzeugt vor allem im Bahn- und Strassenbau durch seine hervorragenden technischen Eigenschaften (hohe Druckfestigkeit, hohe Schlag-Abriebfestigkeit, gute Frostbeständigkeit, gute Adhäsion an Teer und Bitumen). Die im Jahr 2009 in der Schweiz produzierten Hartsteine aus Kieselkalk reichten aus, um rund 65% des gesamtschweizerischen Bedarfs abzudecken. Der Begriff «Kieselkalk» bezieht sich auf eine petrographische Eigenschaft des Gesteins: «Kiesel» bezeichnet dabei die chemische Verbindung Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ , die in unterschiedlichen Ausbildungsformen und Varietäten im Gestein auftritt.  $\text{SiO}_2$  kann dabei als Chalcedon in Fossilresten (zum Beispiel Schwammnadeln), als sekundäre Verkieselung sowie als detritische Quarzkörner vorliegen. Die sekundäre Verkieselung bildet in der Kalkmasse ein von Auge nicht erkennbares Skelett aus  $\text{SiO}_2$  (DE QUERVAIN 1969).

Als lithologischer Begriff wird Kieselkalk für Gesteine unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher paläogeographischer Ablagerungsräume verwendet. Kieselkalke können in Formationen als geringmächtige Teilsequenzen aber auch als fast reine Kieselkalkabfolge über eine ganze Formation auftreten. So zum Beispiel in der Helvetischen Kieselkalk-Formation. Historisch wird «Kieselkalk» im helvetischen Hauterivien auch als stratigraphischer Begriff verwendet.

## 1.2 Problemstellung, Ziel der Arbeit

Im Rahmen einer Datenerfassung für eine geologische Grundlagenstudie (ARE 2006) hat sich gezeigt, dass seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts nur wenige Untersuchungen zu potenziellen Hartsteinen in der Schweiz durchgeführt wurden. Vor allem detaillierte, zeitgemässe mineralogisch-petrographische und technische Beiträge sind rar. Dies trotz der Tatsache, dass Hartsteine, insbesondere Kieselkalke zu einer der wichtigsten mineralischen Rohstoffgruppen (Steine und Erden) im Bausektor gehören und intensiv genutzt werden.

In der Schweiz weisen wenige Gesteine Potenzial für Hartsteinprodukte höchster Qualität auf: Die wichtigsten Vertreter sind Kieselkalke, Flysch-, Molasse- und Glaukonitsandsteine. In den Untersuchungen wird der Schwerpunkt auf die Varietäten des Kieselkalks gelegt.

Folgende Fragen sollen in der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

## Erster Teil

- Wozu werden Hartsteine in der Schweiz gebraucht und welche technischen Anforderungen werden an sie gestellt?
- Welche in der Schweiz vorkommenden Gesteine können heute als Hartsteine verwendet werden?
- Welche Rolle spielt Kieselkalk bei der Versorgung der Schweiz mit Hartsteinprodukten?
- Welche umweltrelevanten Aspekte und Problemfelder können im Bezug auf die heutige und zukünftige Nutzung von Hartsteinvorkommen erkannt werden?

## Zweiter Teil

- Wie können Kieselkalke aus paläogeographisch unterschiedlichen Entstehungsräumen mineralogisch-petrographisch differenziert werden?
- Wie können einzelne Mineralphasen in den Kieselkalcken einfach und genau qualitativ und quantitativ bestimmt werden?
- Welchen Einfluss hat die Textur der Verkieselung auf die technischen Eigenschaften?
- Welchen Einfluss hat die Mineralogie der Kieselkalke auf deren technischen Eigenschaften?
- Können die technischen Eigenschaften der Kieselkalke in Relation zu anderen (Hart-) Gesteinen gestellt werden?
- Kann auf Grund von neuen Untersuchungen eine vereinfachte Klassifikation für Hartsteine aufgestellt werden?

Das Ziel der Arbeit ist die Aktualisierung und Erweiterung des mineralogisch-petrographischen und technischen Wissensstandes über Hartsteine, insbesondere Kieselkalke. Im Weiteren soll die Arbeit auf kommunaler, kantonaler sowie nationaler Ebene als wissenschaftliche Grundlagenstudie verschiedenen Interessengruppen und relevanten Entscheidungsgremien dienen.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

### Erster Teil

Um den Einstieg ins Thema zu erleichtern, wird im ersten Teil der vorliegenden Arbeit der Begriff Hartstein und die Hartsteinnutzung aus umweltpolitischen, raumplanerischen, wirtschaftlichen sowie geologischen Perspektiven erläutert.

Schliesslich soll ein Überblick über die Versorgung vermittelt und die Nutzung von Hartsteinen im nationalen Rahmen aufgezeigt werden.

### Zweiter Teil

Resultate aus den mineralogisch-petrographischen und technischen Untersuchungen werden im zweiten Teil präsentiert:

- Untersuchung und anwendungsorientierte Charakterisierung der Varietäten des Kieselkalks mittels Dünnschliffen, Rasterelektronenmikroskop (REM) und Röntgendiffraktometrie (XRD)
- Technische Versuche zum Druckfestigkeitsverhalten der Kieselkalke
- Ermittlung des Abrasivitäts- und Brechbarkeitsverhaltens von Hartsteinen mittels LCPC-Testverfahren (AFNOR P 18-579, siehe Anhang A)

Die aus den verschiedenen Untersuchungsmethoden resultierenden Ergebnisse werden analysiert, korreliert und in die Klassifizierung der Hartsteine miteinbezogen. Der Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch wird in Beziehung zu einem heute etablierten Prüfverfahren gestellt.

Die Datenerhebung konzentriert sich auf Varietäten des Kieselkalks der Schweiz. Um einen Vergleich mit anderen Gesteinen anzustellen, werden Kieselkalke im technischen Teil mit einigen ausgewählten Sedimentgesteinen (Flysch-, Molasse- und Glaukonitsandstein) sowie magmatischen und metamorphen Gesteinen verglichen, die teilweise ebenfalls als Hartsteine im Verkehrsinfrastrukturwesen Verwendung finden.



## 2. Hartsteine der Schweiz

### 2.1 Definition der Hartsteine

Die von DE QUERVAIN (1967, 1969) aufgestellte Definition der Hartsteine bildet noch heute die Grundlage zur Klassifikation: Hartsteine zeichnen sich durch eine hohe Druckfestigkeit aus ( $>140$  MPa) und enthalten einen Anteil  $>25\%$  an harten Mineralen (Härte nach Mohs  $>5.5$ ). Bei dieser vereinfachten Beschreibung ist zu beachten, dass Gesteine mit einem Anteil an harten Mineralen von 25–75% mindestens eine Druckfestigkeit von 180 MPa erreichen müssen bzw. Gesteine mit einer Druckfestigkeit von 140 MPa  $>75\%$  harte Minerale enthalten müssen, damit der Begriff Hartstein angewandt werden darf (Tabelle 2.1).<sup>1</sup>

Im Bezug auf die Anwendung der Gesteine im Verkehrsinfrastrukturbereich, wo qualitativ hochwertige Hartsteine verwendet werden, ist die Einteilung eines Gesteins gemäss dieser Definition als Hartstein bzw. mittelhartes oder Weichgestein nicht mehr ausreichend. In Richtlinien und Prüfverfahren werden zusätzliche Anforderungen festgelegt, die auf Erfahrungswerten basieren und denen je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Gewichtung beigemessen wird.

Diese Anforderungen führen dazu, dass Gesteine, die im Volksmund oder in der Natursteinbranche als harte Gesteine gelten, für hochwertige Hartsteinprodukte nicht berücksichtigt werden können. So erfüllen zum Beispiel Granite und Gneise aus der Schweiz wegen dem meist hohen Gehalt an Schichtsilikaten und deren Gefüge die von den Abnehmern geforderten Grenzwerte und Richtlinien nicht.

Ein Prüfverfahren, welches sowohl für die Bewertung von Bahnschotter, als auch Strassensplitt angewandt wird, ist das Los-Angeles-Prüfverfahren (EN 1097-2, siehe Anhang A). Eine Gesteinsprobe wird dabei zusammen mit Stahlkugeln in einer rotierenden Trommel beansprucht. Der Los-Angeles-Koeffizient (LA) entspricht dem Massenanteil in Prozent, der nach dem Prüfvorgang durch ein 1,6 mm Analysensieb hindurchgeht. Für Schotter der Klasse I beträgt der LA-Koeffizient  $<16$ . Für Splitt wird der LA-Koeffizient anwendungsspezifisch festgelegt, wobei für die beste Kategorie ein LA-Koeffizient  $\leq 15$  gilt.

In dieser Studie werden Gesteine einbezogen und untersucht, die auf Grund langjähriger Erfahrungen aus der Industrie Potential für hochwertige Hartsteine aufweisen und Verwendung im Verkehrsinfrastrukturbereich gefunden haben.

### 2.2 Die Hartsteinvarietäten der Schweiz

In den letzten 40 Jahren wurden in der Schweiz vorwiegend Kieselkalke, Flysch-, Molasse- und Glaukonitsandsteine zu Hartsteinprodukten für Verkehrsinfrastrukturen verarbeitet. Untergeordnet wurden für die Produktion von Schotter und Splittkörnungen Kalksilikatfelse und Meta-Rhyolithe verwendet.

Die geografische Verbreitung dieser Kieselkalk-, Flyschsandstein-, Molassesandstein- und Glaukonitsandsteinvorkommen konzentriert sich auf ein Band entlang des Alpenrandes vom Waadtland/Wallis über das Berner Oberland, die Zentralschweiz bis ins St. Galler Rheintal. Diese spezifische Verteilung der potenziellen Hartsteinvorkommen wird auch als «Hartsteingürtel» bezeichnet. Einzig das Meta-Rhyolithvorkommen im Albulatal/GR, der Kalksilikatfels bei Castione/TI und die Kieselkalkvorkommen am Monte Generoso/TI sowie der Region Gandria/TI liegen ausserhalb des eigentlichen Hartsteingürtels der Schweiz.

Nachstehend werden neben einem Kurzaufsatz der Kieselkalke mineralogisch-petrographische und, sofern bekannt, technische Eigenschaften der als hochwertigen Hartsteine verwendeten Flysch-, Molasse- und Glaukonitsandsteine sowie der Meta-Rhyolithe aufgeführt. Diese Gesteine werden als Vergleichsmaterial zu den Varietäten des Kieselkalks in die technische Versuchsreihe miteinbezogen.

#### 2.2.1 Kieselkalke

Bei den Kieselkalcken handelt es sich meist um grau- bis dunkelgraue Gesteine mit scharfkantigem Bruch und vorwiegend muscheligen Bruchoberflächen. Das Gestein besteht hauptsächlich aus den Mineralen Kalzit und Quarz (Abbildung 2.1). Quarz tritt als Detritus und in Form einer aus Mikroquarz bestehenden Verkieselungsstruktur auf, welche die Kalkmasse durchzieht und im Dünnschliff meist nicht beobachtbar ist (DE QUERVAIN 1969). Die Kieselkalke zeigen im Dünnschliff eine Vielfalt von Sedimentstrukturen, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

Der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt beträgt typischerweise 30–40 Gew.-%. Kieselkalke weisen mit Druckfestigkeitswerten  $>160$  MPa gegenüber reinen Kalksteinen (bis 160 MPa) eine hohe einachsige Druckfestigkeit auf und zeigen eine geringe Abnutzung. Bestimmungen der absoluten Porosität haben Werte von maximal 1–2% ergeben (DE QUERVAIN 1969).

#### 2.2.2 Flyschsandstein

Flyschsandsteine sind Ablagerungen aus klastischen Trübeiströmen und «mass flows», die in tiefmarinen Vor-

<sup>1</sup> In Deutschland gilt für Schotter grundsätzlich eine Mindestdruckfestigkeit von 180 N/mm<sup>2</sup> bzw. 180 MPa (vgl. LORENZ & GWOSDZ 2003).

Tabelle 2.1: Zusammenfassende Klassifikation der Hartsteine nach DE QUERVAIN (1967, 1969). Kriterien für die Einteilung sind die mittlere Druckfestigkeit (technisches Kriterium) und der Gehalt an harten Mineralen (petrographisches Kriterium). Die rote Linie trennt Hartsteine von mittelharten und weichen Gesteinen.

Mittlere Druckfestigkeit (MPa)	Gehalt an harten Mineralen (%)			
	0–25	25–50	50–75	75–100
> 220	mittelhart	hart	hart	hart
180–220	mittelhart	hart	hart	hart
140–180	mittelhart	mittelhart	mittelhart	hart
100–140	weich	weich	mittelhart	mittelhart
60–100	weich	weich	weich	mittelhart
< 60	sehr weich	weich	weich	weich

landbecken eines Orogens abgelagert wurden (PIFFNER 2009). Es handelt sich grösstenteils um hell- bis dunkelgraue Gesteine, deren Zusammensetzung vorwiegend von Quarz dominiert und von wechselnden Gehalten an Feldspäten, Chert und Glimmer begleitet wird (Abbildung 2.2). Das vorwiegend kalkige Bindemittel kann Anteile von 10–40 % erreichen (DE QUERVAIN 1969). Der Karbonatgehalt kann in Varietäten des Flyschsandsteins auf Kosten des Gehalts an detritischem Quarz und kieseligem Zement bis auf wenige Prozent zurückgehen.

Die Flyschsandsteine weisen Bankungen von wenigen Dezimetern bis Metern Mächtigkeit auf. Dazwischen sind tonreiche Lagen von dünnplattigen Kalkphylliten, Mergelschiefern und Sandsteinen im Millimeter bis Meterbereich eingeschaltet. Die grosse Variabilität in der mineralogischen Zusammensetzung der Sandsteine führt zu starken Wechseln bei den technischen Kennwerten. Bei einer Korn zu Korn-Verwachsung des Quarzes sowie dem Vorhandensein eines kieseligen Bindemittels gelten Flyschsandsteine als Hartstein und können dementsprechend für die Produktion von Schotter und Splitt höchster Qualität verwendet werden. Nach DE QUERVAIN (1969) wurden bei verschiedensten Flyschsandsteinen einachsige Druckfestigkeiten von 175–265 MPa gemessen, wobei bei 195–240 MPa eine Häufung der Messresultate festgestellt werden konnte.

### 2.2.3 Subalpine Molassesandsteine

Bei den als Hartstein verwendeten Gesteinen der subalpinen Molasse handelt es sich hauptsächlich um Sandsteine hellgrauer bis grauer Farbe des Grès-des-carrières-Typus. Die Korngrössen können 0.3 mm erreichen. Neben Quarz und Kalzit sind verschiedene Erze, Feldspat, Hellglimmer und akzessorisch Chlorit, Dolomit (sowie weitere Minerale) vorhanden (Abbildung 2.3). Die Gesteinszusammensetzung sowie das Gefüge sind je nach Lage im Molassesandstein unterschiedlich. Detritische Quarzkörner (<0.3 mm) machen in Varietäten, die ein Partikelgefüge zeigen, bis zu 65 % des gesamten Mineralbestandes aus. Quarzkörner sind dabei oftmals miteinander verwachsen. Kalzit findet sich hier vorwiegend in einer feinkristallinen, im Dünnschliff kaum näher beschreibbaren Masse zwischen den Quarzkör-

nern. Matrix gestützte Molassegesteine sind dagegen feinkörniger und zeigen in einer Grundmasse (>65 %) aus Kalzit und fein dispers verteiltem Mikroquarz auch Quarz bis 0.15 mm (<30 %).

Im Unterwallis liegt die einachsige Druckfestigkeit von geeigneten subalpinen Molassesandsteinen bei 210–240 MPa. Im Los-Angeles-Prüfverfahren werden für Schotter Werte zwischen 11 und 15 erreicht (FAMSA, 2010). Betreffend Verwitterungsresistenz wurden in der Literatur keine Angaben gefunden. Es ist aber anzunehmen, dass auf Grund der Korn zu Korn-Verwachsung des Quarzes und des mengenmässig dominierenden Quarzgehalts eine gute Verwitterungsbeständigkeit vorliegt.

### 2.2.4 Glaukonitsandstein

Glaukonitsandsteine, früher auch als glaukonitische Sandsteine oder Grünsandsteine bezeichnet, sind Gesteine von dunkler, grüngrauer bis fast schwarzer Farbe. Die Korngrösse des Quarzes beträgt 0.2–0.4 mm. Die Hauptbestandteile sind Quarz, Glaukonit und Kalzit (Abbildung 2.4). Meist akzessorisch (<1 %) führen sie Pyrit. Durch Verwitterung erhalten die Glaukonitsandsteine fleckige, rostige bis bräunliche Verfärbungen, die auf die Umwandlung des eisenhaltigen Glaukonits und des oft vorhandenen Pyrits zurückzuführen sind.

Die Glaukonitsandsteine können aufgrund ihres Gefüges und Mineralbestandes in drei Gruppen unterteilt werden (DE QUERVAIN 1969, ergänzt von DIETRICH & WAHRENBACHER 1997):

- Gruppe I: Quarzitisches Sandsteine mit direkter Quarzkornverwachsung und kalzitischem bis quarzitischem Porenzement. Quarzgehalt 85–90 %. Bindemittel 10–15 % (Abbildung 2.4 a).
- Gruppe II: Sandsteine mit teilweiser Quarzkornverwachsung und kalzitischem bis quarzitischem, glaukonitischem und serizitischem Porenzement. Quarzgehalt 70–80 %. Bindemittel ca. 25 % (Abbildung 2.4 b).
- Gruppe III: Sandsteine mit indirekter Quarzkornbindung und glaukonitischem, kalzitischem und serizitischem Porenzement. Quarzgehalt 40–70 %. Bindemittel 30–60 %.



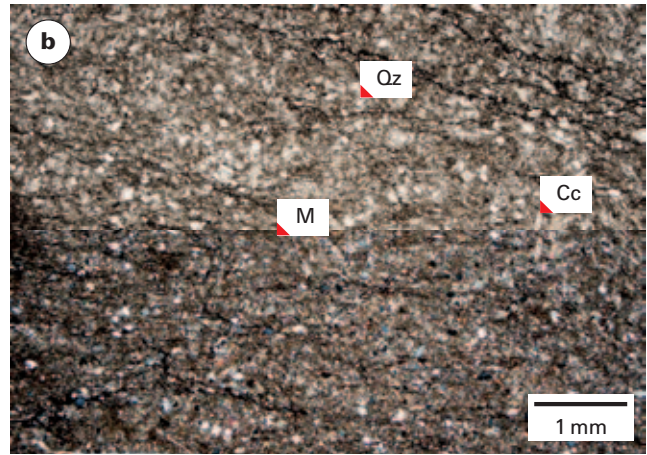
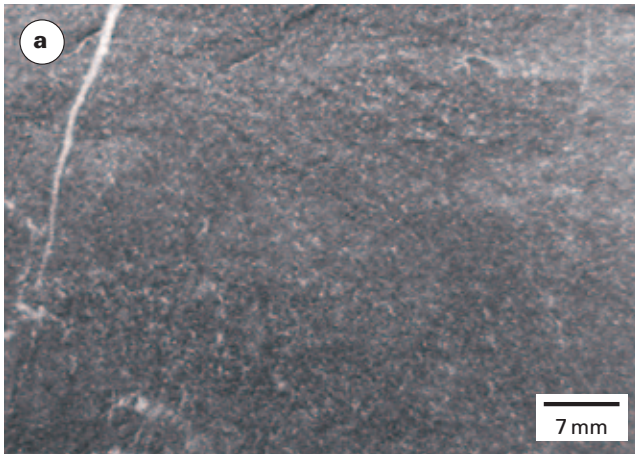


Abbildung 2.1: Beispiel eines Kieselkalks. Probe KK4. Koord. 671.600/193.600. (a) Handstückphoto. (b) Dünnschliffmikroskopische Aufnahme mit unpolarisiertem (oben) und polarisiertem Licht (unten). Neben detritischem Quarz (Qz) tritt Kalzit (Cc), Ankerit und Pyrit auf. Auf Grund der mikro- bis kryptokristallinen Ausbildung sind im Mikrit (M) Mineralien schwierig zu erkennen.

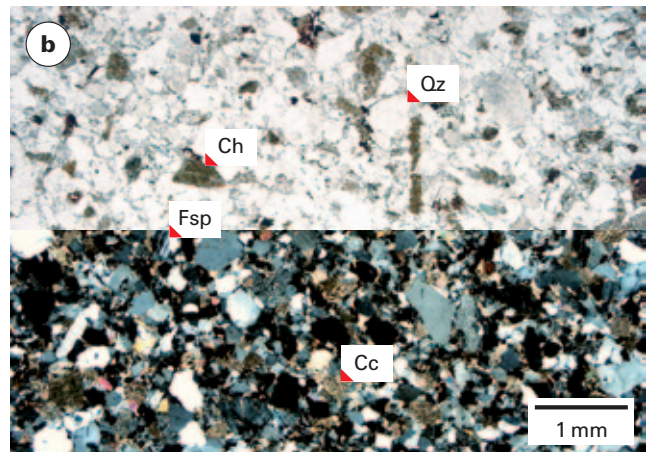
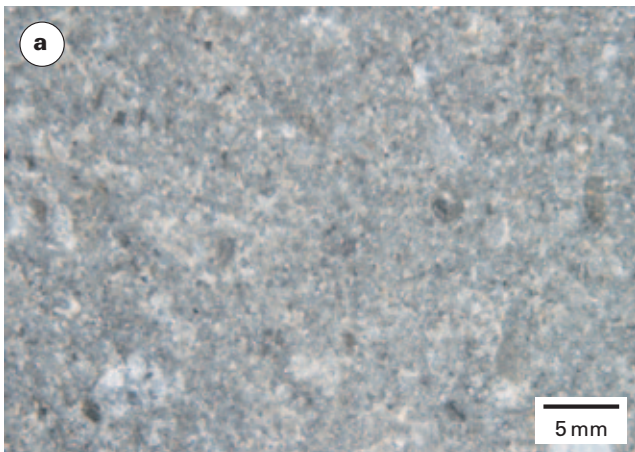


Abbildung 2.2: Beispiel eines Flyschsandsteins aus dem Altdorfer Sandstein. Probe FLY4. Koord. 689.160/192.246. (a) Handstückphoto. (b) Dünnschliffmikroskopische Aufnahme mit unpolarisiertem (oben) und polarisiertem Licht (unten). Neben Quarz (Qz), teilweise mit Korn-zu-Korn-Verwachsung, treten Feldspäte (Fsp), Cherts (Ch) und Glimmer auf. Kalzitische (Cc), teilweise kieseliges Bindemittel verbindet die Mineralkörner.

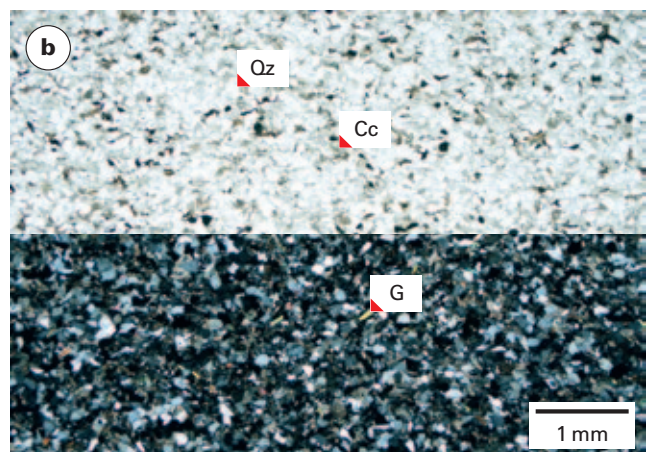


Abbildung 2.3: Beispiel eines subalpinen Molassesandsteins, Grès des carrières-Typ. Probe FN. Koord. 564.050/120.250. (a) Handstückphoto. (b) Dünnschliffmikroskopische Aufnahme mit unpolarisiertem (oben) und polarisiertem Licht (unten). Neben Quarz (Qz), vereinzelt mit Korn-zu-Korn-Verwachsung treten Feldspäte, Glimmer (G) und Erz auf. Das Bindemittel besteht aus Kalzit (Cc), in Varietäten auch aus Quarz.



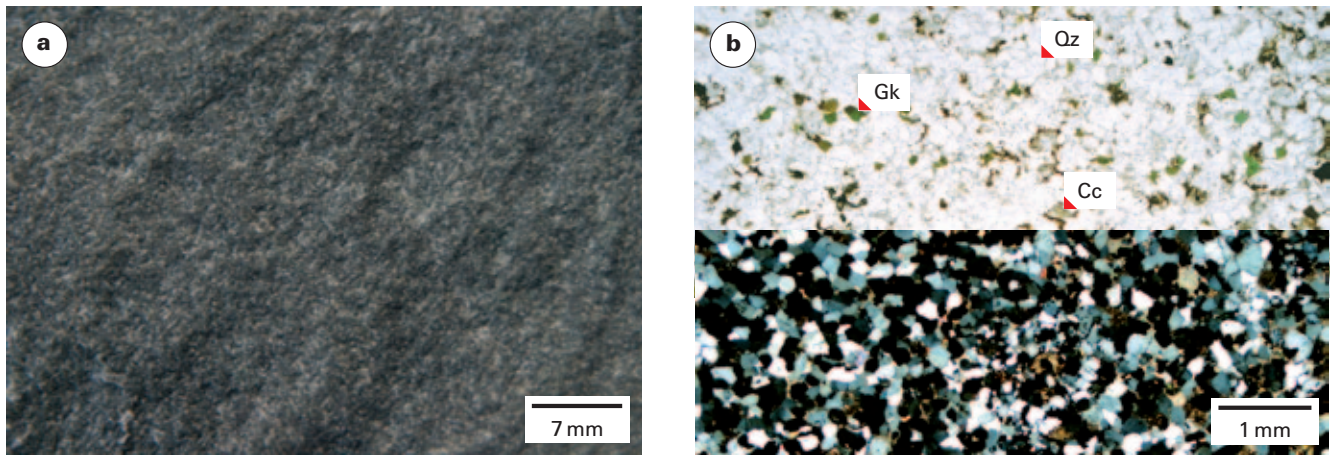


Abbildung 2.4: Beispiel eines Glaukonitsandsteins. Probe GLAU2. Koord. 728.000/222.621. (a) Handstückphoto. (b) Dünnschliffmikroskopische Aufnahme mit unpolarisiertem (oben) und polarisiertem Licht (unten). Quarzkörner (Qz) sind meist direkt miteinander verwachsen, zum Teil mit einer Bindesubstanz aus Glaukonit (Gk) und Kalzit (Cc) verbunden.

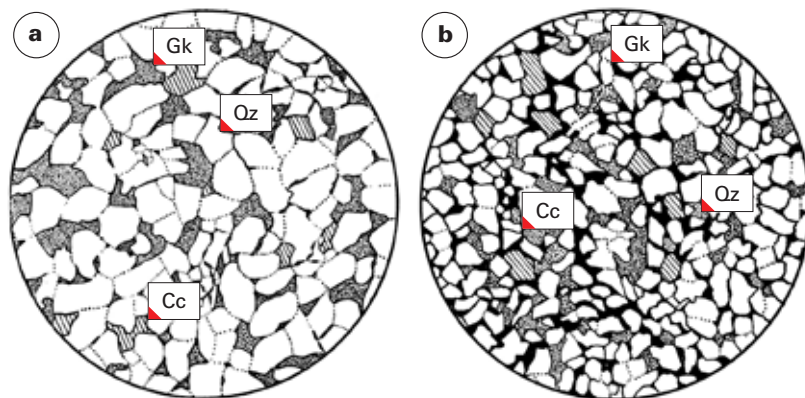


Abbildung 2.5: Darstellung von Glaukonitsandsteinen nach DE QUERVAIN (1969). Verwachsung der Quarzkörner durch punktierte Linien angedeutet. (a) Korn-zu-Korn-Verwachsung des Quarz (Qz). Zudem ist Glaukonit (Gk) und wenig Kalzit (Cc) vorhanden. (b) Quarz mit teilweiser Korn zu Korn-Verwachsung, Glaukonit und kalzitische sowie kieselige Zwischenmasse. Bildbreiten umfassen je ca. 3 mm.

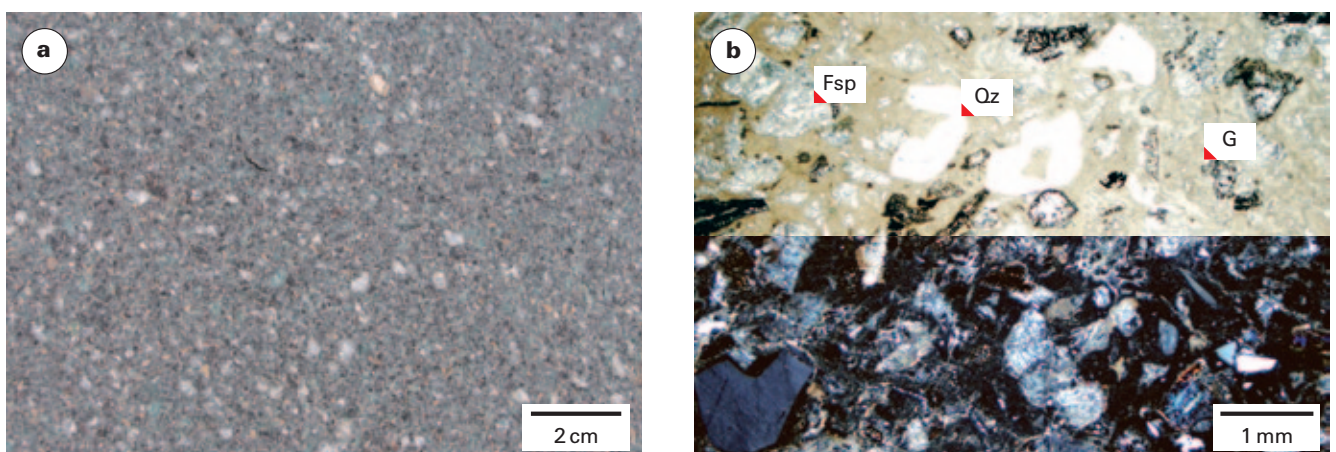


Abbildung 2.6: Rhyolith aus dem Albulatal. Probe FARR. Koord. 774.619/161.704. (a) Handstückphoto. (b) Dünnschliffmikroskopische Aufnahme mit unpolarisiertem (oben) und polarisiertem Licht (unten). In einer Grundmasse (G) treten neben Quarz (Qz) auch Feldspäte (Fsp) Hellglimmer (Hg) Erz und Kalzit auf.

In Gruppe I und II können Tripelpunkte von Quarzkornverwachsungen mit 120°-Winkeln zwischen den Körnern beobachtet werden. Für die einachsige Druckfestigkeit der Gruppen I und II werden Werte von 240–335 MPa angegeben. Bei Gruppe III liegen sie wegen der schlechteren Korn zu Korn-Verwachsung des Quarzes und der höheren Serizit- und Glaukonitanteile zwischen 230–270 MPa.

Die ausgezeichnete Griffigkeit ist auf die Wechselwirkung von harten und weichen Mineralanteilen zurückzuführen (STAHEL 1968); sie entsteht durch die Auswitterung des weicheren Glaukonits und feinsten Glimmeranteile im Zement gegenüber dem feinkörnigen harten Quarz.

#### **2.2.5 Meta-Rhyolith (Handelsbezeichnung: Quarzporphyr)**

Im Albulatal/GR wird ein Meta-Rhyolithvorkommen permischen Alters aus der ostalpinen Silvrettadecke zur Herstellung von Bahnschotter und Splittfraktionen verwendet. Es handelt sich um ein porphyrisches, graugrünes Gestein, in welchem makroskopisch mittel- bis feinkörniger Quarz (ca. 16%), Feldspat (gelblich, ca. 16%), Hellglimmer (4%) und Erz (4%) unterschieden werden können (Abbildung 2.6a). Ferner kann mit 10%iger Salzsäure Kalzit nachgewiesen werden.

Mikroskopisch kann im porphyrischen Gefüge eine feinkristalline, alterierte Grundmasse (ca. 60%) von den Einsprenglingen Quarz, Kalifeldspat, Plagioklas und Hellglim-

mer differenziert werden (Abbildung 2.6b). Die Feldspäte zeigen starke Zersetzung in Form von Serizitisierung und Kaolinisierung. Erz tritt hauptsächlich in Verbindung mit Hellglimmern auf. Das Gestein wird von Kalzitadern durchzogen.

Über die technischen Eigenschaften dieses Meta-Rhyoliths liegen keine Angaben vor, womit die Zugehörigkeit zu den Hartsteinen weder ausgeschlossen, noch bestätigt werden kann.

### **2.3 Vergleich: Hartsteine im Ausland**

Im benachbarten Ausland werden bevorzugt feinkörnige magmatische Gesteine für die Herstellung von Hartsteinprodukten verwendet. Als oft genutzte Hartsteine können Rhyolithe («Quarzporphyr»), Mikrogranite, Basalte und Dolerite aufgeführt werden (LORENZ & GWOSDZ 2003). Teilweise kommen auch leicht metamorphe (schwach umgewandelte) Gesteine (Bsp. Diabas), Hornfelse, Quarzite und Dolomite sowie Sandsteine (Grauwacken) zur Anwendung. Aus geologischer Sicht sind mit Ausnahme des Dolomits die vorgehend aufgeführten Gesteine in der Schweiz nicht vorhanden oder sehr schwierig zu gewinnen.

Bei den 2010 in die Schweiz importierten Hartstein-schotter handelt es sich vorwiegend um Rhyolithe, Ganggesteine, feinkörnige Granite sowie Grauwacken.

### 3. Hartsteinprodukte und deren Verwendung

#### 3.1 Einleitung

Um Hartsteinprodukte herstellen und auf dem Markt absetzen zu können, müssen Gesteine verarbeitet werden, welche den hohen Qualitätsanforderungen der Kunden entsprechen. Ungeeignete Gesteinsanteile wie mergelige und schiefrige Zwischenlagen müssen deshalb vor der Verarbeitung teilweise manuell separiert und ausgeschieden werden.

Im Folgenden werden – unter besonderer Berücksichtigung des Kieselkalks – Produkte, Produktions- und Bedarfsmengen sowie Anwendungsbereiche von Hartsteinen vorgestellt. Es zeichnet sich ab, dass Kieselkalk nicht nur zur Herstellung von Produkten für den Gleisoberbau und Deckschichten im Strassenbau oder als Gesteinskörnungen für Beton verwendet werden kann: Kieselkalk wird auch in anderen Produkten eingesetzt und besitzt Potenzial für neue Märkte.

#### 3.2 Produkte

Bei der Herstellung von Hartsteinprodukten ist es sinnvoll, zwischen primären und sekundären Produkten aus dem Abbau- und Produktionsstandort zu differenzieren. Unter primären Produkten werden alle Erzeugnisse verstanden, die direkt aus dem Spreng- und Brechvorgang gewonnen werden. Sekundäre Produkte sind weiter verarbeitete Primärprodukte sowie Mischprodukte, die daraus hervorgehen oder in Kombination mit anderen Materialien erzeugt werden.

##### 3.2.1 Primäre Hartsteinprodukte aus dem Tagbau / Steinbruch

Durch den Sprengabbau im Hartsteinbruch entstehen bei guten geologischen Verhältnissen hauptsächlich grössere Gesteinsbruchstücke. Es wird eine schonende Sprengtechnik mit dafür geeigneten Sprengmitteln angewandt.<sup>1</sup> Somit wird das Gestein nicht durch übermässig viele Risse geschwächt. Mit dieser Sprengtechnik kann gewährleistet werden, dass beim Herunterbrechen des Gesteins in verschiedene Korngruppen möglichst grosse Schottermengen (32/50) hergestellt werden. Nach der sprengtechnischen

<sup>1</sup> Beispiele von heute verwendeten Sprengstoffen für den Hartsteinabbau: Tovex SE (Fussladung), Tovex V (Schaftladung), Schwarzpulver als Sockelladung, teilweise Sprengschnur Detonex an Stelle der Schaftladung Tovex V.

Vorlagesteine	0,25–1,5 m <sup>3</sup>
Mauer- und Pflastersteine	0,001–0,2 m <sup>3</sup>
Schotter	
Grobschotter	40/63 mm
Schotter	32/50 mm
Grobe Gesteinskörnungen	
Splitt	22/32 mm
Splitt	16/22 mm
Splitt	11/16 mm
Splitt	8/11 mm
Splitt	4/8 mm
Splitt	2/4 mm
Feine Gesteinskörnungen	
Brechsand	0/2 mm
Füller	< 0,09 mm

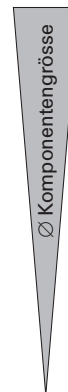


Abbildung 3.1: Primäre Produkte, die im Hartsteinabbau gewonnen werden. Grobe und feine Gesteinskörnungen werden in den aufgeführten Korngrössen hauptsächlich für Deck- und Binderschichten verwendet. Feine Gesteinskörnungen werden auch in Trag- und Fundamentalschichten eingesetzt.

Gebirgslösung erfolgt die Zerkleinerung mit einem Backenbrecher. Das Gestein, welches nach Abzug des Schotters zurückbleibt, wird in kleinere Korngrössen klassiert und bei Bedarf zu noch feineren Korngruppen gebrochen.

Mit abnehmender Korngrösse entstehen Splittkörnungen, Brechsand und Füller (Abbildungen 3.1). Letzterer wird hauptsächlich als Koffermaterial für den Belagsbau eingesetzt. Die gebrochenen Gesteinskörnungen werden entweder direkt als einzelne Korngruppen oder als Korngruppenmischungen auf dem Markt angeboten.

##### 3.2.2 Primäre Hartsteinprodukte aus dem unterirdischen Abbau

In der Schweiz werden Hartsteine teilweise auch unterirdisch abgebaut. So zum Beispiel in Tunnelbauprojekten oder in einem 2009 begonnen Untertage-Projekt, in welchem Kieselkalk in Kavernen abgebaut und als Hartstein genutzt werden soll.

#### 3.3 Produktionsmengen

Für die Darstellung der nationalen Hartsteinproduktionsmengen wird auf die Statistik des Verbandes schweizerischer Hartsteinbrüche (VSH) zurückgegriffen (VSH 2010 b). Diese zeigt sowohl den aktuellen Stand, als auch Entwicklungen aus den letzten 17 Jahren auf (Tabelle 3.1).



Tabelle 3.1: *Produktion und Absatz von Hartsteinen aus Schweizer Betrieben. Angaben nach VSH (2010b) und SGTK, letzte Datenerhebung: April 2010. Für Statistik bis ins Jahr 2003 vgl. ASTRA (2004).*

Produktion und Absatz [t]			2004 <sup>1</sup>	2005	2006	2007	2008	2009
Schotter	SBB	32/50	395 849	289 981	323 994	321 099	359 150	287 441
	Privatbahnen	32/50	122 430	150 057	171 418	195 915	155 048	157 958
Schotter		andere Körnung	46 514	5 000	5 970	2 864	19	0
Splitt (Korngruppen)		22/32	–	21 808	34 270	31 988	30 243	29 146
		16/22	69 186	74 785	89 323	84 212	75 917	78 192
		11/16	70 160	66 735	89 403	90 999	78 986	79 105
		8/11	–	135 701	141 415	141 766	124 051	132 634
		4/8	–	177 594	196 627	207 103	195 346	228 336
		2/4	–	43 596	50 390	41 166	36 585	43 156
		0/2	–	78 219	88 990	65 448	115 387	95 929
Kombinierte Korngruppen		0/32	737 738	332 602	359 399	376 329	367 499	135 506
Füller		0,063/0,5	31 060	27 308	31 950	27 045	15 068	20 236
Vorlagesteine		<1,5m <sup>3</sup>	105 516	65 830	121 294	97 604	72 706	72 373
«Kiessand» PSS		0/32	32 038	33 751	55 844	26 644	36 590	28 507
Koffer-/Planiematerial		0/X	624 286	434 857	497 827	580 779	617 712	596 572
Mauer- und Pflastersteine		0,001–0,5m <sup>3</sup>	21 034	26 476	28 361	28 042	30 810	40 794
Total			2 255 811	1 964 300	2 286 475	2 319 003	2 311 117	2 025 885

<sup>1</sup> Im Jahr 2004 wurden Splitt nur teilweise separat erfasst. Zudem wurden die alten Korngruppen 0/3, 3/6, 6/11 verwendet.

### 3.3.1 Schotterproduktion in der Schweiz: Vergangenheit und heute

Von 1993–1999 wurden in der Schweiz durchschnittlich 500 000 Tonnen Schotter pro Jahr aus Hartsteinbrüchen produziert (Abbildung 3.2a). Damit machte Schotter rund 30% der gesamten nationalen Hartsteinproduktionsmengen aus (ASTRA 2004). Ab 2000 wurde im Durchschnitt immer noch die gleiche Schottermenge von 500 000 Tonnen pro Jahr hergestellt; der Anteil gegenüber den gesamten nationalen Hartsteinproduktionsmengen ist aber nicht mehr über 27% gestiegen und hat sich in den letzten 5 Jahren konstant auf rund 22% gehalten. Dies deshalb, weil bei der Zu- bzw. Abnahme der Schotterproduktion vorwiegend die Splittproduktion zu- bzw. abnahm.

Im Jahr 2009 wurden in Schweizer Hartsteinbrüchen rund 445 000 Tonnen Schotter für die Bundes- und Privatbahnen produziert (Tabelle 3.1). Abschätzungen ergeben, dass davon rund 60% bzw. 260 000 Tonnen aus Kieselkalksteinbrüchen stammen. Die übrigen 40% wurden durch Schotter aus Schweizer Hartsandsteinbrüchen und Schotter aus dem Ausland gedeckt.

### 3.3.2 Splittproduktion in der Schweiz: Vergangenheit und heute

Die Splittproduktion mitsamt kombinierter Korngruppen betrug 2009 gemäss Angaben des VSH (2010b) rund 820 000 Tonnen. Die Produktionsstatistik zeigt seit 1993 drei Anstiege der Splittproduktion mit darauf folgenden Rück-

gängen (Abbildung 3.2a). Die durchschnittlichen Produktionsmengen stiegen dabei über die letzten 17 Jahre um fast 12 000 t/a von 630 000 Tonnen auf 820 000 Tonnen an. Abschätzungen der Splittproduktionsmengen in den einzelnen Hartsteinbrüchen ergeben, dass 2009 rund 490 000 Tonnen Splitt aus Kieselkalken hergestellt wurden.

## 3.4 Bedarf

Die Entwicklung des Hartsteinbedarfs wurde bereits von M. E. Gerber im Bericht des ASTRA (2004) aufgezeigt. Dabei geht aus der langjährigen Beobachtung des Markts hervor, dass die Bedarfszahlen für Hartsteine nicht dieselben konjunkturellen Schwankungen zeigen wie der Kies- oder Zementverbrauch. Vielmehr variiert der Bedarf auf dem schweizerischen Markt mit Projekten im Bereich der Verkehrsinfrastrukturanlagen (ASTRA 2004).

Die nachfolgende Ausführung zeigt im Kurzabriss den Schotter- und Splittbedarf der wichtigsten Abnehmer von hochwertigen Hartsteinen auf: Den Bundes- und Privatbahnen sowie dem Strassenbau.

### 3.4.1 Schotterbedarf der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB)

Der Schotterbedarf der SBB betrug von 1993–2006 im Durchschnitt rund 500 000 Tonnen pro Jahr. Ab 2007 fiel der Bedarf unter 400 000 Tonnen. 2009 betrug der Bedarf

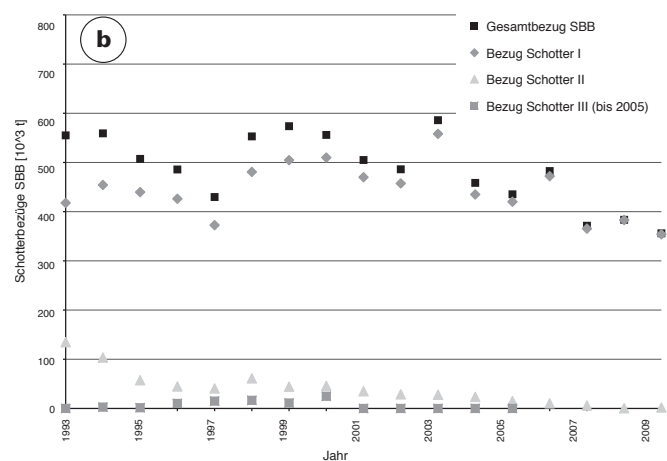
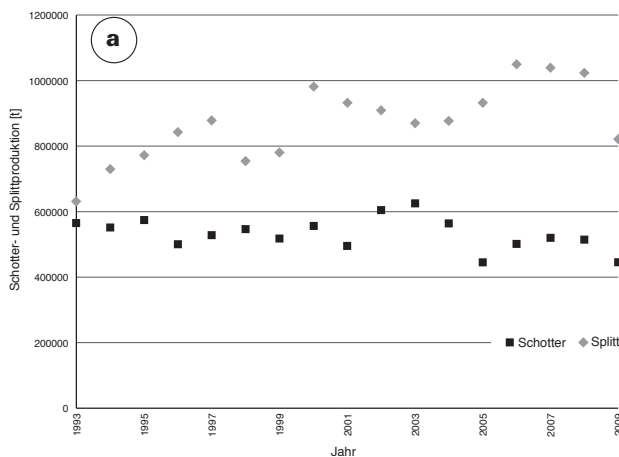


Abbildung 3.2: a) Schotter- und Splittproduktion zwischen 1993 und 2009. Die Schotterproduktion beträgt seit 1993 durchschnittlich rund 500 000 Tonnen pro Jahr. Die Splittproduktion nimmt im Durchschnitt mit 12 000 Tonnen pro Jahr zu. 2009 betrug die Splittproduktion rund 800 000 Tonnen. Angaben gemäss VSH (2010 b). b) Schotterbedarf der Schweizerischen Bundesbahnen. Daten über VSH (2010 b) bezogen. Die Schotterkategorie III wurde mit der Einführung des Regelwerks R RTE 21110 (Anhang A) aufgehoben und erscheint ab 2006 nicht mehr in der Statistik.

rund 360 000 Tonnen (Abbildung 3.2 b). Höhepunkte von Schotterbezügen in den Jahren 1993, 1998/99 und 2003 widerspiegeln sich auch in den Produktionsmengen der schweizerischen Hartsteinindustrie (Abbildung 3.2 a). Die importierten Schottermengen der SBB beliefen sich in den letzten 5 Jahren im Durchschnitt auf rund 65 000 Tonnen (VSH 2010 b).

Die Schotterbezüge der SBB zeigen neben dem schwankenden Bedarf an Schotter der Klasse I zwischen 355 000 und 575 000 Tonnen über die letzten 15 Jahre einen kontinuierlichen Rückgang von Schotter der Klasse II auf (Abbildung 3.2 b).

### 3.4.2 Schotterbedarf der Bern-Lötschberg-Simplon-Bahnen (BLS)

Die BLS als wichtigster Vertreter der Privatbahnen beziehen seit 2007 rund 60 000 Tonnen Schotter pro Jahr für den Streckenunterhalt und -neubau. Vor der Fusion mit der Regionalverkehr Mittelland AG (RM) betrug die jährliche Bezugsmenge im Durchschnitt 40 000 Tonnen. Schwankungen lagen mit Ausnahme der fusionsbedingten Zunahme in den letzten zwölf Jahren im Bereich von maximal  $\pm 5000$  t.

Die BLS verwenden im Gegensatz zu den SBB nur Schotter, der den Anforderungen der Klasse I (nach R RTE 21110, siehe Anhang A) genügt. Schotter der Klasse II wird gemäss Angaben der BLS aus logistischen und bahnsicherheitstechnischen Gründen nicht mehr eingesetzt (BLS 2008).

### 3.4.3 Splittbedarf

Über den detaillierten Splittbedarf wurde im Rahmen dieser Arbeit keine Zahlen erfasst. Es wird hier auf die vom Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) ermittelten Bedarfsgrossen von 800 000 Tonnen Deckbelägen pro Jahr (ARE 2008 a, b) und einen Bericht des ASTRA verwiesen

(ASTRA 2004). Der jährliche Bedarf an hochwertigen Hartsteinprodukten ist im Strassenbau durch die landesinterne Produktion gedeckt (vgl. auch NZZ 2009).

## 3.5 Historische Anwendungsbereiche von Kieselkalk

### 3.5.1 Haus- und Strassenbau

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts kam der Kieselkalk in verschiedenen Pflasterarten im Strassenbau zum Einsatz. Auch als Baustein für Gebäude und Häuser fand er Verwendung. Ab den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde mit der Herstellung von Schotter für das Bahnwesen das Kieselkalk-Produkteangebot erweitert. In Tabelle 3.2 sind einige Verwendungsarten von Kieselkalk inklusive deren Abbaustandorte dargestellt (GRUBENMANN 1915).

Auffallend ist im Kanton Tessin – hauptsächlich Südtessin – die intensive Nutzung des Kieselkalks aus der Moltrasio-Formation. Als hartes und verwitterungsresistentes Gestein konnte der Kieselkalk der Südalpen in einem weiten Anwendungsspektrum eingesetzt werden: Als Beispiel kann auf die unzähligen Pflastersteinstrassen und die vielfache Verwendung an Bild- und Bauwerken in der Stadt Lugano hingewiesen werden (Abbildung 3.3). Im Raume des Generoso-Becken sind fast alle Natursteinmauern aus diesen Kieselkalkvorkommen aufgebaut. Der Kieselkalk wird dabei nach der Typuslokalität in Moltrasio/IT als «Calcare di Moltrasio» bezeichnet, obwohl die Gewinnung dieser Gesteine grösstenteils im Kanton Tessin stattfand.

### 3.5.2 Bunker- und Festungsbau

In den 50er Jahren wurden Sprengversuche am Kieselkalk durchgeführt (BECK 1942). Ziel dieser Versuche war es, die Sprengwirkungen auf Kieselkalk – als repräsentativer

Tabelle 3.2: *Kieselkalk für die Bau- und Agrarindustrie (aus GRUBENMANN 1915: Teil III S. 97ff.)*

Art der Verwendung	Abbaustandort
Bruchstein	Salorino/TI
Mauerstein und Pflasterstein	Balmholz/BE
Mauersteine und Wührsteine	Mollis/GL
Pflasterstein, Mauerstein, Strassenschotter	Gersau/SZ
Strassenschotter	Kehrsiten/NW
Quaimauern, Bachverbauungen, Vorlagesteine	Schwibogen/NW
Randsteine für Trottoirs, Sockelgürtel	Ringgenberg/BE
Schiefrige Varietät (Basis des Hauterivien): Treppen, Terrassen, Balkonplatten, Brunnenröge	Goldswil/BE
Fassadenstein: Beispiel Bahnhof Luzern	Ingenbohl/SZ
Düngekalk	Weesen/SG

Hartstein für die damals noch grosse Anzahl von Hartsteinarten – zu testen, um Rückschlüsse auf die Verwendung von Hartsteinen s.l. als Bunkerverkleidung zu ziehen. Gleichzeitig wurden von der EMPA systematisch alle damals genutzten Hartsteintypen auf deren Druckfestigkeit und Schlagwiderstand geprüft, sowie die spezifische Zähigkeit aus dem Quotienten Schlagwiderstand zu Druckwiderstand bestimmt.<sup>2</sup>

In den geotechnischen Prüfergebnissen der Gesteinsarten der Schweizeralpen (Tabelle zu BECK 1942) sind die Resultate dieser Untersuchungen dargestellt. Es wird darauf verwiesen, dass der Schlagwiderstand den Widerstand gegen Explosionen und Beschuss am besten annähert. Der Kieselkalk des Hauterivien schnitt dabei als zweitbesten Hartstein hinter den «Quarzsandsteinen und Spatkalken der mittleren Kreide» ab und wurde somit als Baustein für den Bunkerbau empfohlen.

### 3.6 Heutige Verwendung von Kieselkalk

#### 3.6.1 Gleisbau

##### 3.6.1.1 Hartsteinschotter für den Oberbau

Seit 1925 verlangen die Bahnunternehmen ausschliesslich Schotter für die Konstruktion des Schotterbetts im Gleisoberbau. Schotter wird eingebracht, damit Instabilitäten des Gleisrostes infolge Verkehrslast und Schwindung/Dehnung durch Temperatureinflüsse reduziert werden können (CHALLANDES & DÄPPEN 2005).

Die zunehmende Belastung der Geleise infolge höherer Frequenz, höherer Geschwindigkeiten sowie höheren Achslasten führte vermehrt zu Erneuerungsarbeiten im Oberbau (RÖTHLISBERGER et. al. 2005), weshalb heute ausschliesslich Schotter aus Hartstein verwendet wird, welcher den wachsenden Belastungen und erhöhten Anforderungen besser standhält (Abbildung 3.4 a).

<sup>2</sup> Schlagwiderstand nach BECK (1942): Ein Stahlgewicht von 50 kg fällt aus zunehmender Höhe auf Würfel von 7 cm Kantenlänge bis zu deren Zerstörung. Die Energie der erforderlichen Schläge wird summiert und durch das Volumen der Würfel dividiert, so dass der gesamte Schlagwiderstand in mkg/cm<sup>3</sup> ausgedrückt werden kann.

#### *Anforderungen an Gesteinskörnungen für Gleisschotter*

In der Europäischen Norm EN 12450:2002 und der danach gerichteten Schweizer Norm SN 670110 (beide Anhang A) sind die Anforderungen an Gesteinskörnungen für Gleisschotter festgehalten. In Tabelle 3.3 sind die wichtigsten Punkte aus dieser Norm zusammengefasst. Die Grenzwerte, welche dabei für die Unterscheidung von Schotter der Klassen I und II verwendet werden, sind in der Widerstandsprüfung gegen Zertrümmerung EN 1097-2 vorgeschrieben.

Als zusätzliches Prüfverfahren wird im Regelwerk R RTE 21110 (2005) der SBB die Druckfestigkeitsprüfung am Haufwerk (SN 670830) (beide Anhang A) verlangt. Damit soll berücksichtigt werden, dass die Beständigkeit des Schotters nicht nur von der Belastung durch den Zugverkehr und der Witterungsbeständigkeit abhängt, sondern von weiteren Faktoren aus dem Gleisunterhalt beeinflusst wird.<sup>3</sup> Der Grenzwert für diese national geltende Zertrümmerungsprüfung (SN 670110 mit Ergänzung zur Druckfestigkeit Haufwerk) wird für Schotter der Klasse I bei 43 Masse-% festgelegt, bei Schotter der Klasse II dürfen nicht mehr als 51 Masse-% durch das 22.4 mm Sieb ausgeschieden werden (R RTE 21110, 2005).

Im Bezug auf die Schotterproduktion muss festgehalten werden, dass Kieselkalke nicht ausnahmslos für die Produktion von Schotter der Klasse I geeignet sind. So wurde 2009 in der Schweiz Hartschotter hergestellt, welcher den Anforderungen an Gleisschotter der Klasse I nur teilweise genüge.

#### *Gleisschotter: Hartsteinprodukt von beschränkter Lebensdauer*

Trotz den hohen Anforderungen, die an Schotter der Klasse I gestellt werden, ist dessen Verwendungsdauer beschränkt. Nicht nur natürliche Beanspruchungen und Belastungen durch den Zugverkehr, sondern auch Unterhaltsarbeiten am Schotterbett wirken sich auf die Beständigkeit des Schotters aus. Die SBB gehen davon aus, dass die heu-

<sup>3</sup> Untersuchungen an Teststrecken der SBB haben gezeigt, dass der Schotter vorwiegend durch Unterhaltsarbeiten bis zur Füllerkurve zerkleinert wird (RÖTHLISBERGER 2000).

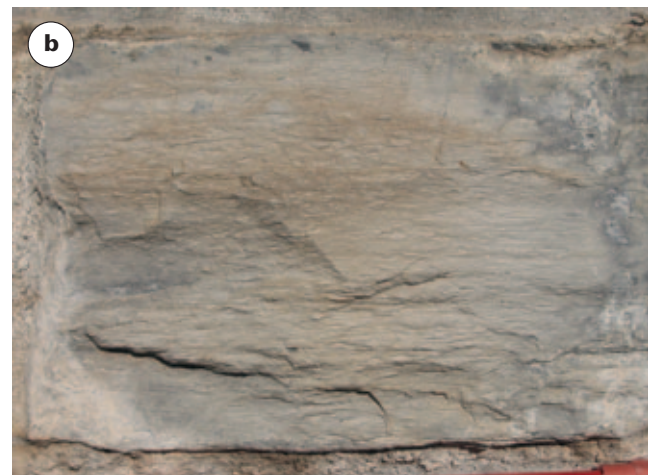


Abbildung 3.3: Typische historische Anwendung des Kieselkalks der Moltrasio-Formation als Baustein. In diesem Beispiel als Bauelement in einer Stützmauer bei Lugano. Lokalität: Wanderweg zwischen Lugano und Gandria (Via Cortivo), Koordinaten: 719.408/955.140. Bildbreite a) 2 m, b) 18 cm. Auffallend ist das witterungsbedingte hervorgehobene planare Gefüge.

te produzierten qualitativ hochwertigen Gleisschotter der Klasse I eine Lebensdauer von mindestens 40 Jahren erreichen. Damit wird der Lebenszyklus der Schiene um das Vierfache übertroffen und die Lebensdauer der heute verwendeten Betonschwellen egalisiert.

Gebrauchter Hartschotter wird aus dem Gleisbett entnommen und dem Recycling zugeführt. In Recycling-Anlagen wird der Schotter gereinigt und falls nicht mehr genügend kantig in kleinere Korngrößen (Splitt und Brechsand) gebrochen. Rund 80 % des Schotters kann so in der Belags- und Betonproduktion sowie als Koffermaterial weiterverwertet werden. 20 % müssen u.a. wegen der Schadstoffbelastung deponiert werden (REY 2009).

### 3.6.1.2 Planumsschutzschicht für Gleisunterbau

Ein weiterer Einsatzbereich von Kieselkalk ist die Planumsschutzschicht PSS, welche nach SBB-Regelwerk aus einer bestimmten Kornfraktion bestehen muss. Die Planumsschutzschicht (Handelsbezeichnung: «Kiessand» PSS) wird verwendet, wenn der Unterbau nur einschichtig eingebaut werden kann. Sie übernimmt dabei sowohl die Funktion der Sperr-, als auch der Foundationsschicht und erübrigt die Verwendung von Bitumen oder anderen mineralischen Rohstoffen. Sowohl die Tragfähigkeit, als auch die Filterstabilität, die geringe Durchlässigkeit und der Frostschutz sind bei der Verwendung von Kieselkalkkorngruppen gegeben. In der Regel werden heute im Gleisunterbau Schichtdicken von 30 cm eingebaut.

## 3.6.2 Strassenbau

Je nach Verkehrsbelastung werden Strassen und Wege nach unterschiedlichen Bauklassen erstellt. Für den Oberbau, bestehend aus Deck- und Tragschichten, werden Gesteine mit besonders hohem Festigkeitsvermögen eingesetzt. Einerseits wird damit eine gleichmässige Druckverteilung auf den Unterbau gewährleistet, andererseits kann die

Nutzungsdauer einer Strasse durch die Verwendung von druckresistenten Splitten in der Deckschicht gesteigert werden (Abbildung 3.4b).

### 3.6.2.1 Anforderungen an Gesteinskörnungen für Deckschichten

In der Europäischen Norm EN 13043:2002 (Anhang A) werden Anforderungen an Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Strassen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen aufgeführt. Die Anforderungen variieren je nach spezifischem Verwendungszweck. Sie umfassen geometrische, physikalische sowie chemische Kriterien. Teilweise werden die gleichen Prüfverfahren wie bei der Schotterprüfung nach EN 13450:2002 verwendet. Zusätzlich werden bei Gesteinskörnungen für Deckschichten zum Beispiel der Widerstand gegen Polieren (PSV, EN 1097-8), der Widerstand gegen Verschleiss (Micro-Deval-Koeffizient, EN 1097-1), sowie die Dauerhaftigkeit unter Hitzebeanspruchung (EN 1367-2) getestet (alle Normen in Anhang A).

Füller aus Hartstein wird als Zuschlagstoff im bituminösen Belagsbau verwendet (EN 13043). Füller stabilisiert das nicht direkt am Gestein haftende Bindemittel und schützt die wasserlöslichen Bindemittel gegen Auslaugen (VSH 1997).

### 3.6.2.2 Hartsteinkörnungen für Tragschichten

Die Verwendung von ungebundenem, gebrochenem Hartstein angrenzend an den bituminösen Deckbelag ergibt gegenüber herkömmlichen Materialien Vorteile: erhöhte Qualität des Oberbaus durch hohe Frostsicherheit, verbesserte Tragfähigkeit oder bei gleichbleibenden Strukturwerten auch die geringere Schichtdicke. So werden gebrochene Hartsteinkörnungen als Alternativrohstoff zu den immer knapper werdenden runden Kiessanden eingesetzt (vgl. JÄCKLI & SCHINDLER 1986). Bei gleichen Strukturwerten für den Oberbau von Strassen kann damit die benötigte



Tabelle 3.3: Anforderungen an Gesteinskörnungen für Gleisschotter 32/50 mm nach SN 670110 (Anhang A).

Anforderungen	Eigenschaften	Messgrösse	Wert	
Geometrische Anforderungen	Korngrößenverteilung	Siebdurchgang	mm	Gew.-%
			63	100
			50	70–99
			40	30–65
			31,5	1–25
			22,4	0–3
	Feinstkorn (<0,063 mm)	Siebdurchgang	≤ 5 Gew.-%	
Physikalische Anforderungen	Kornform	Kornformkennzahl	≤ 20 Gew.-%	
	Kornlänge	Kornlänge > 100 mm	≤ 4 Gew.-%	
	Widerstand gegen Zertrümmerung	Los-Angeles-Koeffizient (LA)	≤ 16 Kl. I bzw. ≤ 24 Kl. II	
	Empfindliche Gesteinskörnungen	Petrographie	–	
	Frostwiderstandsprüfung	Magnesiumsulfatwert (MS)	≤ 3 Gew.-%	

Gesteinskubatur der Tragschichten mit gebrochenen Hartsteinkörnungen gegenüber Rundkörnungen um bis zu 30% reduziert werden (VSH 2007, BÜRGI 2009).<sup>4</sup>

### 3.6.3 Beton

Beton mit Hartsteinkörnungen als Zuschlagstoff kann durch die verbesserten technischen Eigenschaften in speziellen Anwendungsgebieten eingesetzt werden, da sich die hohe Druckfestigkeit des Gesteins positiv auf die Festigkeit des Betons auswirkt. Je nach Korngrösse des Zuschlagstoffs, Feuchtigkeit, Temperatur und kieselensäurehaltige Gesteinskörnung kann aber mit dem basischen Zement eine Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) begünstigt werden. Sowohl die mikrokristalline Form des Quarzes in der Gerüststruktur der Kieselkalke, als auch das zum Teil noch chalzedonisch vorliegende SiO<sub>2</sub> der Bioklasten bilden wesentliche Faktoren für einen Ablauf der für den Beton schädlichen AAR.<sup>5</sup>

### 3.6.4 Mauer- und Wasserbausteine

Grosse Gesteinskörnungen (0,001–1,5 m<sup>3</sup>) wie Mauersteine und Wasserbausteine (Wuhrsteine) werden für den Bau von Stütz- und Schutzmauern verwendet. In Bächen, wo temporär viel Wasser und Sediment transportiert wird, eignen sich die schlag- und abriebfesten Hartsteine gut.

Ungefähr 5% des gesprengten, grobkörnigen Gesteinsmaterials wird im Steinbruch direkt nach der Sprengung aussortiert und für diese Nutzung bereitgestellt.

## 3.7 Produktinnovationen

### 3.7.1 Steinkörbe / Schallelemente

Die wohl einfachste Weiterentwicklung der Angebotspalette von Kieselkalkprodukten sind Steinkörbe. Es handelt sich dabei um Metallkörbe unterschiedlicher Grösse, die mit Gesteinsmaterial verfüllt werden. Sie finden als Sichtschutz- oder als Stützmauern Verwendung (Abbildung 3.5a). Sie sind insofern wichtig, als dass auch Steinbruchmaterial verwertet werden kann, welches den hohen Anforderungen als Gleisbettungsschotter und Strassenbaumaterial nicht genügt aber trotzdem Stützfunktionen erfüllen kann. Durch den Einbau einer Zwischenschicht können Steinkörbe auch als schallisolierende, mehrere Meter hohe Elemente eingesetzt werden. Versuche bei Hartsteinunternehmen haben gezeigt, dass Lärmeinwirkungen um mehr als 30 dB reduziert werden können. Bei Verwendung von Hartsteinen kann mit einer langjährigen Beständigkeit und Sicherheit der Isolationswand gerechnet werden. 2009 wurden bereits mehrere 100 m solcher Kieselkalkschallelemente an Schweizer Strassenrändern eingebaut.

### 3.7.2 Mineralguss

Bei der Entwicklung von Mineralgüssen werden auch Versuche mit gebrochenem Hartstein als Zuschlagstoff durchgeführt. Mineralgüsse, auch Polymerbeton genannt, sind Werkstoffe, bei welchen ein mineralischer Zuschlagstoff mit einem Kunstharz gebunden wird. Wurden bis anhin Granite und Quarzite, sowie untergeordnet Basalte und weitere Gesteine als Zuschlagstoffe verwendet (WECK 2002), fällt das Augenmerk in der Schweiz heute auch auf den Kieselkalk (Abbildung 3.5b). Dessen Druckfestigkeit

<sup>4</sup> Die Tragfähigkeit eines Strassenoberbaus in bituminöser Bauweise wird nach dem AASHTO Guide for Design durch den Strukturwert SN ausgedrückt (TURTSCHEY et al. 2005). Der Strukturwert entspricht der Summe der Dicken der einzelnen Oberbauschichten multipliziert mit den entsprechenden Tragfähigkeitswerten  $a$ . Bsp: Kiessand rund  $a=1$ , Kiessand gebrochen  $a=1,25$ .

<sup>5</sup> Die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) ist eine chemische Reaktion zwischen reaktiven Zuschlagstoffen und freien Alkalien des Porenwassers im Mörtel oder Beton (THALMANN et al. 2001). Die AAR hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab: 1. freie Alkalien, 2. lösliche Silikatminerale, 3. Feuchtigkeit. Zudem beschleunigen hohe Temperaturen die AAR. Resultierend aus der AAR entsteht ein expansives Gel, welches den Beton beschädigt (LEEMANN et al. 2005). Detaillierte Informationen über die AAR: CEMSUISSE (2005) und BAU + WISSEN (2010).



Abbildung 3.4: Zwei Gesteinskörnungen aus Kieselkalk, die für den Bau von Verkehrsinfrastrukturen verwendet werden: a) Schotter 32/50 für den Gleisoberbau. b) Splitt 8/11 für Deckbeläge von Strassen.



Abbildung 3.5: a) Stützmauer aus Steinkörben, die mit Kieselkalk verfüllt sind. Strasse zwischen Lauerz und Seewen/SZ. b) Mineralguss bestehend aus Epoxydharz (Kleber) und einer Kornmischung aus Kieselkalk.

und Elastizitätsverhalten erweisen sich im Bereich des Geräte- und Maschinenbaus sowie für Maschinensysteme als vorteilhafte Eigenschaften.

### 3.7.3 Kieselkalkfüller für die Bindung von Öl und Fett

Kieselkalkfüller findet in der Behandlung von mit Öl kontaminierten Flüssigkeiten neue Anwendungsbereiche: In einem von einer Schweizer Firma entwickelten Produkt SOT 11 (Solid Oil Treatment) wird neben weiteren, natürlichen und nichttoxischen Materialien Kieselkalkfüller als Bestandteil zugefügt. Der Kieselkalk soll als Öl adsorbierender Zusatz wirken. Das Produkt zeigt ähnliche physikalisch-technische Eigenschaften wie Tripel<sup>6</sup> und Kieselkreide<sup>7</sup>, deren grosse Ölaufnahme bzw. Adsorption primär auf den hohen Anteil an mikrokristallinem Quarz zurückzuführen ist.

<sup>6</sup> Tripel oder Tripoli ist eine mikrokristalline Form von Quarz (LORENZ & GWOSDZ 1999).

<sup>7</sup> Kieselkreide: feinkörniges Gestein aus Quarz und Kaolinit im Verhältnis 4:1 bis 6:1 (STREIT 1987).

Die Anwendung von SOT 11 wird primär auf Erdölverunreinigungen im Ozean, auf Süßwasserseen, Flüsse und Kanäle konzentriert. Das Öl sinkt mit der durch den Kieselkalkfüller bedingten Ausflockung fein dispergiert auf den Grund und wird durch natürliche mikrobiologische Prozesse innerhalb von 3 bis 4 Monaten zersetzt.

### 3.7.4 Kieselkalkfüller in Seifen

Kieselkalk wird zudem als Gesteinskörnung für Seifen genutzt. Durch den Abrieb einerseits und die absorbierende Wirkung des mikrokristallinen Quarzes andererseits werden mit Fett oder Öl verschmutzte Stellen gereinigt. Neben einer Harthandseife wurde ferner eine Handpaste entwickelt.

## 4. Abbau von Hartstein

### 4.1 Abbaustandorte

#### 4.1.1 Historischer Abbau von Hartstein

Die gegenüber normalen Festgesteinen hervorragenden technischen Eigenschaften der harten Gesteine bzw. Hartsteine führten zu vielfältigen Anwendungsbereichen. Es fällt auf, dass bereits in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts bevorzugt die eigentlichen Hartsteine (nach Definition DE QUERVAIN 1969) aus dem Hartsteingürtel für den Bau von Infrastrukturanlagen, insbesondere Verkehrswegen verwendet wurden (Abbildung 4.1, Stand 1915; GRUBENMANN 1915).

#### 4.1.2 Rückgang der Hartsteinabbaustandorte

Die Anzahl der Abbaustandorte von Hartsteinen hat sich innerhalb eines Jahrhunderts stark verringert (Abbildung 4.1). Während im Jahr 1915 entlang des nördlichen Schweizer Alpenrandes an 50 Standorten (42 Kieselkalk- sowie 8 Sandsteinbrüche) Hartsteine gewonnen wurden, verminderte sich die Anzahl Hartsteinbrüche bis ins Jahr 1965 auf 21 (14 Kieselkalk- sowie 7 Sandsteinbrüche). Nach Angaben des Verbandes schweizerischer Hartsteinbrüche (VSH 2010 a) und nach Recherchen der SGTK betrieben 2009 neun Unternehmen entlang des Alpenrandes an

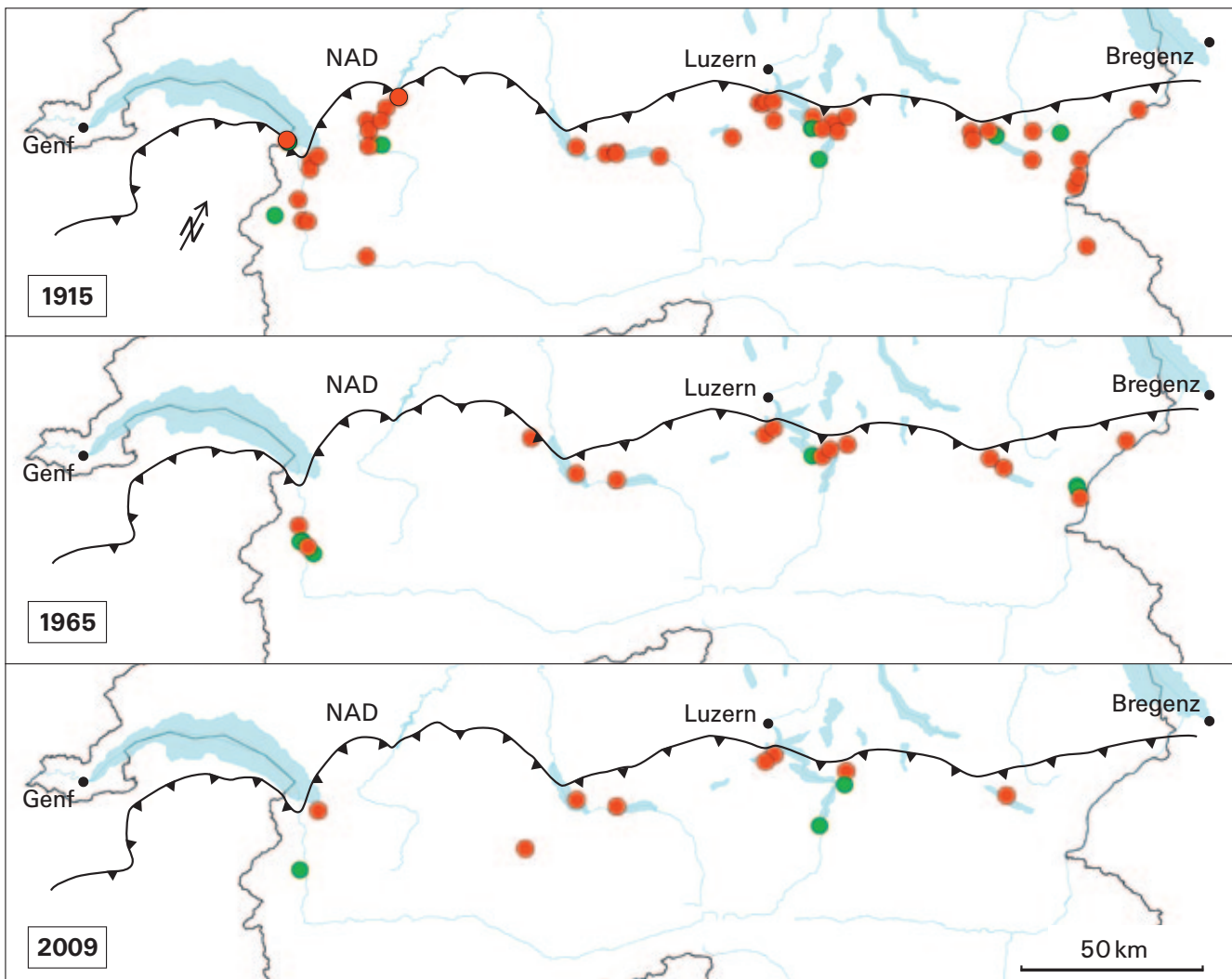


Abbildung 4.1: Überblick über die historischen Abbaustandorte von Hartstein entlang des nördlichen Alpenrandes in den Jahren 1915, 1965 sowie 2009. Rückgang der Anzahl Abbaustellen von 50 im Jahr 1915 auf 11 im Jahr 2009. Grüne Punkte: Abbau von Hartsandstein; rote Punkte: Abbau von (vorwiegend Kiesel-)Kalk. NAD: nordalpine Deckenfront. Quelle: Geotechnischer Umwelt-Atlas GUA (SGTK 2010).



Tabelle 4.1: *Abbaustandorte im Jahr 2009 mit Bezeichnung der genutzten Gesteinsart und der involvierten Unternehmen.*

Abbaustandort, Gemeinde, Kanton	Gestein	Unternehmen
Les Fréneys, Massongex, Wallis	Molassesandstein	FAMSA SA
Planches-Boetrix, Villeneuve, Waadt	Kieselkalk	Carrières d'Arvel SA
Blausee-Mitholz, Kandergrund, Bern	Kieselkalk	SHB Steinbruch & Hartschotterwerk Blausee Mitholz AG
Balmholz, Beatenberg, Bern	Kieselkalk	AG Balmholz
Ringgenberg, Ringgenberg, Bern	Kieselkalk	AG Balmholz
Rüti, Ennetmoos, Nidwalden	Kieselkalk	STEINAG Rozloch AG
Kehrsiten, Stansstad, Nidwalden	Kieselkalk	Holcim Kies und Beton AG
Eielen, Attinghausen, Uri	Flyschsandstein	Hartsteinwerk Gasperini AG
Zingel, Seewen, Schwyz	Kieselkalk	KIBAG KIES SEEWEN
Ingenbohl, Ingenbohl, Schwyz	glauk. Sandstein	Holcim Kies und Beton AG
Schnür, Amden, St. Gallen	Kieselkalk	Mühlehorn-Quinten AG
Farrirola, Filisur, Graubünden	Metarhyolith	HEW AG Bauunternehmung

11 Standorten (8 Kieselkalk- sowie 3 Sandsteinbrüche) Hartsteinabbau. Unter Einbezug des Meta-Rhyolithsteinbruchs zwischen Filisur/Gr und Bergün/Gr waren es 2009 total 10 Unternehmen bzw. 12 Abbaustandorte, an denen Gesteine vorwiegend zu hochwertigem Schotter und Strassenbaumaterial verarbeitet wurden.

Wie aus Tabelle 4.1 ersichtlich ist, handelt es sich bei den im Jahr 2009 aktiven Abbaustandorten vorwiegend um Kieselkalksteinbrüche. In den Hartsandsteinbrüchen bei Attinghausen/UR, Choëx-Massongex/VS und Ingenbohl/SZ wurden die im vorangehenden Kapitel 2 besprochenen Flysch-, subalpinen Molasse- und glaukonitischen Sandsteine abgebaut und zu Hartsteinprodukten verarbeitet.

Die von der Zentralschweiz in Richtung St. Galler Rheintal in zunehmender Mächtigkeit auftretenden Glaukonitsandsteinvorkommen wurden 2009 mit Ausnahme des Abbaustandorts Ingenbohl/SZ nicht mehr genutzt. Speziell ist auf den Raum Tessin zu verweisen, in welchem 1969 ausserhalb des Hartsteingürtels noch bei Castione Kalksilikatfels sowie im Südtessin Kieselkalke abgebaut wurden, die spätestens seit der Eignungsprüfung durch die EMPA 1993 nicht mehr für die Produktion von Schotter und Splitt verwendet wurden (vgl. EMPA 1993).

#### 4.1.3 Geologische Ursachen für die rückläufige Entwicklung

Bei der rückläufigen Entwicklung der Anzahl Abbaustandorte spielen geologisch/geotechnische Aspekte eine wichtige Rolle. Als Beispiele können ein ungünstiger Nuttschichtenverlauf oder Instabilitäten im Gelände aufgeführt werden. Auch die unterschiedliche Gesteinsqualität der Hartsteine hat zu einer Einschränkung der Anzahl Abbaustandorte beigetragen: So werden heute für die Herstellung von Gesteinskörnungen für Verkehrsinfrastrukturanlagen ausschliesslich hochwertige Hartsteinvorkommen genutzt.

## 4.2 Interessenkonflikte

Hartsteine sind Massenrohstoffe mit beschränkter Wertschöpfung: Aus ökonomischen und ökologischen Gründen werden Transportwege > 50 km möglichst vermieden. Durch die Verteilung der potenziellen Hartsteinvorkommen vorwiegend entlang des nördlichen Alpenrandes vom Waadtland/Wallis bis ins St. Galler Rheintal bestehen geologische Rahmenbedingungen, welche die Abbaumöglichkeiten in der Schweiz regional einschränken. Genau diese Regionen liegen aber auch in landschaftlich attraktiven und mit hohen Schutzinteressen belegten Gebieten. Die meisten aktiven Hartsteinbrüche und potenziellen Standortgebiete für Hartsteinabbau liegen sogar in Gebieten, die zum Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN) gehören.

Die nationale Produktion und die Versorgung mit Hartsteinen ist zum heutigen Zeitpunkt ungeklärt; nicht weil die Vorkommen aufgebraucht werden, sondern Abbaukonzessionen für bestehende Hartsteinbrüche auslaufen und neue Bewilligungen für Abbaustandorte im Rahmen der geltenden Gesetzesbestimmungen sehr schwierig zu realisieren sind (vgl. ARE 2008 a).

#### 4.2.1 Standortplanung

Für die Standortplanung von Hartsteinbrüchen gilt es, neben geologischen, geotechnischen und betriebswirtschaftlichen Parametern auch die umweltrelevanten Anliegen und die Akzeptanz bei der Bevölkerung zu berücksichtigen. Ein neuer Standort oder die Weiterführung eines aktuellen Hartsteinbruchs bewegt sich immer im Spannungsfeld zwischen Geologie – Wirtschaft – Politik – Umwelt und formt verschiedene Interessengruppen. Jede Interessengruppe hat ihre Anliegen und Vorgaben, sei es auf juristischer, gesellschaftlicher oder emotionaler Ebene.

Tabelle 4.2: *Beispiele von Schutzobjekten, die bei Entscheidungsprozessen über die Standortplanung von Hartsteinbrüchen berücksichtigt werden müssen. Die Schutzobjekte sind nach nationaler, kantonaler und kommunaler Ebene eingeteilt. Regionale bzw. interkantonale Schutzobjekte (hier nicht aufgelistet) sind bei der Standortplanung ebenfalls zu berücksichtigen.*

Schutzobjekt	Entscheidungsebene
Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN)	national
Moorlandschaft	
Hoch- und Flachmoor	
Jagdbanngebiet	
Auen	
Geotop	
Biosphärenreservate	kantonal
Hoch- und Flachmoor	
Trockenwiesen, -weiden	
Naturschutzgebiet	
Artenschutzgebiete und -objekte	
Wildwechsel	
Waldreservat	kommunal
Kommunale Landschaftsschutzgebiete	

Ziel einer nachhaltigen Planung der Hartsteinversorgung ist es, Lösungen zu finden, welche von allen Interessengruppen getragen werden können. Diesbezüglich laufen in der Schweiz seit 2001 Gespräche, Abklärungen und Projekte.

#### 4.2.1.1 Übergeordnete Interessen

Übergeordnete Interessen, die von allen Interessengruppen angestrebt werden, können unter folgenden drei Punkten zusammengefasst werden (Abbildung 4.2):

- Die Sicherstellung der Mobilität im nationalen Rahmen durch den Bau von Verkehrsinfrastrukturanlagen im öffentlichen und privaten Bereich (Bahn und/oder Strassen)
- Die Erhaltung und Weiterentwicklung des wirtschaftlichen und finanziellen Wohlstands
- Die Erhaltung und gemeinsame Nutzung unseres Lebensraumes

#### 4.2.1.2 Umweltschutz und Raumplanung

Bei der Nutzung und Festlegung von Standorten werden Unternehmen mit Interessen konfrontiert, die aus dem Bereich des Umweltschutzes und der Raumplanung stammen. Während bis vor einigen Jahrzehnten Abbauvorhaben ohne grosse Einschränkungen durchgeführt werden konnten, müssen heute nationale, kantonale und kommunale Schutzobjekte (Tabelle 4.2) sowie raumplanerische Interessen in der Projektplanung berücksichtigt werden.

Zudem haben Private und Organisationen die Möglichkeiten, ihre Interessen einzubringen. Weil der Abbau von Hartsteinen mit Emissionen wie zum Beispiel Lärm oder Staub verbunden ist und ein Abbaustandort unter Umständen ohne Sichtbarrieren aus weiter Entfernung gesehen

werden kann, erhält ein Steinbruch mehr als nur lokalen Charakter. Gerade in den touristisch und landschaftlich attraktiven Regionen des nördlichen Alpenrandes kann eine Abbaustelle für Hartsteine auch langfristig als störend empfunden werden.

#### 4.2.1.3 Weitere Interessen im Rahmen der Standortplanung

Bei einer Standortplanung müssen neben politischen, geologischen und umweltrelevanten auch wirtschaftliche Interessen berücksichtigt werden. Ein Hartsteinbruchunternehmen hat beim Abbau auch finanzielle und wirtschaftliche Interessen zu berücksichtigen. Damit verbunden sind Arbeitsplätze und Gewinne, die nicht nur für das Unternehmen, sondern auch für die Entwicklung einer Wirtschaftsregion wichtig sind.

Zu erwähnen ist auch die Gruppe «Abnehmer/Kunden», die vorwiegend für die Umsetzung von Projekten im Bereich Verkehrsinfrastrukturbau auf Hartsteinprodukte angewiesen ist und an einer flächendeckenden Versorgung interessiert ist. Langfristige Versorgungssicherheiten und garantierte Qualitätseigenschaften sind hier von grosser Bedeutung.

#### 4.2.2 Hartsteinbrüche in BLN-Gebieten als Beispiel eines Interessenkonflikts

Die Balance zwischen Nutzung und Schutz hat in Gebieten, wo Hartsteine abgebaut werden können, in den letzten Jahren vorwiegend im Bereich der nationalen Schutzobjekte des Bundesinventars für Landschafts- und Naturschutz (BLN) zu Interessenkonflikten geführt. Ge-

## Gesellschaft

Mobilität

wirtschaftlicher und finanzieller Wohlstand

Erhaltung und Nutzung des Lebensraums

### Abnehmer/Kunden der Hartsteinproduzenten

**Qualitätsinteressen**  
Hochwertiges Baumaterial  
Alternativbaustoff

**Umsetzen von Projekten**  
Bau von Infrastrukturanlagen  
Gewährleistung von Sicherheitsaspekten  
Sicherstellung der Mobilität

### Hartsteinindustrie

**Wirtschaftliche Interessen**  
Arbeitsplätze  
Marktplatz Schweiz

**Finanzielle Interessen**  
Investition/Umsatz/Gewinn

### Bund/Kantone/Gemeinden

**Wirtschaftliche Interessen**  
Arbeitsplätze  
Standort Schweiz

**Finanzielle Interessen**  
Steuereinnahmen

### Raumplanerische Interessen

**Schutzinteressen** (nationale, kantonale und kommunale Ebene):  
Landschaftsschutz  
Naturschutz  
Moorgebiete, Auen  
Jagdbann- und Artenschutzgebiete

## Hartsteinproduktion

### Weitere Interessengruppen

**Wissenschaft**  
Mineralogisch-petrographische und technische Beurteilung von Gesteinen  
**erweiterter Kreis von Wirtschaftsgruppen**  
Bsp. Logistik, Tourismus, Bauindustrie (Inertstoffdeponien)

### Private

**Schutzinteressen**  
Emissionen (Staubschutz, Lärmschutz)  
Sichtschutz  
Naturschutz  
(Werk) Verkehr

### weiterführende Interessen

### Umweltschutzorganisationen

**Schutzinteressen**  
Naturschutz  
Landschaftsschutz

Abbildung 4.2: Schematischer Überblick über verschiedene Ansprüche von Interessengruppen im Rahmen der Hartsteinproduktion. In den weissen Kästen sind einige grundsätzliche Interessen von Interessengruppen aufgezählt.

### 1. Ereignisphase: Beginn 2001; Dauer 1,5 Jahre.

#### Unterzeichnung einer Absichtserklärung

- Der Grundsatz der Absichtserklärung beinhaltete, dass alle Beteiligten (siehe folgenden Punkt «Unterzeichnende») «die gesamtschweizerische Planung über den Abbau von Hartsteinen an die Hand nehmen. Die Deckung des nachgewiesenen Bedarfs an Hartsteinen und die Wahrung des Schutzes der Natur sowie der nachhaltigen Entwicklung und Nutzung von Landschaft und Wald sind unter Abwägung der massgeblichen öffentlichen Interessen gleichrangig zu berücksichtigen» (ARE 2006).
- Zu den Unterzeichnenden gehörten: Verband Schweizerischer Hartsteinbrüche (VSH), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bundesamt für Strassen (ASTRA), Schweizerische Bundesbahnen (SBB) AG.

### 2. Ereignisphase: Beginn 2003; Dauer 3,5 Jahre.

#### Planungshilfe für die Standortplanung von Hartsteinbrüchen

- Mitwirkung: Das BUWAL (heute BAFU) machte Abklärungen im Bereich Schutzgebiete, das ARE übernahm die Moderation und der VSH finanzierte die konzeptionellen Arbeiten. Es entstand eine Planungshilfe, die neben der Erläuterung von nationalen Interessen (Natur- und Heimatschutz, Hartsteinprodukte für Infrastrukturanlagen) einen Kriterienkatalog zur frühzeitigen Abwägung von Nutzungs- und Schutzinteressen sowie Potenzialkarten von Hartsteinvorkommen beinhaltete. Die Schweizerische Geotechnische Kommission erarbeitete u.a. die geologischen Grundlagen für die Potenzialkarten.

### 3. Ereignisphase: Beginn 2007; Dauer 1,5 Jahre.

#### Ergänzung des Sachplans Verkehr mit Grundsätzen und Erläuterungen zur Hartsteinversorgung

- Mit dem Bundesgerichtsurteil gegen eine Erweiterung des Steinbruchs Arvel (März 2007) wurde seitens Bundesgericht eine «verbindliche überkantonale Koordination oder eine nationale Planung der Hartsteinbrüche verlangt, wenn Konflikte in Gebieten bestehen, die im Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN) aufgeführt sind» (ARE, 2008 a, b). Die Planungshilfe (ARE 2006) und die Absichtserklärung (siehe oben) genügten nicht als Argumentation für die Standortwahl.
- Da ein direkter Zusammenhang zwischen der Versorgung mit Hartsteinen und dem Bau und Betrieb von Verkehrsinfrastrukturen besteht, wurde als weiterführender Schritt der Konfliktlösung der Sachplan Verkehr mit Grundsätzen zur Hartsteinversorgung erweitert.

### 4. Ereignisphase: Beginn 2010; Dauer 2 Jahre.

#### Umsetzung der «Hartsteingrundsätze»

- Mitwirkung: Alle oben genannten Interessengruppen: Vertreten sind neu auch die swisstopo, Bereich Landesgeologie, sowie Umweltverbände (z.B. Pro Natura).
- Der VSH übernimmt in einem von allen Interessengruppen zusammengesetzten Gremium die Projektführung. Ziel ist die geologische, ökologische, wirtschaftliche und politische Evaluation von Alternativstandorten ausserhalb von BLN-Gebieten.
- Zusätzlich wird die gemäss Sachplan Verkehr vorgeschriebene periodische Überprüfung der Grundsätze in der Ergänzung des Sachplans Verkehr durchgeführt.

Abbildung 4.3: Historischer Abriss und aktueller Stand der Behandlung von Aspekten zur Hartsteinversorgung auf nationaler Ebene: Bis heute können vier Ereignisphasen differenziert werden, in denen Lösungsansätze für Probleme betreffend der Standortplanung von Hartsteinbrüchen gesucht und umgesetzt wurden.

stützt auf Artikel 5 des Bundesgesetzes vom 1. Juli 1966 (BUNDESGESETZ 1977) über den Natur- und Heimatschutz (NHG), hat der Bundesrat in der Verordnung über das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BUNDESVERFASSUNG 1966) Gebiete von nationaler Bedeutung ausgeschieden. Es handelt sich dabei um 162 Schutzobjekte (Flächen), die seit 1977 im Rahmen des Bundesinventars in Kraft gesetzt worden sind. Die BLN-Gebiete decken rund 20% der schweizerischen Landesfläche ab, vorwiegend im Jura, in den Alpen und entlang der Voralpen.

BLN-Gebiete sollten gemäss dem Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NHG) vom 1. Juli 1966 (Stand am 1. Januar 2008), Art. 6, in besonderem Masse ungeschmälert erhalten bleiben, «jedenfalls aber unter Einbezug von Wiederherstellungs- oder angemessenen Er-

satzmassnahmen die grösstmögliche Schonung verdienen». Seit 2003 wird sogar eine Aufwertung der BLN-Schutzobjekte ausgearbeitet, da die «anhaltende Bautätigkeit sowie die wirtschaftliche Nutzung nach wie vor Druck auf die Landschaft ausüben» (BAFU 2010). Zum Zeitpunkt der Inventarisierung der schutzwürdigen Objekte stellten die in BLN-Gebieten bestehenden Hartsteinbrüche kein Widerspruch zu den Schutzzielen des BLN dar, da zwischen den Kantonen und den Steinbruchbetreibern bereits vor der Inventarisierung Konzessionsverträge für bestimmte Abbaumengen und -perimeter abgeschlossen wurden, die den Unternehmen einen zeitlich befristeten Abbau innerhalb eines BLN-Schutzobjekts erlaubten.

Interessenskonflikte zeigen sich, wenn bestehende Steinbruchunternehmen bei ablaufenden Abbaukonzessionen



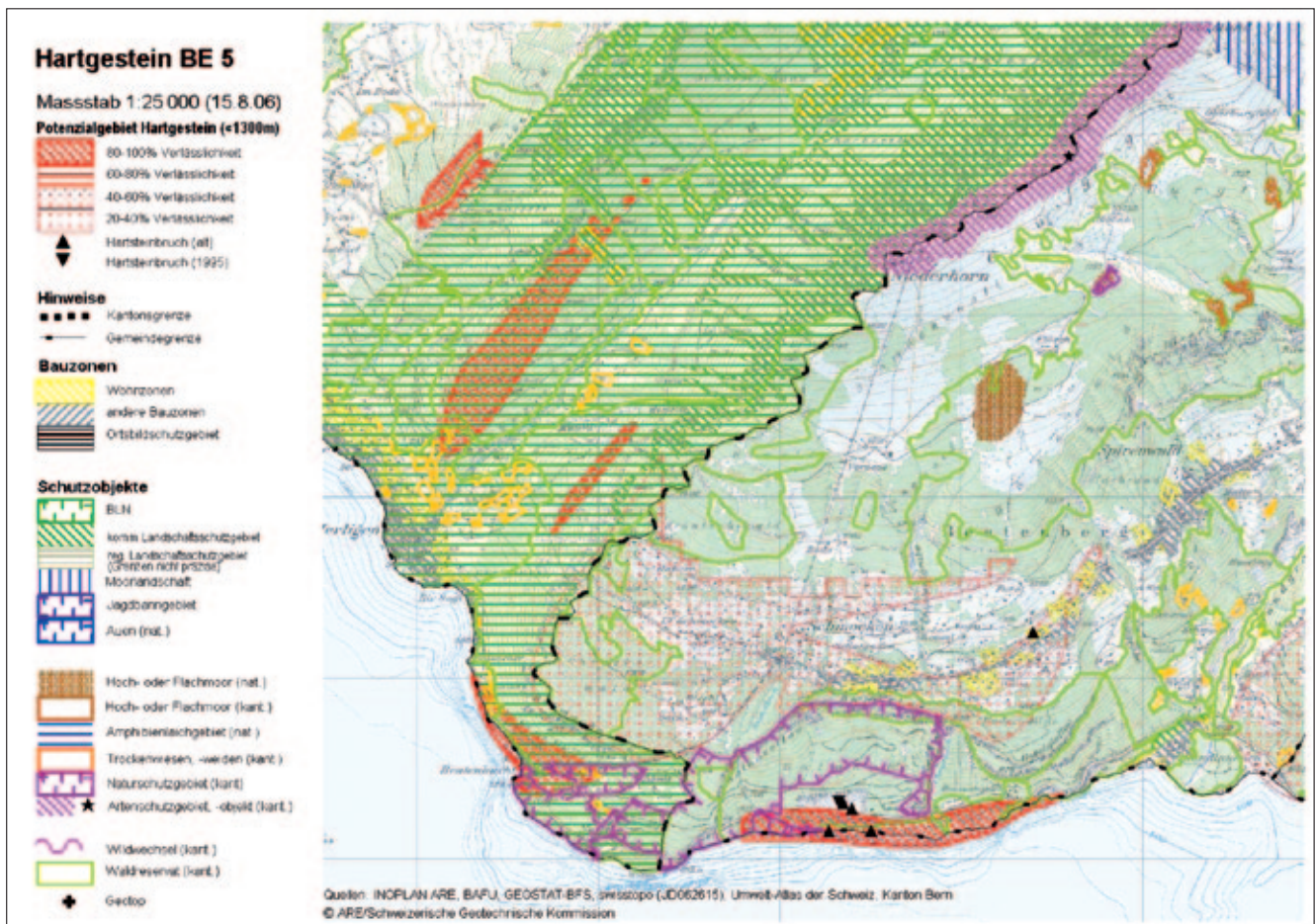


Abbildung 4.4: Beispiel einer Karte mit potenziellen Hartsteinvorkommen (rote Muster) unter Berücksichtigung von nationalen, kantonalen und kommunalen Schutzobjekten. Die Potenzialkarten können über die Internetseite des ARE bezogen werden: [www.are.admin.ch/themen/raumplanung/00244/00435/index.html?lang=de](http://www.are.admin.ch/themen/raumplanung/00244/00435/index.html?lang=de)

den fortführenden Abbau von Hartsteinen in BLN-Gebieten projektieren und durch das oben beschriebene Bundesgesetzes auf Widerstand stossen. Drei Bundesgerichtsentscheidungen führten nach Abwägung der verschiedenen Interessen in den Fällen Campiun (2006) und Arvel (2007) zur Ablehnung einer Steinbrucherweiterung (BUNDESGERICHT 2010). Das Erweiterungsprojekt des Steinbruchs Zingel (2007) wurde vorwiegend wegen der teilweisen Sicherstellung der kurz- und mittelfristigen nationalen Versorgung mit Hartsteinen gut geheissen.

#### 4.2.3 Behandlung von Aspekten zur schweizerischen Hartsteinversorgung auf nationaler Ebene

##### 4.2.3.1 Ereignisphasen

Die Problematik der verschiedenen Ansprüche von Interessengruppen wurde im Jahr 2000 erstmals von Seiten des Verbandes schweizerischer Hartsteinbrüche (VSH) gegenüber der Schweizerischen Vereinigung für Landesplanung (VLP) kommuniziert. Wichtigster Diskussionspunkt waren die unterschiedlichen Interessenziele betreffend der Standortplanung von Hartsteinbrüchen in Natur- und Landschaftsschutzgebieten. In der Folge wurden auf natio-

ner Ebene Diskussionsrunden einberufen, an denen die wichtigsten Interessengruppen (ARE, BAFU, VSH, SBB, ASTRA) vertreten waren. Bislang können vier Ereignisphasen unterschieden werden, in welchen Lösungsschritte zur Beilegung der Interessenkonflikte durchgeführt wurden. Abbildung 4.3 gibt einen Überblick über die bis heute unterscheidbaren Phasen.

##### 4.2.3.2 Planungshilfe für die Standortplanung von Hartsteinbrüchen

Die Planungshilfe für die Standortplanung von Hartsteinbrüchen, welche im Jahr 2006 publiziert wurde (vgl. ARE 2006) stellte einen Meilenstein in der Behandlung der Interessenkonflikte dar. In der Planungshilfe wurden in Potenzialkarten sämtliche Schutzobjekte mitsamt vereinfachten potenziellen Hartsteinvorkommen graphisch erfasst (Abbildung 4.4). Damit werden raumplanerisch potenzielle Hartsteinvorkommen identifiziert, sowie Konflikte betreffend eines möglichen Abbaustandorts aufgezeigt. Als Grundlage für die Potenzialkarten diente eine geologische Grundlagenstudie der SGTK ([www.sgtk.ch](http://www.sgtk.ch) → Hartsteinbrüche). Die geologische Grundlagenstudie dient auch als Basis für die vorliegende Forschungsarbeit.



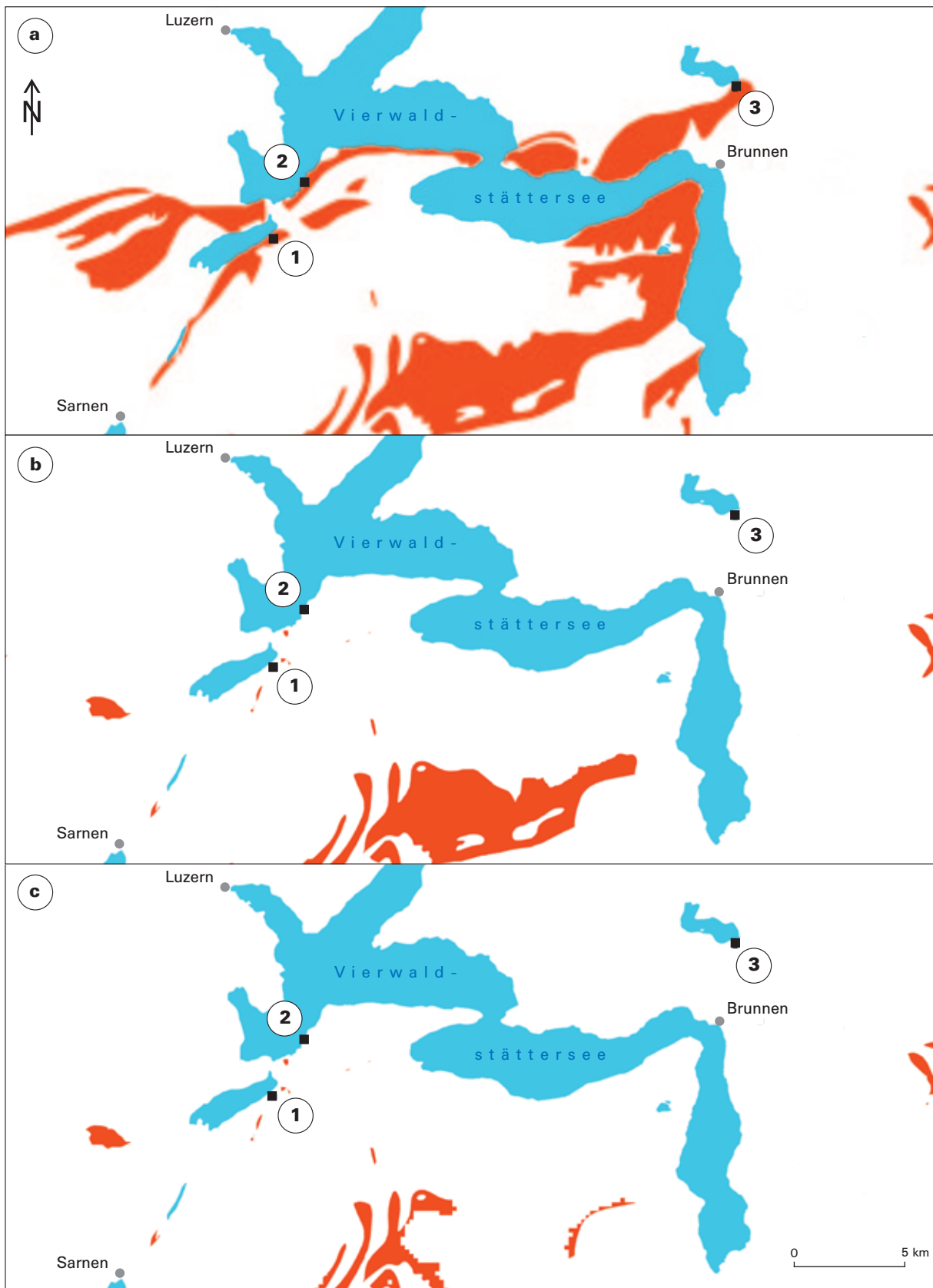


Abbildung 4.5: a) Darstellung der potenziellen Kieselkalkvorkommen im Raum Zentralschweiz. b) Darstellung der Vorkommen unter Berücksichtigung der BLN-Gebiete. c) Darstellung unter Berücksichtigung der BLN-Gebiete und der Abbauobergrenze von 1300 m ü. M. Schwarze Vierecke entsprechen den im Jahr 2010 aktiven Kieselkalksteinbrüchen. 1) Rozloch, 2) Kehrsiten, 3) Zingel. Daten aus dem Geotechnischen Umwelt Atlas (GUA) der SGTK. Stand: Dezember 2010.

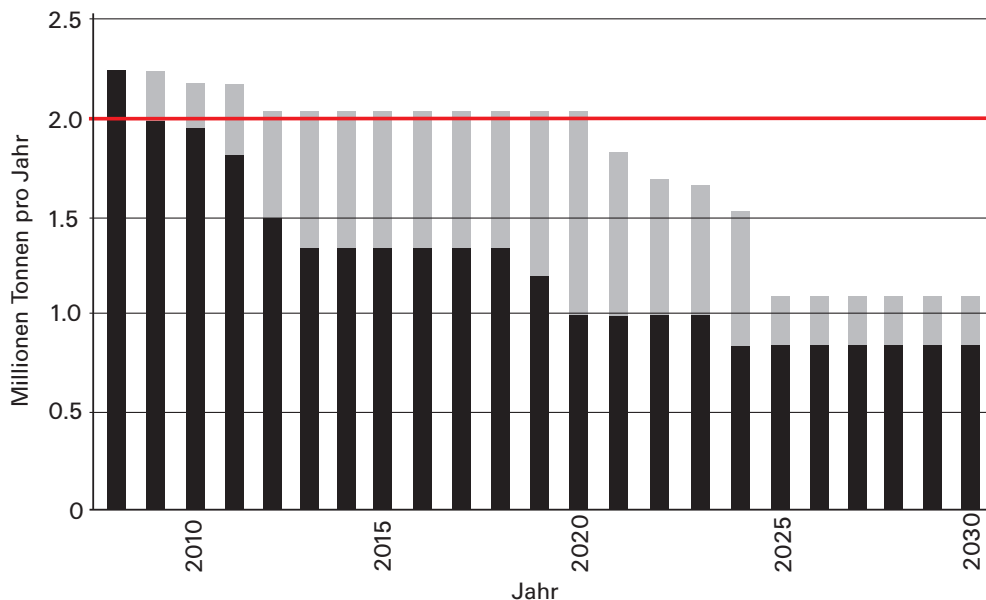


Abbildung 4.6: Darstellung der 2008 prognostizierten Hartsteinproduktion (ARE 2008 a). Die rote Linie zeigt den jährlichen Durchschnittsverbrauch von Hartsteinen in der Schweiz. Die grauen Säulen stellen die prognostizierten Produktionsmengen unter Berücksichtigung aller 2008 bestehenden Steinbrüche dar. Die schwarzen Balken zeigen die Entwicklung der Hartsteinversorgung ohne Produktionsleistungen der Steinbrüche Zingel und Arvel, deren Abbaugelände in BLN-Gebieten liegen.

## Geologische Grundlagenstudie der SGTK

### Datenerhebung

Für die Erstellung der Potenzialkarten wurden Gesteinsarten in die Datenerhebung miteinbezogen, von denen bekannt ist, dass sie in den letzten Jahrzehnten für die Herstellung von Hartsteinprodukten genutzt wurden. Bei den Gesteinstypen handelt es sich um Kieselkalke, Glaukonitsandsteine, Flyschsandsteine sowie spezielle Molasse-sandsteine. Gesteinsvorkommen, in denen diese Gesteinstypen vorkommen, werden als potenzielle Hartsteinlithologien bezeichnet.

Die Datenerhebung wurde für unterschiedliche Massstabsbereiche durchgeführt. Zwei Übersichts-massstäbe 1: 500 000 und 1: 200 000 wurden auf Basis der geologischen Karte der Schweiz 1: 500 000 (Version 2000) sowie der geotechnischen Karte 1: 200 000 (1964–1967) erfasst. Für die Darstellung im Detailmassstab 1: 25 000 wurden Daten aus publizierten geologischen Karten des Geologischen Atlas der Schweiz 1: 25 000 sowie geologische Spezialkarten im Massstab 1: 25 000 bis 1: 50 000 verwendet.

### Verlässlichkeit

Um aus den verschiedenen und heterogenen Datenquellen im Detailmassstab 1: 25 000 eine verbindliche Darstellungsebene potenzieller Hartsteinvorkommen abzuleiten, wurde für alle erfassten Hartsteinflächen ein Verlässlichkeitsparameter abgeschätzt. Der Parameter gibt an, in wie weit eine Fläche oder eine Flächengrenze für weiterführende Analysen als sicher und verbindlich gelten kann. Er wird aus drei Beurteilungskriterien berechnet, welche die wichtigsten Differenzen der Quelldaten berücksichtigen:

- A: Präzision der Gesteinszuweisung der Fläche bezüglich der gewünschten Hartsteinlithologie Kieselkalk, Glaukonitsandstein, Flyschsandstein und Molasse-sandstein
- B: Genauigkeit der aus der Karte übernommenen Flächengrenzen bezüglich der geographischen Lage
- C: Allgemeine Gültigkeit der Arbeit bezüglich heutiger wissenschaftlicher Interpretation

Aus dem Gesamtwert (GW) der Verlässlichkeit, der über die Formel  $17 \times A + 2 \times B + C$  bestimmt wird, ergibt sich ein Darstellungsparameter ( $DP = GW/20$ , Wert zwischen 0 und 100) des Verlässlichkeitswerts, mit welchem die Hartsteinflächen in fünf Abstufungen klassifiziert werden können.

### Darstellung potenzieller Hartsteinvorkommen

Für die Darstellung der potenziellen Hartsteinvorkommen in den Potenzialkarten der Planungshilfe des ARE wurden die Gesteinstypen zu einer Hartsteinlithologie zusammengefasst und mit den entsprechenden Verlässlichkeitswerten versehen. Inwiefern sich dabei potenzielle Hartsteinvorkommen als Abbaustandorte eignen, kann aus den grafischen Darstellungen der Planungshilfe nicht abgeleitet werden.

### Wirtschaftliche Kriterien

In der Planungshilfe wurden auch wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt, welche von Seiten des Verbandes schweizerischer Hartsteinbrüche eingebracht wurden. Über 1300 m ü.M können aus betriebswirtschaftlichen Gründen keine Abbaustandorte geplant und umgesetzt werden (vgl. ARE 2006). Grund dafür sind jahreszyklische Witterungs-

einflüsse, die Abbaumöglichkeiten zeitlich einschränken. Logistische sowie infrastrukturelle Probleme können ebenfalls Einschränkungen bei Abbauvorhaben verursachen.

#### **4.2.3.3 Neue Standorte ausserhalb von BLN-Gebieten: «Alternativgebiete» als Lösungsansatz**

Der Abbau von Hartstein in einem BLN-Gebiet ist gemäss Bundesgesetz nicht prinzipiell ausgeschlossen (vgl. Kapitel 4.2.2). Dennoch hat das Bundesgericht als höchste juristische Entscheidungsinstanz Hartsteinabbauvorhaben, bei denen projektierte Abbauperimeter BLN-Gebiete tangierten, nicht gut geheissen. Im Gerichtsurteil zum Abbauvorhaben Arvel wird einerseits eine überkantonale Koordination für die Standortplanung gefordert. Andererseits verweist das Bundesgericht auf «Alternativstandorte» für Hartsteinbrüche. Der Begriff «Alternativstandorte» hat sich aus der «Planungshilfe für die Standortplanung von Hartsteinbrüchen» entwickelt und bezeichnet potenzielle Hartsteinvorkommen, in denen mögliche Abbaustandorte keinen Interessenkonflikt mit dem BLN verursachen.

Die Potenzialkarten weisen Gebiete aus, in denen keine BLN-Schutzgebiete von einem eventuellen Standort in einem potenziellen Hartsteinvorkommen betroffen wären. Unter Berücksichtigung der maximalen Abbauobergrenze von 1300m.ü.M. werden die potenziellen Hartsteinvorkommen, die für den Abbau in Betracht gezogen werden, stark eingegrenzt. In Abbildung 4.5 ist als Beispiel der Raum Zentralschweiz mit potenziellen Kieselkalkvorkommen inklusive bestehender Hartsteinbrüche sowie Schutz- und Nutzungsansprüchen dargestellt.

In der vierten Ereignisphase (Abbildung 4.3) nimmt man sich dieser Problematik an: Im Sinne einer interkantonalen und nationalen Planung haben sich das ARE und der VSH bereit erklärt, zusammen mit allen Interessengruppen Gebiete ausserhalb von BLN-Gebieten und unterhalb von 1300 m ü.M. aus geologischer, wirtschaftlicher, politischer und umweltrelevanter Sicht zu evaluieren. Mit einem Krite-

rienkatalog, der zu Beginn der vierten Ereignisphase festgelegt wurde, werden diese potenziellen Hartsteinvorkommen bewertet. Bei positiver Bewertung werden politische Vertreter von Kantonen und Gemeinden beigezogen, welche die politische Akzeptanz eines möglichen Abbauvorhabens in der Region prüfen.

#### **4.2.4 Lückenhafte Versorgung mit Hartsteinen**

Zwischen der dritten und vierten Ereignisphase der Behandlung der Hartsteinaspekte auf nationaler Ebene wurde bei einer Analyse der konzessionierten Abbaumengen aller schweizerischen Hartsteinbrüche festgestellt, dass mit den bewilligten Abbauprojekten die nationale Versorgung mit Hartsteinen nur knapp über zwei Jahre gewährleistet war (ARE 2008 a). Bereits ab 2010 musste bei auslaufender Konzession für die Steinbrüche Zingel und Arvel mit einem kontinuierlichen Produktionsrückgang und einem entsprechenden Defizit an verschiedenen Hartsteinprodukten gerechnet werden (Abbildung 4.6).

Für den Steinbruch Zingel wurde deshalb 2008 eine Ausnahmeregelung vereinbart. Diese sollte einerseits mittelfristig (10 Jahre) zur Sicherung der nationalen Versorgung beitragen. Andererseits wurde mit der Ausnahmeregelung ein Zeitraum für die Untersuchung von Abbaugebieten ausserhalb von Interessenkonfliktgebieten geschaffen.

Für den Steinbruch Arvel musste ein vom Unternehmen geplantes Erweiterungsvorhaben gemäss Bundesgerichtsentscheid (März 2007) neu ausgearbeitet werden.

#### **4.2.5 Schlussfolgerung**

Die Abwägung zwischen nationalen und kantonalen Zuständigkeiten ist im Falle von Hartsteinen und mineralischen Rohstoffen diffizil, liegt doch das Bergrecht auf kantonaler Ebene aber die übergeordneten, umweltrelevanten Gesetze und Bestimmungen auf nationaler Ebene.

## 5. Die Kieselkalkvorkommen der Schweiz

### 5.1 Einteilung der Kieselkalke

Die für die Nutzung wichtigen Kieselkalke der Schweiz lassen sich nach paläogeographischer Herkunft und Ablagerungszeiträumen in vier Varietäten unterscheiden (Abbildung 5.1):

- **Helvetischer Kieselkalk des Hauteriviens** (Frühe Kreide): Helvetische Kieselkalk-Formation
- **Helvetischer Kieselkalk des Valanginens** (Frühe Kreide): Diphoides-Formation und weitere
- **Kieselkalk aus dem Südalpin** (früher bis mittlerer Lias): Moltrasio-Formation
- **Kieselkalke der Préalpes médianes** (Lias): Die Kieselkalke aus den Préalpes médianes können wegen ihrer unterschiedlichen Entstehungsgeschichten nicht einer einzigen Formation zugeordnet werden (vgl. METTRAUX 1989). Deshalb wird der Begriff Kieselkalk für die Préalpes médianes ausser in spezifischen Beschreibungen im Plural verwendet

In der Schweiz treten neben den vier genannten Varietäten weitere Kieselkalkvorkommen auf: So finden sich im Lias der Glarner Alpen in der Spitzmeilen- und Sexmor-Formation (TRÜMPY 1949) sowie im Lias der Ostalpinen Decken Kieselkalkvorkommen (vgl. Geologischer Atlas 1:25 000, Blatt 81 Albulapass). Da diese Vorkommen im Bezug auf die Nutzung im Verkehrsinfrastrukturwesen nie an Bedeutung erlangten, wurden sie nur am Rande in die Arbeit einbezogen.

### 5.2 Der Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation

**Allgemeine Begriffserklärungen:** KAUFMANN (1867) hat in der Monographie über die «geologische Beschreibung des Pilatus» den Begriff «Kieselkalk» eingeführt. Die damals festgesetzte Formationsobergrenze des Kieselkalk wird noch heute als Grenze zur jüngeren Tierwis- bzw. Schrattenkalk-Formation verwendet. Die Gesteinsabfolge der Helvetischen Kieselkalk-Formation wurde zur Zeit des Hauterivien<sup>1</sup> abgelagert. Obwohl der Begriff «Helvetische Kieselkalk-Formation» gemäss Nomenklatur des SCHWEIZERISCHEN KOMITEES FÜR STRATIGRAPHIE (SKS) nur noch als informelle Formation aufgeführt ist, wird aus historischen Gründen und auch wegen der weiten Verbreitung in der Literatur an dieser Bezeichnung festgehalten (SKS 2005).

<sup>1</sup> Internationale Kommission für Stratigraphie (ICS 2009) Hauterivien: 133,9–130 ± 1,5 Millionen Jahre.

FUNK (1969) beschrieb das Typusprofil der Helvetischen Kieselkalk-Formation am Pilatus:

Es handelt sich um eine Abfolge von leicht sandigem Kieselkalk, die an der Basis aus einem glaukonitischen, leicht schiefrigen Mergelkalk hervorgeht – als Gemsmättli-Member bezeichnet – und durch eine Echinodermenbrekzie und einen glaukonitischen, sandigen Kalk, dem Lidernen-Member unterbrochen wird. Abgeschlossen wird die Helvetische Kieselkalk-Formation gegen die jüngere Tierwis- bzw. Schrattenkalk-Formation durch eine Echinodermenbrekzie.

Eine weniger detaillierte, dafür auf verschiedene Decken ausgelegte Beschreibung der Helvetischen Kieselkalk-Formation in der Zentralschweiz liefert BRÜCKNER (1947).

**Paläogeografische Verteilung im alpinen Raum:** Die Helvetische Kieselkalk-Formation besteht aus Gesteinen der helvetischen Sedimentdecken, die entlang des Europäischen Kontinentalrandes auf einer Karbonatplattform abgelagert wurden (FUNK 1969, 1971, WYSSLING 1986, FUNK et al. 1987, VAN DE SCHOOTBRUGGE 2001, FÖLLMI et al. 2007, PFIFFNER 2009).

**Vorkommen und Mächtigkeit:** Der Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation erstreckt sich in der Schweiz entlang des nördlichen Alpenrandes vom Kanton Wallis über das Berner Oberland, die Zentralschweiz bis ins St. Galler Rheintal (Abbildung 5.1). In den Westalpen setzt sich das Helvetikum als direktes laterales Äquivalent im Dauphinois fort (PFIFFNER 2009). Die Helvetische Kieselkalk-Formation erfährt in den Savoyer Voralpen allerdings eine Faziesänderung, so dass das Gestein nicht mehr explizit als Kieselkalk aufgeführt wird: Aus den siliziumreichen Gesteinen werden in der Region Albertville–Domène Mergel und dunkle Kalke, die wenig silifiziert sind, jedoch stets noch Schwammnadeln und detritischen Quarz aufweisen. In der mesozoischen Sedimentabfolge des Dauphinois wird die frühe Kreide als Wechsellagerung von mergeligen Kalken und Kalk ausgeschieden (vgl. DEBELMAS 1974, PFIFFNER 2009). Detaillierte Angaben sind in den Erläuterungen zu den «Cartes géologiques de la France à 1/50000» zu finden. Im östlicher Richtung kann die Kieselkalk-Formation bis nach Vorarlberg verfolgt werden (WYSSLING 1986).

Je nach tektonischer Einheit kann die Mächtigkeit der Helvetischen Kieselkalk-Formation mehrere hundert Meter betragen. FICHTER (1934) schätzt sie in der Zentralschweiz beim Niderbauen/NW (Koord. 684.150/199.700) auf über 500 Meter. In der Ostschweiz beträgt die Mächtigkeit der Helvetischen Kieselkalk-Formation am Alvier ebenfalls über 500 Meter (FUNK 1971), wobei die Formation noch



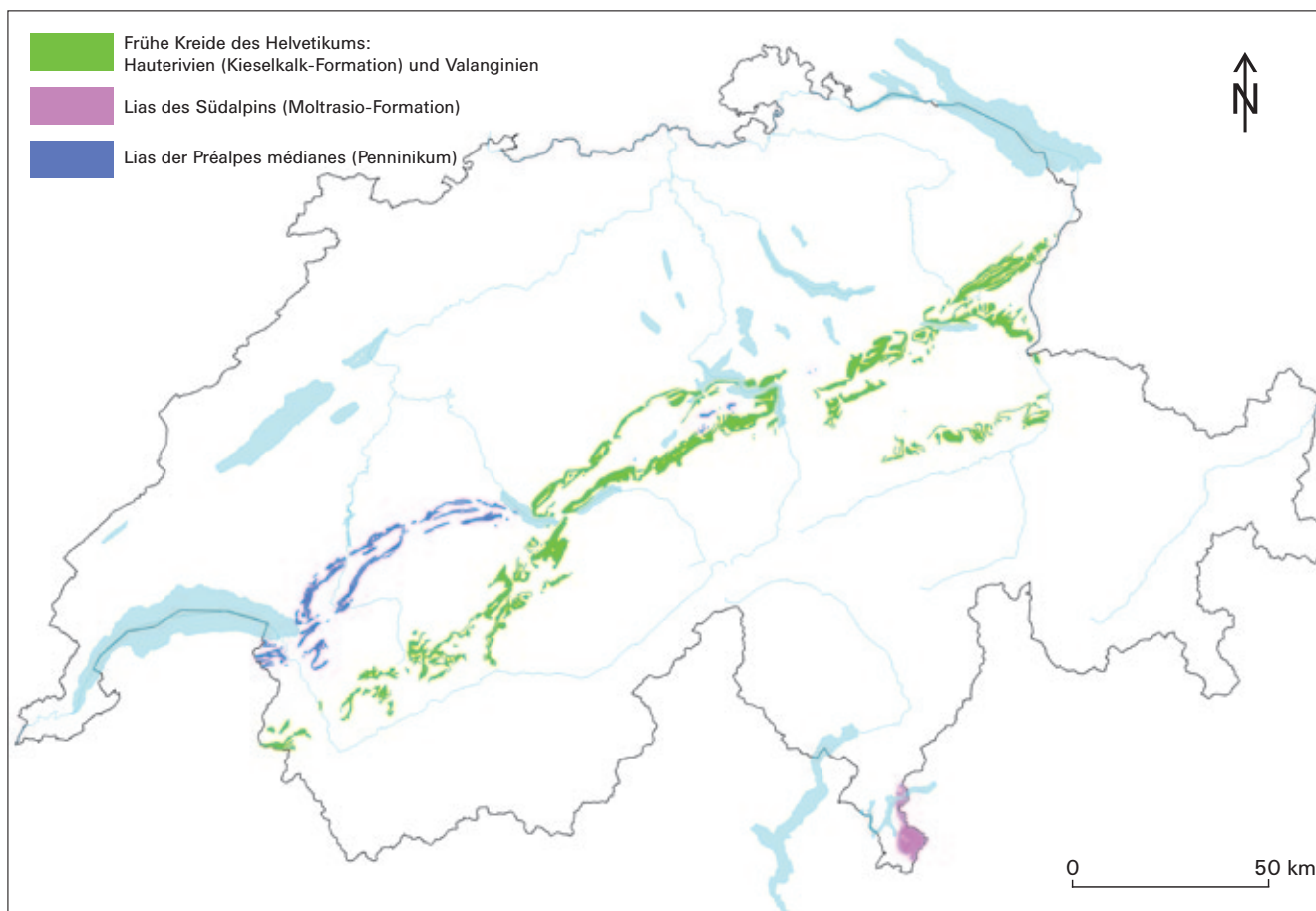


Abbildung 5.1: Kieselkalkvorkommen in der Schweiz: Die Kieselkalke des Hauteriviens und Valanginiens sind der Übersicht halber zusammengefasst. Auszug aus der Geologischen Karte der Schweiz 1: 500 000 (V1, 2005).

an der Grenze zu Liechtenstein am Fläscher Berg (Koord. 757.200/212.150) 500 Meter mächtig geschätzt wird (DIETRICH 1982).

FUNK (1971) und MOJON (1984) geben anhand von diversen Profilaufnahmen in der Helvetischen Kieselkalk-Formation vom Raum Ostschweiz über die Zentralschweiz bis ins Berner Oberland eine Vielzahl von Mächtigkeitsangaben an. In Tabelle 5.1 sind aus den Publikationen von FUNK (1971) und MOJON (1984) sowie weiteren Veröffentlichungen Angaben über die (Teil-) Mächtigkeit der gesamten Helvetischen Kieselkalk-Formation zusammengestellt. Es ist zu beachten, dass der «untere» Kieselkalk dem älteren Teil der Kieselkalk-Formation bis zum Lidernen-Member entspricht. Der «obere» Kieselkalk umfasst die Abfolge zwischen dem Lidernen-Member und der jüngsten Echinodermenbreckzie.

**Abbau und Nutzung:** Der Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation wurde im Jahr 2009 in der Schweiz an sechs Standorten genutzt (vgl. Kapitel 4 «Abbau von Hartstein»). Es sind dies die Steinbrüche Blausee Mitholz/BE, Balmholz/BE, Rotzloch/NW, Kehrsiten/NW, Zingel/SZ sowie Schnür/SG.

Vier der sechs aufgeführten Abbaustandorte sind im Bezug auf die Produktionskapazität von Hartsteinprodukten von nationalem Interesse (ARE 2008 b). Zwei Hartstein-

bruchunternehmen produzierten weniger als 5% des gesamtschweizerischen Schotterbedarfs und weniger als 10% des gesamtschweizerischen Hartsteinbedarfs.

Ein weiterer Steinbruch in der Helvetischen Kieselkalk-Formation Schnür/SG am Walensee beschränkt den Abbau auf sehr geringe Mengen bzw. Rekultivierungsmassnahmen, da bis Ende 2010 der gesamte Abbau und Rückbau der Aufbereitungsanlagen abgeschlossen sein wird.

### 5.3 Kieselkalk des Helvetischen Valanginiens

Im helvetischen Valanginiens gibt es mehrere Formationen, die verkieselte Kalke aufweisen können. Aus der Literatur geht nicht eindeutig hervor, welche Formationen ausser der Diphyoides-Formation eine Verkieselung zeigen. Einzig in der westlichen Fortsetzung der Diphyoides-Formation, der Sichelkalk-Formation werden noch Wechselagerungen von Kieselkalkbänken mit anderen Gesteinen beschreiben (Geologischer Atlas 1: 25 000, Blatt 32 Gemmi).

**Allgemeine Begriffserklärungen:** Der Begriff «Helvetischer Valanginiens-Kieselkalk» ist nomenklatorisch nicht korrekt (SKS 2005) und entspricht nicht der Usanz bei der Landesgeologie. Er umschreibt eine sedimentäre Sequenz

von (teil-)verkieselten Kalken aus dem Ablagerungszeitraum des Valanginiens<sup>2</sup>. Vom stratigraphischen Standpunkt betrachtet handelt es sich um Gesteine, die älter als die Gesteine der Helvetischen Kieselkalk-Formation sind und an letztere angrenzen. Sie zeigen neben einer durchgehenden Verkieselung Silixknollen und -lagen.

Silexlagen und verkieselte Muscheltrümmer können auch im Betliskalk, der Nord- bis Mittelfazies des helvetischen Valanginiens, beobachtet werden (BURGER & STRASSER 1981); eine Verkieselung ähnlicher Art wie im Diphyoides-Kalk oder in der Helvetischen Kieselkalk-Formation kann aber auf Grund der sedimentologischen Beschreibung von BURGER & STRASSER (1981) ausgeschlossen werden.

**Paläogeografische Verteilung im alpinen Raum:** Die Diphyoides-Formation besteht aus Sedimentgesteinen der helvetischen Sedimentdecken, die entlang des Europäischen Kontinentalrandes im südlichen Faziesraum der Zentral- und Ostschweiz abgelagert wurden (FUNK 1969, 1971, MOJON 1984, WYSSLING 1986, FUNK et al. 1987, FÖLLMI et al. 2007, PFIFFNER 2009).

**Vorkommen und Mächtigkeit:** Die räumliche Ausdehnung der Diphyoides-Formation erstreckt sich von Vorarlberg im Osten über den Raum Zentralschweiz bis ins Kiental im Berner Oberland in westlicher Richtung. Aus Darstellungsgründen wurde das Helvetische Valanginien in Abbildung 5.1 mit der Helvetischen Kieselkalk-Formation zusammengefasst. Im Geologischen Atlas 1: 25 000, Blatt 87 Adelboden, wird das Valanginien des Helvetikums als Sichel-Kalk aufgeführt (vgl. auch Geologischer Atlas 1: 25 000, Blatt 6 Lauterbrunnen).

Die Mächtigkeit des Valanginien-Kieselkalks kann auf Grund der Literaturangaben nicht eindeutig angegeben werden: Auf dem geologischen Atlasblatt Nr. 6 Lauterbrunnen wurde explizit eine verkieselte Einheit als Diphyoides-Kalk ausgeschieden die ca. 30 Meter mächtig ist. Das übrige Valanginien wird als Kieselkalk (c2k) und Mergel des Valanginien aufgeführt. Es ist davon auszugehen, dass die Mächtigkeit des Helvetischen Valanginien-Kieselkalks im nord-östlichen Teil des Atlasblatts Lauterbrunnen bzw. im Raum Interlaken über 200 Meter beträgt. In Vorarlberg wird die Mächtigkeit der Diphyoides-Formation auf maximal 90 Meter angegeben (WYSSLING 1986).

Die südwestliche Fortsetzung des Valanginien-Kieselkalks wird im Raum Gemmi auf eine Wechsellagerung von Kieselkalken mit Kalk und Schiefern reduziert, wobei die durchgehende Verkieselung des Gesteins zurücktritt und sich auf einzelne Kieselkalkbänke konzentriert. Genauso tritt gegen Osten im Diphyoides-Kalk eine Faziesänderung auf, so dass zum Beispiel HANTKE (1961) spätestens in der Zentralschweiz am Urnersee den Kalk des helvetischen Valanginien als reinen, sequenziell schwach siltigen Kalk mit sandigen Schichtfugen beschreibt.

**Abbau und Nutzung:** Im Gebiet der Ortschaft Ringgenberg wurden mehrere Steinbrüche im Helvetischen Valangi-

nien-Kieselkalk betrieben, wovon heute nur noch einer in Betrieb ist: Steinbruch Ringgenberg/BE (AG Balmholz). Früher wurde das Gestein zu Bahnschotter verarbeitet.

## 5.4 Kieselkalk der Moltrasio-Formation

**Allgemeine Begriffserklärungen:** Den Namen trägt die Moltrasio-Formation von der Typuslokalität Moltrasio am Westufer des Lago di Como (Italien). Die früher verwendete Bezeichnung für den Hauptteil dieser Formation, «Lombardischer Kieselkalk» (Geologischer Atlas 1: 25 000, Blatt 69 Lugano sowie Geologischer Atlas 1: 25 000, Blatt 39 Tesserete), ist gemäss dem SCHWEIZERISCHEN KOMITEE FÜR STRATIGRAPHIE (SKS) heute nicht mehr gültig. Die Moltrasio-Formation entspricht dem Lombardischen Kieselkalk und schliesst das jüngere Molino-Member von WIEDENMAYER (1980) ein. Das Molino-Member wiederum wird von roten Knollenkalken der Morbio-Formation überlagert.

Der einst verwendete Ausdruck «Lombardischer Kieselkalk» kennzeichnet die geografische Ausdehnung der heutigen Moltrasio-Formation: Sie reicht in den lombardischen Alpen vom Lago Maggiore im Westen bis hin zum Lago d'Iseo im Osten.

Die Moltrasio-Formation beinhaltet in den jungen Ablagerungen neben dem Kieselkalk weitere Gesteine. Diese treten aber im Vergleich mit der mächtigen Kieselkalkabfolge mengenmässig untergeordnet auf.

**Paläogeografische Verteilung im alpinen Raum:** Die Moltrasio-Formation besteht aus Sedimentgesteinen (südlich der Insubrischen Linie), die entlang des adriatischen Kontinentalrandes im lombardischen Becken gebildet wurden (BERNOULLI 2007, PFIFFNER 2009).

**Vorkommen und Mächtigkeit:** Das Vorkommen des Kieselkalks kann auf das Nudo-Becken zwischen dem Lago Maggiore und Arzo sowie das Generoso-Becken zwischen Arzo und dem Lago di Lecco eingegrenzt werden (Abbildung 5.2). Das Nudo-Becken ist durch eine syngenetische Bruchzone vom Generoso-Becken getrennt, die durch eine rhätisch-liasische Dehnungstektonik verursacht wurde (BERNOULLI 1964).<sup>3</sup>

Die Moltrasio-Formation umfasst als mehrere tausend Meter mächtige Serie im Generoso-Becken die Zeitspanne vom frühen Hettangien zum Pliensbachien<sup>4</sup> (BERNOULLI 1964). Dies entspricht ungefähr einem Zeitraum von 10–12 Millionen Jahren. Während der Kieselkalk am Rand des Generoso-Beckens tektonisch bedingt nur eine geringe Mächtigkeit aufweist, steigt diese Fazies im zentralen Bereich des Beckens auf über 4000 Meter Mächtigkeit an.

Im Nudo-Becken westlich der Luganer Linie erreicht der Kieselkalk eine maximale Mächtigkeit von über 1800

<sup>2</sup> Internationale Kommission für Stratigraphie (ICS 2009) Valanginien: 140,2±3–133,9 Millionen Jahre.

<sup>3</sup> Eine neuere Theorie (SCHENKER 2008) verbindet die Strukturen des Nudo- und Generoso-Beckens sowie die Genese des Kieselkalks in der Moltrasio-Formation mit einem grossräumigen Impakt-Ereignis. Eine Publikation darüber blieb bis dato aus.

<sup>4</sup> Internationale Kommission für Stratigraphie (ICS 2009): Hettangien bis Pliensbachien: 199,6±0,6–189,6±1,5 Millionen Jahre.

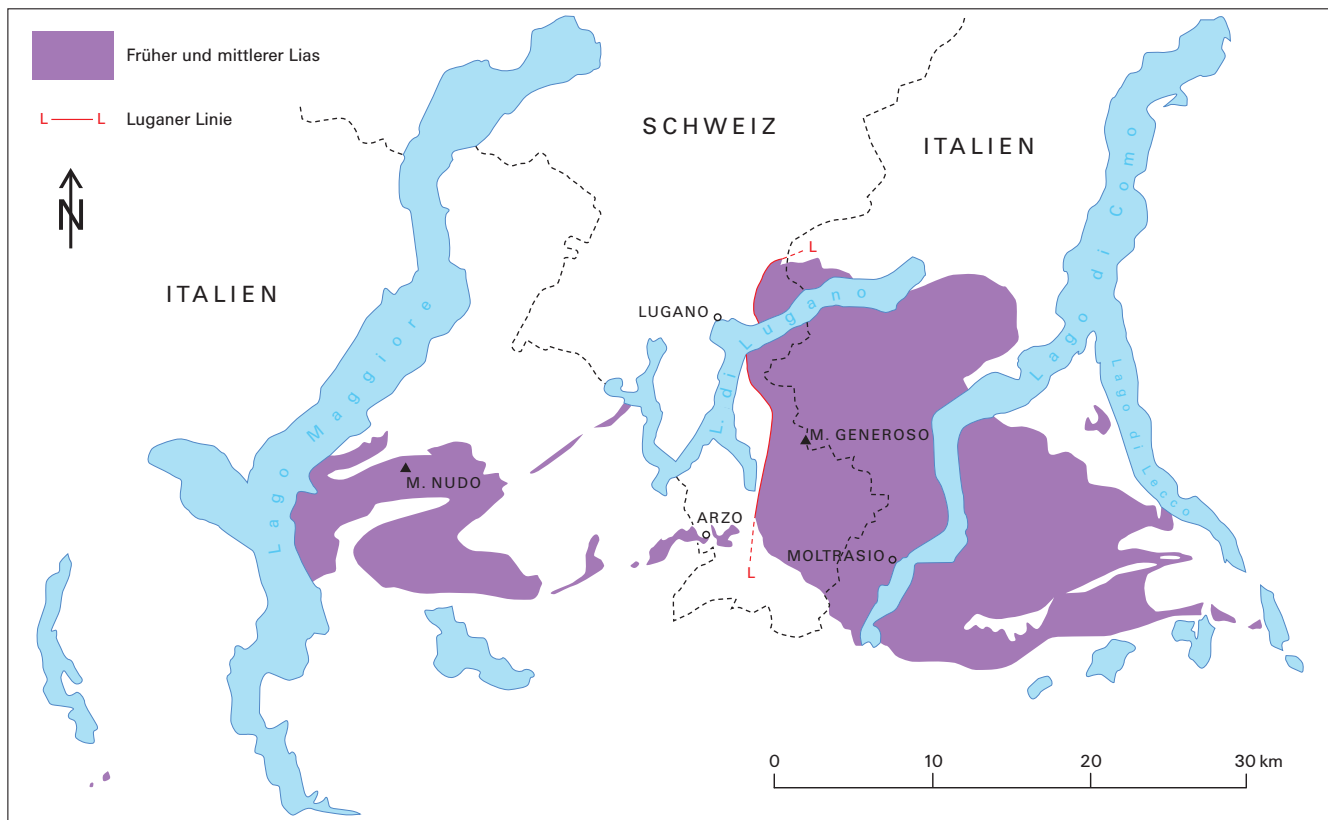


Abbildung 5.2: Übersichtskarte zur Verteilung der westlombardischen Ablagerungen aus dem frühen und mittleren Lias. Da sich der Kieselkalk der Moltrasio-Formation auf den frühen Lias beschränkt, entsprechen die ausgeschiedenen Flächen nur ungefähr der Verbreitung des Kieselkalks. Modifiziert nach BERNOULLI (1964).

Metern, wovon 300 Meter auf den mittelliasischen Medolo entfallen (teils merglige, nicht kieselige Kalke; VAN HOUTEN 1929, BERNOULLI 1964, 1980).

**Abbau und Nutzung:** Im Kanton Tessin wird aktuell kein Kieselkalk-Steinbruch für die Herstellung von Hartsteinprodukten betrieben. Als historisch wichtige Abbaustellen können der Steinbruch von Salorino, diverse Abbaustellen am nördlichen Monte Generoso auf Seeniveau sowie ein markanter Steinbruch auf der Gandirastrasse an der Grenze zu Italien aufgeführt werden.

**Bemerkung:** Eine detaillierte biostratigraphische Gliederung der sedimentären Abfolge ist wegen dem spärlichen Auftreten von Fossilien kaum möglich. Zwar hat BERNOULLI (1964) anhand von einigen wenig ausgedehnten Aufschlüssen versucht, eine Neugliederung vorzunehmen.<sup>5</sup> Im Gegensatz zu den meisten Sedimentserien kann aber im Feld eine stratigraphische Unterteilung des Kieselkalks bzw. der Moltrasio-Formation nur auf Grund von Kriterien wie 1) Vorkommen von Silexknollen und -bändern, 2) Ausbildungsart der Silexknollen und -bänder sowie 3) spezifischer, präalpiner Verformungsstrukturen (hauptsächlich Rutschungen) vorgenommen werden. Bei der Anwendung dieser Kriterien im Feld muss aber davon ausgegangen werden, dass im ganzen Raum des Generoso-Beckens ähnliche Bildungsbedingungen geherrscht haben müssen.

<sup>5</sup> Erste Gliederung des lombardischen Kieselkalks: FRAUENFELDER (1916).

## 5.5 Kieselkalke der Préalpes médianes

**Allgemeine Begriffserklärungen:** Wie bereits METTRAUX (1989) in ihrer Arbeit über die Sedimentologie, Paläotektonik und Paläoozeanographie der «Préalpes médianes» beschrieben hat, wurden in vorangehenden Arbeiten die unterschiedlichsten Namen für die Lias-Kieselkalke der Préalpes médianes verwendet. Das Spektrum reicht von «Calcaire siliceux» über «Formation siliceuse» bis hin zu «Calcaires bleuâtres». In der vorliegenden Studie wird trotz unterschiedlichen Bildungsmilieus der allgemeine Ausdruck «Kieselkalk der Préalpes médianes» verwendet.

Es fällt auf, dass in der Literatur unterschiedliche Angaben über die chronostratigraphische Einordnung der verkiesselten Gesteine der Préalpes médianes gemacht wurden. Nach METTRAUX (1989) wurden die Kieselkalke der Préalpes médianes zwischen dem Hettangien und dem Toarcien<sup>6</sup> abgelagert.

GISIGER (1967) legt in der Namensgebung der «Formation siliceuse» erstmals nahe, dass neben dem Kalk ein kryptokristalliner Zement aus sekundärer Silifizierung mit wenig tonigem Anteil vorliegt.

**Paläogeografische Verteilung im alpinen Raum:** Die Kieselkalke aus den Préalpes médianes gehören den mittelpenninischen Sedimentgesteinen an, die im Bereich des

<sup>6</sup> Internationale Kommission für Stratigraphie (ICS 2009): Hettangien bis Toarcien:  $199,6 \pm 0,6$ – $183 \pm 1,5$  Millionen Jahre.

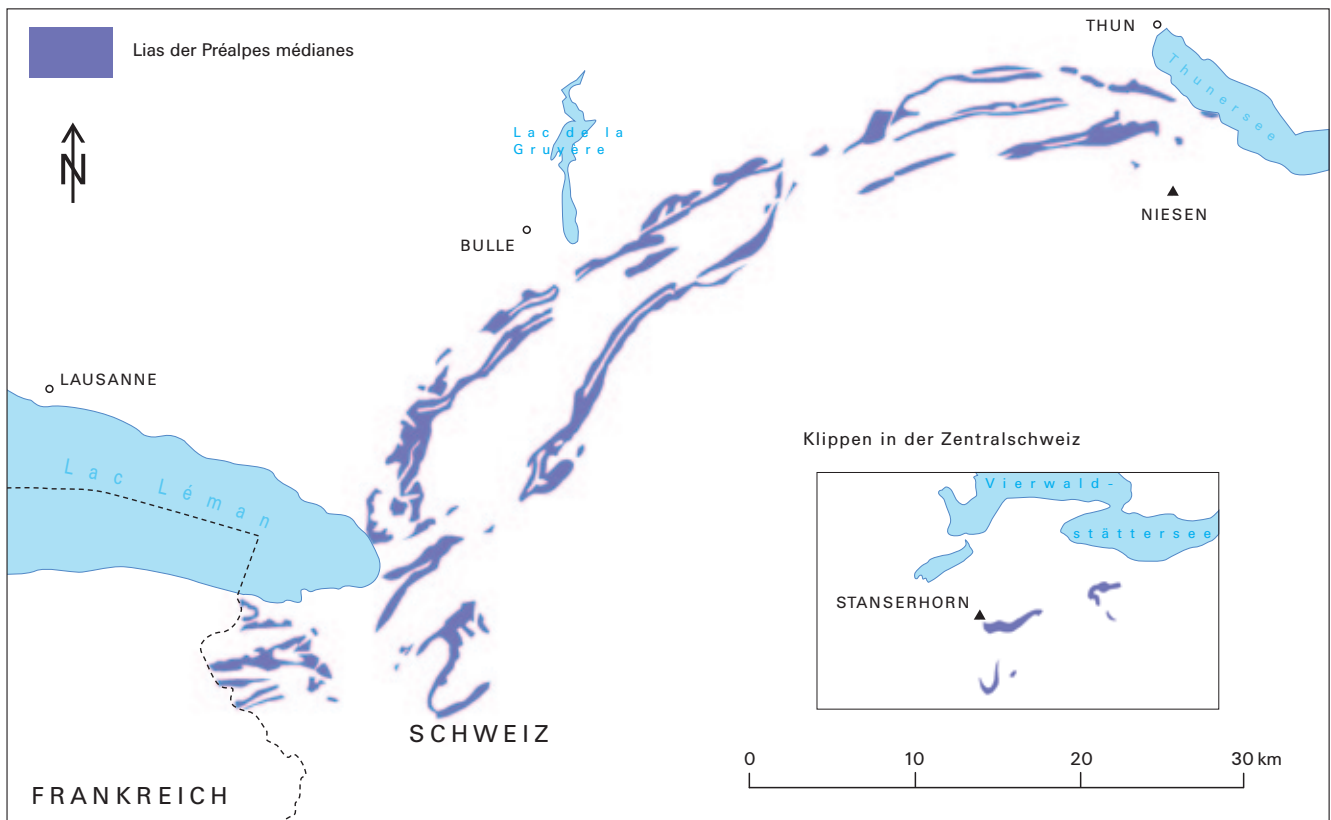


Abbildung 5.3: Übersichtskarte des Lias in den Préalpes médianes. Nach METTRAUX (1989) wurden die Lias-Kieselkalksteine der Préalpes médianes während mehrerer Zeitperioden vom Hettangien bis ins späte Toarcien gebildet. Darstellungsgrundlage ist die geologische Karte der Schweiz 1: 500 000 (2005).

Briançonnais abgelagert wurden und zum Subbriançonnais gezählt werden (TRÜMPY 1980).

**Vorkommen und Mächtigkeit:** Die Liasvorkommen der Préalpes médianes erstrecken sich von der französisch-schweizerischen Grenze südlich des Genfersees entlang der Voralpen bis an den Thunersee. Zudem finden sich mittelpenninische Liasklippen in der Zentralschweiz am Stanserhorn, Buochserhorn sowie auf dem Gross Mythen (Abbildung 5.3).

Durch die Aufteilung der Préalpes médianes nach METTRAUX (1989) in lithostratigraphische Einheiten sind folgende Decken im Lias der Préalpes médianes für die Betrachtung von Lias Kieselkalken wichtig:

- «Heiti-Schichten»: Es handelt sich hierbei um eine 200–400 m mächtige, verkieselte Abfolge.
- «Couches de Chauderon»: Die silifizierter Abfolge variiert von 50 bis 200 m Mächtigkeit.
- «Couches du Petit Liençon»: Die Dicke dieser verkieselten Einheit beträgt 50–150 Meter.
- «Couches d'Arvel»: Die Kieselkalk führende Schicht hat eine Mächtigkeit von ungefähr 150–200 m.

Letztere werden in METTRAUX (1989) als spatige Kalke beschrieben. Die Gesteinsabfolge im Hangenden des Spatkalkes der Couches d'Arvel zeigt aber eine mehr oder weniger durchgehende Verkieselung.

In den Couches de la Grande Bonnavau können zudem grossräumige Verkieselungen des Gesteins festgestellt wer-

den (Bsp. Gruyères). Dies erstaunt nicht weiter, werden doch in METTRAUX (1989) an der Basis der Couches de la Grande Bonnavau verkieselte Spongiennadeln beschrieben.

**Abbau und Nutzung:** Der Kieselkalk des Lias wird in den Préalpes médianes heute noch im Steinbruch von Arvel (Villeneuve/VD) abgebaut, wo die Couches d'Arvel zutage treten. Historische Abbaustellen sind u.a. bei Roche (VD), Vouvy (VS) und Rossinière (VD) bekannt, wo teils kieselige Kalksteine vorwiegend auf Grund von mittelhohen Druckfestigkeiten (140–160 MPa) lokal von Bedeutung waren (DE QUERVAIN 1969).

## 5.6 Verkieselte Gesteine im nahen Ausland

Aus dem europäischen Raum sind verschiedene verkieselte Gesteine bekannt, die mindestens makroskopisch mit der einen oder anderen Kieselkalkvarietät der Schweiz verglichen werden können.

In östlicher Richtung tritt die Helvetische Kieselkalk-Formation mit maximal 105 Meter Mächtigkeit in Vorarlberg und im Allgäu (WYSSLING 1986) auf. Im Westen finden sich die nächstgelegenen verkieselten Gesteine westlich von Morgins: Die in südwestlicher Richtung fortlaufende Joux-Verte-Formation aus der Zeit der Frühen Kreide (Valanginien–Albien) führt an der Basis eine 5–15 m mächtige Serie von kompakten, bis 50 cm dicken Kieselkalkbänken



(DALL'AGNOLO 1997). Durch die Verwitterungsbeständigkeit der Kieselkalke hebt sich die Basis der Joux-Verte-Formation morphologisch hervor. Auf dem Geologischen Atlasblatt der Schweiz Nr. 37 Monthey ist diese Formation als Flysch der Brekziendecke ausgeschieden. Auf dem anschliessenden französischen geologischen Blatt No. 655 Samoëns-Pas de Morgins, 1:50 000, ist die Joux-Verte-Formation als Quarzserie der Brekziendecke zu finden. DALL'AGNOLO (1997) beschreibt die hier vorkommenden Kieselkalke als verkieselte Echinodermenkalke, Schwammkalke und vereinzelt als Brekzien. Untersuchungen im Dünnschliff und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Kieselkalke in DALL'AGNOLO'S (1997) Arbeit weisen auf eine grosse Ähnlichkeit zu den Kieselkalken der Helvetischen Kieselkalk-Formation hin.

GURSKY (1997) beschreibt kieselige Serien aus der Karbonzeit, die am Nord- und Ostrand des rheinischen Schiefergebirges und im angrenzenden Kellerwald sowie im Ober- und Mittelharz zutage treten. Neben den Radiolarien-Kieselgesteinen treten untergeordnet Kieselgesteine

auf, in denen Schwammnadeln als Hauptbestandteil vorkommt.

ELORZA & BUSTILLO (1989) beschreiben in Nordspanien (Bilbao) vorkommende Flyschablagerungen aus der späten Kreide als verkieselte Gesteine. Die Gesteine zeigen eine stark ausgeprägte Wechsellagerung von Kalkareniten (Turbiditablagerung) mit Silexlagen. Die als Grainstone klassifizierten Kalkarenite führen neben Kieselschwammnadeln und Karbonatkörnern auch Radiolarien, Foraminiferen und detritischen Quarz. Durch die Ausrichtung der Kieselschwammnadeln erhalten die Kalkarenite ein laminares Gefüge. ELORZA & BUSTILLO (1989) gehen davon aus, dass das Silizium der Silexlagen aus frühdiagenetischen Lösungsvorgängen stammt, bei denen Kieselschwammnadeln durch Kalzit ersetzt worden sind. Makroskopisch zeigt die Gesteinsabfolge von Kalkareniten mit Silexlagen Ähnlichkeit zu Sequenzen aus der Moltrasio-Formation im Südpin. Mikroskopische Aufnahmen im Dünnschliff weisen sogar eine starke Affinität zu den Helvetischen Hauterivien-Kieselkalken auf.

Tabelle 5.1: Angaben über die Mächtigkeit der helvetischen Kieselkalk-Formation. Datenherkunft siehe Spalte «Quellenangabe» und Anhang B.

Koordinaten	Genauigkeit	Lithologie	Mächtigkeit [Meter]	Quellenangabe	Seite	Profil- Nummer	Lokalität	Bemerkungen
715.610/206.820	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	55	Hantke 1961	48		Näbelchäppler	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
712.510/204.520	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	60	Hantke 1961	65		Silberenalp	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
712.510/204.520	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	54	Hantke 1961	65		Silberenalp	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
697.600/197.420	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	> 20	Hantke 1961	79		Plänggeli	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
697.600/197.420	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	47	Hantke 1961	80		Plänggeli	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
697.360/197.200	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	38	Hantke 1961	82		NE-Grad des Fülen	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
697.360/197.200	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	34	Hantke 1961	83		NE-Grad des Fülen	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
689.810/199.640	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	67	Hantke 1961	90		Axenstrasse	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
689.810/199.640	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	65	Hantke 1961	90		Axenstrasse	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
685.170/207.250	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	27	Hantke 1961	123		N-Grad der Hohflue	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
685.170/207.250	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	34	Hantke 1961	123		N-Grad der Hohflue	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
689.680/202.580	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	160	Hantke 1961	139		Axenstrasse zw Sisikon und Ort	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
689.680/202.580	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	310	Hantke 1961	140		Axenstrasse zw Sisikon und Ort	Mittelpunktcoordinate der Profilsur
736.100/228.000	Ortsangabe	Kieselkalk	70	Herb 1962	17		N Häderenberg	Nördlich Häderenberg, Steinbruch Starkenbach
728.500/225.500	Ortsangabe	Kieselkalk	110	Herb 1962	17		NW-Seite Mattstock	Profil Mattstock
729.000/222.500	Ortsangabe	Kieselkalk	140	Herb 1962	18		Walenseeufer	Profil zwischen Weesen und Beetlis
662.000/204.000	Ortsangabe	Kieselkalk inkl. E.-brekzie	160	Buxtorf 1915	Karte	1	Pilatus Nordrand	
660.000/202.300	Ortsangabe	Kieselkalk inkl. E.-brekzie	180	Buxtorf 1915	Karte	3	Pilatus Mitte Widderfeld	
680.500/207.000	Ortsangabe	Kieselkalk inkl. E.-brekzie	200	Buxtorf 1915	Karte	4	Rigihochfluh	
681.500/206.500	Ortsangabe	Kieselkalk inkl. E.-brekzie	200	Buxtorf 1915	Karte	5	Vitznauerstock	
673.000/206.000	Ortsangabe	Kieselkalk inkl. E.-brekzie	320	Buxtorf 1915	Karte	8	Bürgenstock	
684.200/194.200	Ortsangabe	Kieselkalk	460	Buxtorf 1915	Karte	12	Nieder-, Oberbauen	
691.200/202.600	Ortsangabe	Kieselkalk	460	Buxtorf 1915	Karte	13	Fronalpstock	
668.000/192.000	Ortsangabe	Kieselkalk	450	Buxtorf 1915	Karte	14	Gräfimattgrad	
692.200/202.000	Ortsangabe	Kieselkalk	460	Buxtorf 1915	Karte	15	Huserstock	
680.000/194.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	200	Arbenz 1918	Karte		Isental, Bannalpsee	
750.000/220.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	450	A. Heim & J. Oberholzer 1917	Karte		Region Alvier	Mächtigkeit aus Sammelprofil: xy im Kartengebiet zugeordnet
751.000/235.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	< 80	Eugster et al. 1982	Karte		Kartenblatte Säntis	
640.311/188.203	Gebietsangabe	Kieselkalk	215	R. Schider 1919	Karte		Schrattenfluh	Koordinaten abgeschätzt, Mitte Gebrigszug
651.264/198.800	Gebietsangabe	Kieselkalk	200	H. Mollet 1919	Karte		Schimberg	Mächtigkeit aus Sammelprofil abgelesen; xy abgeschätzt
559.250/112.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	100–150	E. Gagnebin et al. 1939	4		Kartenblatt St. Maurice	Mächtigkeit nur für Morcles-Decke
561.000/124.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	50	H. Badoux et al. 1960	6		Kartenblatt Monthey	Mächtigkeit des gesamten Hauterivien!
577.518/113.435	Gebietsangabe	Kieselkalk	100	H. Badoux 1971	17		Westlich Saxon	
582.100/128.500	Gebietsangabe	Kieselkalk	100	H. Badoux & J.-H. Gabus 1991	34		Kartenblatt Les Diablerets	Diablerets-Decke

Fortsetzung Tabelle 5.1: Angaben über die Mächtigkeit der helvetischen Kieselkalk-Formation.

Koordinaten	Genauigkeit	Lithologie	Mächtigkeit [Meter]	Quellenangabe	Seite	Profil- Nummer	Lokalität	Bemerkungen
576.500/124.500	Gebietsangabe	Kieselkalk	100	H. Badoux & J.-H. Gabus 1991	39		Kartenblatt Les Diablerets	Mordles-Decke
601.000/138.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	180	H. Badoux & A. Lombard 1962	6, 7		Kartenblatt Lenk	
622.200/161.150	Ortsangabe	Kieselkalk	270	H. Günzler-Seiffert 1933	Karte	1	Standfluh	
624.900/160.000	Ortsangabe	Kieselkalk	320	H. Günzler-Seiffert 1933	Karte	2	Dreisnitz	
630.000/161.050	Ortsangabe	Kieselkalk	200	H. Günzler-Seiffert 1933	Karte	3	Schwalmen	
613.000/140.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	70	H. Furrer & H. Badoux 1956	13		NW Gemmi; Lämmerenplatten	Mächtigkeit nimmt nach Süden ständig ab bis Kieselkalk fehlt
612.000/145.000	Gebietsangabe	Kieselkalk	150	H. Furrer 1962	18		Lohnergruppe	Erläuterungen fu GA 92
661.795/203.550	Punktangabe	Kieselkalk	106	H. Funk 1969	195		Pilatus (Klinsen)	Basis des Typ.-profils. Inkl. 8.5 m sandigen Schiefem an Basis
727.840/224.100	Punktangabe	Kieselkalk	76	H. Funk 1971	Tafel I	2	Unterfurgglen	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
728.080/225.525	Punktangabe	Kieselkalk	84	H. Funk 1971	Tafel I	3	Mattstock	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
730.300/226.075	Punktangabe	Kieselkalk	84	H. Funk 1971	Tafel I	4	Rahberg	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
732.260/225.995	Punktangabe	Kieselkalk	56	H. Funk 1971	Tafel I	5	Gulmen	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
732.925/226.830	Punktangabe	Kieselkalk	52	H. Funk 1971	Tafel I	6	Goggeien (Rotberg)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
736.280/228.120	Punktangabe	Kieselkalk	88	H. Funk 1971	Tafel I	7	Steinbruch	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
737.560/229.080	Punktangabe	Kieselkalk	44	H. Funk 1971	Tafel I	9	Rossnägel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
737.510/231.120	Punktangabe	Kieselkalk	72	H. Funk 1971	Tafel I	10	Ruestel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
739.240/230.050	Punktangabe	Kieselkalk	68	H. Funk 1971	Tafel I	11	Risi	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
739.420/232.185	Punktangabe	Kieselkalk	80	H. Funk 1971	Tafel I	12	Hoffert	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
739.920/231.480	Punktangabe	Kieselkalk	72	H. Funk 1971	Tafel I	13	Lütspitz	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
741.770/233.815	Punktangabe	Kieselkalk	60	H. Funk 1971	Tafel I	14	Silberplatten	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
741.875/232.850	Punktangabe	Kieselkalk	60	H. Funk 1971	Tafel I	15	Mittagwand	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
741.920/231.100	Punktangabe	Kieselkalk	84	H. Funk 1971	Tafel I	17	Türi	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
742.760/231.800	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	18	Burstel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
742.550/234.970	Punktangabe	Kieselkalk	68	H. Funk 1971	Tafel I	19	Musfallen	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
743.725/232.800	Punktangabe	Kieselkalk	28	H. Funk 1971	Tafel I	21	Gerstein	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
743.780/232.230	Punktangabe	Kieselkalk	76	H. Funk 1971	Tafel I	22	Gersellen	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
744.210/231.510	Punktangabe	Kieselkalk	60	H. Funk 1971	Tafel I	23	Gampflüt	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
745.270/230.810	Punktangabe	Kieselkalk	68	H. Funk 1971	Tafel I	24	Flurentobel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
745.370/232.090	Punktangabe	Kieselkalk	44	H. Funk 1971	Tafel I	25	Schafboden	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
743.760/235.810	Punktangabe	Kieselkalk	52	H. Funk 1971	Tafel I	26	Chammhalde	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
744.280/235.750	Punktangabe	Kieselkalk	40	H. Funk 1971	Tafel I	27	Hüenerberg	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
745.280/234.325	Punktangabe	Kieselkalk	44	H. Funk 1971	Tafel I	28	Lisengrat	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
745.890/234.120	Punktangabe	Kieselkalk	60	H. Funk 1971	Tafel I	29	Rotsteinpass	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
746.125/233.980	Punktangabe	Kieselkalk	40	H. Funk 1971	Tafel I	30	Altmannsattel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen

Fortsetzung Tabelle 5.1: Angaben über die Mächtigkeit der helvetischen Kieselkalk-Formation.

Koordinaten	Genauigkeit	Lithologie	Mächtigkeit [Meter]	Quellenangabe	Seite	Profil- Nummer	Lokalität	Bemerkungen
746.780/236.710	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	31	Messmer	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
747.230/236.115	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	32	Seealp	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
748.925/233.050	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	33	Mutschen	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
748.600/238.760	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	35	Gartenalp	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
749.275/238.475	Punktangabe	Kieselkalk	60	H. Funk 1971	Tafel I	36	Äscher	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
750.080/238.815	Punktangabe	Kieselkalk	56	H. Funk 1971	Tafel I	37	Wasserauen	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
750.975/237.770	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	38	Alpsigel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
749.875/236.800	Punktangabe	Kieselkalk	40	H. Funk 1971	Tafel I	39	Marwees E	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
750.130/236.640	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	40	Bogarten	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
750.200/235.825	Punktangabe	Kieselkalk	24	H. Funk 1971	Tafel I	41	Widderalpstock	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
750.430/234.675	Punktangabe	Kieselkalk	36	H. Funk 1971	Tafel I	42	Saxerlücke	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
753.425/235.550	Punktangabe	Kieselkalk	44	H. Funk 1971	Tafel I	43	Kobel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
754.625/237.000	Punktangabe	Kieselkalk	44	H. Funk 1971	Tafel I	44	Dürhorn	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
759.670/242.800	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	45	Oberriet	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
729.010/222.150	Punktangabe	Kieselkalk	112	H. Funk 1971	Tafel I	47	EW Talegg	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
733.250/221.800	Punktangabe	Kieselkalk	48	H. Funk 1971	Tafel I	49	Platten	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
735.910/222.710	Punktangabe	Kieselkalk	200	H. Funk 1971	Tafel I	50	Nägelberg	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
738.600/223.675	Punktangabe	Kieselkalk	212	H. Funk 1971	Tafel I	51.1	Obersäss	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
738.710/223.660	Punktangabe	Kieselkalk	212	H. Funk 1971	Tafel I	51.2	Obersäss	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
739.610/223.875	Punktangabe	Kieselkalk	216	H. Funk 1971	Tafel I	52	Brisi	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
738.775/222.060	Punktangabe	Kieselkalk	40	H. Funk 1971	Tafel I	53	Hinterwiesen	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
743.000/222.760	Punktangabe	Kieselkalk	244	H. Funk 1971	Tafel I	54	Lüsis	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
749.960/218.875	Punktangabe	Kieselkalk	280	H. Funk 1971	Tafel I	59	Alvier	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
753.900/218.725	Punktangabe	Kieselkalk	12	H. Funk 1971	Tafel I	60	Capätsch	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
748.400/235.480	Punktangabe	Kieselkalk	40	H. Funk 1971	Tafel I	62	Börtzel	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
619.085/157.920	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	40	A. Mojon 1984	Tafel I	1	Gehrihorn (Schlafeggflue)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
622.180/161.140	Punktangabe	Kieselkalk	200	A. Mojon 1984	Tafel I + II	2	Standflue (Richtigrabe)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
624.770/159.750	Punktangabe	Kieselkalk	250	A. Mojon 1984	Tafel I + II	3	Dreispietz (Graben NW Agne)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
627.250/163.080	Punktangabe	Kieselkalk	355	A. Mojon 1984	Tafel I + II	5	Morgenberghorn (E Schöni Chumm)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
629.630/165.620	Ortsangabe	«Unterer» Kieselkalk	45	A. Mojon 1984	Tafel I	6	Saxeten-Schiffli (SE Am Heitigen)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
625.350/170.310	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	95	A. Mojon 1984	Tafel II	7	Balmholz (Steinbruch Balmholz)	Profil im basalen Bereich; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
623.760/173.190	Punktangabe	Kieselkalk	125	A. Mojon 1984	Tafel I + II	9	Sigriswilergrat-West (Gibelegg)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
623.975/173.100	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	55	A. Mojon 1984	Tafel I	11	Rufisgraben	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
624.380/175.295	Punktangabe	Kieselkalk	110	A. Mojon 1984	Tafel I + II	12	Sigriswilergrat (Graben ESE Bodmi)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen

Koordinaten	Genauigkeit	Lithologie	Mächtigkeit [Meter]	Quellenangabe	Seite	Profil- Nummer	Lokalität	Bemerkungen
625.920/173.920	Punktangabe	Kieselkalk	170	A. Mojon 1984	Tafel I+II	13	Bachersbode-Niederhorn	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
625.940/175.360	Punktangabe	Kieselkalk	140	A. Mojon 1984	Tafel I+II	14	Sigriswiler Rothorn (SW Neuwang)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
632.350/171.770	Punktangabe	Kieselkalk	345	A. Mojon 1984	Tafel I+II	16	Harder Bahn (Ob Tunnelportal)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
634.130/171.770	Ortsangabe	«Unterer» Kieselkalk	70	A. Mojon 1984	Tafel I	17	Burgseeli-Ringgenberg (S Burgseeli)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
627.800/176.360	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	60	A. Mojon 1984	Tafel I	20	Sigriswilerbergli-Chumali	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
627.800/177.830	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	55	A. Mojon 1984	Tafel I	21	Sichle (N Stechelberg)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
629.740/179.820	Punktangabe	Kieselkalk	280	A. Mojon 1984	Tafel I+II	22	Solfue	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
638.240/175.500	Punktangabe	Kieselkalk	305	A. Mojon 1984	Tafel I+II	23	Niederried (Fahrlauigraben)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
635.140/182.540	Punktangabe	Kieselkalk	350	A. Mojon 1984	Tafel I+II	25	Hohgant (Luterschwändlegg)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
638.480/185.440	Punktangabe	Kieselkalk	245	A. Mojon 1984	Tafel I+II	26	Schrattflue (E Gärtlen)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
645.800/181.205	Punktangabe	Kieselkalk	365	A. Mojon 1984	Tafel I+II	27	Brienzer Rothorn (Bahntrasse)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
650.750/179.880	Ortsangabe	Kieselkalk	285	A. Mojon 1984	Tafel I+II	30	Wilerhorn	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
646.900/195.720	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	50	A. Mojon 1984	Tafel I	32	Schafmatt (E Baumgarten)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
664.130/188.000	Punktangabe	Kieselkalk	320	A. Mojon 1984	Tafel I+II	33	Höch Dossen (Ebnetwald)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
653.930/201.140	Punktangabe	Kieselkalk	130	A. Mojon 1984	Tafel I+II	34	Risetenstock (Risetenflue)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
667.600/203.600	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	110	A. Mojon 1984	Tafel II	37	Lopper (Acheregg (Strasse))	Profil im basalen Bereich; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
668.180/202.000	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	110	A. Mojon 1984	Tafel II	38	Rotzloch (Steinbruch)	Profil im basalen Bereich; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
672.105/206.260	Punktangabe	«Oberer» Kieselkalk	70	A. Mojon 1984	Tafel II	41	Bürgenstock (W Bürgenwald)	Profil im basalen Bereich; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
677.840/205.730	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	15	A. Mojon 1984	Tafel I	43	Untere Nase (N Ruedersbalm)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
681.300/193.200	Punktangabe	Kieselkalk	70	A. Mojon 1984	Tafel I+II	46	Bärenstock (W Holzegg)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
681.162/206.665	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	10	A. Mojon 1984	Tafel I	49	Vitznauerstock (Gross-Stockrübi)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
686.100/205.940	Ortsangabe	Kieselkalk	75	A. Mojon 1984	Tafel I+II	51	Brünischart (E Brünischart)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
689.900/201.120	Punktangabe	Kieselkalk	460	A. Mojon 1984	Tafel I+II	55	Schiferenegg (Strassenprofil)	Helvetischer Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
689.740/199.400	Punktangabe	«Unterer» Kieselkalk	10	A. Mojon 1984	Tafel I	58	Sisikon (SE Stutzegg)	Basis Helv. Kieselkalk; Mächtigkeit aus Profil abgemessen
714.125/190.855	Punktangabe	Kieselkalk	20	F. Frey 1965	28	3	Altenorenstock-Schuppe	Basis Helvetischer Kieselkalk, südlich Claridenhütte

## 6. Probenentnahme

### 6.1 Grundlagen für die Probenentnahme

Die Probenentnahmegebiete wurden auf Basis der geologischen Grundlagenstudie für die «Planungshilfe für die Standortplanung von Hartsteinbrüchen» festgelegt (SGTK 2006). Der Schwerpunkt bei den Probenentnahmen wurde auf potenzielle Hartsteingebiete gelegt, in denen die Verlässlichkeitswerte gemäss Bewertung für die geologische Grundlagenstudie 80–100% betragen (vgl. Kapitel 4). Damit wird im Bezug auf eine potenzielle Nutzung der Gesteine als Hartstein ein angemessener Stellenwert eingeräumt. Der Vollständigkeit halber wurden auch oberhalb 1300 m ü.M. Proben entnommen (vgl. Kapitel 4.2.3.2). Somit kann eine flächendeckende Aussagekraft der Untersuchungen erzielt werden.

### 6.2 Probenentnahmestellen

Bei der Probenentnahme wurden alle vier Varietäten des Kieselkalks und eine Auswahl von weiteren poten-

ziellen Hartsteintypen berücksichtigt (Abbildungen 6.1 und 6.2).

#### 6.2.1 Kieselkalke

Trotz der hohen Verlässlichkeitswerte von 80–100% können innerhalb der Kieselkalkabfolgen ungeeignete und technisch kaum separierbare Gesteinsanteile vorkommen, die eine Nutzung erschweren. Deshalb wurden bei der Probenwahl ausschliesslich Kieselkalkbänke (>15 cm) mit möglichst geringmächtigen Zwischenlagen (<3 cm) berücksichtigt. Tektonisch stark beanspruchte Gesteinsserien wurden nicht beprobt. Probenentnahmen in Gesteinen mit engständiger Klüftung wurden ebenfalls vermieden.

#### 6.2.2 Übrige Gesteine

Bei den übrigen beprobten Gesteinstypen handelt es sich um Flysch-, Molasse-, Glaukonitsandsteine sowie einen Metarhyolith. Es wurden u.a. aktive Steinbrüche miteinbezogen, in denen Hartsteinvorkommen genutzt werden.

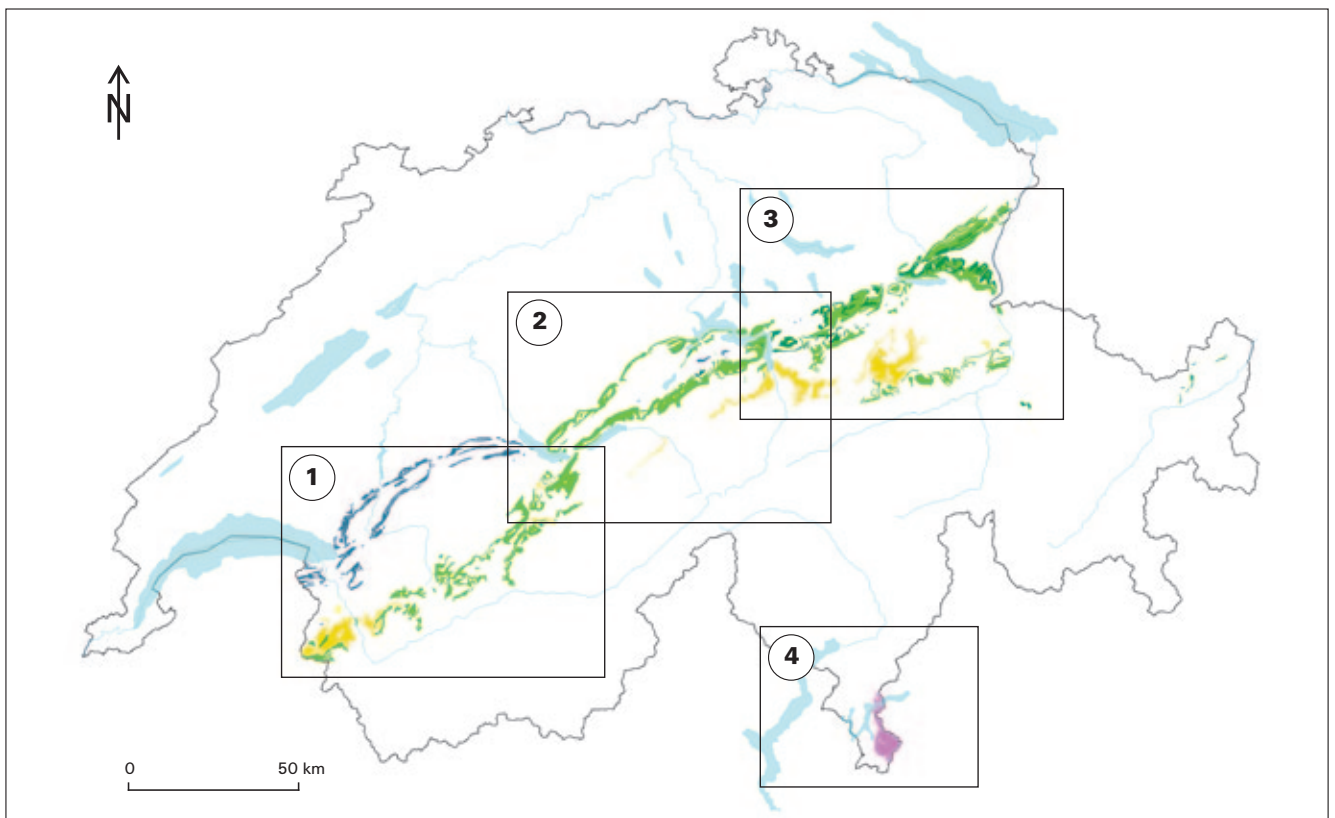


Abbildung 6.1: Probenentnahmegebiete West (1), Zentral (2), Ost (3) und Süd (4).



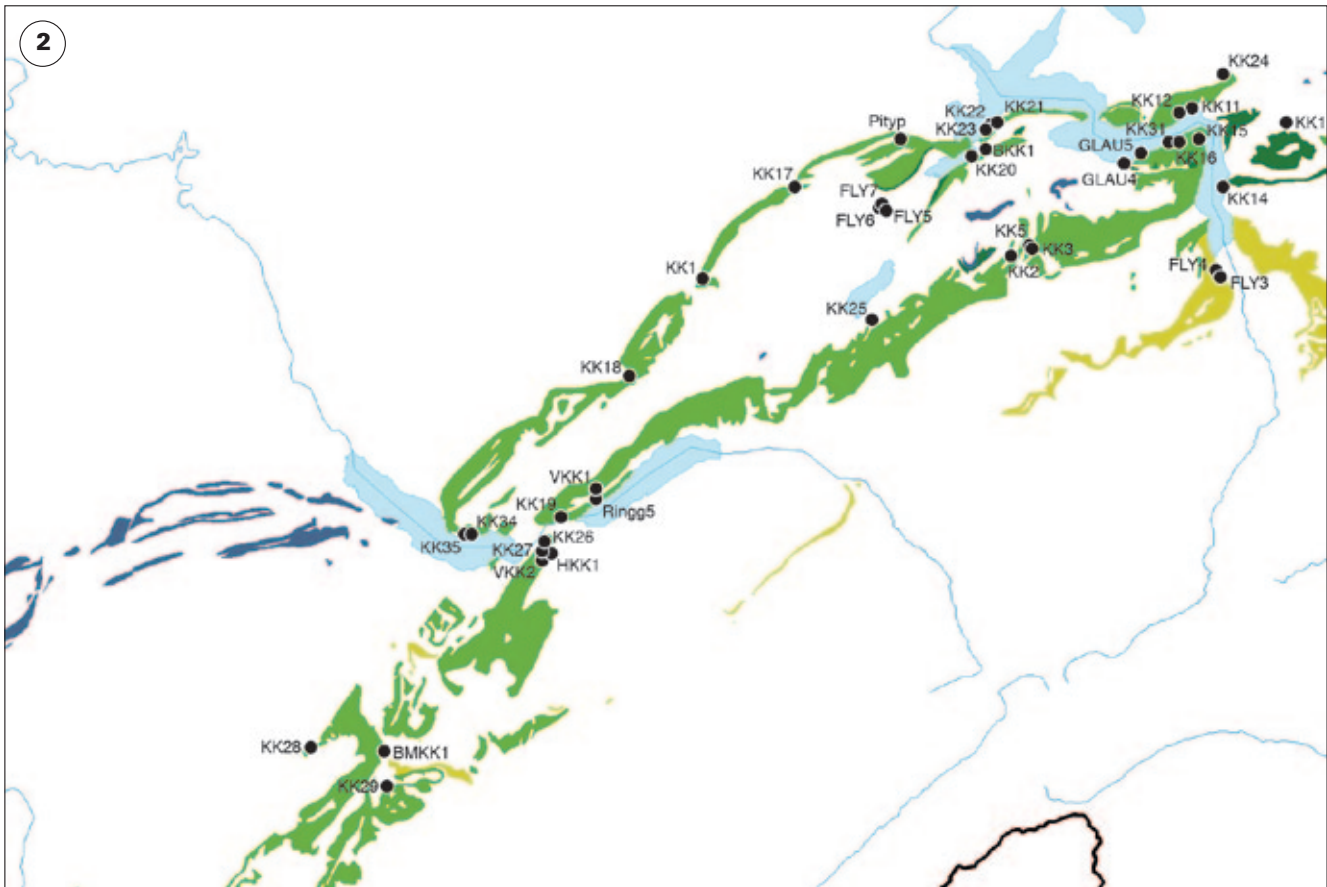
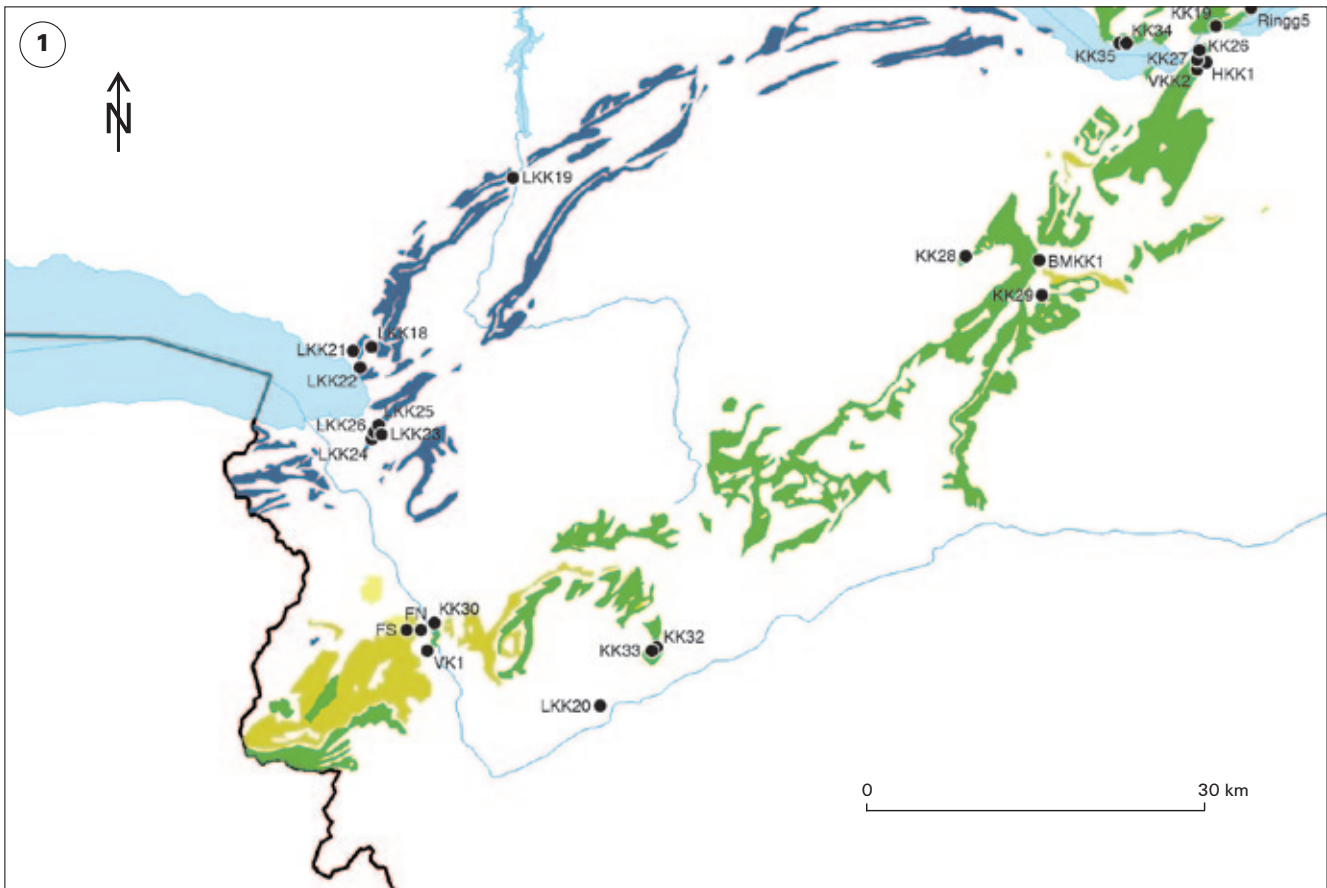
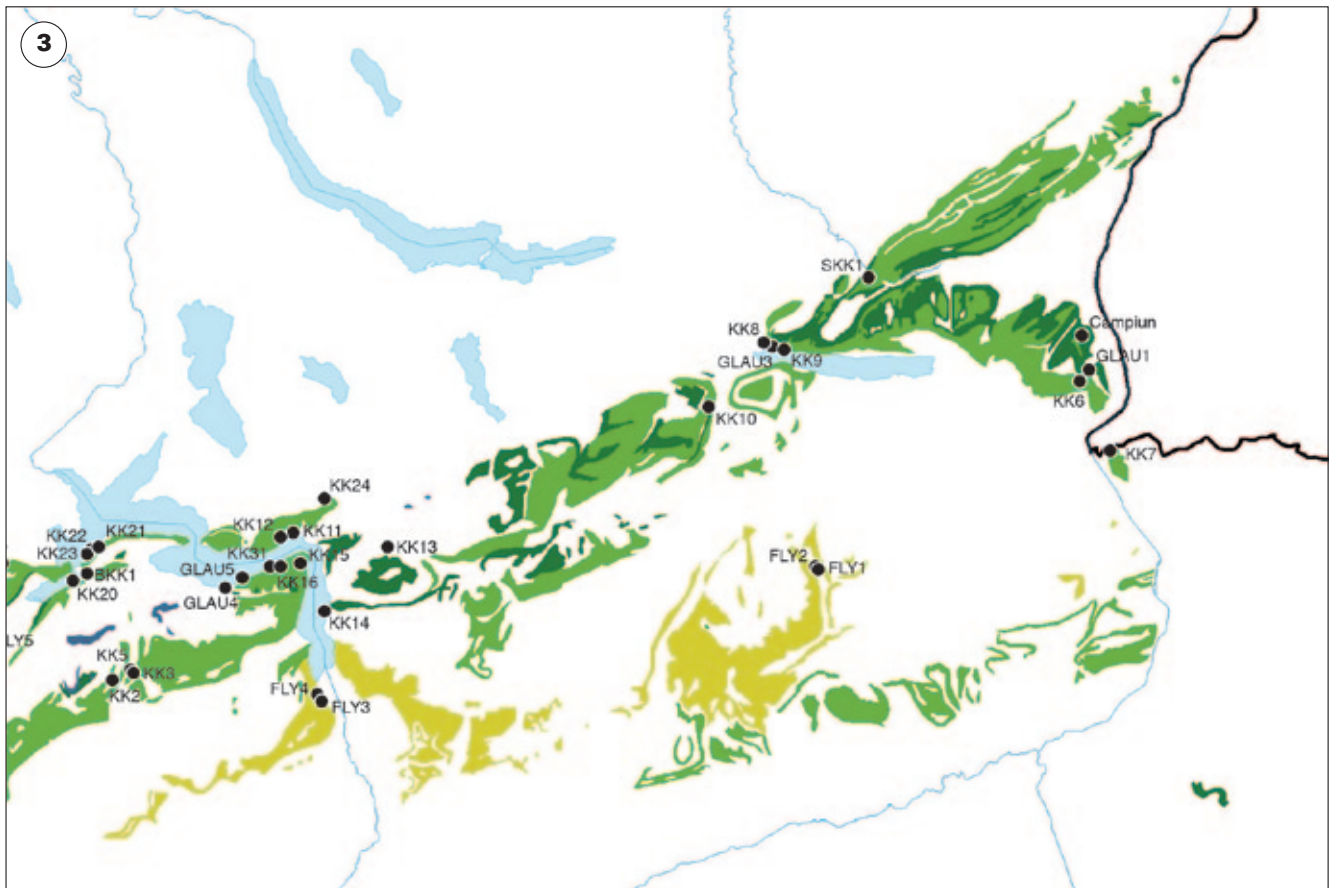


Abbildung 6.2: Probenentnahmestellen von potenziellen Hartsteinvorkommen mit besonderem Augenmerk der Kieselkalke. West (1), Zentral (2), Ost (3) und Süd (4).



- Lias der Préalpes médianes (Penninikum)
- Lias des Südalpins (Moltrasio-Formation)
- Frühe Kreide des Helvetikums  
Hauterivien (Kieselkalk-Formation) und Valanginien
- Glaukonit-, Flysch-, Molassesandsteine  
(div. Ablagerungs- und Zeiträume)

## 7. Makroskopische und mikroskopische Untersuchung der Kieselkalke

### 7.1 Hintergrund

Die makroskopische und mikroskopische Untersuchung bietet Möglichkeiten, Kieselkalke zu charakterisieren und vergleichend darzustellen. So können trotz der fein- bzw. mikro-kryptokristallinen Ausbildung der Kieselkalke nicht nur Minerale bestimmt werden, sondern anhand von sekundär gewachsenen Mineralien und Sedimentstrukturen Teile der Entwicklungsgeschichte hergeleitet werden. Der Erfassung des Gefüges wird hier ein besonderer Stellenwert eingeräumt, da dieses im Hinblick auf die technischen Prüfverfahren wie Druckfestigkeits- sowie Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch wichtig ist.

### 7.2 Methodik

Neben der petrographischen Beschreibung der Gesteine werden mit der Untersuchung im Dünnschliff Sedimentstrukturen sowie prozentuale Anteile von detritischem Quarz und Glaukonit tabellarisch erfasst (Tabelle 7.1) und in den Kapiteln 8, 9 sowie 11 einbezogen.

- Um das Gefüge zu erfassen, wird die Klassifikation nach DUNHAM (1962) angewandt (Abbildung 7.1). Anteile an Schwammnadeln werden in der Detailuntersuchung mit folgenden Bezeichnungen vermerkt: Schwammnadelhaltige Kieselkalke zeigen im Dünnschliff einen flächenmässigen Anteil <30 %, Schwammnadelreiche Kieselkalke zeigen Schwammnadelanteile von 30–50 %.

- Der Gehalt an detritischem Quarz und Glaukonit wird mit Dünnschliffbildaufnahmen in Bildauswertungsprogrammen ermittelt und als volumetrische Anteile für das Gesamtgestein betrachtet. Die Ermittlung erfolgt durch Überzeichnen des detritischen Quarzes und Glaukonits mit annähernden Formen (Kreis bis Oval). Die ausgeschiedenen Flächen werden in Beziehung zur Dünnschlifffläche gesetzt.

Die Bestimmung des detritischen Quarzes ist im Hinblick auf die quantitative Bestimmung des authigen gebildeten Quarzes (Mikroquarz) wichtig (siehe Kapitel 8). Im Gegensatz zum detritischen Quarz wird der Chalcedonanteil auf Grund seines seltenen Auftretens nicht bestimmt.

### 7.3 Allgemeine makroskopische Beobachtungen

Die massiven, 1–150 cm mächtigen, meist durchgehend verkieselten Kalkbänke werden durch mm–m mächtige, teils schiefrige Zwischenlagen voneinander abgegrenzt. Die Schichtabfolge von Kieselkalkbänken und Zwischenlagen führt zu morphologischen Unterschieden: Die Kieselkalkbänke treten an exponierten Stellen witterungsbedingt gegenüber den Zwischenlagen hervor.

Die Kieselkalke zeigen im frischen Handstück eine graue bis dunkelgraue Farbe. Angewittert sind sie vorwiegend hellgrau, wobei bei Anwesenheit von Pyrit durch dessen Verwitterung zu Limonit und anderen Eisenhydro-

(Allochthone Kalke) Primäre Komponenten während der Sedimentation, nicht organogen gebunden					
weniger als 10 % Komponenten > 2 mm				mehr als 10 % Komponenten > 2 mm	
mit Mikrit (< 0,03 mm)			ohne Mikrit	Matrixgefüge	Partikelgefüge
Schlammgefüge		Partikelgefüge			
weniger als 10 % Komponenten	mehr als 10 % Komponenten				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone

Abbildung 7.1: Klassifikation der Kalksteine nach DUNHAM (1962), mit Ergänzungen von EMBRY & KLOVAN (1971).





Abbildung 7.2: Beispiele von unterschiedlich ausgebildeten Kieselkalksequenzen aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation. a) Deutlich sichtbare, gebankte Ausbildung mit Zwischenlagen (<5 cm) im Engelbergertal/NW (Koord. 673.000/194.500), b) kompakter, kaum durch Zwischenschichten unterbrochener Kieselkalk am Bürgenstock/NW (Koord. 669.900/204.800); Hammerlänge 60 cm.

xiden eine hellbraune bis rostorange Farbe festgestellt werden kann. Durch die Verwitterung werden in den Kieselkalen Karbonatkomponenten herausgelöst, was zu einem feinen, makroskopisch teilweise sichtbaren, schwammartigen Quarzrückstand führen kann.

Das Reiben von Kieselkalk auf einem Hammer oder einem Messer führt zur Bildung von Kratzspuren. Beim Anschlagen von Kieselkalk entsteht der charakteristische Geruch von Feuerstein. Die Zerkleinerung der Kieselkalke mittels Hammer führt meist zur Bildung von muscheligen Bruchoberflächen.

Die Kieselkalke sind gemäss der Nomenklatur von FÜCHTBAUER & MÜLLER (1977) fast ausschliesslich feinkörnige Sedimentgesteine. In einer dunklen Grundmasse sind meist nur vereinzelt Kristalle von detritischem Quarz (<0,3 mm), spätig ausgebildetem Kalzit (<1 mm) sowie Pyrit (<1 cm) zu beobachten.

#### 7.4 Allgemeine mikroskopische Beobachtungen

Die Kieselkalke der Moltrasio-Formation, der Préalpes médianes und der unteren Kreide des Helvetikums weisen als Hauptbestandteil Kalzit und Quarz auf. Kalzit findet sich vorwiegend in der mikritischen/sparitischen Grundmasse. In Anlehnung an TUCKER (1985) wird hier die Bezeichnung Mikrit sowohl für eine feinkörnige, dunkle Matrix, als auch für feinkörnige Karbonatteilchen verwendet. Mit Sparit wird kalzitischer Zement bezeichnet. So zum Beispiel die Zementausfüllung von Schwammnadeln. Mikrit kann in allen untersuchten Kieselkalkproben beobachtet werden, weshalb bei der Klassifizierung dieser Gesteine nach DUNHAM (1962) maximal drei Gefügetypen unterschieden werden können (Abbildung 7.1): Mudstone, Wackestone, Packstone. Sparit findet sich ebenfalls in allen Proben.

Quarz liegt in verschiedenen Ausbildungsformen vor:

- Als detritischer Quarz kann er in den helvetischen Kieselkalen des Valanginien und Hauterivien sowie im

Kieselkalk der Préalpes médianes beobachtet werden. Der Anteil an detritischem Quarz ist in diesen drei Varietäten unterschiedlich. Im Kieselkalk der Hauterivienstufe kann er je nach Formationsniveau und Ablagerungsraum bis 20% betragen, tritt aber in den Varietäten des helvetischen Valanginien und in den Lias-Kieselkalen der Préalpes médianes fast ganz zurück. Im Kieselkalk der Moltrasio-Formation konnte kein detritischer Quarz festgestellt werden.

- Mikroquarz ist in den meisten Varietäten nur bedingt, wenn überhaupt, sichtbar. Vielfach ist er mit Kalzit in der mikritischen Grundmasse vermischt. Die Korngrösse <0,03 mm erschwert dessen Identifizierung im Dünnschliff. Einzig in den Kieselkalen der Moltrasio-Formation ist Mikroquarz deutlich erkennbar. Er bildet dabei vorwiegend Aggregate von Quarzkörnern, wobei die einzelnen Körner <0,05 mm sind.
- Selten kann Chalcedon beobachtet werden. In einigen Dünnschliffen sind Schwammnadeln (Monaxone, Tetra-xone) und Echinodermen (Krinoiden) aus Chalcedon zu erkennen.

In den meisten untersuchten Varietäten des Kieselkalks tritt sekundär über das bestehende Gefüge gewachsenes, blass rostbraunes, rhomboedrisches Karbonat auf. Dessen Anteil wird auf mehrere Prozent geschätzt. Vor allem in Kieselkalen der Moltrasio-Formation fällt das Karbonat mengenmässig auf, wo es teilweise >5% ausmacht. Ob es sich um Dolomit oder einen Mischkristalle der Reihe Dolomit-Ankerit handelt, kann auf Grund der Untersuchungen im Dünnschliff nicht eindeutig festgestellt werden.

Glaukonit tritt mit Ausnahme der Gemsmättli- und Lidenen-Members nur akzessorisch (<1%) im Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation auf.

Die meist mikro- bis kryptokristalline Ausbildung (FÜCHTBAUER & MÜLLER 1977) sowie das oftmals gemeinsame Auftreten mit Pyrit erschwert die Identifizierung von Schichtsilikaten im Dünnschliff. Einzig den vorhin beschriebenen Glaukonit sowie Vertreter der Chloritgruppe können bestimmt werden.



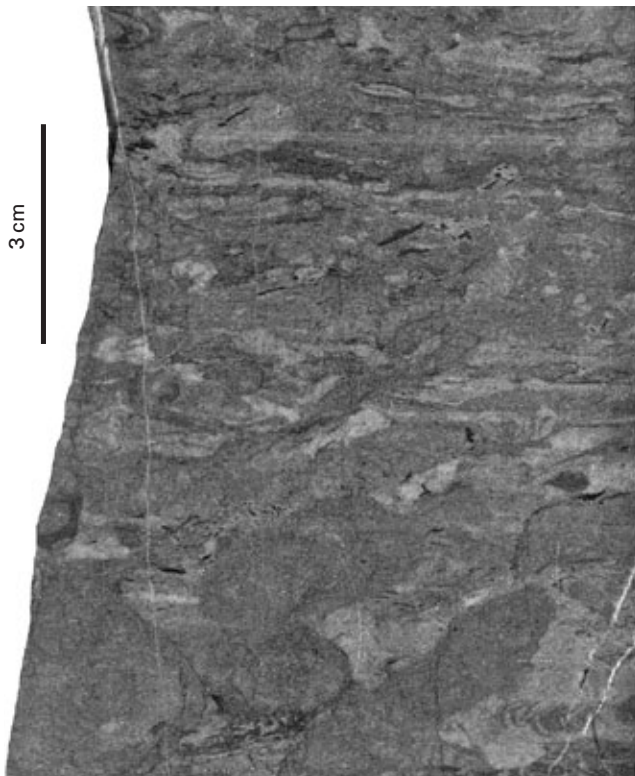


Abbildung 7.3: Polierter Anschnitt eines Teils einer Kieselkalkbank aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation. Schnitt senkrecht zur Schichtung. Durch Bioturbation werden ablagerungsbedingte Schichtstrukturen zerstört/durchwühlt. Es entsteht ein ungeordnetes Muster, in welchem teilweise noch Schürfbewegungen von Organismen erkannt werden können. Gesteinsprobe KK 18, Koordinaten: 638.825/183.340.

Pyrit findet sich meist akzessorisch (<1%) und in zwei Generationen ausgebildet. Die ältere Generation ist in den Gesteinen dispers verteilt. Die jüngere Pyritgeneration ist entlang von ausgedehnten oder seitlich begrenzten Lagen angereichert. Die Lagen durchziehen das Gestein sowohl schichtparallel, als auch schichtdiskordant und werden meist von einer alterierten Zone umgeben. In Tabelle 7.1 ist das Auftreten dieser Lagen als potenzielle Schwachzonen in einer vierstufigen Einteilung erfasst wobei die Kieselkalke der Moltrasio-Formation generell wenige solcher Schwachzonen zeigen.

Die Klassifizierung nach DUNHAM (1962) ist bei einzelnen Kieselkalkproben nicht eindeutig umsetzbar, da sich Sedimentstrukturen innerhalb eines Dünnschliffs ändern können.

## 7.5 Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation (Hauterivien)

### 7.5.1 Makroskopische Beobachtungen

Im frischen Handstück zeigt der Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation eine graue bis dunkelgraue Farbe. Die cm–1,5m mächtigen Kieselkalkbänke werden von mm–dm dicken (deformierten?) Zwischenlagen unterbrochen (Abbildung 7.2a). Die Mächtigkeit der Kieselkalk-

bänke und der Zwischenlagen variiert über die gesamte Formation, wobei grosse Teilsequenzen auftreten können, in denen Zwischenlagen beinahe vollständig zurücktreten (Abbildung 7.2b).

Die Kieselkalkbänke und die Zwischenlagen verwittern ungleich, wobei die Kieselkalkbänke gegenüber den Zwischenlagen herauswittern. Im angewitterten Zustand verfärben sich die Kieselkalkbänke hellgrau bis grau; im Bereich der Echinodermenbreckzien zeigen die Gesteine meist eine rostige bis beige Anwitterung (Eisenhydroxid/Limonit). Die Zwischenlagen enthalten stets feinkristallinen Quarz.

Typisch für den grundsätzlich feinkristallinen Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation ist die muschelige Bruchverlauf, der neben den ebenen Kalzitluftflächen mehrere dm grosse, konvexe bzw. konkave Bruchflächen verursacht. Davon ausgenommen ist die Helvetische Kieselkalk-Formation in den Walliser Alpen, wo durchgehende Chloritlagen schichtparallele Schwachzonen verursachen, die das Gestein entlang von vordefinierten Lagen brechen lassen.

Die feinkristalline Ausbildung des Gesteins lässt nur in seltenen Fällen winzige Spaltflächen von Kalzit- und Pyritkristallen erkennen. Selten können im Gestein Muschelbruchstücke beobachtet werden. Mit 10%iger Salzsäure wird in allen Kieselkalcken der Helvetischen Kieselkalk-Formation eine heftige Reaktion ausgelöst; auch in den Zwischenlagen und den Glaukonithorizonten (Gemsättli- und Lidernen-Member).

Die Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation zeigen oft Strukturen von Bioturbation (Abbildung 7.3).

### 7.5.2 Mikroskopische Beobachtungen

Die Klassifikation der Kieselkalke aufgrund des Gefüges (nach DUNHAM 1962) zeigt, dass es sich bei den beprobten Kieselkalcken der Helvetischen Kieselkalk-Formation um Wackstones und Packstones handelt (A 7.1, S.52f). Mikrit (<0,03 mm) ist stets vorhanden. Der Anteil an Komponenten/Partikeln schwankt beträchtlich.

**Karbonate:** Kalzit ist das mengenmässig häufigste Mineral. Er zeigt sich im Mikrit und Sparit. In der sparitischen Grundmasse füllt Kalzit als Zement nicht nur Zwischenräume, sondern überwächst sekundär kalzitische Bioklasten (hauptsächlich Echinodermen) und das bestehende Gefüge. Sofern Bioklasten nicht mit Chaledon verfüllt sind, bestehen sie ausschliesslich aus sekundär gewachsenem Kalzit.

Häufig können im Dünnschliff rhomboedrische Kristalle eines weiteren Karbonats beobachtet werden. Diese überwachsen das bestehende Gefüge. Die oft beobachtbare, leicht rostbraune Eigenfarbe der Rhomboeder lässt vermuten, dass es sich um ein eisenhaltiges Karbonatmineral handelt: Mischkristall der Reihe Dolomit-Ankerit.

**SiO<sub>2</sub>-Polymorphe** können in drei Varietäten vorliegen:

- **Detritischer Quarz:** In den untersuchten Gesteinsproben tritt detritischer Quarz feinkörnig (<0,25 mm) und in unterschiedlichen Mengenanteilen auf. Diese Quarzvarietät ist meist makrokristallin >0,1 mm ausgebildet. Die Kornform variiert von kantig bis gerundet. Meist

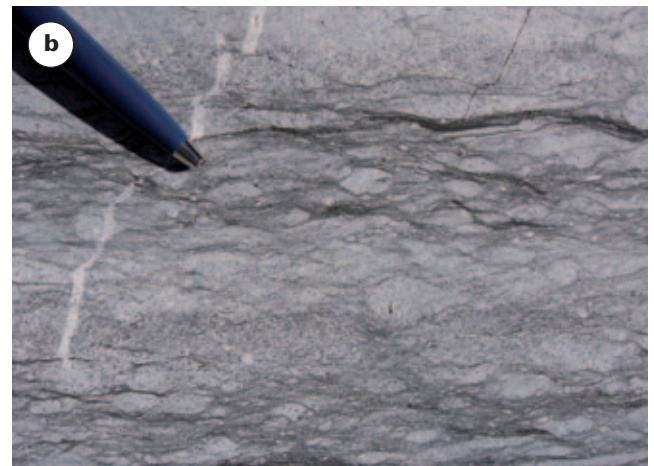


Abbildung 7.4: Kieselkalke aus dem Helvetischen Valanginien. a) Aufschluss in einem Steinbruch (Koord. 636.200/173.300). Hammerlänge: 60 cm. b) Detailansicht eines Kieselkalks aus dem Helvetischen Valanginien. Innerhalb der Bankung treten inhomogen verteilte, feine Strukturen auf, welche sich farblich unterscheiden und die einzelnen Bänke durchziehen. Es sind genau diese Feinstrukturen, die bei der Anwitterung dieser Kieselkalkvarietät sichtbar herauswittern (Koord. 636.100/173.400). Bildbreite ca. 12 cm.

treten an den Kornrändern Lösungsstrukturen auf, die mit sekundär gebildetem Kalzit verfüllt wurden. Der detritische Quarz löscht undulös aus und zeigt oft Rutil und weitere Minerale als Einschlüsse. In den untersuchten Dünnschliffen kann bis 20% detritischer Quarz festgestellt werden (vgl. Tabelle 7.1).

- Chalcedon: Selten sind Bioklasten (Schwammnadeln) nicht mit sekundärem Kalzit verfüllt, sondern liegen als Chalcedon vor. Chalcedon zeigt dabei die für ihn typische, radiale Auslöschung. Vereinzelt sind Radiolarien im Dünnschliff zu beobachten.
- Mikroquarz kann selten beobachtet werden. Meist ist er in der mikritischen Grundmasse mit Kalzit verwachsen und wegen des feinkörnigen Auftretens im Dünnschliff schwierig zu erkennen. Einzig in Probe KK 34 liegt eine Anhäufung von Mikroquarkristallen in Aggregaten vor.

**Glaukonit:** Glaukonit kann neben den glaukonitreichen Horizonten (Lidernen-Member, Gemsmättli-Member) in der Helvetischen Kieselkalk-Formation in einigen Dünnschliffen beobachtet werden. Er tritt grösstenteils akzessorisch auf (<1%) und erreicht Korngrößen von 0,2 mm. Er zeigt eine weiss-grüne Eigenfarbe und ist in den Proben homogen verteilt.

**Pyrit:** Pyrit liegt einerseits homogen verteilt vor (primärer Pyrit), andererseits ist er in Lagen angereichert (sekundärer Pyrit). Typisch für den Pyrit ist die oft ausgebildete, framboidale Form. Die teilweise schichtdiskordanten Lagen, an denen Pyrit angehäuft auftritt, gehen häufig mit einer rostfarbenen Verfärbung des Gesteins einher und lassen vermuten, dass sekundär gewachsener Pyrit im Zusammenhang mit einer partiellen Alterierung des Gesteins entstanden ist.

**Chlorit:** In Kieselkalken aus dem Berner Oberland und den Walliser Alpen findet sich Chlorit, der durch anomale Interferenzfarbe und schichtartige Ausbildung auffällt. Er überwächst das bestehende Gefüge.

Auf Grund der Untersuchung im Dünnschliff ist unklar, ob in den Kieselkalken der Helvetischen Kieselkalk-Formation Tonminerale vorkommen.

## 7.6 Kieselkalk des Helvetischen Valanginiens

### 7.6.1 Makroskopische Beobachtungen

Der Kieselkalk aus dem Helvetischen Valanginien zeigt auf frischen Bruchflächen eine hellgraue bis graue Farbe. Vereinzelt kann im frischen Handstück auch ein leicht bräunlicher Farbton festgestellt werden. Im angewitterten Zustand zeigt der Kieselkalk hellgraue bis orange-gelbe, rauhe Oberflächen. Die Kieselkalkabfolgen im helvetischen Valanginien bestehen aus einer Wechsellagerung von Kieselkalkbänken und Zwischenlagen (Abbildung 7.4 a), welche sich farblich sowie durch eine meist schiefrige Ausbildung unterscheiden. Die einzelnen Kieselkalkbänke zeigen eine Mächtigkeit von bis zu einem Meter, während die Zwischenlagen auf maximal Dezimeter-Dicke begrenzt sind. In einigen Kieselkalksequenzen treten auch innerhalb von Kieselkalkbänken mm-dicke, dunklere, seitlich kaum begrenzte, schichtparallele Lagen auf. Auf angeschnittenen Gesteinsflächen kann diese Struktur besonders gut beobachtet werden (Abbildung 7.4 b). Das Gestein bricht dabei bevorzugt plattig entlang der vorgezeichneten Lagen. In ungestörten Kieselkalkbänken bilden sich muschelartige Bruchflächen aus. Vereinzelt können in den feinkristallinen Kieselkalken bis 0,5 mm kleine Spaltflächen von Kalzitkristallen und Pyrit beobachtet werden.

### 7.6.2 Mikroskopische Beobachtungen

Für den Kieselkalk aus dem Valanginien des Helvetikums ist eine zusammenfassende Beschreibung der mikroskopischen Beobachtungen nur bedingt sinnvoll, da die wenigen als Kieselkalk identifizierten Gesteine aus diesem

Ablagerungs- und Zeitraum unterschiedliche Sedimentstrukturen und geschätzte Mineralanteile aufweisen (A 7.2, S. 62f.). Sogar innerhalb desselben Dünnschliffs können teilweise verschiedene Gefüge erkannt werden.

Folgende generelle Beobachtungen können festgehalten werden:

- In allen Kieselkalkproben des helvetischen Valanginien tritt Kalzit als Hauptbestandteil auf. Kalzit kann als Sparit Korngrößen von 0,5 mm erreichen. Meist ist er vorwiegend feinkörnig in der Grundmasse als Mikrit vorhanden.
- Quarz findet sich in kleinen Mengenanteilen und hauptsächlich als detritischer Quarz. Vereinzelt kann in Bioklasten Chalcedon beobachtet werden.
- Pyrit tritt in zwei Varietäten auf, wobei die eine Varietät homogen im Gestein verteilt ist und die andere entlang von meist schichtparallelen Lagen angereichert ist, die seitlich begrenzt oder durchgehend sind. Die Grösse des Pyrits ist <0,1 mm.

**Bemerkung:** Im Raum Ringgenberg/BE findet sich ein Kieselkalk, der im Schlammgefüge deutlich weniger als 10% Komponenten aufweist und gemäss Klassifikation nach DUNHAM (1962) als Mudstone bezeichnet werden muss. Generell sind Mudstones in den Kieselkalken aller Varietäten aber selten zu finden.

## 7.7 Kieselkalk der Moltrasio-Formation (Südalpen)

### 7.7.1 Makroskopische Beschreibung

Der Kieselkalk der Moltrasio-Formation zeigt zwei verschiedene Ausbildungsformen:

- In der Moltrasio-Formation können Sequenzen beobachtet werden, die aus einer Wechselfolge von verkieselten Kalkbänken und mergeligen Zwischenlagen bestehen (Abbildung 7.5 a). In diesen Sequenzen findet sich Silex mehrheitlich in Knollen und in seitlich begrenzten Lagen (<2 m). Eine Vielzahl von aufgelassenen Steinbrüchen im Kanton Tessin wurde in solchen Sequenzen des Kieselkalks angelegt.
- Im schätzungsweise grössten Teil der Formation treten Sedimentsequenzen auf, die durch eine Wechsellagerung von bis zu dm-mächtigen Silex- und Kalksiltit bis Kalkarenitlagen<sup>1</sup> charakterisiert sind (Abbildung 7.5 b). Die Silexvorkommen treten sowohl als seitlich begrenzte als auch unbegrenzte Lagen auf. Die Silexlagen sind oftmals über die Schichtlagengrenzen miteinander verwachsen.

Die Kieselkalke der durchgehend verkieselten Kieselkalkbänke haben im frischen Handstück eine graue bis dunkelgraue Farbe. Angewittert zeigen sie eine hellgraue bis gelbliche Farbe sowie eine raue Oberflächenstruktur. Die

einzelnen Bänke weisen eine Mächtigkeit von bis zu 1 m auf. In den durchgehend verkieselten Kieselkalken findet sich Silex. Es zeigt meist scharfe Grenzen gegenüber dem umgebenden Gestein und tritt vorwiegend an Bankgrenzen auf.<sup>2</sup>

Mit Ausnahme der Ablagerungszyklen im oberen Teil der Moltrasio-Formation ist in der Sedimentabfolge meist eine deutliche Strömungslamination zu beobachten, die durch eine Einregelung von Schwammnadeln gezeichnet wird. Der Kieselkalk ist feinkristallin und zeigt im frischen Bruch muschelige, konkave und konvexe Flächen.

Die Moltrasio-Formation wurde durch die alpine Orogenese schwach beeinflusst. Es gibt Störungszonen wie Klüfte und Bruchflächen, kleinräumige ab und zu geschlossene Verfaltungen sowie eine offene Wellung der Formation im Grossmassstab (vgl. Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000, Blatt Nr. 39). Eine Metamorphose ist makroskopisch nicht zu erkennen.

**Bemerkung:** Die verschiedenen Ausbildungsformen der Moltrasio-Formation sind in den einzelnen Aufschlüssen erkennbar, können jedoch nicht stratigraphisch eingeordnet werden, da Leithorizonte oder Leitfossilien in der Formation fehlen.

### 7.7.2 Mikroskopische Beobachtungen

Die Klassifikation der Gesteine aufgrund des Gefüges (nach DUNHAM 1962) zeigt, dass es sich bei den beprobten Kieselkalken aus der Moltrasio-Formation vorwiegend um Wackestones handelt (A 7.3, S. 64f.). Bei wenigen Gesteinsproben kann ein Partikel gestütztes Gefüge festgestellt werden, womit es sich durch das Vorhandensein von Mikrit um Packstones handelt.

**Karbonate:** Die Kieselkalke zeigen im Dünnschliff als Hauptbestandteil Kalzit. Viele Kieselkalke sind reich an Bioklasten (vorwiegend Schwammnadeln), die eine sekundäre Karbonatisierung zeigen.

Ein rhomboedrisch ausgebildetes Karbonat ist in allen Dünnschliffen zu beobachten. Es wächst über das bestehende Gefüge und zeigt keine Eigenfarbe.

**SiO<sub>2</sub>-Polymorphe** finden sich in den Kieselkalken in zwei verschiedenen Ausbildungsformen:

- Mikroquarz (<0,05 mm): Er liegt in Aggregaten <4 mm vor. Die Aggregate bilden vorwiegend längliche und runde Formen und sind unsystematisch im Gestein verteilt. Die einzelnen Mikroquarzkörner löschen im polarisierten Licht bei unterschiedlichen Positionen aus, was deren Kornform- und Grössenbestimmung vereinfacht. Es handelt sich der Ausbildung nach um sekundär gebildeten authigenen Quarz. Der Mikroquarz zeigt ausschliesslich kantige Kornformen. Lösungserscheinungen

<sup>1</sup> Einteilung der Kalkgesteine nach der Korngrösse (FÜCHTBAUER & MÜLLER 1977, TUCKER 1985). Kalkarenit: Partikelgrößen zwischen 2 mm und 62 µm. Kalksiltit: Die meisten Partikel < 62 µm.

<sup>2</sup> Hinweis: Im Nudo-Becken westlich des Generoso-Beckens, wird der Kieselkalk als blaues, muschelig brechendes, gut gebanktes Gestein beschrieben, in welchem Hornsteinlagen und -knauer herauswittern (VAN HOUTEN 1929).





Abbildung 7.5: Unterschiedliche Ausbildung des Kieselkalks der Moltrasio-Formation. a) Aufschluss von kompakten, durchgehend verkieselten Kieselkalkbänken (inkl. Lamination). Einzelne Bänke sind durch Zwischenlagen getrennt. Aufschluss entlang der Strasse bei Caneggio im Muggiotal (Bildbreite umfasst ca. 3 m, Koord. 723.600/817.000). b) Unsystematische Wechselfolge von dunklen Silex- mit hellen Kalksilt- bis Kalkarenitlagen (inkl. Laminierung). Die Kalksilt- und Kalkarenitlagen (hellgrau) verwittern gegenüber den Silexlagen intensiver. Probenherkunft aus der Region von Arogno/TI (Bildbreite: 12 cm, Koord. 720.800/910.000).

nungen sind bei den Mikroquarzkörnern nicht zu beobachten.

- Chalcedon findet sich in Schwammnadeln und Radiolarien in der Grundmasse.

In vielen Dünnschliffen sind rostbraune Verfärbungen feststellbar, die dem Gestein teilweise ein mosaikartiges Muster verleihen. Die Verfärbungen treten gegenüber der grundsätzlich leicht braunen Farbe im Dünnschliff hervor und korrelieren mit den qualitativ erfassten potenziellen Schwachzonen, die von Pyrit begleitet werden (Tabelle 7.1). Es handelt sich dabei um alterierte Zonen, in denen sekundär Eisenhydroxid ausgefällt wurde.

## 7.8 Kieselkalke der Préalpes médianes

### 7.8.1 Makroskopische Beobachtungen

Durch das Auftreten der Kieselkalke in unterschiedlichen Lias-Decken existieren in den Préalpes médianes eine Vielzahl von Kieselkalken (vgl. METTRAUX 1989). Die Kieselkalke treten meist in Wechsellagerung mit Zwischenlagen auf. Der Übergang zwischen den Kieselkalk- und den Zwischenlagen ist scharf.

Der Lias-Kieselkalk zeigt in der Regel Bankungen von 15–60 cm Mächtigkeit. Vereinzelt sind die Bänke jedoch bis zu einem Meter mächtig. So zum Beispiel in Aufschlüssen oberhalb von Montreux/VD. In den Couches des Petit Liençon, den Couches de Chauderon und in den Couches de la Grande Bonavau treten Sequenzen auf, in denen Kieselkalkbänke kaum von Zwischenlagen unterbrochen werden. Als Beispiel kann auf Kieselkalksequenzen zwischen Glion und Caux/VD oder bei Gruyères/FR verwiesen werden.

Im Vergleich mit anderen Gesteinen aus dem Lias der Préalpes médianes sind die massiven Gesteinsbänke der verkieselten Abfolgen im frischen Handstück auffallend dunkel. Meist haben sie eine graue bis dunkelgraue Farbe. Karbonatreiche Kieselkalke zeigen eine hellgraue Farbe

und lassen sich leichter brechen, als die dunklen Varietäten. Vereinzelt kann ein blasses Fleckenmuster von dunkelgrauen Bereichen in einer helleren Matrix festgestellt werden. Angewittert zeigen die Gesteine eine rostig farbige Verwitterungskruste, die mehrere Zentimeter mächtig sein kann.

Die Kieselkalke sind feinkristallin. Vereinzelt, makroskopisch sichtbare Kalzitkristalle sind <1 mm. In einigen Kieselkalken der Préalpes médianes treten Kalzitkristalle in grossen Mengen auf.

Abgesehen von Belemniten, sind Fossilien in den Kieselkalken der Préalpes médianes selten zu finden.

### 7.8.2 Mikroskopische Beobachtungen

Für die Kieselkalke aus den Préalpes médianes ist eine zusammenfassende Beschreibung der mikroskopischen Beobachtungen nur bedingt aufschlussreich, da die Gesteine aus verschiedenen Decken stammen und unterschiedliche Sedimentstrukturen sowie Mineralanteile aufweisen (A 7.4, S. 68f.).

Folgende generelle Beobachtungen können aber festgehalten werden:

- Kalzit kommt sowohl im Mikrit, als auch Sparit vor. Kalzit tritt in unterschiedlichen Mengenanteilen auf, wobei in einzelnen Kieselkalkproben der Kalzitanteil kleiner als der Quarzanteil ist.
- Ein Mischkristall der Reihe Dolomit–Ankerit kann in allen Dünnschliffen beobachtet werden. Er überwächst in allen untersuchten Proben das bestehende Gefüge.
- Quarz ist sowohl als Mikroquarz, als auch Chalcedon vorhanden. Detritischer Quarz kann nur in wenigen Proben beobachtet werden.
- Sofern Chlorit festgestellt werden kann, wächst er über das bestehende Gefüge.

In den sieben untersuchten Kieselkalkproben aus den Préalpes médianes zeigen die bioklastenreichen Gesteine partikelgestützte Gefüge, was nach der Klassifikation nach DUNHAM (1962) Packstones entspricht.



Tabelle 7.1: Auswertung der Untersuchungen im Dünnschliff: Anteil an detritischem Quarz, Glaukonit sowie Klassifizierung nach DUNHAM (1962) und Tendenz (in Klammern schwache Tendenz). Als «M/S» wird das Verhältnis von Mikrit zu Sparit angegeben. Mit der «Korngrösse» wird die mittlere Kristallgrösse ausgedrückt (vgl. FÜCHTBAUER & MÜLLER 1977). Folgende Einteilung wurde für die Erfassung von potenziellen Schwachstellen vorgenommen: – keine Schwachstellen sichtbar; (x): wenige, teils durchgehende Schwachstellen; x: viele, teils durchgehende Schwachstellen; xx: sehr viele, teils durchgehende Schwachstellen. Das «eingeregelter Gefüge» wird durch längliche Minerale oder Schwammnadeln definiert. Die Kieselkalkvarietäten sind durch gestrichelte Linien getrennt. Reihenfolge (durch gestrichelte Linie getrennt): Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation, Helvetische Kieselkalke des Valanginiens, Kieselkalke der Moltrasio-Formation, Kieselkalke aus dem Lias der Préalpes médianes.

Probe	Det. Qz [Vol.-%]	Glaukonit [Vol.-%]	Klassifizierung	Tendenz	M/S	Korngrösse [mm]	Potenz. Schwachzonen	Eingeregelter Gefüge	homogener Aufbau
KK2	3,7	0,5	Packstone	(Wackestone)	0,50	0,30	x	teilweise	nein
KK3	3,2	0,1	Wackestone		3,00	0,10	xx	nein	nein
KK6	5,1	–	Wackestone	Mudstone	6,00	<0,1	xx	nein	ja
KK7	7,2	0,1	Packstone	(Wackestone)	0,33	0,10	xx	teilweise	ja
KK8	4,8	–	Wackestone	(Packstone)					
KK9	1,7	0,1	Wackestone	Packstone					
KK10	2,0	–	Wackestone	(Mudstone)	5,00	<0,1	–	nein	nein
KK11	0,2	0,1	Wackestone	(Mudstone)	10,00	<0,1	(x)	nein	nein
KK12	4,3	0,2	Packstone		0,50	0,35	–	nein	ja
KK13	3,3	0,2	Packstone	Wackestone	0,20	0,20	(x)-x	nein	ja
KK14	5,1	3,6	Packstone						
KK15	2,3	0,2	Packstone	(Wackestone)					
KK16	1,6	1,2	Wackestone		3,00	<0,1	(x)	teilweise	nein
KK17	1,0	0,1	Wackestone	Packstone					
KK18	0,6	0,1	Wackestone		4,00	<0,1	x	nein	nein
KK19	0,2	–	Wackestone						
KK20	8,4	0,2	Wackestone		3,00	0,10	xx	ja	nein
KK21	2,1	–	Wackestone	Packstone	1,00	0,15	x	nein	nein
KK22	1,3	0,2	Packstone						
KK23	1,7	0,1	Wackestone		2,00	0,10	x	nein	nein
KK24	11,0	0,6	Packstone		0,25	0,20	x	teilweise	nein
KK26	1,8	–	Wackestone		1,50	<0,1	x	ja	nein
KK28	0,2	–	Wackestone	(Packstone)	3,00	0,20	(x)	nein	nein
KK29	20,0	–	Packstone		1,00	0,10	x	ja	nein
KK30	17,8	–	Wackestone	Packstone	1,00	0,10	xx	nein	ja
KK31	6,1	2,7	Wackestone	Packstone	2,00	0,15	(x)	nein	ja
KK32	8,1	–	Packstone	(Wackestone)	0,50	0,10	xx	ja	ja
KK33	10,0	–	Packstone	(Wackestone)					
KK34	0,2	–	Packstone		1,00	0,10	x	teilweise	nein
KK35	0,2	0,1	Wackestone		3,00	<0,1	–	ja	ja
BKK1	0,9	0,1	Wackestone						
SKK1	3,5	0,1	Wackestone						
VKK1	0,2	–	Mudstone	(Wackestone)	15,00	<0,1	xx	teilweise	nein
VKK2	0,3	–	Packstone		0,25	0,30	x	teilweise	nein
VKK3	0,2	–	Wackestone	(Mudstone)					
KK27	1,3	–	Wackestone		8,00	0,10	(x)	nein	nein
LKK1	–	–	Wackestone		5,00	<0,1	(x)	ja	nein
LKK4	–	–	Wackestone	Mud/Packstone					
LKK6	–	–	Wackestone						
LKK7	–	–	Wackestone		3,00	<0,1	(x)	ja	nein

Fortsetzung Tabelle 7.1

Probe	Det. Qz [Vol.-%]	Glaukonit [Vol.-%]	Klassifizierung	Tendenz	M/S	Korngrösse [mm]	Potenz. Schwachzonen	Eingeregeltes Gefüge	homogener Aufbau
LKK8	–	–	Wackestone	(Packstone)	4,00	<0,1	(x)	ja	nein
LKK9	–	–	Packstone	(Wackestone)	1,00	0,10	–	ja	nein
LKK10	–	–	Packstone	(Wackestone)					
LKK11	–	–	Wackestone	Packstone					
LKK12	–	–	Wackestone						
LKK13	–	–	Wackestone		4,00	<0,1	(x)	teilweise	nein
LKK14	–	–	Wackestone						
LKK16	–	–	Wackestone		3,00	<0,1	xx	teilweise	nein
LKK17	0,1	–	Packstone		0,50	0,10	(x)	nein	nein
LKK18	–	–	Mudstone	(Wackestone)	15,00	<0,1	(x)	nein	nein
LKK19	1,5	–	Wackestone						
LKK21	2,3	–	Wackestone	(Packstone)	0,50	0,15	xx	ja	nein
LKK22	4,2	–	Packstone		0,25	0,20	xx	nein	nein
LKK24	0,1	–	Packstone						
LKK26	0,2	–	Wackestone		2,00	<0,1	xx	ja	ja

## 7.9 Folgerungen

Die Kieselkalk-Formationen aller Varietäten sind durch eine Wechselfolge von Kieselkalkbänken mit Zwischenschichten charakterisiert. Die Mächtigkeit der einzelnen Kieselkalkbänke und Zwischenlagen variiert stark.

Die für die technische Nutzung wichtigen Sequenzen, in denen die einzelnen Kieselkalkschichten dick gebankt sind und die Zwischenlagen beinahe vollständig zurücktreten, sind in allen Varietäten vorwiegend lokal und nur auf Teile der Kieselkalkabfolgen bzw. -Formationen beschränkt. Im Hinblick auf die Verwendung der Kieselkalke im Verkehrsinfrastrukturwesen ist eine Abschätzung des gesamtschweizerisch nutzbaren Kieselkalkvolumens somit sehr schwierig.

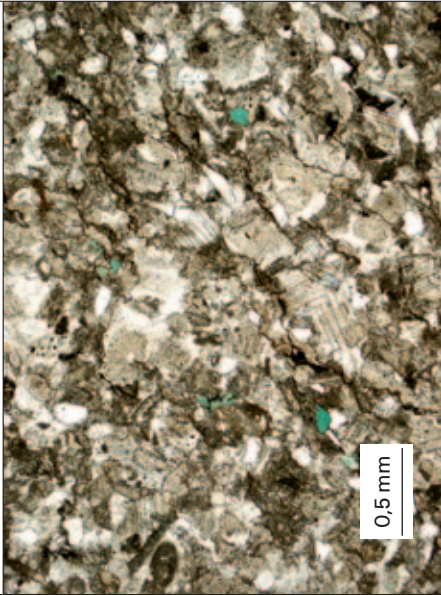
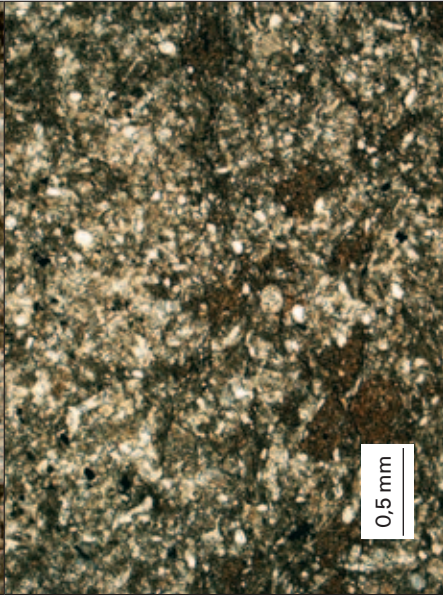
Die Untersuchung der Gesteine im Dünnschliff zeigt, dass die Varietäten des Kieselkalks auf Grund des Mineralbestands und des Gefüges schwierig zu unterscheiden sind. Einzig die Kieselkalke der Moltrasio-Formation und der Helvetischen Kieselkalk-Formation können anhand von folgenden Merkmalen eindeutig von den anderen zwei Varietäten des Kieselkalks unterschieden werden:

1. Ausser in den Kieselkalken der Moltrasio-Formation kann immer detritischer Quarz beobachtet werden. Im Weiteren kommt Chlorit im Kieselkalk der Moltrasio-Formation nicht vor
2. Glaukonit kommt nur in den Kieselkalken der Helvetischen Kieselkalk-Formation vor

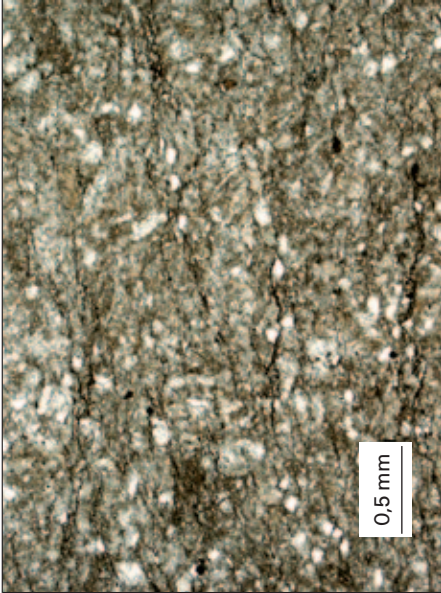
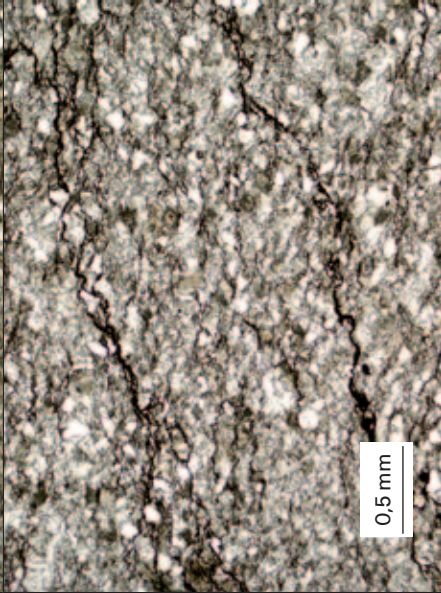
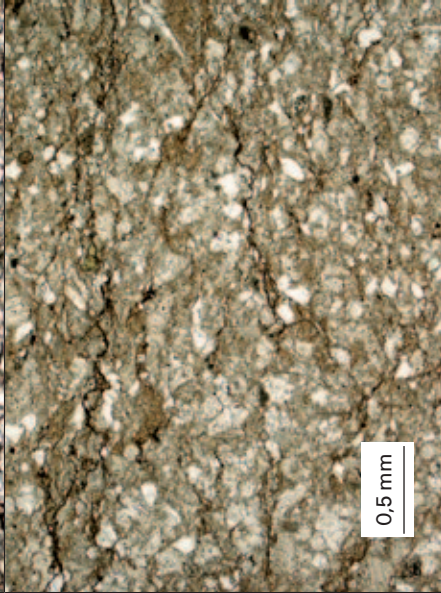
Vorwiegend der Anteil an Bioklasten, detritischem Quarz und Kalzit als Mikrit und Sparit in der Grundmasse führt in den Kieselkalken zu unterschiedlichen Sedimentstrukturen, die mit der Klassifikation nach DUNHAM (1962) erfasst werden können. Da in allen untersuchten Proben Mikrit vorhanden ist, beschränkt sich die Gefügebezeichnung auf Mudstones, Wackestones und Packstones. In jeder Varietät des Kieselkalks sind mindestens zwei der drei genannten Gefügetypen vorhanden.

Spikulite mit mehr als 50% Schwammnadeln, wie sie FLÜGEL (2004) beschreibt, können in den untersuchten Schweizer Varietäten des Kieselkalks nicht festgestellt werden. Dennoch finden sich Kieselkalke, in denen der Schwammnadelanteil beträchtlich, jedoch <50% sein kann. Mikroquarz kann im Dünnschliff ausser in den Kieselkalken der Moltrasio-Formation selten beobachtet werden.


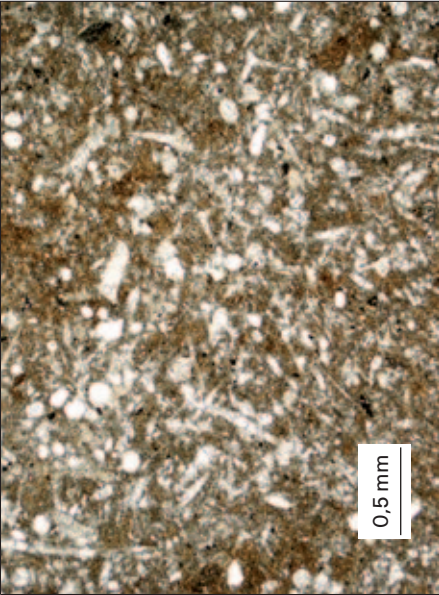
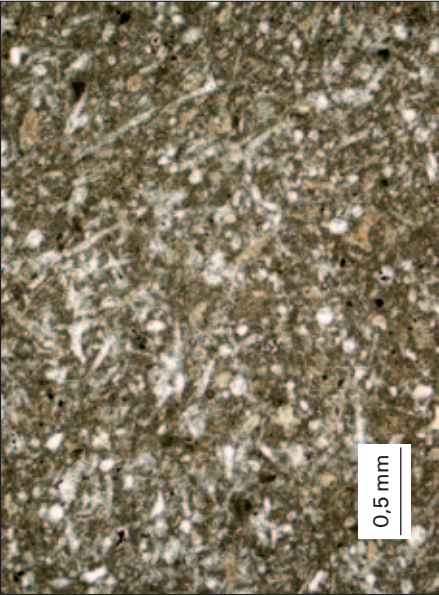
## A 7.1 Dünnschliffbeschreibungen: Helvetische Kieselkalk-Formation (Hauterivien, Frühe Kreide)

Dünnschliff	Kurzbeschreibungen	Minerale	Klassifikation nach DUNHAM (1962)	Dünnschliffaufnahmen
KK2	<p>In der grösstenteils sparitischen, teils mikritischen Grundmasse findet sich vorwiegend Kalzit. Bis 0,5 mm grosse Einkristalle von Kalzit überwachsen das primäre Gefüge.</p> <p>Detritischer Quarz (0,01–0,2 mm) ist ausser im Bereich von Stylolithen homogen verteilt, undulös auslöschend, zeigt angelöste Kornränder, die durch Kalzit ersetzt worden sind.</p> <p>Glaukonit ist homogen verteilt, bis 0,2 mm gross, und zeigt eine blass grüne Eigenfarbe.</p> <p>Schichtsilikate bilden wenige, seitlich begrenzte Lagen, die durch das oftmals damit vergesellschaftete Erz verstärkt hervortreten.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (3,7%)</li> <li>- Glaukonit (0,45%)</li> <li>- Schichtsilikate</li> <li>- Pyrit</li> </ul>	Packstone	
KK3	<p>Kalzit dominiert in der grösstenteils mikritischen Grundmasse. Kalzit überwächst zudem sekundär das Gefüge (Einkristalle &lt;0,4 mm). Mikrit/Sparrit 3:1.</p> <p>Det. Quarz (&lt;0,08 mm) zeigt kantige bis gerundete Formen und teilw. Lösungserscheinungen.</p> <p>Ankerit überwächst sekundär das best. Gefüge.</p> <p>Bioklasten sind meist kalzifiziert; Chaledon tritt aber vereinzelt noch in Echinodermen und Spongienüberresten auf.</p> <p>Glaukonit zeigt blassgrüne Eigenfarbe (0,06 mm).</p> <p>Pyrit tritt in mehreren mm grossen, alterierten Zonen in seitlich begrenzten Lagen auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (3,2%)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Glaukonit (0,1%)</li> <li>- Chaledon</li> <li>- Pyrit</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	



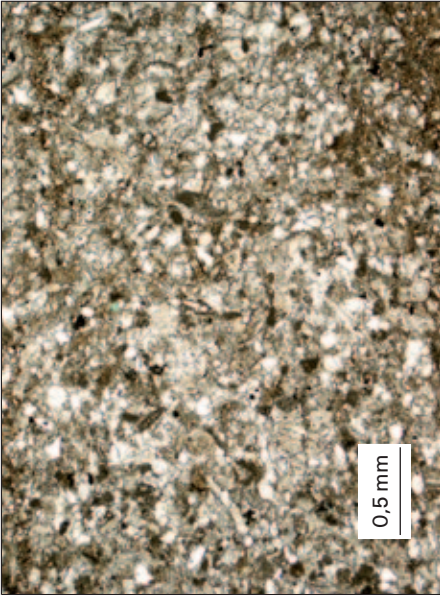
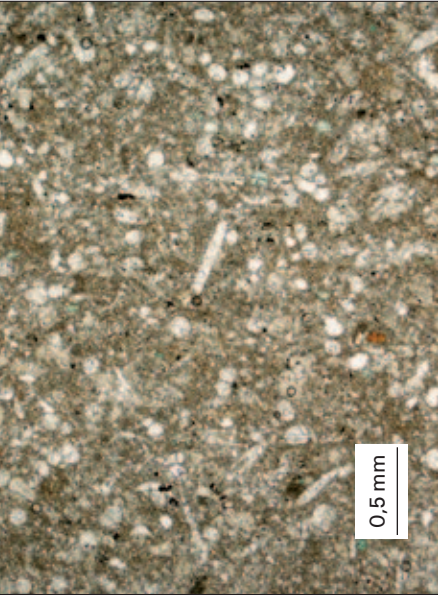
KK6	<p>Kalzit liegt grösstenteils in der mikritischen Grundmasse vor. Dünne (0,1 mm schmale) Kalzitklüfte sind mit sparitischem Zement verfüllt. Bioklasten bestehen durchwegs aus sekundär gebildetem Kalzit (Mikrit/Sparit 6:1).</p> <p>Quarz kann nur als Detritus beobachtet werden. Die bis 0,2 mm kleinen Körner zeigen unterschiedliche Kornformen. Auffallend sind Lösungserscheinungen am Quarz, die mit Kalzit sekundär ausgefüllt wurden.</p> <p>Schichtminerale durchziehen das Gestein in zusammenhängenden Lagen. Keine Anreicherung von detritischem Quarz.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (5,1 %)</li> <li>- Schichtsilikate</li> <li>- Pyrit</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
KK7	<p>Sparit überwiegt dem Mikritanteil. Sparitischer Kalzit erreicht Korngrößen bis 0,35 mm.</p> <p>Detritischer Quarz (0,1–0,2 mm) ist homogen verteilt und zeigt Lösungserscheinungen an den Kornrändern (gerundet und kantig).</p> <p>Aggregate von Mikroquarz sind über den ganzen Dünnschliff zu beobachten. Der Mikroquarz zeigt im Gegensatz zum det. Quarz keine Lösungserscheinungen.</p> <p>Schichtsilikate sind mit Erz vergesellschaftet und durchdringen das Gefüge in oftmals seitlich kaum begrenzten Lagen.</p> <p>Glaukonit ist akzessorisch vorhanden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (7,2 %)</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Pyrit</li> <li>- Glaukonit (0,05 %)</li> </ul>	Packstone	
KK8	<p>Kalzit ist sowohl in der mikritischen Grundmasse, als auch als sekundär gebildetes (bis 0,9 mm grosses) und Gefüge überwachsendes Mineral zu beobachten. (Mikrit/Sparit 3:2).</p> <p>Detritischer Quarz zeigt kantengerundete bis angerundete Körner; vielfach mit Lösungserscheinungen; Korngrösse bis 0,2 mm.</p> <p>Als weiteres Karbonat kann in rhomboedrischer Form Ankerit beobachtet werden (&lt;0,15 mm). Er überwächst das Gefüge sekundär und ist homogen verteilt.</p> <p>Erz (Pyrit) tritt meist zusammen mit Schichtsilikaten in teilweise durchgehenden Lagen auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (4,8 %)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Pyrit</li> <li>- Schichtsilikat</li> </ul>	Wackestone	



KK9	<p>Die Grundmasse enthält spartitische und mikritische (Mikrit / Sparit 1:1) Anteile. Kalzit ist als einziges Mineral im Mikrit zu erkennen. In der spartitischen Masse sind Kalzitkristalle &lt;0,9 mm. Detritischer Quarz ist bis 0,4 mm gross, angerundet und zeigt oftmals Lösungserscheinungen. Ankerit überwächst rhomboedrisch das Gefüge. Entlang von wenigen Brüchen/Klüften ist Pyrit angereichert. Glaukonit tritt nur akzessorisch auf und macht weniger als 0,1 % aus. Blasse, weissgrüne Eigenfarbe.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (1,7 %)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Pyrit</li> <li>- Glaukonit (0,05 %)</li> <li>- Schichtsilikat</li> </ul>	Wackestone	
KK10	<p>Kalzit ist in der Grundmasse als Mikrit vorhanden. Vereinzelt kann Kalzit als Sparit beobachtet werden. Monaxone und Tetraedre (Spongienadeln) sind beinahe vollständig durch sekundären Kalzit ersetzt. Vereinzelt kann Chaledon beobachtet werden. Mikrit/Sparit 5:1. Ankerit ist ebenfalls vorhanden. Detritische Quarzkörner sind gerundet bis kantig und zeigen oftmals Lösungserscheinungen. Pyrit ist homogen verteilt. Ton ist kaum festzustellen und bildet keine durchgehenden Lagen. Farbliche Differenzierung: Rostbräunliche (Eisenhydroxid?) vs. beige nat. Einfärbung.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (2 %)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Chaledon</li> <li>- Pyrit</li> </ul>	Schwammnadelreicher Wackestone	
KK11	<p>Kalzit tritt hauptsächlich in der mikritischen Grundmasse auf. Diverse Bioklasten: Grosse Muschelbruchstücke, Spongiennadeln (hauptsächlich Monaxone), Echinodermen. Organische Reste? Mikrit/Sparit 10:1. Ankerit (&lt;0,1 mm) überwächst als sekundär gebildetes Mineral rhomboedrisch das bestehende Gefüge. Wenig det. Quarz (0,2 %) &lt;0,1 mm, kantig. Farbliche Unterscheidung von rostbraunen und beigen Partien. Im Bereich von Schwächezonen, die von Erz begleitet werden, ist das Gestein rostbraun verfärbt (Alterierung).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (0,2 %)</li> <li>- Erz (u. a. Pyrit)</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	

KK12	<p>Die Grundmasse ist vorwiegend sparitisch ausgebildet und bildet ein Partikelgefüge. Bei den Partikeln handelt es sich hauptsächlich um Kalzitkristalle (0,3–0,5 mm). Foraminiferen und Bryozoen sind erkennbar.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,2 mm) zeigt angerundete Kornformen und Lösungserscheinungen an den Kornrändern.</p> <p>Glaukonit ist akzessorisch vertreten. Gehalt &lt;0,2%. Erz (&lt;0,1%) hauptsächlich homogen verteilt.</p> <p>Das Gestein zeigt wenig Bruchzonen, die zudem nicht durch den ganzen Schliff verfolgbar sind.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (4,3%)</li> <li>- Glaukonit (0,15%)</li> <li>- Erz (Pyrit)</li> </ul>	Packstone	
KK13	<p>Bioklasten (Echinodermen) werden durchwegs von sekundärem Kalzit überwachsen. Es zeigt sich eine sparitische Grundmasse mit wenig Mikrit. Mikrit/Sparit 1:5.</p> <p>Quarz ist nur in Form von detritischen Körnern zu beobachten: kantig-gerundet, undulös auslöschend, teilweise Lösungserscheinungen, bis 0,25 mm gross.</p> <p>Glaukonitkörner (&lt;0,2 mm) blassgrüne Eigenfarbe. Schichtsilikate sind mit Erz vergesellschaftet, bilden aber keine durchgehenden Lagen (max. 1 cm seitliche Ausdehnung).</p> <p>Typisches Partikelgefüge.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (3,3%)</li> <li>- Glaukonit (0,23%)</li> <li>- Schichtsilikat</li> <li>- Erz</li> </ul>	Packstone	
KK14	<p>Kalzit bildet mit bis zu 1,3 mm grossen Partikeln ein Partikelgefüge. Eine mikritische Grundmasse ist untergeordnet vorhanden. Bei den Partikeln handelt es sich vorwiegend um Bryozoenüberreste.</p> <p>Das Verhältnis von Mikrit/Sparit beträgt ca. 1:4. Evtl. Ankerit.</p> <p>Blassgrüner Glaukonit (&lt;0,45 mm) ist homogen im Gestein verteilt.</p> <p>Det. Quarz (&lt;0,4 mm) zeigt kantige bis gerundete Kornformen und meist angelöste Kornränder.</p> <p>Erz tritt bevorzugt in der Maschenstruktur der Bryozoenüberreste auf, findet sich aber auch entlang von Korngrenzen angehäuft.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (5,1%)</li> <li>- Glaukonit (3,6%)</li> <li>- Erz</li> <li>- Ankerit?</li> </ul>	Packstone	


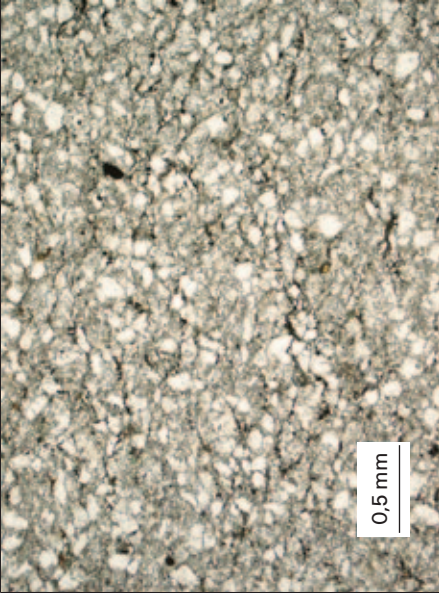
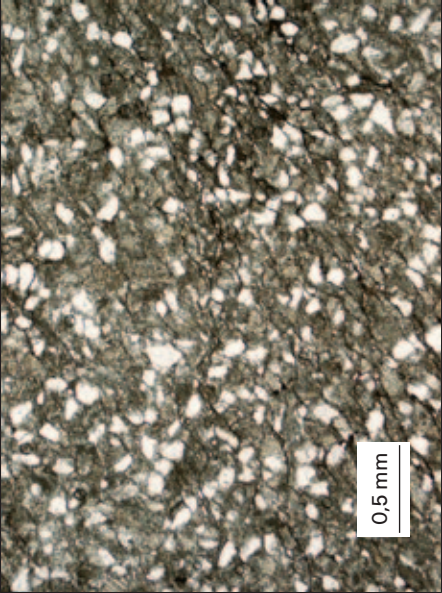


KK15	<p>Kalzit ist vorwiegend in der mikritischen Grundmasse vorhanden. Mengenmässig untergeordnet überwachsen Kalzeinkristalle (&lt;0,9 mm) das Gefüge. Mikrit/Sparit 3:2.</p> <p>Rhomboedrische Kristalle &lt;0,4 mm überwachsen sekundär das bestehende Gefüge: Ankerit.</p> <p>Detritische Quarz (bis 0,1 mm), gerundet bis kantig, zeigt deutliche Lösungserscheinungen. Lösungstellen sind durch sekundär gebildeten Kalzit verfüllt.</p> <p>Glaukonit &lt;0,1 mm, blassgrüne Eigenfarbe. Kalzitklüfte durchziehen das Gestein. Erz ist in alternierten/rostig verfärbten Partien angehäuft.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (2,3%)</li> <li>- Glaukonit (0,16%)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Packstone	
KK16	<p>Kalzit dominiert in der grösstenteils mikritischen Grundmasse. Spongiennadeln (Monaxonen und Tetraxonen) sind durchwegs durch Kalzit ersetzt. Mikrit/Sparit 3:1.</p> <p>Ankerit (&lt;0,1 mm) überwächst das best. Gefüge.</p> <p>Detritischer Quarz ist maximal 0,15 mm gross und zeigt an den Kornrändern teils angelöste Partien.</p> <p>Der Anteil an detritischem Quarz entspricht ungefähr dem Glaukonitanteil.</p> <p>Glaukonit zeigt eine blassgrüne Eigenfarbe und ist &lt;0,15 mm.</p> <p>Pyrit ist vorwiegend in begrenzt ausgedehnten Bruchzonen angehäuft.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (1,6%)</li> <li>- Glaukonit (1,2%)</li> <li>- Erz (Pyrit)</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
KK18	<p>Feinkristalline, dunklere Bereiche befinden sich in einer helleren, gröber kristallinen Grundmasse.</p> <p>Kalzit findet sich in beiden Bereichen vorwiegend als Mikrit. Bioklasten sind vorwiegend kalzifiziert. Mikrit/Sparit 4:1.</p> <p>Det. Quarz zeigt vorwiegend angerundete Kornformen und teilweise Lösungsphänomene.</p> <p>Der grösste Teil der Spongien ist vollständig kalzifiziert. Der Rest ist mit Chalcedon verfüllt.</p> <p>Ankerit &lt;0,1 mm überwächst das Gefüge.</p> <p>Pyrit ist entlang von ausgedehnten, jedoch seitlich begrenzten Lagen angereichert.</p> <p>Glaukonit tritt akzessorisch &lt;0,1 mm auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (0,6%)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Pyrit</li> <li>- Glaukonit (0,1%)</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	

KK20	<p>Kalzit ist vorwiegend in der mikritischen Grundmasse vorhanden. Karbonatrhomboeder (&lt;0,2 mm) überwachsen das bestehende mikritisch/spartische Gefüge. Es handelt sich um Ankerit. Mikrit/Sparit 3:1.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,15 mm) zeigt stark angeätzte Ränder, die sekundär mit Kalzit ausgeheilt sind. Mikroquarz ist selten eindeutig identifizierbar.</p> <p>Eine partielle, rostbräunliche Verfärbung der vorwiegend mikritischen Partien (Alterierung?) geht mit einer lagenförmigen Ausbreitung von Erzmineralen einher.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (8,4%)</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Glaukonit (0,17%)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Wackestone	
KK21	<p>Mikrit und Sparit (bis 0,4 mm) sind in etwa gleichen Mengenanteilen vorhanden. Mikrit/Sparit 1:1.</p> <p>Bioklasten sind grösstenteils kalzifiziert. Spongienadeln (Monaxone und Tetraxone) zeigen im Kern Chalcedon, während die Ummantelung aus Kalzit besteht.</p> <p>Ankerit (&lt;0,2 mm) wächst sekundär über das bestehende Gefüge.</p> <p>Der detritische Quarz (&lt;0,1 mm) zeigt kantengerundete Formen und angelöste Kornränder.</p> <p>Mikroquarz kann vereinzelt beobachtet werden.</p> <p>Erz ist entlang von alternierten, farblich rostbraunen Zonen lagig angehäuft.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (2,1%)</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Glaukonit (0,02%)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
KK22	<p>Kalzitkomponenten und Quarz bilden ein Partikelgefüge. Mikrit kommt untergeordnet vor.</p> <p>Bioklasten (Bryozoen) sind meist vollständig von Kalzit (bis 1,3 mm) überwachsen.</p> <p>Mikrit/Sparit 1:3.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,2 mm) zeigt kantige bis angerundete Kornränder. Leichte Lösungserscheinungen sind zu beobachten.</p> <p>Ankerit (&lt;0,15 mm) überwächst sek. das Gefüge.</p> <p>Erz ist einerseits in Lagen angereichert, die teilweise durch den ganzen DS ziehen. Andererseits findet es sich konz. in Bryozoenresten.</p> <p>Glaukonit zeigt Korngrößen bis 0,2 mm.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (1,3%)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Glaukonit (0,24%)</li> <li>- Pyrit</li> </ul>	Packstone	

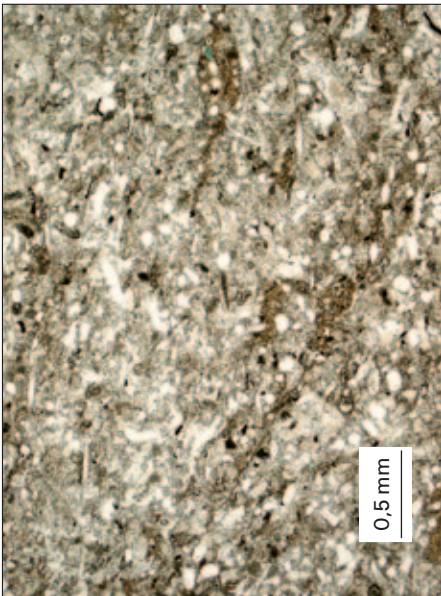




KK23	<p>Kalzit ist vorwiegend in der mikritischen Grundmasse zu finden. Klüfte (bis 0,5 mm) sind spärlich verfüllt. Mikrit/Sparit 2:1. Ankeritrhomboeder treten als sekundäre Minerale in der Grundmasse auf.</p> <p>Detritischer Quarz kommt eher spärlich vor und ist maximal 0,1 mm gross. Kantig-gerundete Körner, teils angeätzte Ränder.</p> <p>Glaukonit (&lt;0,5 mm) ist homogen verteilt.</p> <p>Erz ist entlang von alterierten Zonen/Bruchflächen angereichert. Die Alteration fällt durch eine rostbraunen Verfärbung gegenüber der eher graubeißen Grundmasse auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (1,7%)</li> <li>- Glaukonit (0,05%)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
KK24	<p>Kalzit tritt hauptsächlich in der sparitischen Grundmasse auf. Der Anteil an Sparit überwiegt dem Mikrit. Mikrit/Sparit 1:4. Bioklasten (Bryozoen) sind vollständig von sekundär gebildetem Kalzit (bis 0,8 mm) überwachsen worden. Kalzit bildet zusammen mit detritischem Quarz ein Partikelgefüge.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,1 mm) zeigt kantige- kanten-gerundete Kornformen und Lösungserscheinungen an den Kornrändern.</p> <p>Glaukonit hat eine blassgrüne Eigenfarbe.</p> <p>Erz (Pyrit) tritt präferenziert in Bioklasten und in Lagen angereichert auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (11%)</li> <li>- Glaukonit (0,62%)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Packstone	
KK26	<p>Kalzit kommt sowohl in der vorwiegend mikritischen Grundmasse, als auch in den vollständig kalzifizierten Bioklasten (Spongienadeln bis 0,9 mm) vor. Mikrit/Sparit 3:2.</p> <p>Ankerit (&lt;0,1 mm) überwächst das best. Gefüge.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,2 mm) ist homogen im DS verteilt und zeigt oftmals Lösungserscheinungen an den Kornrändern. Die Kornrundung variiert von kantig bis gerundet.</p> <p>Mikroquarz kann vereinzelt beobachtet werden.</p> <p>Erz ist entlang von alterierten, rostbraun verfärbten Zonen angehäuft. Diese Zonen durchziehen den DS vollständig.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- det. Quarz (1,8%)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	

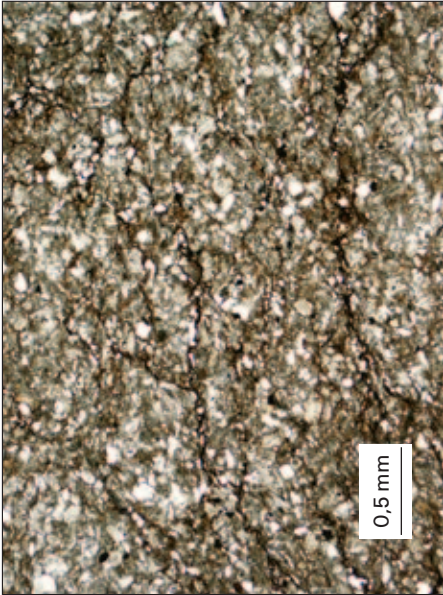
KK28	<p>Kalzit liegt vorwiegend in der mikritischen Grundmasse vor. Sekundär gewachsener Kalzit (Sparit) überwächst Bioklasten und bildet Einkristalle &lt;0,8 mm. Mikrit/Sparit 3:1.</p> <p>Detritischer Quarz ist nebst Chalcedon als Quarzvarietät erkennbar. Die Körner (&lt;0,03 mm) zeigen angerundete bis gerundete Formen und Lösungserscheinungen an den Kornrändern. Chalcedon findet sich in rundlichen Bioklasten (Echinodermen od. Radiolarien?). Ankerit (&lt;0,01 mm) wächst sek. über das best. Gef. Erz ist entlang von teils parallelen und seitlich nicht begrenzten Lagen angereichert.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (0,2%)</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Wackestone	
KK29	<p>Kalzit liegt im Gestein in einer sparitisch-mikritischen Grundmasse vor. Mikrit/Sparit 1:1.</p> <p>Detritischer Quarz ist inhomogen verteilt und zeigt oftmals nicht nur Lösungserscheinungen am Kornrand, sondern auch innerhalb des Korns. Dabei wird er durch sekundär gebildeten Kalzit ersetzt.</p> <p>Mikroquarz ist in einzelnen Bereichen des Dünnschliffs zu beobachten. Die Korngrösse liegt unter 0,04 mm.</p> <p>Erz ist vorwiegend fein im Gestein verteilt. Klinochlor (sek.) ist vereinzelt vorhanden und zeigt einen Pleochroismus von braun nach olivgrün.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (20%)</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Erz</li> <li>- Klinochlor</li> </ul>	Packstone	
KK30	<p>Kalzit liegt vorwiegend in der sparitischen Grundmasse vor. Der Anteil an Mikrit ist gering, verhindert aber teilweise ein durchgehendes Partikelgefüge. Mikrit/Sparit 1:2.</p> <p>Der Anteil an detritischem Quarz (&lt;0,15 mm) ist hoch. Die Körner sind kantig bis angerundet ausgebildet und zeigen nur teilweise Lösungserscheinungen an den Kornrändern.</p> <p>Klinochlor (sekundär gewachsen, &lt;0,1 mm) findet sich homogen verteilt und zeigt einen Pleochroismus von farblos nach blass braun. In Bruchzonen tritt ein Mineral auf (kein Erz!), bei dem es sich wahrscheinlich auch um Chlorit handelt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (17,8%)</li> <li>- Klinochlor</li> <li>- Erz</li> </ul>	Wackestone	



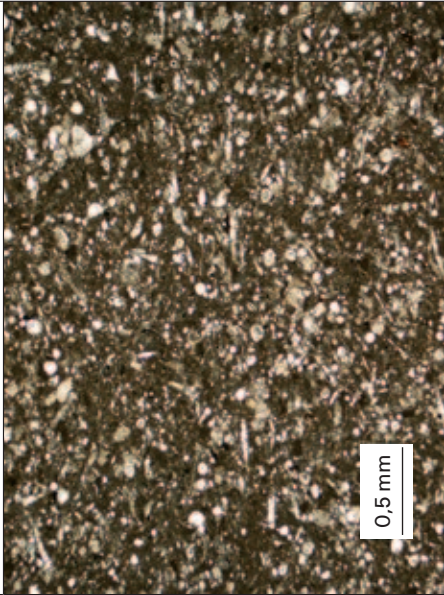
KK31	<p>Kalzit findet sich in der teils mikritischen, teils sparitischen Grundmasse. Bioklasten (Echinodermen) sind von sekundär gebildetem Kalzit überwachsen.</p> <p>Detritischer Quarz (<math>&lt;0,25</math> mm) ist homogen verteilt und zeigt an den Kornrändern Lösungserscheinungen. Der weggelöste Quarz ist durch sekundär gebildeten Kalzit ersetzt.</p> <p>Glaukonit (<math>&lt;0,25</math> mm) ist vorhanden und zeigt eine blaugrüne Eigenfarbe.</p> <p>Ankerit (<math>&lt;0,05</math> mm) wächst als sekundäres Karbonat über das bestehende Gefüge.</p> <p>Erz zeichnet ein lineares/planares Gefüge nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (6,1 %)</li> <li>- Glaukonit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Wackestone	
KK32	<p>Kalzit findet sich sowohl in der mikritischen Grundmasse, als auch als sekundär über Bioklasten (Bryozoen) wachsendes Mineral.</p> <p>Detritischer Quarz (<math>&lt;0,1</math> mm) zeigt gerundete bis angerundete Kornformen und ist an den Kornrändern meist angelöst. Sekundär gebildeter Kalzit verfüllt die gelösten Partien.</p> <p>Erz tritt zusammen mit Schichtmineralien (Bsp. Chlorit) entlang von seitlich begrenzten Lagen an und wächst dabei über das bestehende Gefüge. Die durchschnittlich 1 mm voneinander entfernten Lagen erzeugen im Gestein ein planares Gefüge.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (8,1 %)</li> <li>- Klinochlor</li> <li>- Erz</li> </ul>	Packstone	
KK33	<p>Kalzit liegt vorwiegend in der mikritischen Grundmasse vor.</p> <p>Det. Quarz (<math>&lt;0,15</math> mm) zeigt nicht nur an den Kornrändern, sondern auch innerhalb der Körner Lösungserscheinungen.</p> <p>Das Gestein zeigt durch die Anhäufung von schichtförmigen Mineralen (hauptsächlich Chlorit), entlang von Lagen ein stark ausgeprägtes, lineares bzw. planares Gefüge.</p> <p>Erz unterstreicht durch seine Anhäufung entlang der Chloritlagen das planare Gefüge.</p> <p>Weiteres Mineral (<math>&lt;0,15</math> mm): Pleochroitisch von blass gelb nach olivgrün, pseudomorph.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (10%)</li> <li>- Klinochlor</li> <li>- Erz</li> <li>- weiteres Mineral?</li> </ul>	Packstone	

KK34	<p>Die mikritisch/sparitische Grundmasse besteht hauptsächlich aus Kalzit. Spongiennadeln sind teilweise mit sekundärem Kalzit verfüllt. Mikrit/Sparit 1:1.</p> <p>Chalcedon findet sich in den meisten Monaxonen und Tetraxonen.</p> <p>Mikroquarz ist sichtbar vertreten. Er bildet bis 0,4mm grosse Mikroquarzaggregate.</p> <p>Detritischer Quarz ist max. 0,05 mm gross.</p> <p>Erz ist einerseits im Gestein homogen verteilt, andererseits tritt es innerhalb von rostbraun verfärbten Partien in seitlich begrenzten Lagen auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- det. Quarz (0,2%)</li> <li>- Erz</li> <li>- Glaukonit (0,02%)</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Packstone	
KK35	<p>Kalzit findet sich vorwiegend in der mikritischen Grundmasse. Bioklasten sind fast vollständig kalzifiziert; wenige bestehen aus Chalcedon. Mikrit/Sparit 3:1.</p> <p>Ankerit (&lt;0,1 mm) wächst in rhomboedrischer Form über das bestehende Gefüge.</p> <p>Detritischer Quarz zeigt angerundete Körner (&lt;0,1 mm) mit Lösungserscheinungen.</p> <p>Erz (Pyrit) ist einerseits homogen dispergiert, andererseits in seitlich begrenzten (sek. entst.?) Lagen angereichert.</p> <p>Glaukonit findet sich akzessorisch als blass grünes Mineral &lt;0,1 mm.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (0,2%)</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Erz</li> <li>- Glaukonit (0,07%)</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
BKK1	<p>Kalzit findet sich vorwiegend in der mikritischen Grundmasse. Bioklasten (Spongien, Bryozoen) sind durchwegs kalzifiziert.</p> <p>Det. Quarz (&lt;0,1 mm) zeigt Lösungserscheinungen an den Kornrändern. Kornform: kantig bis gerundet.</p> <p>Ankerit wächst als sekundär gebildetes, rhomboederförmiges Mineral (&lt;0,05mm) mit blass gelber Eigenfarbe über das bestehende Gefüge.</p> <p>Glaukonit (&lt;0,1 mm) ist akzessorisch vorhanden.</p> <p>Erz ist homogen in framboidalen Anhäufungen (&lt;0,05 mm) über das Gestein verteilt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (0,9%)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Glaukonit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	



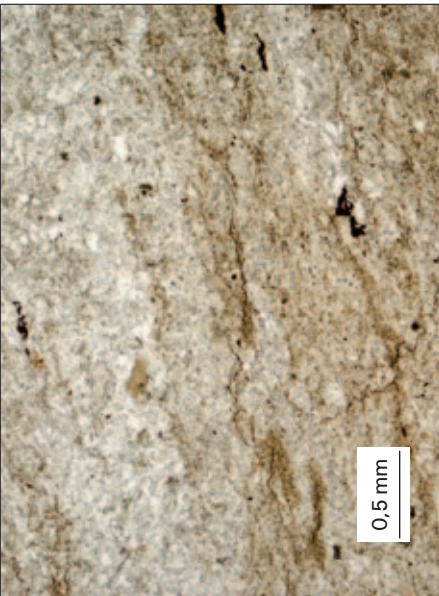
SKK1	<p>Kalzit tritt sowohl in der mikritischen Grundmasse, als auch in sekundär gewachsenen Einkristallen &lt;0,5 mm auf. Mikrit/Sparit 1:1.</p> <p>Quarz findet sich in zwei verschiedenen Varietäten: Det. Quarz (&lt;0,3 mm) ist homogen verteilt und zeigt angerundete Kornformen sowie Lösungserscheinungen. Chalcedon tritt in einzelnen Partien angehäuft in Echinodermeresten auf. Ankerit (&lt;0,2 mm) überwächst das best. Gefüge. Glaukonit (blassgrün) ist vereinzelt vorhanden. Erz ist vorwiegend in parallelen Lagen angereichert und zeichnet ein planares Gefüge.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (3,5%)</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Helglimmer</li> <li>- Glaukonit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Wackestone	
------	--	---	------------	--

## A 7.2 Dünnschliffbeschreibungen: Kieselkalk des Helvetischen Valanginiens (Frühe Kreide)

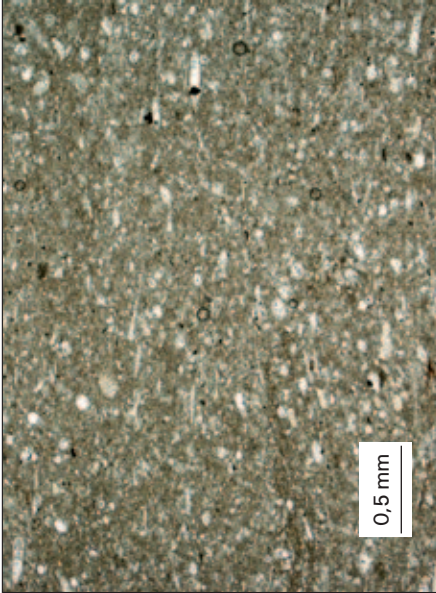
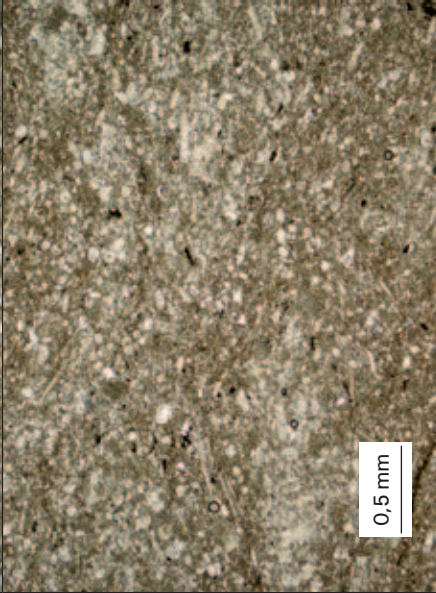
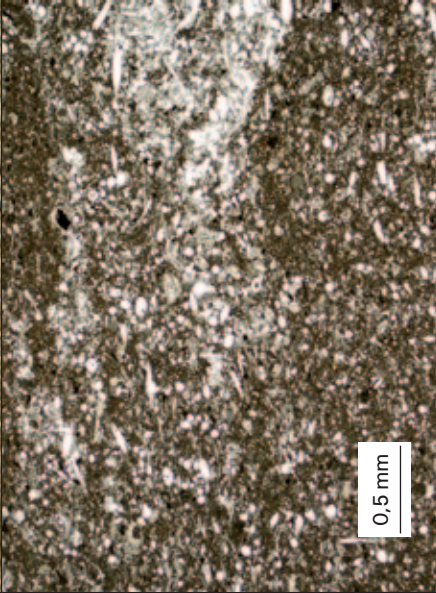
Dünnschliff	Kurzbeschreibungen	Minerale	Klassifikation nach DUNHAM (1962)	Dünnschliffaufnahmen
VKK1	<p>Kalzit liegt mit Ausnahme der Bioklasten hauptsächlich in der mikritischen Grundmasse vor. Die Bioklasten sind vollständig mit sekundär gebildetem oder rekr. Kalzit verfüllt.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,1 mm) tritt vereinzelt auf. Gelöste Kornränder sind mit Kalzit verfüllt.</p> <p>Erz ist nebst einer dispersiven Verteilung in der Grundmasse in seitlich begrenzten Lagen angereichert, die unsystematisch durch den DS ziehen.</p> <p>Dünnschliff hat Stellen, in welchen wenig Bioklasten vorkommen und eher der Begriff Mudstone zutreffen würde.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (0,2%)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Wackestone	

VKK2	<p>Kalzit liegt vorwiegend in einer sparitischen Grundmasse vor, die dem Gestein ein Partikel gestütztes Gefüge verleiht. Kalziteinkristalle können bis 1,5 mm gross sein. Sie wachsen meist sekundär über bestehende Bioklasten.</p> <p>Chalcedon findet sich vereinzelt und in sehr kleinen Mengen angereichert.</p> <p>Det. Quarz und Erz kann nur vereinzelt festgestellt werden. Qz zeigt Lösungserscheinungen.</p> <p>Im Gestein können feinkörnige Partien beobachtet werden, die einem Mud- Wackestone ähnlich sind.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (0,3 %)</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Erz</li> </ul>	Packstone	
KK27	<p>Kalzit findet sich hauptsächlich in der überwiegend mikritischen Grundmasse. Bioklasten (u. a. Spongien) sind vollständig kalzifiziert. Teilweise können kalzitische Einkristalle &lt;0,3 mm beobachtet werden. Mikrit/Sparit 8:1.</p> <p>Rhomboedrisch ausgebildeter Ankerit wächst über das bestehende Gefüge.</p> <p>Detritischer Quarz (max. 0,1 mm) ist homogen im Gestein verteilt und zeigt kantige Körner.</p> <p>Erz ist einerseits im DS homogen verteilt, andererseits entlang von alterierten und rostbraun verfärbten Zonen lagig angehäuft. Die Lagen sind meist in der Ausdehnung begrenzt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (1,3 %)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	


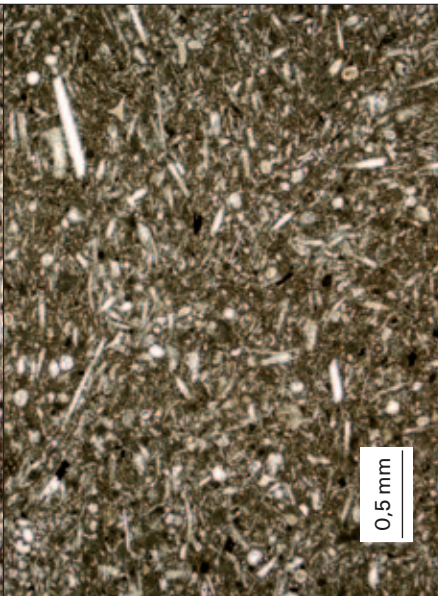
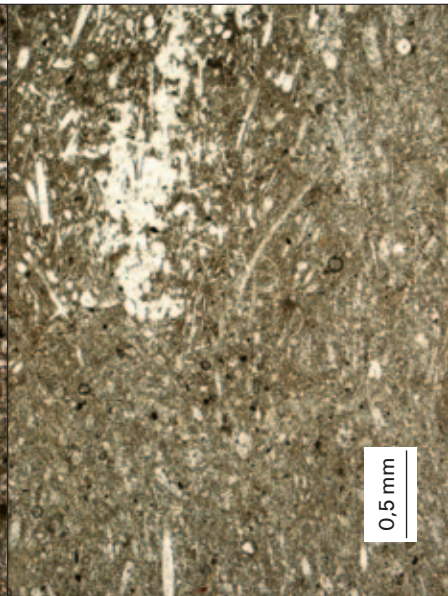
### A 7.3 Dünnschliffbeschreibungen: Kieselkalk der Moltrasio-Formation (Lias der Südalpen)

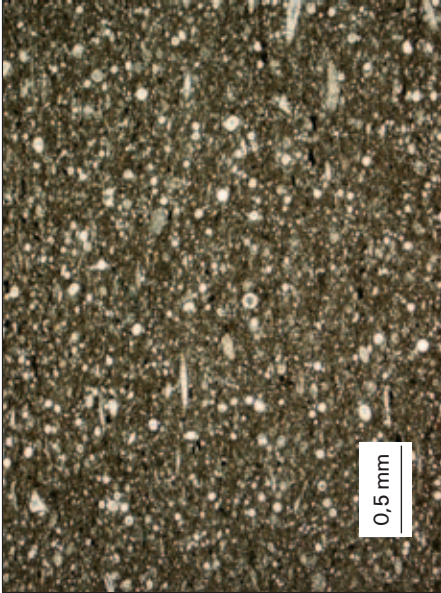


Dünnschliff	Kurzbeschreibungen	Minerale	Klassifikation nach DUNHAM (1962)	Dünnschliffaufnahmen
LKK1	<p>Kalzit liegt fast ausschliesslich in einer mikritischen Grundmasse vor. Vereinzelt sind Bioklasten mit sekundärem Kalzit sparitisch verfüllt (Spongien-nadeln und Echinodermen).</p> <p>Mikroquarz (&lt;0,05 mm) ist inhomogen im Gestein in bis zu 4 mm grossen Aggregaten angehäuft.</p> <p>Chalcedon tritt in 0,3 mm grossen, runden Formen auf (Querschnitt Spongiennadel, Echinodermen oder Radiolarien?).</p> <p>Ankerit wächst über das bestehende Gefüge.</p> <p>Kalkstein, in welchem der sekundäre Verkieselungsprozess nicht vollständig abgelaufen ist.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelreicher Wackestone	
LKK2	<p>Kalzit tritt vorwiegend in der mikritischen Grundmasse auf. Vereinzelt ist er als Einkristall (&lt;0,2 mm) ausgebildet.</p> <p>In der mikritischen Grundmasse sind Zonen intensiver Verkieselung festzustellen. Mikroquarz bildet dabei bis cm grosse Aggregate von feinkörnigem Quarz, die nur wenig Kalzit enthalten.</p> <p>Radiolarien bestehen vorwiegend aus Chalcedon.</p> <p>Als sekundäres Mineral überwächst ein rhomboedrisches Karbonat (&lt;0,05 mm) das bestehende Gefüge: Mischkristall der Reihe Dolomit-Siderit.</p> <p>Erz ist homogen verteilt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	



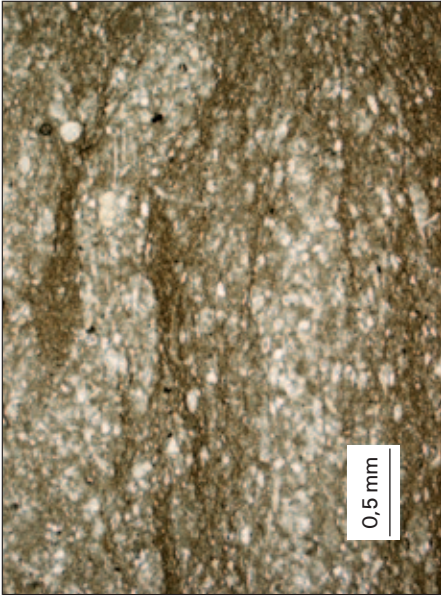
LKK6	<p>Mikritische Grundmasse mit Spongiennadeln, die vollständig mit Kalzit verfüllt sind. Vereinzelt sind bis 0,15 mm grosse Kalzeinkristalle in der Grundmasse zu beobachten. Die parallele Ausrichtung der Spongiennadeln erzeugt ein planares Gefügeelement.</p> <p>Ankerit fällt durch das sekundäre Überwachsen der Grundmasse auf.</p> <p>Mikroquarz kommt im Dünnschliff selten vor.</p> <p>Pyrit ist einerseits homogen verteilt, andererseits fällt in rostbraun verfärbten Partien eine Ansammlung von Erz in Lagen beschränkter Ausdehnung auf.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
LKK7	<p>Kalzit liegt einerseits als mikritische Grundmasse, andererseits in rekristallisierter Form in Bioklasten (v.a. Spongiennadeln) vor. Die Bioklastenanteile ist &gt; 10%. Die Spongiennadeln sind vollständig kalzifiziert.</p> <p>Bioklasten (Crinoiden, Radiolarien) bestehen teilweise aus Chalcedon. Im Zentralkanal von Crinoiden findet sich dabei oftmals Kalzit.</p> <p>Ankerit wächst über die bestehende Grundmasse. Erz findet sich nicht nur homogen in der Grundmasse dispergiert, sondern auch in rostbraun verfärbten (alterierten) Partien in Lagen angereichert.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Pyrit</li> </ul>	Schwammnadelreicher Wackestone	
LKK8	<p>Inhomogen aufgebautes Gestein mit Partien von Wackestone und Packstone.</p> <p>Die Echinodermen (Crinoiden) und Spongiennadeln sind in den Packstonepartien grösstenteils silifiziert (Chalcedon). In den übrigen Partien sind die Bioklasten rekristallisiert und durch Kalzit ersetzt.</p> <p>Mikroquarzaggregate kommen vereinzelt in der Grundmasse vor. Deren Grösse ist auf 5 mm beschränkt.</p> <p>Ankeritrhomboeder wachsen sek. über das Gefüge. Erz ist im DS homogen verteilt. Es kann zwischen Hämatit und Pyrit unterscheiden werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz (Pyrit u. Hämatit)</li> </ul>	Echinodermen- und schwammnadelhaltiger Wackestone	



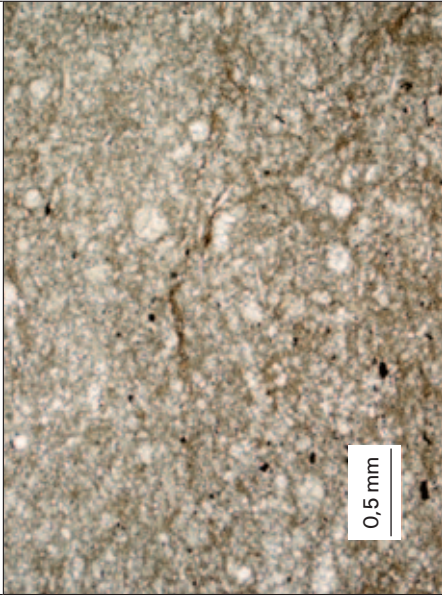
LKK9	<p>Bioklasten sind grösstenteils mit rekristallisiertem Kalzit verfüllt. Kalzit kann auch in der mikritischen Grundmasse beobachtet werden. Bioklasten bilden ein Partikelgefüge. Mikrit/Sparit 1:1. Mikroquarz ist grösstenteils in &lt;2 mm grossen Aggregaten angehäuft.</p> <p>Chalcedon ist in einzelnen Bioklasten vorhanden. In der Grundmasse (beige) fallen rostbraune Partien auf, die den DS durchziehen. Oftmals damit vergesellschaftet ist fein dispergiertes Erz, welches in der beige Grundmasse homogen verteilt ist.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelreicher Packstone	
LKK10	<p>Kalzit tritt neben der mikritischen Grundmasse in Bioklasten auf, die fast vollständig mit sekundärem Kalzit verfüllt sind.</p> <p>Spongiennadeln zeigen teilweise Chalcedon als Bestandteil. Chalcedon findet sich zudem in Echinodermen und Radiolarien.</p> <p>Mikroquarz ist in bis zu 2,5 mm grossen Aggregaten angehäuft. Die Aggregate sind relativ homogen im DS verteilt.</p> <p>Ankerit wächst als sekundäres Mineral rhomboedrisch über das bestehende Gefüge.</p> <p>Erz ist unregelmässig verteilt und in Lagen angereichert.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelreicher Packstone	
LKK11	<p>Im DS sind zwei unterschiedliche Gefügetypen zu unterscheiden: 1) Wackestone mit fast vollständig zu Kalzit rekristallisierten Bioklasten (Spongien). 2) Packstone mit fast vollständig silifizierten Bioklasten (Chalcedon). Auffallend ist in den Packstonepartien die Anhäufung von Mikroquarz. Die Ausrichtung der Bioklasten parallel zur Schichtung ist grenzüberschreitend über beide Gefügetypen.</p> <p>Mikroquarz ist in bis zu 4 mm grossen Aggregaten angesammelt.</p> <p>Pyrit ist im Dünnschliff homogen verteilt.</p> <p>Ankerit (&lt;0,1 mm) wächst über das best. Gefüge.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Pyrit</li> <li>- Ankerit</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	


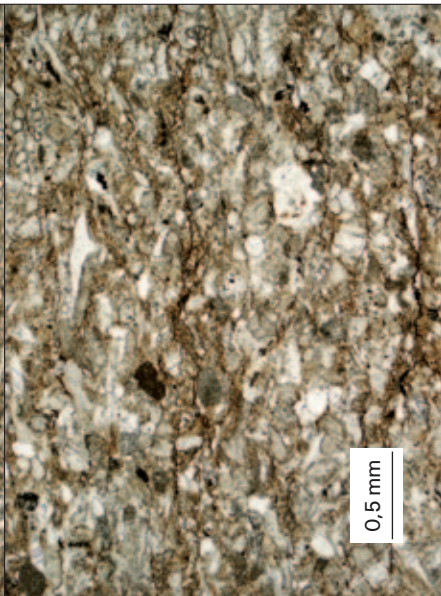
LKK12	<p>In einer mikritischen Grundmasse treten mehr als 10% Komponenten in Form von silifizierten Bioklasten auf. Bei den Bioklasten (&lt;0,15 mm) handelt es sich um Spongiennadlen, Krinoiden sowie evtl. Radiolarien. Spongiennadlen zeigen tetrazone und monaxone Ausbildungsformen. Die Spongiennadlen sind parallel zur Schichtung orientiert.</p> <p>Ankerit wächst über das Gefüge und ist an der rhomboedrischen Form erkennbar.</p> <p>Erz unterstreicht die schichtparallele Ausrichtung der Spongiennadlen in seitlich begrenzten Lagen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Chaledon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Pyrit</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
LKK13	<p>Kalzit liegt sowohl in der mikritischen Grundmasse, als auch in kalzifizierten Bioklasten vor.</p> <p>Mikroquarz ist inhomogen verteilt, bildet aber hauptsächlich bis 0,5 mm grosse Aggregate von Quarzkristallen.</p> <p>Vereinzelte sind Bioklasten mit Chaledon silifiziert.</p> <p>Eine im DS feststellbare, mosaikartige Struktur wird durch farblich unterschiedliche Partien erzeugt.</p> <p>In rostbraunen Partien (Alterierung oder C-Anreicherung?) ist Erz angehäuft. In den helleren (beige-weißen) Partien ist Mikroquarz ange-reicht.</p> <p>Ankerit ist sek. und rhomboedrisch gewachsen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Chaledon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
LKK14	<p>Kalzit liegt einerseits in der mikritischen Grundmasse, andererseits in rekrystallisierter Form in Bioklasten vor (Spongiennadlen). Echinodermen und Spongiennadlen sind vorwiegend mit rekrystallisiertem, feinkörnigem Quarz verfüllt, während nur ein kleiner Anteil durchwegs kalzifiziert ist.</p> <p>Über das bestehende Gefüge wächst homogen verteilt ein sekundär gebildetes, rhomboedrisches Karbonat (&lt;0,1 mm). Mischkristall der Reihe Dolomit-Siderit?</p> <p>Erz zeichnet ein planares Gefüge (Ausrichtung von schichtförmigen Mineralen?) nach.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	



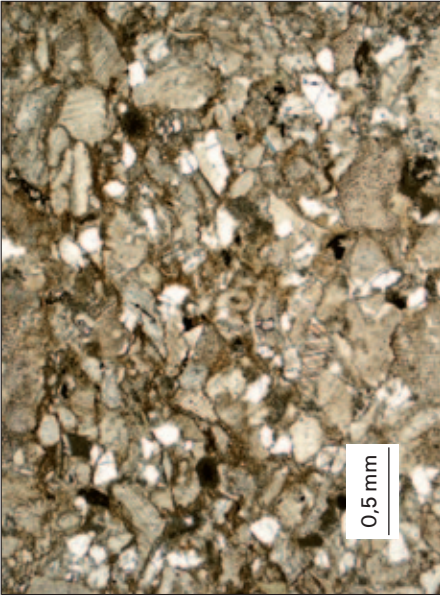
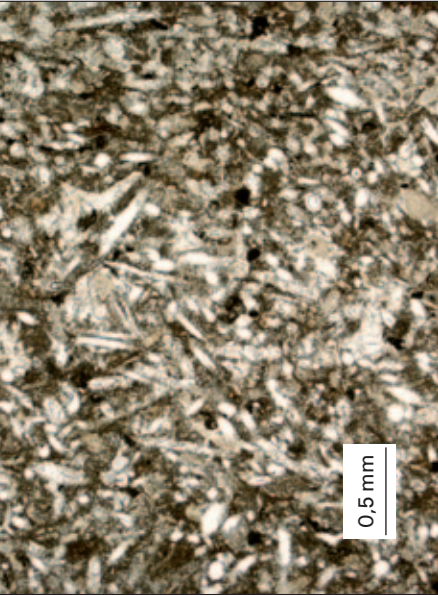

LKK16	<p>In einer mikritischen Grundmasse finden sich bis 0,2 mm grosse sparitische Kalzitkristalle. Mikrit ist mengenmässig mehr als Sparit vorhanden. Bioklasten sind vollständig kalzifiziert (z.B. Spongiennadeln).</p> <p>Vereinzelte kann Mikroquarz festgestellt werden. Durch die Vermischung mit der kalzitischen Grundmasse ist dessen Identifikation schwierig. Schichtparallele Ausrichtung von Erzlagen: Meist verlaufen die Lagen vollständig durch den DS. Das Erz ist dabei feinkörnig und evtl. von org. Substanz begleitet. In der Grundmasse ist Erz zudem homogen verteilt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Erz</li> <li>- Mikroquarz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
-------	---	--	---------------------------------	--

#### A 7.4 Dünnschliffbeschreibungen: Kieselkalke der Préalpes médianes (Lias)

Dünnschliff	Kurzbeschreibungen	Minerale	Klassifikation nach DUNHAM (1962)	Dünnschliffaufnahmen
LKK17	<p>Die Grundmasse ist grösstenteils sparitisch. Kalzitkristalle sind aber selten grösser als 0,1 mm. Wenig mikritische Grundmasse. Bei Bioklasten handelt es sich um Spongien.</p> <p>Detritischer Quarz ist &lt;0,1 mm und zeigt kantige Körner. Mikroquarz kann festgestellt werden.</p> <p>Erz ist inhomogen im Gestein verteilt und häuft sich im Bereich von alterierten Partien framboidal (&lt;0,15 mm) an.</p> <p>Ankerit (&lt;0,08 mm) wächst in rhomboedrischer Form über das bestehende Gefüge.</p> <p>Klinochlor wächst über das bestehende Gefüge, zeigt Pleochroismus und ist max. 0,1 mm gross.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- det. Quarz (0,1 %)</li> <li>- Erz</li> <li>- Ankerit</li> <li>- Klinochlor</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Packstone	

LKK18	<p>Kalzit kommt vorwiegend in der mikritischen Grundmasse vor. In den wenigen Bioklasten ist meist feinkristalliner Kalzit zu beobachten. Nebst Krinoiden, die selten mit Chalcedon oder Mikroquarz verkieselt sind, finden sich einzelne Spongiennadlen, die durchwegs sekundär kalzifiziert sind.</p> <p>Erz ist über den ganzen DS homogen verteilt. Klinochlor (sekundär?) findet sich in der mikritischen Grundmasse.</p> <p>Im DS ist zudem ein weiteres Mineral zu beobachten (&lt;0,05 mm): hohes Relief, IF grau 1. Ordnung. Rhomboedrische Form.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Erz</li> <li>- Klinochlor</li> <li>- Ankerit</li> <li>- weiteres Mineral</li> </ul>	Mudstone	
LKK19	<p>Homogen verteilter Mikroquarz bildet zusammen mit Kalzit eine mikritische Grundmasse, in der feinkristalliner Kalzit sowie sekundär gewachsener Ankerit auftreten. Ankerit zeigt Rhomboederform und ist &lt;0,2 mm. Spongiennadlen sind vollständig durch sekundären Kalzit ersetzt.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,1 mm) ist homogen im DS verteilt und zeigt Lösungserscheinungen an den Kornrändern. Die Kornrundung variiert von kantig bis gerundet.</p> <p>Erz findet sich nur vereinzelt in rostbraun verfärbten Partien (Alterierung, org. C?).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Kalzit</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (1,5%)</li> <li>- Erz</li> <li>- Ankerit</li> <li>- weiteres Mineral?</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	
LKK21	<p>Kalzit findet sich vorwiegend in Bioklasten (Schwammnadeln, Bryozoen, Foram., Echinodermen), die inhomogen im DS verteilt sind. In der mikritischen Grundmasse kann Mikroquarz beobachtet werden, der das Gestein domänenartig durchzieht. Einzelne Bioklasten sind silifiziert (Chalcedon).</p> <p>Erz ist zusammen mit Chlorit (sekundär gewachsen) entlang von rostbraun farbenen Zonen (ohne Polarisator) angehäuft.</p> <p>Ein weiteres, feinkristallines Mineral, &lt;0,2 mm, hat eine graue Eigenfarbe, eine hohe IF und ist über das bestehende Gefüge gewachsen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- det. Quarz (2,3%)</li> <li>- Erz</li> <li>- weiteres Mineral?</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	



LKK22	<p>Kalzit ist einerseits in Form von kalzifizierten Bioklasten, andererseits in der mikritischen Grundmasse vorhanden. Echinodermenbruchstücke (&lt;2,5 mm), bilden zusammen mit det. Quarz (&lt;0,3 mm) das Grundgefüge.</p> <p>Nebst detritischem Quarz ist Mikroquarz anwesend; meist in verkieselten Bioklasten.</p> <p>In den wenigen mikritischen Partien, die ohne Polarisator eine rostbraune Farbe zeigen, ist Chlorit und Erz angehäuft.</p> <p>Ein weiteres, feinkristallines Mineral mit grauer Eigenfarbe, &lt;0,3 mm, hohe IF, wächst über bestehendes Gefüge.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- det. Quarz (4,2%)</li> <li>- Mikroquarz</li> <li>- Erz</li> <li>- weiteres Mineral</li> </ul>	Packstone	
LKK24	<p>Kalzit ist sowohl in mikritischen Partien, als auch in sekundär kalzifizierten oder rekrystallisierten Bioklasten (Bryozoen) zu finden.</p> <p>Spongien und Echinodermen sind zu mehr als 75% mit Chalcedon verkieselt.</p> <p>Ankerit überwächst das Gefüge.</p> <p>Detritischer Quarz (&lt;0,15 mm) kommt vereinzelt in chalcedonarmen Partien vor und zeigt kantige bis gerundete Kornform.</p> <p>Erz ist inhomogen verteilt und vorwiegend in rostbraun verfärbten Partien (Alterierung, org. C?) in Lagen angereichert, die den ganzen Schliff durchziehen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- Ankerit</li> <li>- det. Quarz (0,1%)</li> <li>- Erz</li> </ul>	Bioklastenreicher Packstone	
LKK26	<p>Kalzit liegt einerseits in der mikritische Grundmassen, andererseits in rekrystallisierter Form in Bioklasten (v.a. Bryozoen) vor. Die Spongiennadeln sind durchwegs kalzifiziert, währenddem Krinoiden mit Ausnahme des Zentralkanal häufig mit Chalcedon verfüllt sind.</p> <p>Det. Quarz kommt nur vereinzelt vor (&lt;0,1mm).</p> <p>Chlorit (sekundär über bestehendes Gefüge gewachsen) zeigt einen Pleochroismus von braun-grün zu einem blassen Braun und tritt in seitlich begrenzten Lagen auf. Die Lagen S0 sind offen verfaltet.</p> <p>Erz ist entlang von Chloritlagen angehäuft.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalzit</li> <li>- Chalcedon</li> <li>- det. Quarz (0,2%)</li> <li>- Klinochlor</li> <li>- Erz</li> </ul>	Schwammnadelhaltiger Wackestone	

## 8. Qualitative und quantitative Mineralphasenanalyse (Röntgendiffraktometrie, XRD)

### 8.1 Hintergrund und Problemstellung

Die verschiedenen Varietäten des Kieselkalks der Schweiz sind in der Vergangenheit vorwiegend mit optischen Methoden untersucht worden (z.B. FUNK 1971, MOJON 1984, BERNOULLI 1964). So finden sich in der Literatur fast ausschliesslich auf Dünnschliffuntersuchungen basierte Schätzungen des Modalbestands. Ausführliche mineralogisch-petrographische Untersuchungen bei denen der Mineralbestand der Kieselkalke auch quantitativ präzise erfasst wurde, sind bis heute selten durchgeführt worden.

Mit der Röntgendiffraktometrie (X-Ray Diffractometry, XRD) können die in einem Gestein vorhandenen kristallinen Mineralphasen sowohl qualitativ nachgewiesen, als auch quantitativ bestimmt werden. Für die Bestimmung des Modalbestands wird in dieser Studie die Rietveld-Methode angewandt, bei der die Gewichtsanteile der beteiligten Mineralphasen standardfrei und mit einer grossen Genauigkeit angegeben werden können. Dies bedingt vorwiegend eine eindeutige Identifikation aller vorhandenen Mineralphasen. Amorphe Anteile sind mit dieser Methode nicht quantifizierbar.

### 8.2 Theoretische Grundlagen

#### 8.2.1 Diffraction

Für die Aufnahme eines Diffraktogramms wird die Diffraction monochromatischer Röntgenstrahlung am periodischen Gitter von Kristallen genutzt.

Durch die kohärente Streuung der Röntgenstrahlen an den verschiedenen Netzebenen (Netzebenenabstand  $d$ ) entsteht konstruktive Interferenz, wenn der Gangunterschied von Strahlen, die an diesen Netzebenen reflektiert werden:

- gleich der Wellenlänge  $\lambda$  der primären Strahlung ist oder
- einem ganzzahligen Vielfachen davon ( $n \lambda$ ) entspricht (ALLMANN 2003).

Die Diffraction der Röntgenstrahlung lässt sich mit der Bragg'schen Gleichung beschreiben (Abbildung 8.1):

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (\text{BRAGG \& BRAGG 1913})$$

wobei:

$d$  = Netzebenenabstand,  $\lambda$  = Wellenlänge des Röntgenstrahls,  $n$  = Ordnung (natürliche Zahl),  $\theta$  = Winkel zwischen Röntgenstrahl und Netzebene (Glanzwinkel).

Die gestreute Strahlung wird in Diffraktogrammen (X-Achse: Winkel  $2\theta$ ; Y-Achse: Intensität in Counts) dargestellt. Die Lage der Intensitätsmaxima (Peaks) ist charakteristisch für die einzelnen Minerale. Die Intensität der detektierten Strahlung ist abhängig von den Mengenanteilen der einzelnen Mineralphasen.

#### 8.2.2 Rietveld-Methode

##### 8.2.2.1 Grundlegendes Auswertungsprinzip

Die reflektierte Strahlung kann mit der Rietveld-Methode in quantitative Anteile von Mineralphasen umgerechnet werden.

Das als Rietveld-Methode bezeichnete Verfahren zur Kristallstrukturanalyse aus pulverförmigen Proben wurde von Rietveld ursprünglich zur Neutronenbeugungsanalyse entwickelt und später für Strukturanalysen mittels Röntgenstrahlung modifiziert (RIETVELD 1967, 1969, BISH & POST 1989). Bei diesem Verfahren wird eine mathematische Verteilungsfunktion (Anfangsmodell) basierend auf Kristallstrukturparametern (räumliche Anordnung der Atome in der Kristallstruktur) in einem iterativen Anpassungsprozess

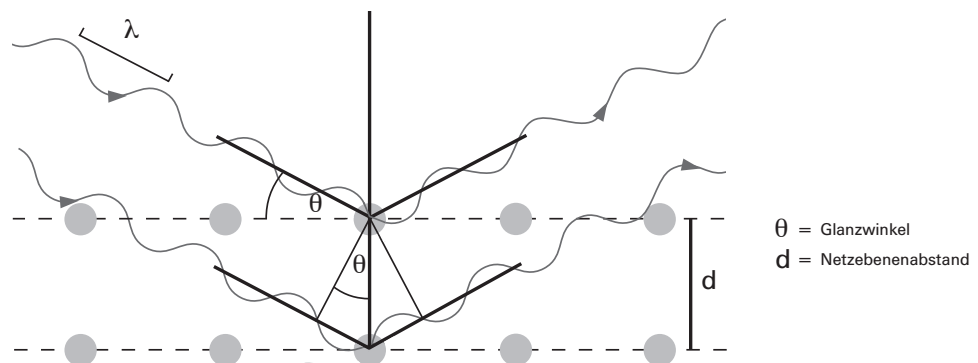


Abbildung 8.1: Diffraction von Röntgenstrahlen an den Kristall-Netzebenen, modifiziert nach BRAGG (1912). Im abgebildeten Beispiel ist der Gangunterschied der gebeugten Röntgenstrahlen =  $\lambda$ ; es entsteht konstruktive Interferenz.

an ein gemessenes Diffraktogramm angeglichen. Für den Anpassungsprozess wird die Methode der kleinsten Quadrate angewendet. Die Verfeinerungsschritte werden so lange wiederholt, bis die Differenz zwischen dem gemessenen und berechneten Diffraktionsprofil minimal ist. Dies inklusive Evaluierung der Zellparameter, bevorzugten Orientierung und Anpassung für die nächste Iteration. Die Verfeinerung setzt ein adäquates Startmodell voraus, welches aus der Kenntnis der in der polykristallinen Substanz vorhandenen Kristallstrukturphasen gewonnen wird (SPIESS et al. 2009).

Der Vorteil der Rietveld-Methode liegt darin, dass die Lage und die Intensität der Peaks über den gesamten 2-Theta-Bereich an das gemessene Spektrum angepasst wird. Deshalb kann bei überlappenden Peaks auf eine Entfaltung verzichtet werden, da weitere Einzelpeaks der betreffenden Phasen für die Anpassung der Intensitäten herangezogen werden.

### 8.2.2.2 Mathematische Grundlagen der Rietveld-Verfeinerung

Bei der Rietveld-Methode kann die Diffraktionsintensität jedes Messpunktes  $m$  ( $= 2\theta$ -Winkel) einer Mineralphasenmischung mit folgender analytischer Funktion beschrieben werden:

$$I_{c,m} = \sum_k SF * M_k * P_k * F_k^2 * LP[2\theta_k] * \Phi_k[2\theta_m - 2\theta_k] + I_{b,o,m} + R_m \quad (\text{YOUNG 1993})$$

wobei:

$I_{c,m}$ : berechnete Gesamtintensität an der Stelle  $m$

SF: Skalierungsfaktor

$M_k$ : Flächenhäufigkeitsfaktor des Reflexes  $k$

$P_k$ : Wert der Vorzugsorientierungsfunktion des Reflexes  $k$

$F_k$ : Strukturfaktor des Reflexes  $k$

$LP(2\theta_k)$ : Lorentz-Polarisationsfunktion an der Position des Reflexes  $k$

$\Phi_k(2\theta_m - 2\theta_k)$ : Reflexprofilfunktion des Reflexes  $k$  an der Stelle  $m$

$I_{b,o,m}$ : Intensität des Untergrundes an der Stelle  $m$

$R_m$ : Rauschen an der Stelle  $m$

$k$ : Index über alle Reflexe, die zur Intensität an der Stelle  $m$  beitragen

Die Parameter dieser Funktion können in der Verfeinerung kontinuierlich mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepasst werden, so dass die Summe der gewichteten Differenz zwischen der berechneten und beobachteten Gesamtintensität minimal wird.

$$S = \sum_m w_m * [I_{o,m} - I_{c,m}]^2 \rightarrow \min \quad (\text{YOUNG 1993})$$

wobei :

$S$ : Summe der gewichteten Differenz zwischen der gemessenen und der berechneten Gesamtintensität an der Stelle  $m$

$w_m$ : Wichtungsfaktor an der Stelle  $m$

$I_{o,m}$ : gemessene Intensität an der Stelle  $m$

Die relativen Gewichtsanteile  $G_j$  der einzelnen Mineralphasen  $j$  können mit der Rietveld-Methode direkt aus dem Skalierungsfaktor  $SF_j$  der Phase  $j$  bestimmt werden:

$$G_j = \frac{SF_j * [Z * V * M]_j}{\sum_{m=1}^n SF_m * [Z * V * M]_m} \quad (\text{HILL \& HOWARD 1987})$$

wobei:

$Z$ : Anzahl der Formeleinheiten in der Elementarzelle der Phase  $j$

$V$ : Volumen der Elementarzelle der Phase  $j$

$M$ : Molgewicht der Formeleinheit der Phase  $j$

### 8.2.2.3 Gütekriterien für die Rietveld-Verfeinerung

In den vorliegenden Untersuchungen wurde das Programm TOPAS® (Bruker AXS) verwendet. Das Anpassungsverfahren wird mit einer Anzahl von numerischen und statistischen Kriterien bewertet. Bei Rietveldverfeinerungen von Mineralphasenmischungen bestimmen diese Kriterien die Anpassungsgüte der umfassenden Modellfunktion (Profil-R-Werte) und nicht die Anpassungsgüte der einzelnen Phasen (Struktur-R-Werte) (KERN 1998).

Das Kriterium für den Vergleich zwischen dem simulierten und dem gemessenen Signal wird durch den Gütewert  $R_{wp}$  (gewichtete Verlässlichkeit bzw.: R-weighted pattern) ausgedrückt:

$$R_{wp} = \sqrt{\frac{\sum_m w_m * [I_{o,m} - I_{c,m}]^2}{\sum_m w_m * I_{o,m}^2}} \quad (\text{YOUNG 1993})$$

wobei:

$I_{o,m}$ : beobachtete Gesamtintensität an der Stelle  $m$

$w_m$ : Wichtungsfaktor. Er entspricht  $1/\sqrt{(I_{o,m})}$

Die erwartete Profilanpassung  $R_{exp}$  (R-expected) entspricht einer theoretischen Berechnung des kleinst möglichen Wertes für  $R_{wp}$ :

$$R_{exp} = \sqrt{\frac{N-P}{\sum_m w_m * I_{o,m}^2}} \quad (\text{YOUNG 1993})$$

wobei:

$N$ : Anzahl der Datenpunkte

$P$ : Anzahl Parameter

Aus dem Quotienten der gewichteten Verlässlichkeit  $R_{wp}$  und der erwarteten Profilanpassung  $R_{exp}$  kann ein statistisches Kriterium für den Grad der Übereinstimmung des berechneten und gemessenen Modells mit der Güte der Profilanpassung («Goodness of Fit», GOF) angegeben werden:

$$GOF = \frac{R_{wp}}{R_{exp}} = \frac{\sum_m w_m * [I_{o,m} - I_{c,m}]^2}{N-P} \quad (\text{YOUNG, 1993})$$

Je kleiner der R-Faktor ist, umso wahrscheinlicher ist die Übereinstimmung des Strukturmodells (SPIESS et al. 2009). Nachdem sich der iterative Prozess einem Grenzwert nähert bzw. der  $R_{wp}$  nach einer bestimmten Anzahl Schritte konstant verhält, wird die quantitative Mineralphasenbestimmung inklusive  $R_{wp}$ -Wert ausgegeben. Bei  $R_{wp}$ -Werten  $< 10\%$  können die angegebenen Quantitäten gemäss Erfah-



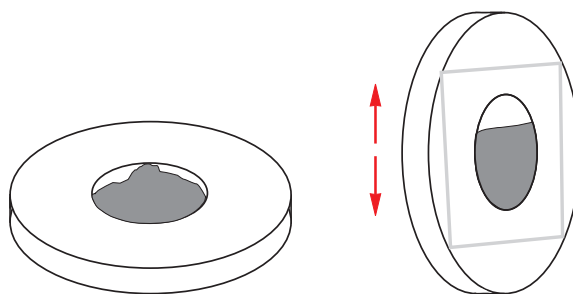


Abbildung 8.2: Einfüllprozedur, falls kein seitliches Einfüllverfahren möglich ist: Pulver wird in Probenhaltervertiefung gefüllt, mit einer Glasplatte bedeckt und senkrecht durch Klopfen auf dem Untergrund zum Setzen gebracht. Entstandene Lücke mit weiterem Pulver verfüllen und Klopfvorgang wiederholen.

rungswerten aus der Industrie als verlässlich betrachtet werden. Je näher der GOF bei 1 liegt, umso genauer stimmen die gemessenen und die modellierten Intensitäten überein und folglich die Mengenangaben der Mineralphasen.

### 8.2.3 Probenaufbereitung

Grundsätzlich empfiehlt es sich, Kieselkalke in einer Achatschwingmühle zu mahlen (Achat ist amorph). Der gewünschte Feinheitsgrad des Pulvers (1–10 µm) kann bei diesem Gestein mit der Wolframkarbidmühle nicht so einfach erreicht werden. Zudem kann Abrieb des kristallinen Wolframkarbid-Mühlenmaterials zu messbaren Signalen im Spektrum führen. Unklar ist die Auswirkung der unterschiedlich harten Minerale (Karbonate vs. Quarz) auf den Mahlprozess und die daraus resultierenden Korngrößen.

Ungefähr 40–60 g des Probenmaterials werden mit einer Achatschwingmühle während rund 4 min gemahlen. Anschließend wird ca. 1.4 g des gemahlenen Materials in die Probenbehälter gefüllt, wobei eine bevorzugte Orientierung der Minerale soweit möglich vermieden werden sollte. Diese entsteht vorwiegend beim Einfüllen wenn parallel zur Oberfläche des Messbehälters Druck auf das Probenpulver ausgeübt wird. Besser als die ursprünglichen Einfüllmethoden eignen sich Verfahren, bei denen senkrecht zur Oberfläche des Behälters mittels Klopfen auf einen harten Untergrund das Pulver verdichtet wird (Abbildung 8.2).

### 8.2.4 Messverfahren

Die Profilmessungen der Gesteinspulverproben wurden auf einem Gerät der Marke Bruker, AXS D8 Advance durchgeführt. Das Gerät zeigt vom Aufbauprinzip eine Bragg-Brentano-Geometrie (divergierender Röntgenstrahl) und funktioniert nach der Theta-Theta-Betriebsweise (Abbildung 8.3).

Die Messung erfolgte über den Winkelbereich 2θ von 5–90° mit einer Schrittweite von 0.00526° (2 Theta) und einer Messzeit von 1.5 s pro Schritt. Mit dieser Messprozedur werden die Spektren sehr detailliert aufgenommen, was die quantitative Bestimmung der Mineralphasen erleichtert.

Technische Daten des Messgeräts AXS D8 Advance:

Röntgenröhre: Kupferanode, K<sub>α</sub>-Wellenlänge 0.154184 nm  
Röhrenspannung 40 kV, Strom 40 mA

Detektor: Ortsempfindlicher Lynxeye-Detektor (PSD)  
PSD Electric Window: 3.7°, Lynx-Iris: 8.2 mm  
Motorisierte Blenden: Divergenzblende: v6  
Probenrotation: on; für verbesserte Zählstatistik

### 8.2.5 Auswertung

#### 8.2.5.1 Qualitative Phasenauswertung (Phasenidentifikation)

Das Programm EVA® aus dem DIFFRAC<sup>plus</sup> Software Package (BRUKER AXS 2006a) dient zur qualitativen Bestimmung der Mineralphasen in einer Gesteinsprobe. Die Bestimmung erfolgt mittels Abgleich (Search/Match) des gemessenen Diffraktogramms mit der Datenbank des Internationalen Zentrums für Diffraktionsdaten (ICDD-PDF 2, 2005, >29 000 Mineralien und mineralbezogene Einträge). Die Identifikation der Minerale muss für jede Probe durchgeführt werden, da ansonsten die Genauigkeit der quantitativen Bestimmung vermindert wird.

#### 8.2.5.2 Quantitative Phasenauswertung mit der Rietveld-Methode

Die quantitative Phasenauswertung wird mit dem Programm TOPAS®, Version 3.1 aus dem DIFFRAC<sup>plus</sup> Software Package (BRUKER AXS 2006b) durchgeführt wobei der «Fundamental Parameter Approach» angewendet wird. Die für die Quantifizierung der Mineralphasen benötigten Mineralstrukturen wurden aus der Strukturdatenbank der «American Mineralogist Crystal Structure Database» (<http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>) entnommen. Die Strukturen enthalten Informationen über Komponentennamen, Molekularformel, Raumgruppe, Zellparameter, Atomkoordinaten, mikrostrukturelle Eigenschaften und Besetzungsfaktoren.

Auf Grund der qualitativen Phasenauswertung wurden für die quantitative Auswertung folgende Mineralphasen berücksichtigt (vgl. Kapitel 8.3): Kalzit, Quarz, Ankerit, Muskowit 2M<sub>1</sub> als Vertreter der Mischreihe Phengit-Muskowit, Pyrit sowie wenn vorhanden auch Chlorit (Tabelle 8.1).

Für die Verfeinerung wurden folgende Parameter angepasst: Korrekturen (Null-Korrektur, Probenverschiebung), Untergrund (Polynomfunktion 5. Grades), Gitterkonstanten (a, b, c, Winkel), Kristallitgröße L sowie die bevorzugte Ori-

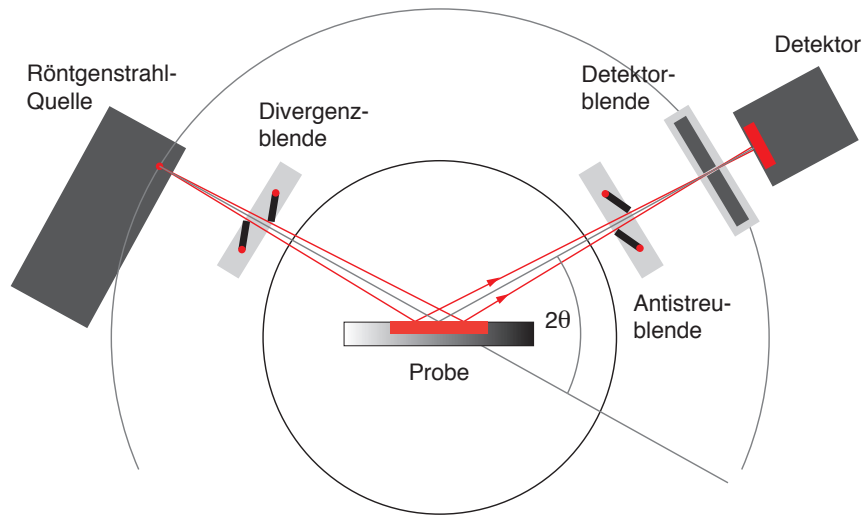


Abbildung 8.3: Bragg-Brentano-Geometrie eines Röntgendiffraktometers mit Theta-Theta-Betriebsweise. Modifiziert nach BRUKER AXS (2010).

entierung. Die Anpassungen der Gitterkonstanten sind durch Minima/Maxima der einzelnen Gitterparameter begrenzt.

Die Strukturverfeinerung mit TOPAS® liefert neben dem Modalbestand auch Informationen über den Gehalt austauschbarer Ionen bzw. Verhältnisse austauschbarer Ionen. So wird zum Beispiel im Ankerit für die austauschbaren  $Mg^{2+}$ - und  $Fe^{2+}$ -Ionen das  $X_{Mg}$  angegeben.

## 8.2.6 Fehleranalyse

### 8.2.6.1 Fehlerquellen

Eine Fehlerminimierung kann durch die Berücksichtigung und Behandlung von Fehlerquellen erreicht werden. KERN (1992, 1998) beschreibt für die Röntgendiffraktometrie (inkl. Rietveld-Methode) eine Vielzahl von Fehlerquellen (Mess-, Auswerte- und Kalibrierfehler), welche die Resultate beeinflussen können und teilweise nicht erfassbar sind. Nachfolgend werden wichtige Fehlerquellen für die quantitative Phasenbestimmung hervorgehoben und im Kapitel 8.2.6.2 Massnahmen zur Fehlerminimierung dargestellt:

- **Probenaufbereitung:** Die Probenaufbereitung stellt eine der grössten Fehlerquellen dar. Nach einer repräsentativen Probenentnahme im Feld müssen die Proben heruntergebrochen und gemahlen werden. Für die Röntgendiffraktometrie werden pulverisierte Proben benötigt, deren Korngrößen approximativ 1–10  $\mu m$  betragen. Die unterschiedlichen Härten der Minerale können im Mahlverfahren zu unterschiedlichen Feinheiten der einzelnen Minerale führen und sich in der Aufzeichnung der Intensitäten negativ auswirken. So zum Beispiel durch Überlagerungseffekte breiter Peaks bei zu kleiner Korngrösse. Der Mahlprozess ist eine der grössten systematischen Fehlerquellen (KLEEBERG et al. 2008). Des Weiteren kann die Herstellung der Messprobenkörper je nach Verfahren zu ungewollter Einregelung der Minerale führen, die je nach Netzebene eine überhöhte Intensität der detektierten Strahlung verursachen (vgl. Kapitel 8.2.3 «Probenaufbereitung»).
- **Fluoreszenz:** Hoch fluoreszierende Materialien wie Pyrit, Hämatit oder andere Fe- und Mn-Oxide stellen bei der

Verwendung von  $CuK\alpha$ -Strahlung eine systematische Fehlerquelle dar (KLEEBERG et al. 2008). Durch die Absorption von primärer Strahlung wird die gebeugte Strahlung vermindert, was zu einer tieferen Intensität und entsprechend geringerer Berechnung der absorbierenden Mineralphasen führt.

- **Messprozedur:** Bei zu geringer Messauflösung (Messschrittgrösse, Messzeit pro Schritt), die in der Messprozedur festgehalten wird, können nicht eindeutige Peakintensitäten sowie stark schwankende Untergrundstrahlung zu Problemen bei der Rietveld-Methode führen und die Aussagekraft über den Modalbestand reduzieren.
- **Instrumentenfehler:** Jedes Röntgendiffraktometer erzeugt gerätespezifische Messfehler, die aber im Vergleich mit der Probenaufbereitung klein ausfallen.
- **Statistische Fehler:** Die statistische Fehlerquelle wird vom Programm TOPAS® berechnet. Der statistische Fehler beinhaltet unter anderem die Abweichung der modellierten zur gemessenen Intensitätsverteilung.
- **Weitere Fehlerquelle:** Bei Vergleichen zwischen den gemessenen und den berechneten Diffraktogrammen kann festgestellt werden, dass für  $2\theta$ -Winkel kleiner als  $41^\circ$  die berechneten Diffraktogramme eine tiefere Intensität aufweisen als die gemessenen. Ab einem  $2\theta$ -Winkel von  $41^\circ$  liegt die Intensität der berechneten Diffraktogramme über den gemessenen Diffraktogrammen. Typischerweise liegt sie maximal 1 % über der gemessenen Peakhöhe. Die Ursache für diesen generell beobachtbaren Trend ist unklar und kann in der Auswertung mit keiner Korrektur ausgeglichen werden. Ein Grund könnte sein, dass der Röntgenstrahl bei tiefen Messwinkeln den Kunststoff des Probenhalters streift. Dadurch wird ein Untergrundsignal erzeugt, welches zur Folge einen erhöhten Diffraktogrammverlauf hat.

### 8.2.6.2 Fehlerminimierung

Im Folgenden werden Aufbereitungs- und Analyse-schritte beschrieben, mit deren Hilfe Fehlerquellen minimiert werden können.

Tabelle 8.1: Kristallstrukturdaten der in der Rietveld-Analyse verwendeten Mineralphasen.

Mineralphase	Kalzit	Quarz	Ankerit	Muskowit 2M <sub>1</sub>	Pyrit	Chlorit IIb
Raumgruppe	167 (R-3c)	154 (P3 <sub>2</sub> 21)	148 (R-3)	15 (C12/c1)	205 (Pa-3)	12 (C12/m1)
Zellparameter (Å)	a=4,9900 c=17,0610	a=4,9120 c=5,4040	a=4,8110 c=16,0400	a=5,1840 b=8,9930 c=20,0690	a= 5,4170	a=5,3500 b=9,2670 c=14,2700
Atompositionen	Ca <sup>2+</sup> (occ: 1) s1 (0, 0, 0) C (occ: 1) s2 (0, 0, 0,2500) O (occ: 1) s3 (0,2570, 0, 0,2500)	Si (occ: 1) s1 (0,4700, 0, 0,6667) O (occ: 1) s2 (0,4150, 0,2680, 0,7860)	Ca <sup>2+</sup> (occ: 1) s1 (0, 0, 0) Mg <sup>2+</sup> (occ: 0,8) s2 (0, 0, 0,5000) Fe <sup>2+</sup> (occ: 0,2) s2 (0, 0, 0,5000) C (occ: 1) s3 (0, 0, 0,7564) O (occ: 1) s4 (0,2498, -0,0300, 0,2447)	Al <sup>3+</sup> (occ: 0,994) s1 (0,2510, 0,0838, 0,0004) Fe <sup>3+</sup> (occ: 0,04) s1 (0,2510, 0,0838, 0,0004) K <sup>+</sup> (occ: 0,9) s2 (0, 0,0986, 0,2500) Si <sup>4+</sup> (occ: 0,75) s3 (0,0345, 0,4295, 0,3646) Al <sup>3+</sup> (occ: 0,25) s4 (0,0345, 0,4295, 0,3646) Si <sup>4+</sup> (occ: 0,75) s5 (0,4514, 0,2582, 0,1355) Al <sup>3+</sup> (occ: 0,25) s6 (0,4514, 0,2582, 0,1355) O (occ: 1) s7 (0,0429, 0,0617, 0,4501) O (occ: 1) s8 (0,3836, 0,2511, 0,0536) O (occ: 1) s9 (0,0380, 0,4447, 0,4463) O (occ: 1) s10 (0,4128, 0,0925, 0,1682) O (occ: 1) s11 (0,2516, 0,3726, 0,1688) O (occ: 1) s12 (0,2469, 0,3083, 0,3426)	Fe <sup>2+</sup> (occ: 1) s1 (0, 0, 0) S (occ: 1) s2 (0,6156, 0,6156, 0,6156) Mg <sup>2+</sup> (occ: 0,849) s2 (0, 0,6678, 0) Fe <sup>2+</sup> (occ: 0,151) s2 (0, 0,6678, 0) O (occ: 1) s3 (0,3150, 0, 0,9257) O (occ: 1) s4 (0,1890, 0,1667, 0,0774) Si <sup>4+</sup> (occ: 0,66) s5 (0,2248, 0,1669, 0,1937) Al <sup>3+</sup> (occ: 0,34) s5 (0,2248, 0,1669, 0,1937) O (occ: 1) s6 (0,8030, 0, 0,7643) O (occ: 1) s7 (0,5110, 0,2280, 0,2363) O (occ: 1) s8 (0,8280, 0, 0,5711) O (occ: 1) s9 (0,1310, 0,3463, 0,4285) Mg <sup>2+</sup> (occ: 1) s10 (0, 0,8336, 0,5000) Fe <sup>2+</sup> (occ: 0) s10 (0, 0,8336, 0,5000) Al <sup>3+</sup> (occ: 0,96) s11 (0, 0,5000, 0,5000) H (occ: 1) s12 (0,2887, 0, 0,8552) H (occ: 1) s13 (0,8377, 0, 0,6339) H (occ: 1) s14 (0,1586, 0,3359, 0,3698)	



Tabelle 8.2: Messungen von verschiedenen Standardmineralmischungen. Die mit TOPAS® berechneten Mineralphasenanteile beziehen sich auf das Gesamtgestein bestehend aus den Mineralphasen Kalzit, Quarz, Ankerit, Muskowit 2M<sub>1</sub> sowie Pyrit. Die Differenzen ergeben sich aus dem Unterschied zwischen den eingewogenen und den Rietveld-Anteilen (in Gew.-%). Der relative Fehler wird aus dem Verhältnis der Differenz zum berechneten Rietveld-Anteil als % angegeben.

Standard-Messung	Kalzit [Gew,-%]				Quarz [Gew,-%]				Dolomit [Gew,-%]				Rwp	GOF
	eingewogen	Rietveld	Differenz	rel. Fehler	eingewogen	Rietveld	Differenz	rel. Fehler	eingewogen	Rietveld	Differenz	rel. Fehler		
1 (Cc_100)	100,00	99,17	-0,83	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	19,29	5,21
2 (Qz_100)	-	-	-	-	100,00	99,10	-0,90	0,9	-	-	-	-	11,82	3,18
3 (Qz_50/Cc_50)	50,00	50,01	0,01	0,0	50,00	49,52	-0,48	1,0	-	-	-	-	15,47	4,04
4 (Mischung 1)	51,24	51,82	0,58	1,1	41,08	40,75	-0,33	0,8	7,68	6,94	-0,74	10,7	14,41	3,76
5 (Mischung 5)	53,94	53,03	-0,91	1,7	41,94	42,86	0,92	2,1	4,12	3,74	-0,38	10,2	13,49	3,48
6 (Mischung 6)	58,42	58,48	0,06	0,5	34,97	35,34	0,37	1,0	6,61	5,61	-1,00	17,8	13,94	3,58
7 (Mischung 7)	25,01	25,51	0,50	2,0	74,99	74,14	-0,85	1,1	-	-	-	-	13,03	3,47
8 (Mischung 8)	75,00	75,34	0,34	0,5	25,00	24,00	-1,00	4,2	-	-	-	-	15,79	4,10

- Auch wenn in TOPAS® bevorzugte Orientierungen von Mineralien berücksichtigt werden können, ist ein seitliches Einfüllverfahren (Kapitel 8.2.3) ohne Provokation von Druck parallel zur Probenoberfläche zu bevorzugen.

– Die Schrittweiten sollten möglichst klein gehalten werden und die Messzeit pro Schritt möglichst lange andauern. Damit wird die Intensität der detektierten Strahlung statistisch verbessert sowie die Peakpositionen genau bestimmt, was die Genauigkeit des berechneten Modalbestands präzisiert.

– Um Instrumentenfehler zu ermitteln und einzuschränken, ist die Messung eines Standardpulvers mit vordefinierten Kennwerten durchzuführen. Für die vorliegenden Auswertungen wurde ein zertifizierter LaB<sub>6</sub>-Standard verwendet (NIST660a).

– Die Fluoreszenz der CuK $\alpha$ -Strahlung am Fe-reichen Pyrit ist gross und die quantitative Erfassung dementsprechend ungenau. Eigene, hier nicht publizierte Versuche mit reinen Quarz-Pyrit-Mischungen (Zweiphasenmischungen) haben gezeigt, dass die Pyritphase mit dem vorliegenden Analyseverfahren bei allen Mischverhältnissen maximal um den Faktor 2 zu tief angegeben wird. Eine Lösung für dieses Problem würde sich durch die Verwendung einer anderen Anode, zum Beispiel Molybdän (K $\alpha$  = 0,709317 nm) anbieten.

– Die Untersuchungen im Dünnschliff (vgl. Kapitel 7) zeigen, dass der Pyrit in mehr als 95% der Kieselkalkproben nur akzessorisch (<1%) vertreten ist und die Quantifizierung der Hauptphasen Kalzit, Quarz, und Ankerit unwesentlich beeinflusst.

### 8.2.6.3 Fehlerabschätzung; experimentelle Fehlerbestimmung

Um die Genauigkeit der Rietveld-Prozedur für die Aufgabenstellung dieser Arbeit zu überprüfen wurden Standardmischungen hergestellt. Vergleiche zwischen den eingewogenen Mineralanteilen und den mittels Rietveld-Methode bestimmten Mineralanteilen erlauben Aussagen über die Präzision der Messungen. Die Standardmischungen bestehen aus Mineralien, die in den Kieselkalken qualitativ nachgewiesen werden konnten. Als Standards wurden ein reiner Quarz-, ein Kalzit- sowie ein Dolomitkristall aus der Mineralsammlung der ETH Zürich verwendet. Bei der Herstellung der Standardmischungen wurde darauf geachtet, dass die Anteile der verwendeten Minerale mit jenen in den Kieselkalken vergleichbar sind.

Der anfänglich für die Standardisierung verwendete Pyrit wurde aus folgenden Gründen aus der Versuchsreihe ausgeschlossen:

Auf die Beimischung von Muskowit als Vertreter der 2M<sub>1</sub>-Mineralphase in den Standardmischungen wurde verzichtet, da in den Dünnschliffuntersuchungen ausser dem akzessorisch vorhandenen Glaukonit keine Schichtsilikate der Glimmergruppe festgestellt wurden. Zudem ist die Aufbereitung auf Grund des Feinheitsgrads und der bevorzugten Orientierung problematisch. Aus den gleichen Gründen wurde Chlorit als weiteres Schichtsilikat in den Standardmessungen nicht berücksichtigt.

Die Auswertung der so hergestellten Standardmischungen hat ergeben, dass zwischen den eingewogenen Standardmineralphasen und den mit der Rietveld-Methode bestimmten Mineralphasenanteilen eine hervorragende lineare Korrelation besteht (Abbildung 8.4a): Die Steigung der Geraden beträgt 0,9956, der Korrelationskoeffizient 0,99949.

Sowohl für die einzeln gemessenen Mineralphasen, als auch in den Zwei- und Drei-Mineralphasengemischen wird unabhängig vom Mineralphasengehalt eine Differenz von maximal  $\pm 1$  Gew.-% erreicht (Tabelle 8.2, Abbildung 8.4b).

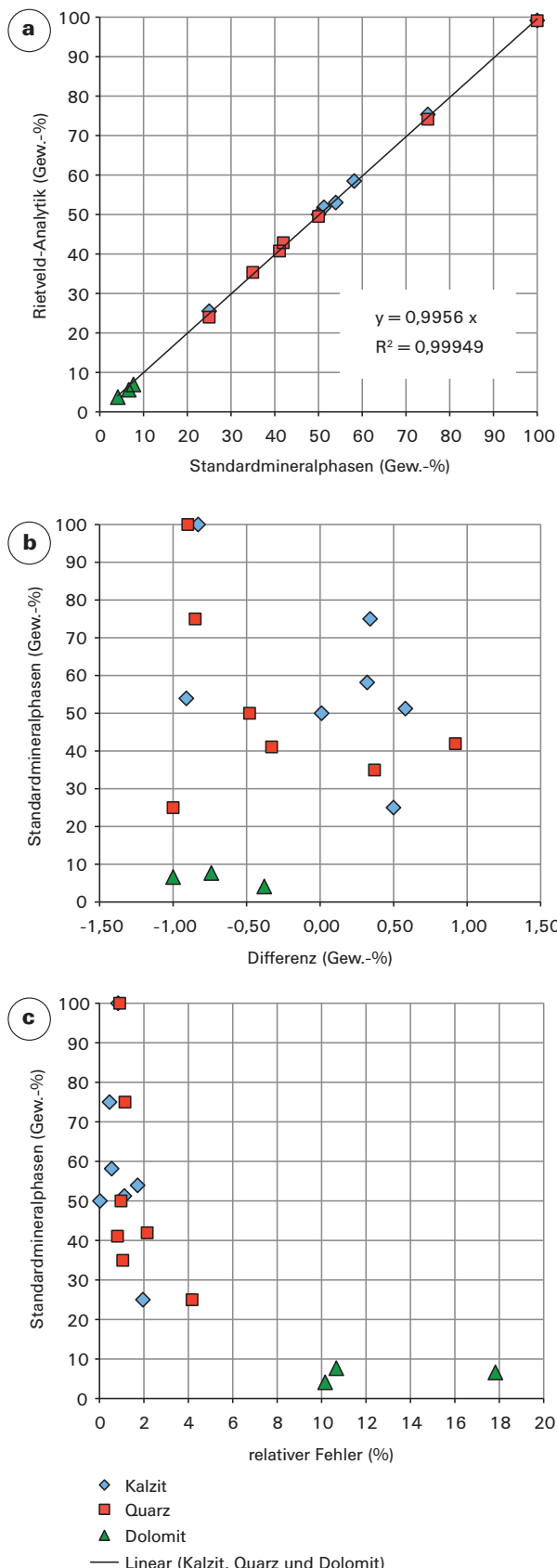


Abbildung 8.4: Überprüfung der Genauigkeit der Rietveld-Methode (Strukturverfeinerungsverfahren). a) Gegenüberstellung eingewogener Standardmineralphasen und Resultaten der Rietveld-Analyse. b) Gegenüberstellung der Differenz (vgl. Tabelle 8.2) und der eingewogenen Standardmineralphasen. c) Relativer Fehler im Bezug auf die eingewogenen Standardmineralphasen.

Der relative Fehler nimmt dabei mit abnehmendem Phasengehalt zu und kann für Dolomit bei eingewogenen 6,6 Gew.-% bis 18 % betragen (Abbildung 8.4 c). Mineralphasen, die in geringeren Anteilen vorkommen, sind mit einem noch grösseren relativen Fehler behaftet.

## 8.3 Resultate

### 8.3.1 Qualitative Mineralphasenauswertung

In den Kieselkalken der vier Varietäten wurden sechs Mineralphasen identifiziert. Im Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation können Kalzit, Quarz, Ankerit, meist Muskowit 2M<sub>1</sub>, Pyrit und je nach Probenherkunft Chlorit nachgewiesen werden. In den Kieselkalken der Moltrasio-Formation und dem Helvetischen Valanginien können ausser Chlorit dieselben Mineralphasen nachgewiesen werden. Teilweise können im Kieselkalk der Préalpes médianes neben Kalzit, Quarz, Ankerit, Muskowit 2M<sub>1</sub>, Pyrit und Chlorit zwischen 22 und 30° (2-Theta) weitere, jedoch kleine Peaks beobachtet werden. Der Abgleich mit den Mineralphasen aus dem ICDD-PDF 2 (2005) führt zu keinem eindeutigen Ergebnis. Prehnit, Pumpellyit und Vertreter der Zeolith- sowie Feldspatgruppe wurden geprüft und können ausgeschlossen werden.

Stellvertretend für alle Proben wird die qualitative Phasenauswertung des Röntgenpulverdiagramms der Probe KK34 in Abbildung 8.5 dargestellt.

### 8.3.2 Quantitative Mineralphasenauswertung

In Tabelle 8.3 sind die Messwerte der Proben im Detail aufgelistet. Der Anteil an authigenem Quarz (Mikroquarz) kann durch Abzug des aus der Dünnschliffuntersuchung ermittelten Gehalts an detritischem Quarz von der Quarzphase bestimmt werden. In der Mengenangabe des authigenen Quarzes ist somit auch der im Dünnschliff selten beobachtete Chalcedon enthalten. Abbildung 8.6 vermittelt einen graphischen Eindruck über die Mineralphasenanteile in den Kieselkalken. Im Weiteren finden sich im Anhang D (S. 140 ff.) die gemessenen und die mit dem Strukturverfeinerungsverfahren angenäherten Röntgendiagramme inkl. den Modalbeständen.

Stellvertretend für alle Proben wird als Beispiel für die quantitative Auswertung der Röntgendiagramme auf KK35 in Abbildung 8.7 verwiesen.

Nachfolgend werden die Resultate der Rietveld-Analyse für die untersuchten Varietäten des Kieselkalks zusammengefasst. Die Durchschnittswerte der drei mengenmässig wichtigsten Mineralphasen Kalzit, Mischkristall Ankerit-Dolomit und Quarz sind der Übersicht halber in Tabelle 8.4 aufgeführt.

#### 8.3.2.1 Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation

**Karbonat:** Mit Ausnahme von drei untersuchten Proben beträgt der Gesamtkarbonatgehalt mehr als 50 Gew.-%.

— Der Kalzitgehalt variiert von 36,5–79,5 Gew.-%. Im Durchschnitt beträgt er 61 Gew.-%.

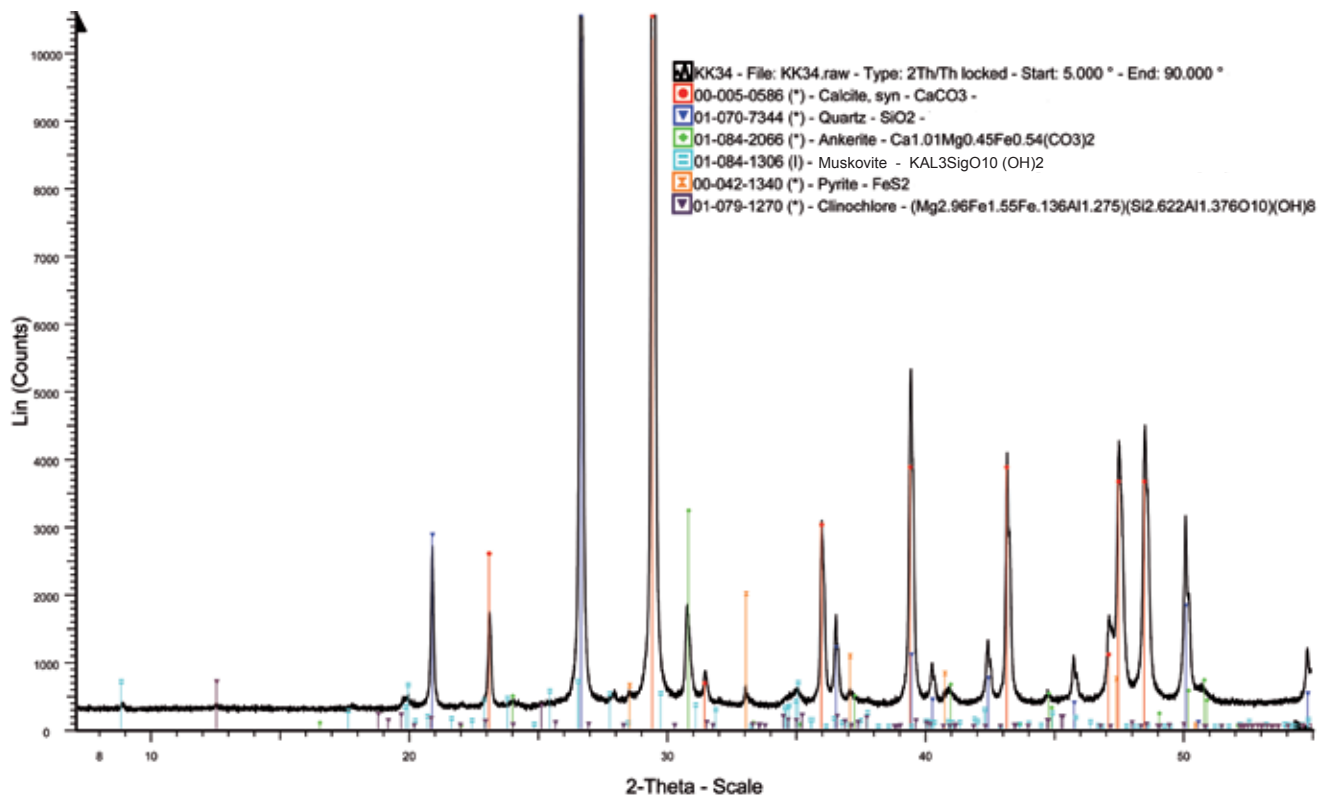


Abbildung 8.5: Ausschnitt aus dem Diffraktogramm der Kieselkalkprobe KK34 aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation. Folgende Mineralphasen wurden mit dem Programm EVA® identifiziert: Kalzit (rot), Quarz (blau), Ankerit (hellgrün), Muskowit  $2M_1$  (hellblau), Pyrit (orange) und Klinochlor (violett).

- Der Anteil des Mischkristalls Ankerit-Dolomit liegt bei 0–8 Gew.-%. Der durchschnittliche Gehalt liegt bei 2,5 Gew.-%. Das  $X_{Mg}$  wird auf 1,0–0,3 eingegrenzt, wobei in den meisten Berechnungen höhere Magnesium-als Eisengehalte angegeben werden.

**Quarz:** Der Gesamtgehalt variiert von 15,5–54,5 Gew.-%. Im Durchschnitt beträgt der Quarzgehalt 34 Gew.-%. Unter Berücksichtigung des detritischen Quarzes resultiert ein authigener Quarzanteil von 3,5–44,5 Gew.-%. Rund  $\frac{2}{3}$  der untersuchten Proben bestehen aus mehr als 30 Gew.-% authigenem Quarz.

**Muskowit  $2M_1$ :** Der Gehalt beträgt 0–5 Gew.-%. Die Muskowitphase  $2M_1$  kann in den meisten Gesteinsproben nachgewiesen werden.

**Chlorit:** Dieses Mineral findet sich in allen Proben südwestlich von Kandersteg. Von Osten her kann Chlorit erstmals im Raum Interlaken nachgewiesen werden. Der Anteil variiert zwischen 0,5–8 Gew.-%.

**Pyrit:** Pyrit ist akzessorisch (<1 Gew.-%) in allen Proben vorhanden.

### 8.3.2.2 Helvetischer Kieselkalk des Valanginiens

**Karbonat:** Der Gesamtkarbonatgehalt aller Proben ist >70 Gew.-%.

- Valanginien-Kieselkalke bestehen mit 69–92,5 Gew.-% und einem durchschnittlichen Gehalt von 75 Gew.-% vorwiegend aus Kalzit.

- Der Anteil des Mischkristalls Ankerit-Dolomit liegt bei 0,5–1,5 Gew.-%, wobei der Durchschnitt 1 Gew.-% beträgt. Das  $X_{Mg}$  beträgt 0,85–0,4.

**Quarz:** Der Gesamtgehalt variiert bei einem Durchschnitt von 18,5 Gew.-% zwischen 7 und 27,5 Gew.-%. Der Anteil an detritischem Quarz ist mit maximalen 1,5 Gew.-% gering. Somit handelt es sich beim Quarz fast vollständig um authigenen Quarz.

**Muskowit  $2M_1$ :** Der Muskowitgehalt beträgt maximal 1,5 Gew.-%.

**Chlorit:** Chlorit konnte in den Proben nicht nachgewiesen werden.

**Pyrit:** Pyrit ist akzessorisch (<1 Gew.-%) in allen Proben vorhanden.

### 8.3.2.3 Kieselkalk der Moltrasio-Formation

**Karbonat:** Der Gesamtkarbonatgehalt ist mit Ausnahme einer Probe >60 Gew.-%.

- Der Kalzitanteil liegt zwischen 32,5 und 76 Gew.-%. Im Durchschnitt beträgt er 59 Gew.-%
- Der Anteil des Mischkristalls Ankerit-Dolomit variiert von 1,5 bis 22 Gew.-%, wobei in 5 von 12 Proben Anteile >10 Gew.-% gemessen wurden und das Mittel bei 8,5 Gew.-% liegt. Das  $X_{Mg}$  beträgt 1,0–0,35, wobei in fast allen Proben wenig Eisen vorhanden ist. In dieser Varietät sollte deshalb von Dolomit anstatt Ankerit gesprochen werden.



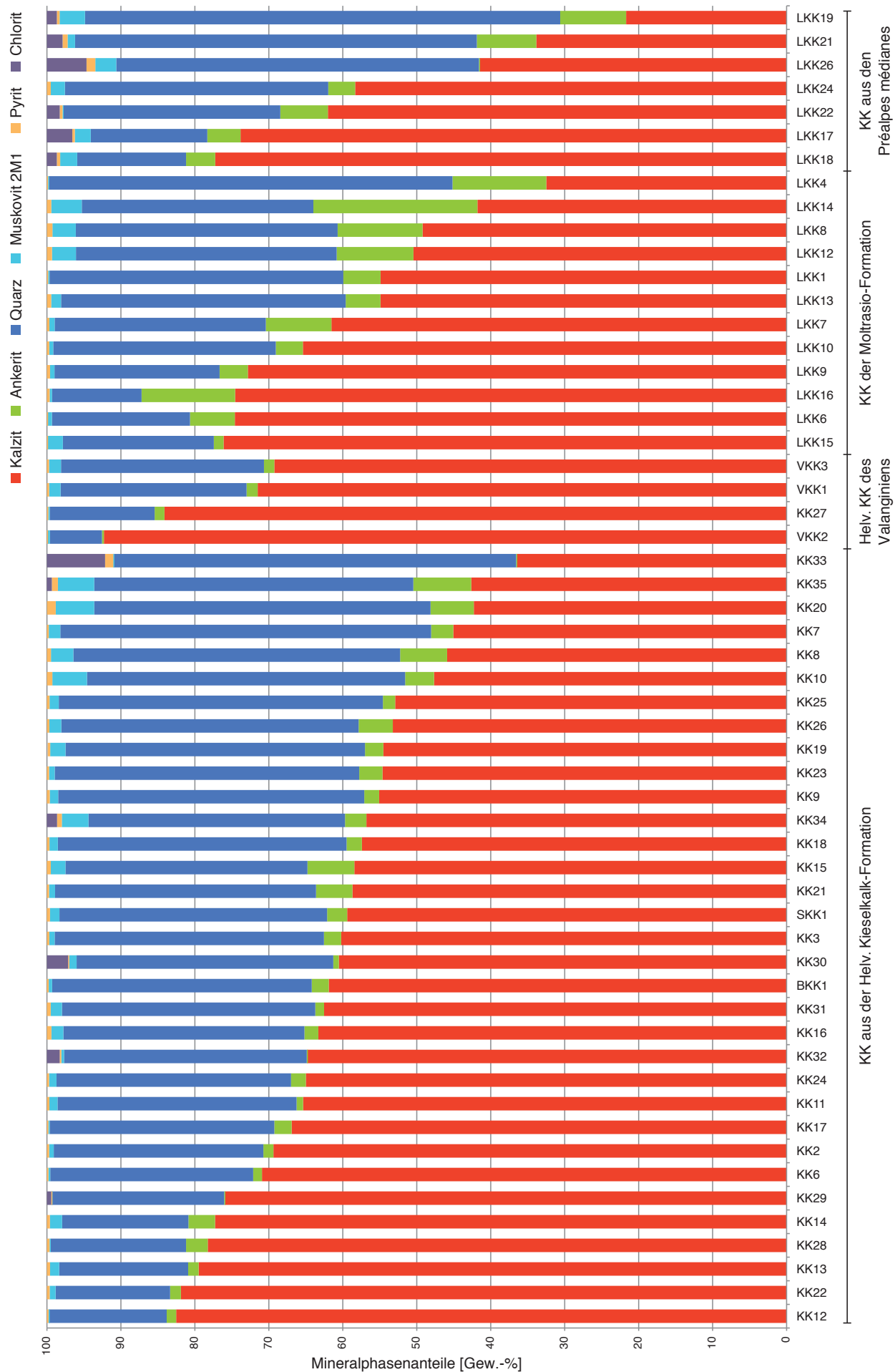


Abbildung 8.6: Darstellung der Ergebnisse der quantitativen Mineralphasenbestimmung im Säulendiagramm. Geordnet nach Kieselkalkvarietät und abnehmendem Kalzitegehalt.

Tabelle 8.3: Quantitative Analyse des Mineralienbestands von Kieselkalen mittels Rieveld-Methode. Alle Angaben ausser Rwp, GOF in Gew.-%. In Klammern sind die gerundeten statistischen Fehler der Berechnungen auf die Stelle nach dem Komma angegeben.

Probe	Kalzit	Quarz	Ankerit	Pyrit	«Muskowit» 2M <sub>1</sub>	Chlorit	Rwp	GOF	Karbonat Total	Detritischer Quarz	Authigener Quarz
SKK1	59,4 (1)	36,2 (1)	2,7 (1)	0,4 (0)	1,3 (1)	–	9,71	2,38	62,2	3,5	32,7
BKK1	61,9 (2)	35,1 (1)	2,3 (1)	0,2 (0)	0,5 (1)	–	12,12	2,88	64,2	0,9	34,2
KK2	69,4 (1)	28,3 (1)	1,4 (1)	0,3 (0)	0,6 (1)	–	10,65	2,56	70,7	3,7	24,6
KK3	60,2 (1)	36,4 (1)	2,3 (1)	0,3 (0)	0,7 (1)	–	10,19	2,50	62,5	3,2	33,2
KK6	70,9 (1)	27,4 (1)	1,2 (1)	0,2 (0)	0,2 (1)	–	9,99	2,34	72,1	5,1	22,3
KK7	45,1 (1)	50,1 (1)	3,0 (1)	0,2 (0)	1,6 (1)	–	9,21	2,32	48,1	7,2	42,9
KK8	45,9 (1)	44,2 (1)	6,3 (1)	0,5 (0)	3,0 (2)	–	9,23	2,36	52,2	4,8	39,3
KK9	55,1 (1)	41,4 (1)	2,0 (1)	0,4 (0)	1,1 (1)	–	9,79	2,43	57,1	1,7	39,7
KK10	47,7 (1)	43,0 (1)	3,9 (1)	0,7 (0)	4,7 (2)	–	8,9	2,3	51,6	2,0	41,0
KK11	65,4 (1)	32,3 (1)	0,9 (1)	0,3 (0)	1,1 (1)	–	9,43	2,24	66,2	0,2	32,1
KK12	82,5 (2)	16,0 (1)	1,3 (1)	0,2 (0)	0,0 (0)	–	11,53	2,63	83,8	4,3	11,6
KK13	79,5 (2)	17,4 (1)	1,4 (1)	0,4 (0)	1,2 (1)	–	11,24	2,65	80,9	3,3	14,1
KK14	77,3 (3)	17,1 (1)	3,6 (2)	0,4 (0)	1,6 (2)	–	9,55	2,6	80,9	5,1	12,0
KK15	58,4 (1)	32,7 (1)	6,3 (1)	0,5 (0)	2,0 (1)	–	9,66	2,39	64,8	2,3	30,4
KK16	63,3 (1)	32,6 (1)	1,9 (1)	0,6 (0)	1,6 (1)	–	8,36	2,09	65,2	1,6	31,0
KK17	66,9 (1)	30,4 (1)	2,3 (1)	0,2 (0)	0,2 (1)	–	10,36	2,45	69,3	1,0	29,4
KK18	57,4 (1)	39,0 (1)	2,1 (1)	0,3 (0)	1,1 (1)	–	9,47	2,31	59,5	0,6	38,4
KK19	54,5 (1)	40,5 (1)	2,5 (1)	0,3 (0)	2,1 (1)	–	8,81	2,2	57,0	0,2	40,3
KK20	42,3 (1)	45,5 (1)	5,8 (1)	1,2 (0)	5,2 (2)	–	8,13	2,17	48,1	8,4	37,1
KK21	58,7 (1)	35,3 (1)	4,9 (1)	0,3 (0)	0,8 (1)	–	9,56	2,32	63,6	2,1	33,2
KK22	81,9 (2)	15,5 (1)	1,5 (2)	0,4 (0)	0,8 (2)	–	11,36	2,69	83,3	1,3	14,2
KK23	54,6 (1)	41,2 (1)	3,1 (1)	0,3 (0)	0,8 (1)	–	9,43	2,33	57,8	1,7	39,5
KK24	65,0 (2)	31,7 (1)	2,0 (2)	0,3 (0)	1,0 (1)	–	10,73	2,65	67,0	11,0	20,7
KK25	52,9 (1)	43,8 (1)	1,7 (1)	0,4 (0)	1,2 (1)	–	9,19	2,28	54,6	0,2	43,6
KK26	53,2 (1)	40,2 (1)	4,6 (1)	0,3 (0)	1,6 (1)	–	9,72	2,4	57,9	1,8	38,4
KK28	78,3 (2)	18,3 (1)	2,9 (1)	0,3 (0)	0,1 (1)	0,1 (1)	10,82	2,47	81,2	0,2	18,1
KK29	76,0 (2)	23,4 (1)	0,1 (1)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,6 (1)	9,32	2,25	76,0	20,0	3,4
KK30	60,5 (2)	34,7 (1)	0,7 (2)	0,1 (0)	1,0 (1)	2,9 (2)	10,31	2,65	61,3	17,8	16,9
KK31	62,5 (2)	34,2 (1)	1,2 (1)	0,5 (0)	1,5 (2)	–	10,65	2,64	63,7	6,1	28,1

Probe	Kalzit	Quarz	Ankerit	Pyrit	«Muskowit» 2M <sub>i</sub>	Chlorit	Rwp	GOF	Karbonat Total	Detritischer Quarz	Authigener Quarz		Helvetische Kieselkalke des Valanginiens		Kieselkalke der Moltrasio-Formation								Kieselkalke aus den Préalpes médianes																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					



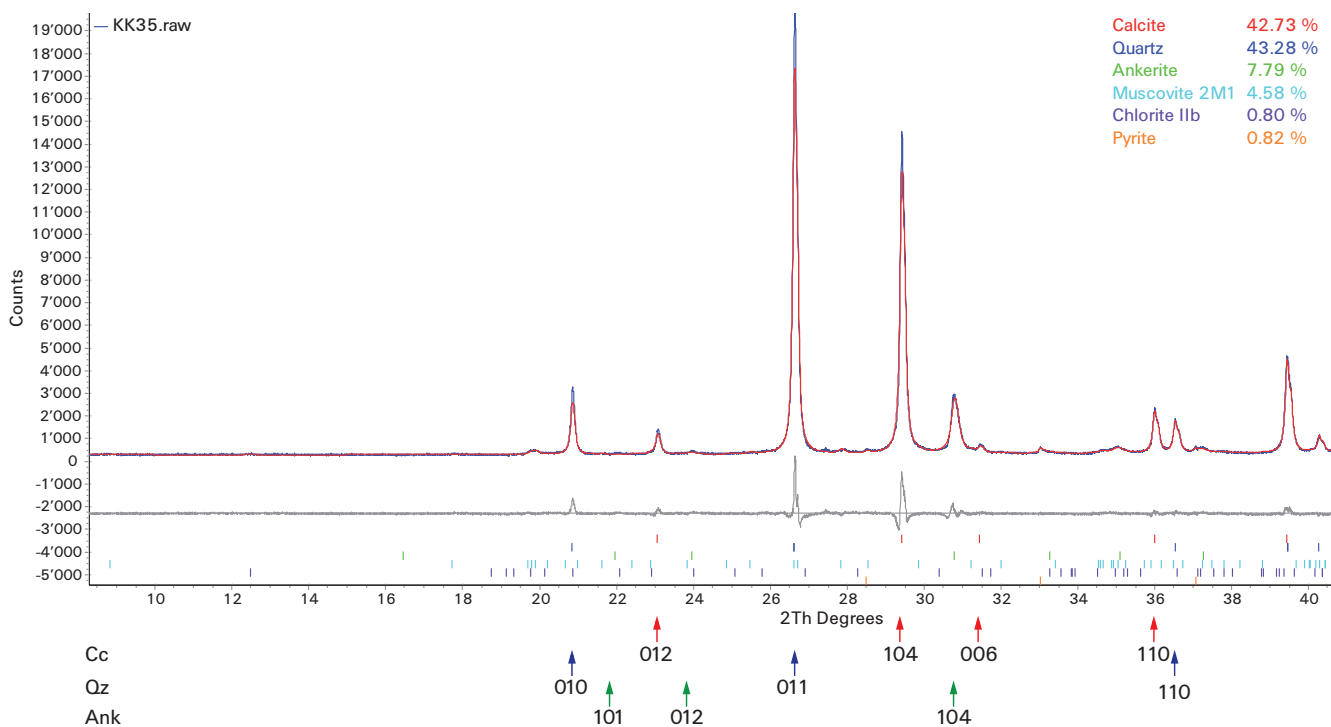


Abbildung 8.7: Ausschnitt aus dem Diffraktogramm der Kieselkalkprobe KK35. Die rote Linie entspricht dem mit der Rietveld-Methode modellierten Diffraktogramm. Sie überdeckt das gemessene Diffraktogramm grösstenteils. Die Differenz zwischen den zwei Diffraktogrammlinien ist grau dargestellt. Für die drei Mineralphasen Kalzit (Cc), Quarz (Qz) und Ankerit (Ank) sind zudem Netzebenen-Indices von sichtbaren Peaks angegeben.

**Quarz:** Der Quarzgehalt variiert zwischen 12–55 Gew.-%. Im Durchschnitt beträgt er 31 Gew.-%. Detritischer Quarz konnte nicht nachgewiesen werden. Somit entspricht der gemessene Quarzgehalt dem authigenen Quarzanteil.

**Muskovit 2M<sub>1</sub>:** Der Muskovitgehalt beträgt 0–4 Gew.-%.

**Chlorit:** Chlorit konnte nicht nachgewiesen werden.

**Pyrit:** Der Anteil an Pyrit ist akzessorisch (<1 Gew.-%).

#### 8.3.2.4 Kieselkalk der *Préalpes médianes*

**Karbonat:** In den Kieselkalcken der *Préalpes médianes* beträgt der Gesamtkarbonatgehalt 30,5–81 Gew.-%.

- Der Kalzitanteil variiert zwischen 21,5–77,5 Gew.-%. Im Durchschnitt beträgt er 52,5 Gew.-%.
- Der Anteil des Mischkristalls Ankerit-Dolomit liegt bei 0–9 Gew.-% und beträgt im Durchschnitt 5 Gew.-%. Das  $X_{Mg}$  beträgt 1,0–0,45, wobei das  $X_{Mg}$  meist im Bereich von 0,8 liegt.

**Quarz:** Der Gesamtanteil beträgt 14,5–64 Gew.-%. Unter Berücksichtigung des detritischen Quarzes ergeben sich für den authigenen Quarz 14,5–62,5 Gew.-%.

**Muskovit 2M<sub>1</sub>:** Der Muskovitgehalt liegt zwischen 0 und 3,5 Gewichts-%. Muskovit kann in den meisten Proben nachgewiesen werden.

**Chlorit:** Chlorit konnte in 6 von 7 gemessenen Proben nachgewiesen werden. Die Anteile betragen 0–5,5 Gew.-%.

**Pyrit:** Pyrit ist mit einer Ausnahme <1 Gew.-% vertreten.

## 8.4 Diskussion

### 8.4.1 Qualitative Mineralphasenbestimmung

Folgende Punkte der qualitativen Analyse scheinen relevant:

- Kalzit und Quarz sind immer vorhanden
- Der Mischkristall Ankerit-Dolomit, Pyrit sowie Muskovit 2M<sub>1</sub> treten meist auf

Tonminerale konnten in den Kieselkalcken der vier Varietäten mit dem angewandten Aufbereitungs- und Messverfahren nicht nachgewiesen werden. Entweder sind die Mengen der Tonminerale zu gering, so dass sie im Untergrund nicht erkannt werden können oder sie wurden durch die Metamorphose umgewandelt; zum Beispiel in Muskovit 2M<sub>1</sub>.

Im Weiteren konnte festgestellt werden dass Chlorit ausgehend vom St. Galler Rheintal in südwestlicher Richtung erstmals im Raum Thunersee in Kieselkalkvorkommen der Helvetischen Kieselkalk-Formation nachgewiesen werden kann (KK34, KK35). In Kieselkalkproben aus dem Helvetischen Valanginien, die ebenfalls im Raum Thunersee entnommen wurden, konnte hingegen kein Chlorit festgestellt werden. In Proben, die zwischen Kandersteg und dem Unterwallis entstammen, kommt Chlorit durchwegs vor. Dies betrifft sowohl Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation, als auch Kieselkalke der *Préalpes médianes*. Da das Helvetische Valanginien östlich des Thunersees auf Grund fehlender Verkieselung nicht beprobt wurde, fehlen hierzu Angaben betreffend des Auftretens von Chlorit. Im Weiteren zeigte die Untersuchung im Dünnschliff, dass Chlorit als sekundär gebildetes Mineral über

Tabelle 8.4: *Durchschnittlicher Gehalt der mengenmässig wichtigsten Mineralphasen von Schweizer Varietäten des Kieselkalks (Gew.-%). Mit min. bzw. max. werden die minimal bzw. maximal gemessenen Werte jeder Phase und Varietät bezeichnet.*

	Kalzit			Mischkristall Ankerit-Dolomit			Quarz		
	Ø	min,	max,	Ø	min,	max,	Ø	min,	max,
Helv, Kieselkalk-Formation	60,8	36,5	82,5	2,6	0,0	7,8	34,2	15,5	54,5
Helv, Valanginien	79,3	69,3	92,3	1,1	0,3	1,5	18,5	7,0	27,4
Moltrasio-Formation	59,1	32,5	76,1	8,6	1,3	22,2	30,6	12,1	54,6
Préalpes médianes	52,6	21,7	77,2	5,1	0,0	8,9	37,6	14,7	64,2

das bestehende Gefüge wächst. Das regionale Auftreten des Chlorits und die Beobachtung aus der Dünnschliffuntersuchung lässt vermuten, dass vom östlichen Thunersee bis ins Unterwallis die Bedingungen einer niedriggradigen Metamorphose gegeben waren, die das Wachstum von Chlorit hervorriefen. DALL'AGNOLO (1997) erwähnt übrigens in der Untersuchung über die Kieselkalke der Joux-Verte-Formation – der westlichen Fortsetzung der Helvetischen Kieselkalk-Formation in Frankreich – den Chlorit nicht.

## 8.4.2 Quantitative Mineralphasenbestimmung

### 8.4.2.1 Generelles

Wie Tabelle 8.3 entnommen werden kann, ergeben sich für die meisten Proben Güterwerte  $R_{wp} < 10\%$ . Dies bedeutet eine sehr gute Annäherung der berechneten an die gemessenen Diffraktogramme. Für Analysen mit Güterwerten  $> 10\%$  kann davon ausgegangen werden, dass neben der in Kapitel 8.2.6.1 beschriebenen Diskrepanz zwischen gemessenen und berechneten Diffraktogrammen entweder Mineralphasen nicht berücksichtigt worden sind und/oder der Feinheitsgrad des Pulvers nicht optimal war. Im Allgemeinen ist bei  $R_{wp} \gg 10\%$  meist ein schlechtes Startmodell mit falschen Strukturen, falschen Orientierungen der bevorzugten Orientierung, schlechter Peakformfunktion etc. Ursache für dürftige Verfeinerungen. Bei den Kieselkalken ist auffallend, dass mit Ausnahme von zwei Proben ab einem Kalzitgehalt  $> 60$  Gew.-% die  $R_{wp}$ -Werte  $> 10$  sind. Das lässt vermuten, dass diese leicht höheren  $R_{wp}$ -Werte wesentlich vom Kalzit verursacht werden könnten. Allenfalls wäre der Einbezug eines Magnesium-Kalzits aufschlussreich.

Für alle Varietäten des Kieselkalks können die mittels Rietveld-Methode ermittelten Angaben des Modalbestands mit einem maximalen absoluten Fehler von  $\pm 1$  Gew.-% angegeben werden. Allerdings muss bei den Kieselkalken der Préalpes médianes berücksichtigt werden, dass eine weitere Mineralphase vorhanden ist. Diese kann aber auf Grund der Untersuchung im Dünnschliff und der Abschätzung aus dem Röntgendiagramm auf maximal 2 Gew.-% eingegrenzt werden.

Die Genauigkeit der Rietveld-Methode wurde neben der in Kapitel 8.2.6.3 durchgeführten Fehlerabschätzung an fünf ausgewählten Proben aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation und der Moltrasio-Formation mit chemischen Analyseverfahren validiert. Dazu wurde mittels Calcimetrie und coulometrischer Kohlenstoffbestimmung der Gesamt-

karbonatgehalt bestimmt und mit den Resultaten der Rietveld-Methode verglichen. Der Gesamtkarbonatgehalt unterscheidet sich dabei um weniger als 2 Gew.-% von den Resultaten der Rietveld-Analyse. Unter der Annahme, dass beide Karbonatphasen (Kalzit und Ankerit) mit gleichen Fehlern behaftet sind, ergeben sich somit für die Resultate mit der Rietveld-Methode maximale Fehler von  $\pm 1$  Gew.-%.

Die röntgendiffraktometrischen Auswertungen der Kieselkalke haben ergeben, dass der Gesamtgehalt von Quarz 7–64 Gew.-% betragen kann. Das Präfix «Kiesel» ist in der Bezeichnung «Kieselkalk» nicht immer angebracht, da bei Quarzanteilen  $> 50$  Gew.-% streng genommen von kalkigen oder kalkhaltigen Kieselgesteinen gesprochen werden müsste.

Mit der Klassifikation nach DUNHAM (1962) (vgl. Kapitel 7) kann nicht auf die Zusammensetzung der Kieselkalke geschlossen werden. Während die wenigen Mudstones tendenziell höhere Kalzitanteile bzw. tiefe Quarzanteile aufweisen, unterscheiden sich die Mineralanteile in Packstones sowie Wackestones stark.

### 8.4.2.2 Randbemerkungen

In einigen Kieselkalken der Helvetischen Kieselkalk-Formation und der Préalpes médianes finden sich zwischen  $27\text{--}29^\circ$  (2-Theta) gemessene Reflexe, die bei der Strukturverfeinerung nicht vollständig mit dem verwendeten Muskowitmodell ( $2M_1$ ) abgedeckt werden können. Auf Grund von Vergleichen zwischen verschiedenen Diffraktogrammen unterschiedlicher Proben können aber alle Reflexe der Muskowitphase zugeordnet werden. Daraus kann geschlossen werden, dass es sich bei der gemessenen Muskowitphase entweder um eine Mischstruktur (z.B. Mixedlayer) handelt oder der Muskowit  $2M_1$  so feinkörnig ist, dass er in diesem 2-Theta-Bereich übermässig hervortritt und durch die Rietveld-Verfeinerung nur bedingt korrekt erfasst wird.

Bei der Bestimmung des authigenen Quarzanteils mittels Abzug des detritischen Quarzes vom Gesamtquarz wurde dem authigenen Quarz auch Chalcedon angerechnet. Dies deshalb, weil Chalcedon-Kristallite Tiefquarzstruktur aufweisen und bei der Quantifizierung als Quarz erfasst wurden. Aus der Untersuchung im Dünnschliff ging hervor, dass der Chalcedonanteil jedoch gering ist ( $< 1$  Gew.-%). Demensprechend sind die bestimmten authigenen Quarzanteile genau.

Die Berücksichtigung der Muskowitphase  $2M_1$  in der quantitativen Auswertung hat sich als sinnvoll erwiesen. Trotz den Beobachtungen im Dünnschliff, wo diese Mineralphase nicht nachgewiesen werden konnte, findet sie sich teilweise in Mengenanteilen bis 5 Gew.-%. Das lässt vermuten, dass sie sehr feinkörnig und wahrscheinlich metamorph aus Tonmineralien entstanden ist (Anchimetamorphose bis Prehnit-Pumpellyit-Fazies).

Sofern Pyrit akzessorisch in den Gesteinen auftritt (<1 Gew.-%), können die Röntgenmessungen mit CuK $\alpha$ -Strahlung durchgeführt werden. Die Quantifizierung liegt damit unter Berücksichtigung von einem Korrekturfaktor ( $\times 1.9$ ) immer noch innerhalb eines Fehlerbereichs von  $\pm 1$  Gew.-%. Es muss beachtet werden, dass bei grösseren Pyritanteilen andere Anoden verwendet werden müssen, damit die Rietveld-Methode noch verlässlich angewandt werden kann.

Der Nachweis von Siderit ( $\text{FeCO}_3$ ) konnte entgegen den Beobachtungen von FUNK (1971) röntgendiffraktometrisch nicht erbracht werden. Hingegen ist ein eisenhaltiger Mischkristall der Reihe Dolomit-Ankerit im Gestein vorhanden. Gemäss der quantitativen Auswertung mit der Rietveld-Methode handelt es sich dabei vorwiegend um Ankerit mit variablen Mg/Fe-Verhältnissen. In den meisten Kieselkalcken wird das  $X_{\text{Mg}} < 0.8$  berechnet, womit nach DEER et al. (1966) von Ankerit gesprochen werden kann. Untersuchungen mit der Elektronenmikrosonde bestätigen diesen Befund, wobei die Ankeritkristalle immer eine Zonierung aufweisen (Mg-reicher Kern, Fe-reicher Mantel).

#### 8.4.2.3 Auswertung

In den Kieselkalcken der Helvetischen Kieselkalk-Formation machen die Karbonatphasen zusammen mit dem Quarzanteil immer über 90 Gew.-% der Gesteinszusammensetzung aus. In den Kieselkalcken der Préalpes médianes betragen die berücksichtigten Phasen ebenfalls über 90 Gew.-%. In den Kieselkalcken aus dem helvetischen Valanginien und der Moltrasio-Formation bestehen die Gesteine zu über 95 Gew.-% aus Quarz und den Karbonatphasen. Die Variabilität des Karbonat- und Quarzanteils ist dabei ausser für die Kieselkalke des Helvetischen Valanginien gross. Nachfolgend werden im Abriss Beziehungen zwischen Mineralanteilen diskutiert und in den Abbildungen 8.8 a–m dargestellt.

- Zwischen dem Gesamtkarbonatgehalt (Kalzit + Ankerit) und Quarz besteht für alle vier Varietäten des Kieselkalks eine lineare Korrelation (Abbildung 8.8a). Dies ergibt sich daraus, dass alle Kieselkalke zu mindestens 90 Gew.-% aus Kalzit, Ankerit und Quarz bestehen.
- Zwischen Kalzit und Quarz zeigt sich dieselbe Korrelation für Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation, des Helvetischen Valanginien sowie der Préalpes médianes. Für die Moltrasio-Formation ist die lineare Korrelation weniger deutlich, als bei den anderen drei Varietäten (Abbildung 8.8b).
- Ankerit und Quarz weisen keine direkte Korrelation auf (Abbildung 8.8c).
- Bei der Gegenüberstellung des authigenen Quarzgehalts und des Gesamtkarbonats ergibt sich eine einfache

lineare Korrelation, wobei für die Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation diese Korrelation weniger deutlich ausfällt (Abbildung 8.8d). Der lineare Zusammenhang zeigt sich deutlicher, wenn der detritische Quarz mit dem Gesamtkarbonat zusammengefasst wird (Abbildung 8.8e).

- Zwischen Kalzit und authigenem Quarz kann eine ähnliche lineare Korrelation wie zwischen Kalzit und Gesamtquarz festgestellt werden (Abbildung 8.8f). Einzig die Proben der Helvetischen Kieselkalk-Formation unterscheiden sich bei dieser Darstellung auf Grund des fehlenden detritischen Quarzanteils.
- Ankerit und authigener Quarz weisen keine Korrelation auf (Abbildung 8.8g).
- Zwischen Ankerit und Kalzit ist keine Korrelation ersichtlich (Abbildung 8.8h). Das bedeutet, dass auf Grund des Kalzitanteils nicht auf den Ankeritanteil geschlossen werden kann.
- Zwischen detritischem Quarz und authigenem Quarz besteht kein Zusammenhang (Abbildung 8.8i). Ein höherer Gehalt an detritischem Quarz geht nicht mit einem höheren Gehalt an authigenem Quarz einher. Diese Darstellung zeigt, dass der detritische Quarz, welcher vor allem in den Kieselkalcken der Helvetischen Kieselkalk-Formation auftritt, zum Beispiel als Kristallisationskeim im Bezug auf die Verkiezelung der Gesteine keinen entscheidenden Faktor darstellt.
- Zwischen Muskowit und Karbonat (Abbildung 8.8j), Muskowit und Quarz (Abbildung 8.8k) besteht erwartungsgemäss kein einfacher Zusammenhang.
- Aus der Dreiecksdarstellung der drei wichtigsten Mineralphasen Kalzit, Quarz und Ankerit ergeben sich gegenüber der zweiachsigen Darstellung keine weiteren Erkenntnisse (Abbildungen 8.8l, m).

Abbildung 8.9 visualisiert anhand von Kreisdiagrammen die Variabilität im Modalbestand der Proben zwischen dem Unterwallis im Westen und dem St. Galler Rheintal im Osten. Die Unterschiede sind im Bezug auf die geographische Verteilung unsystematisch, so dass keine Aussagen betreffend dem zu erwartenden Gesteinszusammensetzung in Abhängigkeit der Lokalität gemacht werden können. Es kann jedoch festgehalten werden, dass Kalzit in den meisten Kieselkalcken den grössten Mineralanteil ausmacht.

Der Vergleich von verschiedenen Proben aus benachbarten Lokalitäten zeigt auf, dass die mineralogische Zusammensetzung der Kieselkalke unabhängig von der lateralen bzw. vertikalen Position in der Schichtabfolge bereits innerhalb von wenigen Metern im Prozentbereich variieren kann.

## 8.5 Folgerungen

Für eine petrographische Beurteilung und Bewertung der Varietäten des Kieselkalks hat sich die Rietveld-Methode als verlässliche Analyse-methode ausgezeichnet. Mit dieser Methode konnte der Modalbestand von Kieselkalke präzise erfasst werden.

Es zeigte sich, dass Quarz und Karbonat mit über 90 Gew.-% in allen Kieselkalcken die Hauptbestandteile sind.



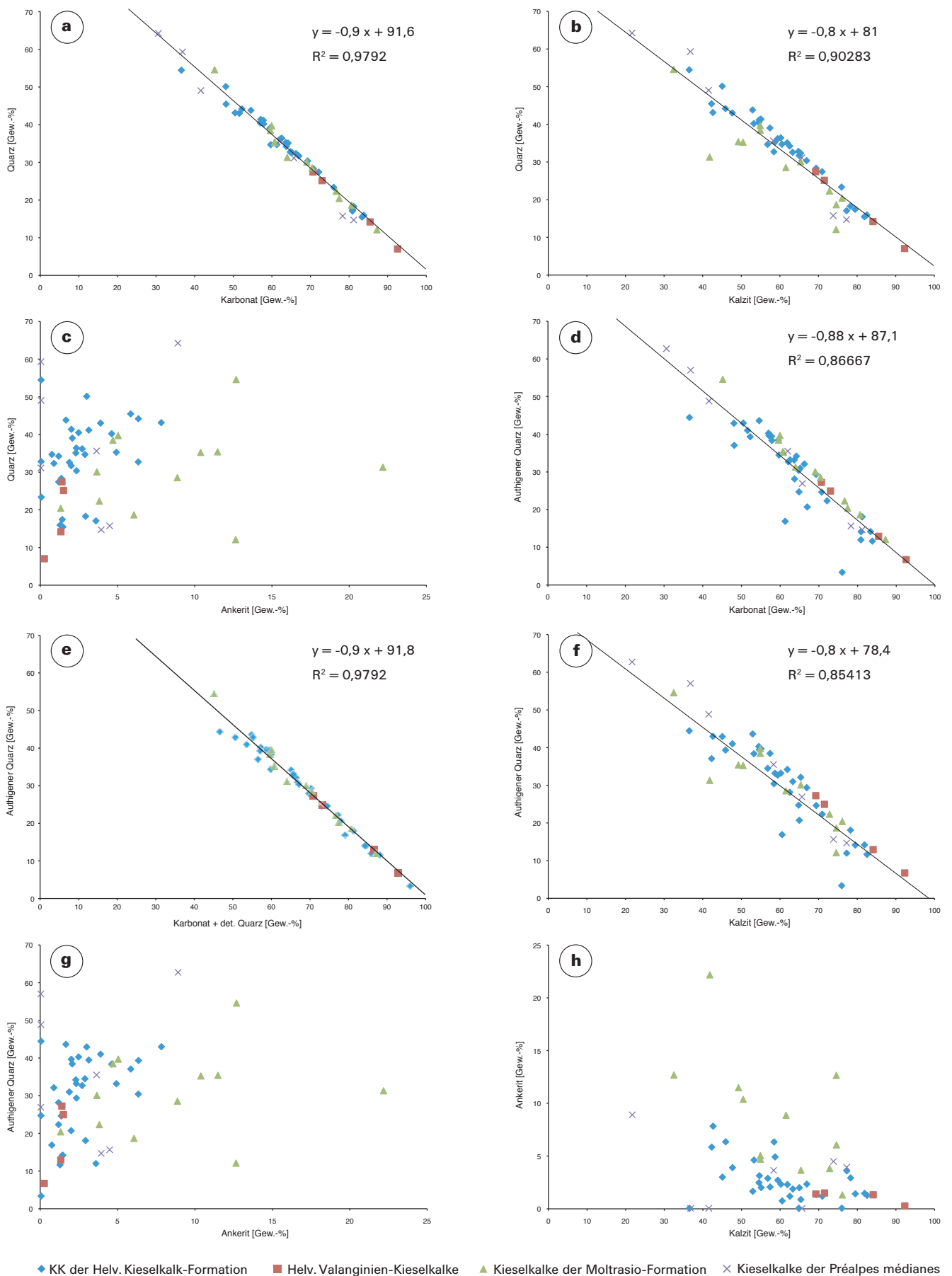
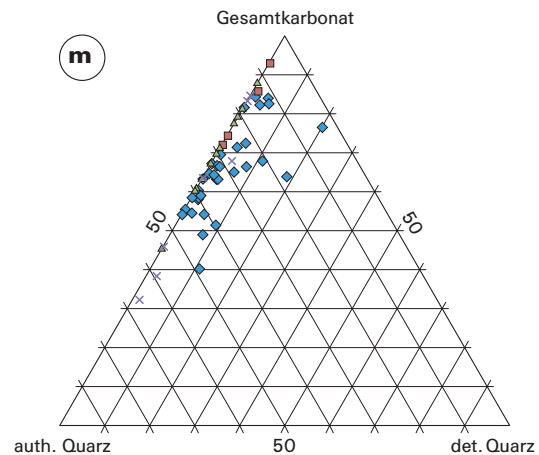
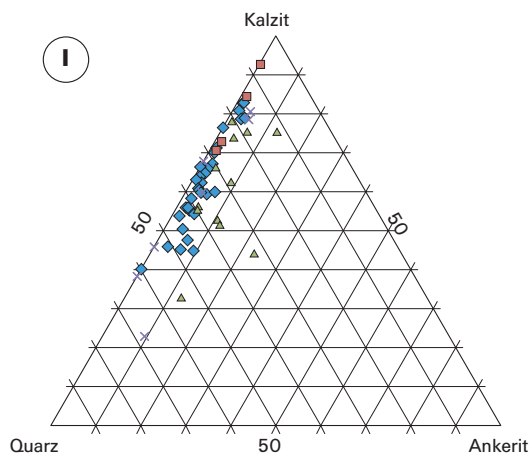
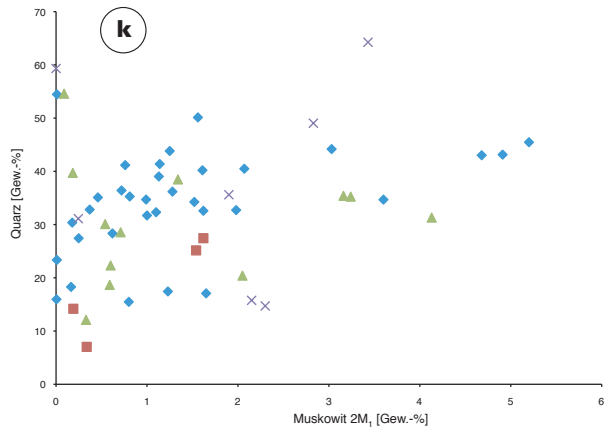
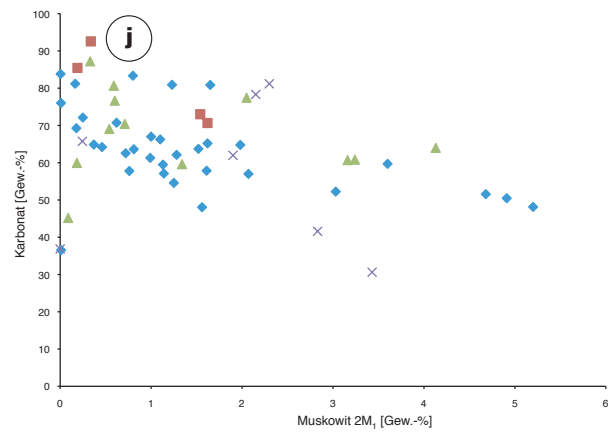
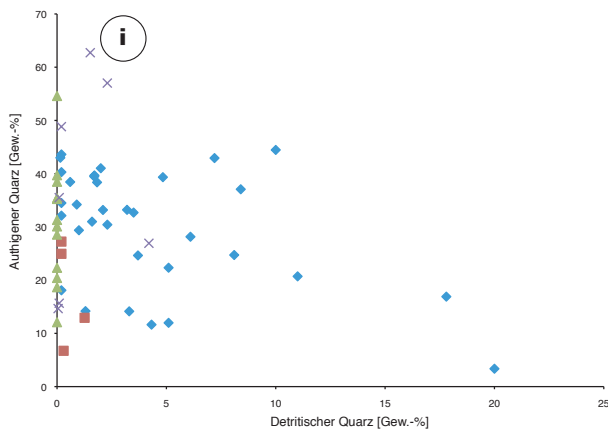


Abbildung 8.8 : Graphische Darstellung von Mineralphasen in Gew.-%. Lineare Korrelationen können im Bezug auf die Hauptmineralphasen Quarz, Kalzit sowie Ankerit festgestellt werden (a, b, d, e, f). Diese drei Minerale machen in allen Kieselkalken mehr als 90 Gew.-% aus. Ergänzend werden weitere Gegenüberstellungen von Ankerit gegen Quarz bzw. authigenem Quarz dargestellt (c, g, h). Fortsetzung nächste Seite.



Fortsetzung Abbildung 8.8: Graphische Darstellung von Mineralphasen in Gew.-%. Abbildungen l und m zeigen die anteilmässige Zusammensetzung der drei häufigsten Mineralphasen in den vier Kieselkalkvarietäten: Kalzit, Quarz (in l nach authigenem und detritischem Quarz aufgeteilt) und Ankerit (in l zusammen mit Kalzit als Gesamtkarbonat angegeben).

Dementsprechend konnte eine lineare Abhängigkeit zwischen Karbonat und Quarz festgestellt werden. Die Variabilität des Karbonat- und Quarzanteils ist dabei ausser in den Kieselkalen des Helvetischen Valanginien sehr gross. Als weitere Mineralphasen konnten Muskowit, akzessorisch Pyrit sowie regional in zwei der vier untersuchten Varietäten Chlorit in unterschiedlichen Mengenanteilen <8 Gew.-% nachgewiesen werden.

Es zeigte sich, dass alle vier Varietäten des Kieselkalks Gesteine beinhalten, deren Anteil an harten Mineralien bzw. Quarz <25 Gew.-% ist. Im Bezug auf die bis heute geltende Definition der Hartsteine bedeutet dies, dass einige der untersuchten Gesteinsproben nicht als Hartstei-

ne, sondern als mittelharte Gesteine betrachtet werden müssten. Wie sich solche Gesteine unter mechanischer Beanspruchung verhalten, wird in Kapitel 10 und 11 besprochen.

Der Vergleich von verschiedenen Proben aus benachbarten Lokalitäten zeigte auf, dass die mineralogische Zusammensetzung der Kieselkalke bereits innerhalb von wenigen Metern im Prozentbereich variieren kann. Im Weiteren ist keine systematische geographische Variation des Modalbestandes ersichtlich. Folglich ist aus mineralogischer Sicht eine Volumenabschätzung der Kieselkalkvorkommen, die auf Grund des Gehalts an harten Mineralien zu den Hartsteinen gezählt werden, nicht möglich.

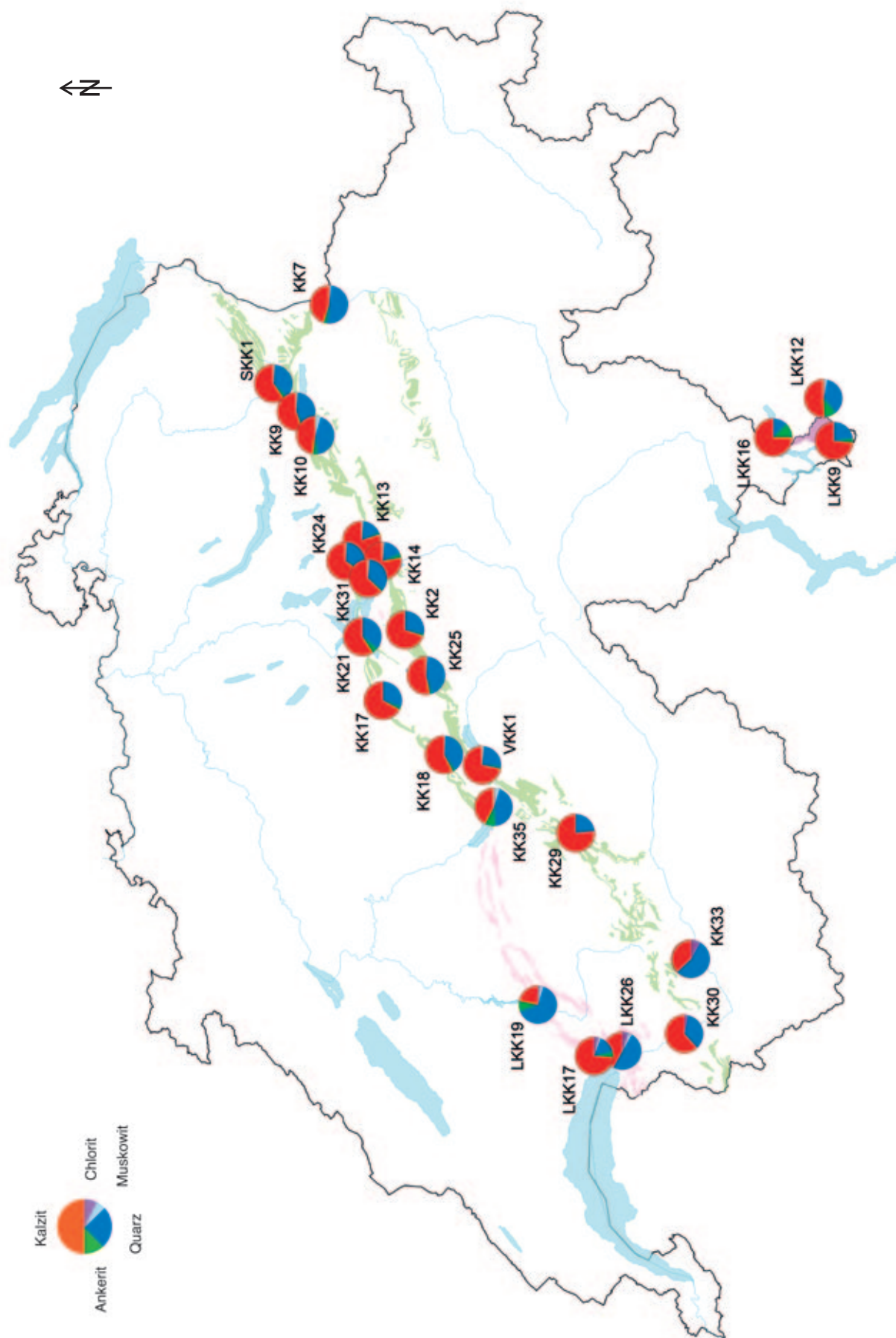


Abbildung 8.9: Modalbestand ausgewählter Proben aller untersuchten Varietäten des Kieselkalks. Eine systematische, geographische Variation ist nicht ersichtlich. Pyrit wurde auf Grund des zu geringen Anteils nicht in die Darstellung einbezogen.



## 9. Verkieselung der Kieselkalke

### 9.1 Hintergrund und Problemstellung

Den Namen führt der Kieselkalk infolge seiner sekundären Verkieselung, die in Form eines schwammartigen Skeletts aus Kieselsubstanz die Kalkmasse durchzieht (DE QUERVAIN 1969). FUNK (1971, 1975) beschreibt die Kieselsubstanz als authigenen Quarz (Mikroquarz), der noch während der Sedimentbildung entstanden ist.

Kieselkalke sind wegen ihrer Verkieselung im Vergleich mit anderen Gesteinen sehr druckfest sowie widerstandsfähig gegen Abnutzung (DE QUERVAIN 1956). In einer umfassenden Beurteilung der Qualitätseigenschaften verschiedener Gesteine für Deckschichten im Strassenbau wurden die Kieselkalke der Kreide sogar als die geeignetsten hervorgehoben (STAHEL 1968).

Im vorangehenden Kapitel 8 konnte aufgezeigt werden, dass sich die Kieselkalke der Schweiz in der mineralogischen Zusammensetzung stark unterscheiden. Daher ist zu erwarten, dass der Aufbau und die technischen Eigenschaften der Kieselkalke wesentlich vom Modalbestand beeinflusst werden. Um das Verhalten dieser Gesteine gegenüber mechanischer Beanspruchung zu verstehen, sind eine detaillierte Analyse der Verkieselungsstruktur sowie vergleichende Untersuchungen zwischen den mineralogisch unterschiedlich zusammengesetzten Kieselkalken notwendig. Schliesslich soll aufgezeigt werden, ob sich die vier in dieser Studie einbezogenen Varietäten der Schweizer Kieselkalke unterscheiden lassen und für eine Verwendung in Verkehrsinfrastrukturanlagen differenziert betrachtet werden müssen.

### 9.2 Kieselsäure: Herkunft und biogene Bindung

#### 9.2.1 Herkunft der Kieselsäure

##### 9.2.1.1 Kieselsäureverteilung in Weltmeeren

Die natürliche Kieselsäure-Konzentration in den Weltmeeren variiert nicht nur geographisch und jahreszeitenbedingt, sondern auch in Abhängigkeit der Wassertiefe (KROPF 2008). Die  $\text{Si(OH)}_4$ -Konzentration nimmt mit der Tiefe zu, wobei die Oberflächenkonzentrationen mit Ausnahme der Antarktis durchschnittlich kleiner als  $2\text{ }\mu\text{M}$  sind. In der Tiefsee steigen die Konzentrationen im Nordatlantik auf  $10\text{--}40\text{ }\mu\text{M}$ , in der Antarktis auf  $100\text{--}160\text{ }\mu\text{M}$  und im Nordpazifik auf  $140\text{--}180\text{ }\mu\text{M}$  (TREGUER et al. 1995).

Kieselsäure wird in den Weltmeeren auf drei Quellen

zurückgeführt (vgl. u.a. MOJON 1984, Tab. 2):

- Eintrag durch Flüsse in gelöster Form  $\text{Si(OH)}_4_{(\text{aq})}$ .
- Hydrolyse von Silikaten (inklusive Quarz) im Meerwasser.
- Submariner Vulkanismus.

##### 9.2.1.2 Bindung der Kieselsäure durch marine Organismen

Der größte Teil der biogen gebundenen Kieselsäure stammt von vielzelligen Schwämmen und eukaryontische Kieselalgen wie einzelligen Diatomeen (KROPF 2008). Die Kieselsäure wird von diesen Organismen direkt aus dem Meerwasser in Form von hydratisiertem, nicht kristallinem Opal A ( $\text{SiO}_{2(\text{s})} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) gebunden bzw. aggregiert. Daneben sind Radiolarien, Choanoflagellaten, Silikoflagellaten sowie höhere Pflanzen fähig, Kieselsäure für ihren Skelettaufbau aus dem Wasser zu polymerisieren (KROPF 2008).

#### 9.2.2 Kiesel Schwämme

Schwämme sind benthische Lebewesen. Moderne Schwämme finden sich vom intertidalen Bereich (0 m) bis in die Tiefsee in über 5000 m Tiefe (FLÜGEL 2004).

Das Wachstum von Kiesel Schwämmen ist gemäss Beobachtungen aus rezenten Bildungsgebieten von folgenden Einflüssen abhängig (GAMMON et al. 2000, FLÜGEL 2004):

- Silikat- und Nährstoffangebot im Wasser: Schwämme sind Suspensionsernährer.
- Konsistenz des Untergrunds: Harter Untergrund (Gestein, Muscheln) wird von Kiesel Schwämmen bevorzugt.
- Sedimenteintrag: Ablagerung von zu viel Sediment beeinflusst Schwammverbreitung negativ.
- Dynamik des Wasserkörpers: Kiesel Schwämme benötigen für ihr Wachstum tiefe hydrodynamische Energie.

Die Temperaturbedingungen und die Wassertiefe stellen zumindest bei modernen Kiesel Schwämmen keine limitierenden Faktoren dar (GAMMON et al. 2000).

Bei den Demospongiae – der heute weitaus grössten Schwammgruppe – bilden monaxone oder tetraxone verkieselte Nadeln meist ein Skelettgerüst (FLÜGEL 2004). Nach dem Absterben der Kiesel Schwämme bleiben in den Sedimenten oft nur die kieseligen Schwammnadeln als fossile Überreste erhalten.

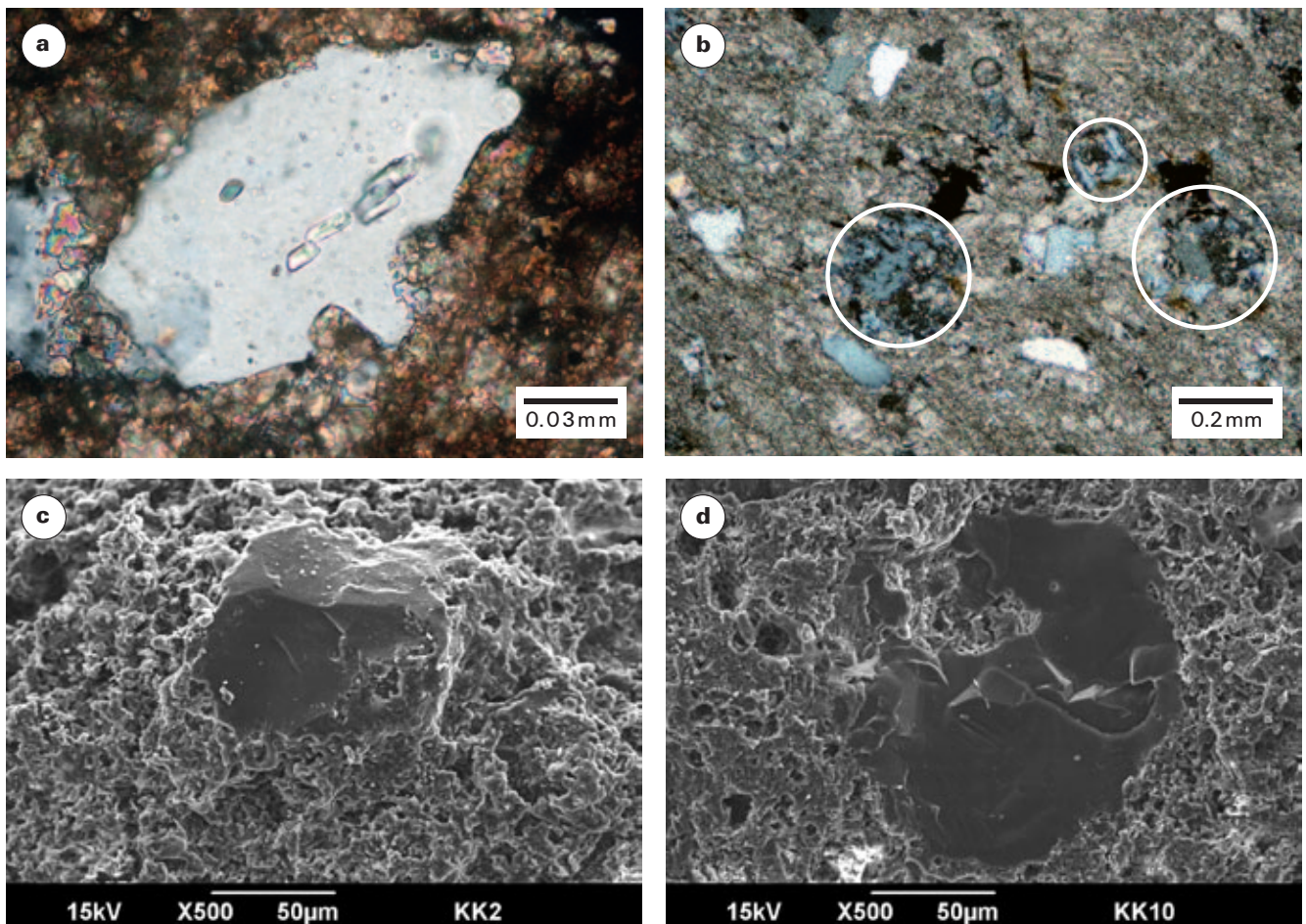


Abbildung 9.1: Detritische Quarzkörner in Kieselkalken der Helvetischen Kieselkalk-Fm. Die Körner zeigen angelöste Kornränder. a) Probe KK10: Quarz mit Lösungserscheinungen. b) Probe KK29: Lösungserscheinungen am Rand und innerhalb von Quarzkörnern (weiss eingekreist). Probenherkunft: Basis der Helvetischen Kieselkalk-Fm. bei Kandersteg (Doldenhorndecke). c) Bildaufnahme von angelöstem detritischem Quarz mittels REM, Probe KK2. d) Bildaufnahme eines weiteren Beispiels von angelöstem det. Quarz mittels REM, Probe KK10.

### 9.3 Quarzgehalt in den Kieselkalken

Bei allen in dieser Studie untersuchten Kieselkalken handelt es sich um Gesteine, die gebundene Kieselsäure in Form von Quarz enthalten. Die röntgendiffraktometrischen Auswertungen der Kieselkalke haben ergeben, dass der Quarzgehalt (authigener und detritischer Quarz) bei rund  $\frac{2}{3}$  aller Proben  $>30$  Gew.-% ist (vgl. Kapitel 8). Unter Berücksichtigung des im Dünnschliff bestimmten detritischen Quarzanteils zeigen mehr als die Hälfte der Proben authigene Quarzgehalte  $>30$  Gew.-%, wobei je nach Probenherkunft eine Variation von 7–63 Gew.-% festgestellt werden kann.

### 9.4 Lösung von detritischem Quarz

Bei der Untersuchung im Dünnschliff fällt auf (Kapitel 7), dass der detritische Quarz, sofern vorhanden, angelöste Kornränder zeigt (Abbildung 9.1 a). Die Lösungsstrukturen sind in Form von geschlossen gewellten Kornrändern (Öffnungswinkel  $30-70^\circ$ ) sowie teils gerundeten Ausbuchtungen zu erkennen, die nicht auf eine mechanische Zer-

kleinerung (Abrieb- oder Schlageinwirkung) des Quarzes oder topographische Schnitteffekte zurückgeführt werden können.

In wenigen Proben können Lösungsstrukturen nicht nur an den Kornrändern des detritischen Quarzes, sondern auch innerhalb der Körner beobachtet werden (Abbildung 9.1 b). Der Quarz bildet dabei eine schwammartige Struktur, die mit Kalzit und weiteren Mineralen verfüllt wird.

Die Anlösung von detritischen Quarzkornrändern kann auch mit der Untersuchung der Kieselkalke im Rasterelektronenmikroskop (REM) festgestellt werden (Abbildungen 9.1 c, d). Die Kieselkalke wurden dafür vorgängig mit 10%iger Salzsäure angelöst, womit der Kalzitatanteil entfernt wird und die Konturen des Quarzes besser hervortreten.

### 9.5 Verkieselung der Kieselkalke

#### 9.5.1 Allgemeine Beobachtungen

Die Verkieselung der Gesteine tritt in allen untersuchten Varietäten des Kieselkalks vorwiegend in den kompakten Bänken der Kieselkalkabfolgen auf. In den Zwischen-



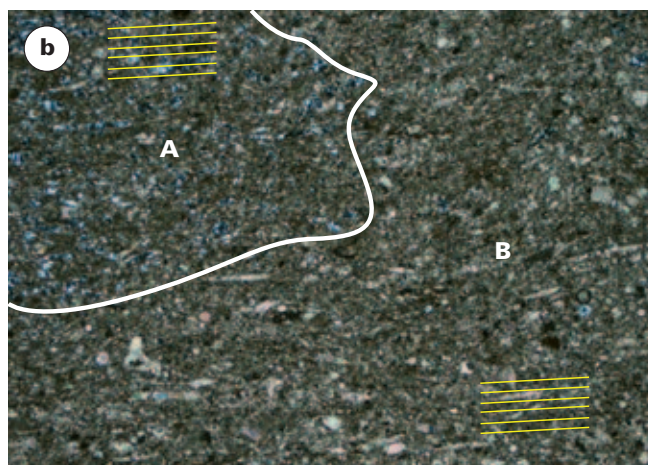
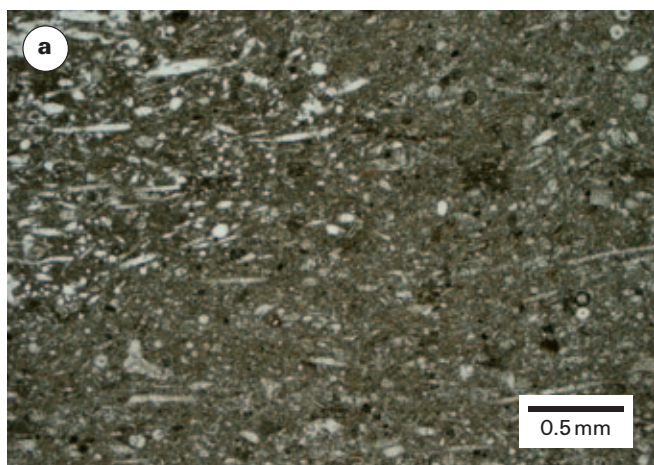


Abbildung 9.2: Dünnschliffaufnahme von Kieselkalk LKK11 aus der Moltrasio-Formation. a) Im Durchlicht und b) mit gekreuzten Polarisatoren. Der Bereich A beinhaltet verkiesselte Schwammnadeln (Chalcedon); im Bereich B sind die Schwammnadeln fast vollständig karboantisiert. Die gelben Linien zeichnen die Schichtung nach. Herkunft der Probe: Koordinaten 723.900/083.300.

lagen tritt die Verkiesselung zurück, ist aber stets vorhanden. Im Kieselkalk der Moltrasio-Formation tritt eine vollständig durchgehende Verkiesselung nur in jenen Sequenzen auf, wo keine hell-dunkel Bänderung von Kalkarenit- bzw. Kalksiltit- und Silexlagen festzustellen ist.

Im grossräumigen Massstab (>10 m) können unterschiedliche Verkiesselungsgrade festgestellt werden: Gemäss Schilderungen von Steinbrucharbeitern fällt dies beim industriellen Abbau von Kieselkalen auf, wo die stärker verkiesselten Kalke beim Brechvorgang plattigere Bruchstücke hervorbringen und durch ihre grössere «Zähigkeit» mehr Unterhaltsarbeiten am Maschinenpark verursachen. Mittels Röntgendiffraktometrie konnte nachgewiesen werden (Beispiel KK21/KK23), dass die Silifizierung auch in einer Kieselkalbank trotz scheinbar homogener und durchgehender Verkiesselung bereits innerhalb von wenigen Metern differieren kann (>1 Gew.-%). Verwitterte Kieselkalke zeigen eine raue Oberflächenstruktur, die bereits durch sanftes Ritzen mit einem Messer zerstört wird. Die Struktur besteht dabei aus einem Residual von Quarz und weiteren, verwitterungsresistenten Mineralen.

## 9.5.2 Mikroskopische Beobachtungen

Die sekundäre Verkiesselung ist durch die vorwiegend feinkörnige Ausbildung des authigenen Quarzes (<0,03 mm) und gegenüber der stark doppelbrechenden Kalkmasse in Gesteinsdünnschliffen selten beobachtbar. Einzig in Kieselkalen aus der Moltrasio-Formation treten häufig im Dünnschliff und sogar makroskopisch sichtbare Anhäufungen von mikrokristallinem Quarz auf. Es sind auch diese Gesteine, in denen im Dünnschliff verschiedene Stadien aus dem Silifizierungsprozess beobachtet werden können. Anhand eines Beispiels aus der Moltrasio-Formation wird hier der unterschiedliche Verkiesselungsgrad illustriert (Abbildungen 9.2a,b): In dieser Kieselkalkprobe können zwei Bereiche unterschieden werden: Einerseits fällt ein Bereich A mit fast vollständig silifizierten Schwammnadeln auf. Die Nadeln bilden dabei ein grobes Gerüst, welches mit authigenem Quarz und Kalzit ergänzt wird. Dieser Bereich ent-

spricht gemäss Klassifikation nach DUNHAM (1962) einem Packstone. Andererseits kann im Bereich B ein matrixgestützter Wackestone mit fast vollständig zu Kalzit umkristallisierten Bioklasten beobachtet werden. Trotz der deutlichen Grenze, die für eine unterschiedliche Verkiesselung zwischen A und B steht, verläuft die Schichtung kontinuierlich durch das Gestein.

In den wenigen Proben der anderen drei Varietäten des Kieselkalks, wo Mikroquarz neben detritischem Quarz auftritt, zeigen die Mikroquarzkörner meist andere Auslöschungswinkel als der detritische Quarz.

## 9.5.3 Beobachtungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM)

### 9.5.3.1 Untersuchungsmethode

Das Rasterelektronenmikroskop (REM) bietet für die Untersuchung des Aufbaus und der Verkiesselung der Kieselkalke im sublichtmikroskopischen Bereich ein optimales Hilfsmittel. Die Funktionsweise des REM kann folgendermassen zusammengefasst werden: Für die Erzeugung von topographischen Bildern werden Sekundärelektronen detektiert, die durch Wechselwirkung eines primären Elektronenstrahls mit der Probenoberfläche entstehen. Die Intensität des Sekundärstrahls hängt hauptsächlich von der Orientierung der Oberfläche ab und wird in Bildpunkte unterschiedlicher Helligkeit umgewandelt. Für die Untersuchung wurde ein REM des Typs Jeol JSM 6390LA mit EDX-Einheit verwendet.

### 9.5.3.2 Probenvorbereitung

Bei der Probenwahl wurde einerseits auf ein möglichst unterschiedliches Erscheinungsbild im Dünnschliff geachtet. Andererseits wurden Proben mit grosser Variation des Modalbestandes berücksichtigt (vgl. Kapitel 8). Um die Verkiesselung im REM zu untersuchen, wurden die Proben während rund einer Minute mit 10%iger Salzsäure geätzt. Dadurch wird der Kalzit gelöst.



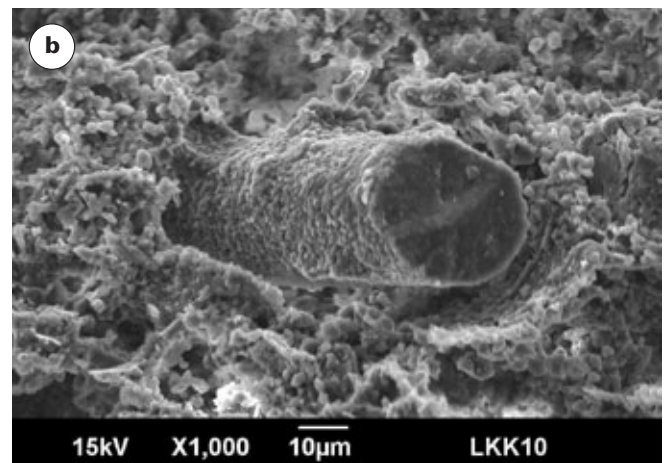
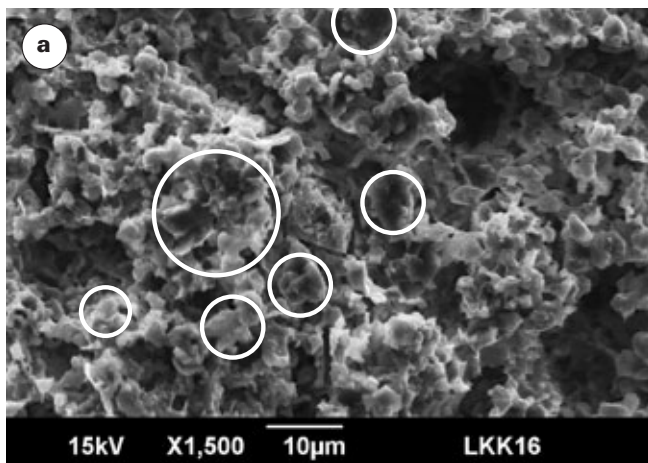


Abbildung 9.3: a) Authigener Quarz zeigt in der mit HCl angeätzten Probe ein Gerüst, in welchem nicht nur idiomorphe Mikroquarzkristalle, sondern auch Ansammlungen von Quarzmassen ohne Kristallflächen zu beobachten sind (weisse Kreise). Probe LKK16. b) Schwammnadel aus Quarz in angeätzter Gesteinsprobe LKK10.

### 9.5.3.3 Vorgehen

Im Hinblick auf die spätere Dokumentation (vgl. Bildaufnahmen im Anhang S.96ff.) wurden bei der Untersuchung die verschiedenen Proben mit gleichen Vergrößerungen beobachtet, um eine Vergleichbarkeit der Verkieselung der Kieselkalle zu ermöglichen.

### 9.5.3.4 Beobachtungen

Nach dem Lösen des Kalzits bleibt eine schwammartige Struktur bestehend aus mikrokristallinem Quarz, sofern vorhanden detritischem Quarz, sowie Ankerit und geringen Anteilen von weiteren Mineralen übrig. Die Ausbildung der Minerale kann folgendermassen charakterisiert werden:

**Authigener Quarz:** Der authigene Quarz bildet in allen untersuchten Kieselkalken ein Gerüst, in welchem Mikroquarz beobachtet werden kann. Die Grösse idiomorpher Kristalle von Mikroquarz beträgt 1–5 µm. Vereinzelt können auch kleinere oder grössere Kristalle beobachtet werden. Die Verbindung der einzelnen Mikroquarzkörner erfolgt im Gerüst aller Varietäten des Kieselkalks über Ecken, Kanten und Flächen oder bis 10 µm grosse Quarzmassen ohne sichtbare, ebene Kristallflächen (Abbildung 9.3a). Teilweise zeigen Mikroquarzkörner neben Kristallflächen auch angerundete bis gerundete Kornformen.

Der authigene Quarz ist in Kieselkalken mit tiefen authigenen Quarzgehalten (<30 Gew.-%) inhomogen verteilt. Bei solchen Kieselkalken kann beobachtet werden, dass Gesteinspartien vollkommen frei von authigenem Quarz sind, während in anderen Bereichen des Gesteins ein ähnlich dichtes Erscheinungsbild der Verkieselung festgestellt werden kann, wie in stark verkieselten Kieselkalken. Es handelt sich dabei um eine partielle, weitmaschige Verkieselung mit Gerüstcharakter (Abbildung 9.4a). Grundsätzlich gilt: Je höher der authigene Quarzgehalt ist, umso engmaschiger und systematischer sind die quarzreichen Partien verbunden (Abbildung 9.4b). Bei authigenen Quarzgehalten >30 Gew.-% sind die Lücken zwischen den Quarzanreicherungen meist <100 µm. Das authigene Quarzgerüst ist

dann homogen, dicht und raumfüllend aufgebaut (Abbildung 9.4c).

**Detritischer Quarz:** In der geätzten Struktur fällt der detritische Quarz als grösster Bestandteil im Residual und durch die glatten Oberflächenstrukturen der gebrochenen Körner auf. Der detritische Quarz wird von authigenem Quarz umwachsen. Um die detritischen Quarzkörner herum ist die Verkieselung nicht dichter, als in Partien der Grundmasse, wo detritischer Quarz auf Grund der Verteilung nicht vorhanden ist. Der Übergang vom detritischen Quarz zum authigenen Quarz ist meist entlang einer Kontaktfläche, die nicht darauf hinweist, dass detritischer Quarz mit authigenem Quarz vollständig verwachsen ist.

**Ankerit:** Ankerit zeigt in den geätzten Proben idiomorphe Kornformen. Der Ankerit überwächst das Gefüge. Um die Ankerithomboeder herum kann vereinzelt ein kleiner Lösungssaum festgestellt werden, der wahrscheinlich durch Ätzen mit 10%iger Salzsäure verursacht wurde.

**Schichtsilikate:** Schichtsilikate – in der quantitativen Analyse durch die Muskowitphase  $2M_1$  vertreten (vgl. Kapitel 8) – sind mit Ausnahme des Chlorits weniger offensichtlich zu beobachten. Durch die feinkörnige Ausbildung treten sie gegenüber dem mengenmässig weit übergeordneten authigenen Quarz in den Hintergrund. In einigen Proben kann Chlorit festgestellt werden, der in Schichten angehäuft das Gestein durchzieht.

**Kalzit:** Durch das Lösen des Kalzits entsteht ein Negativabdruck, welcher indirekt auch Beobachtungen über die Ausbildungsweise des Kalzit zulässt. Je geringer der Kalzitgehalt ist, desto isolierter treten Kalzitanhäufungen auf. In verkieselten Partien ergänzt Kalzit den mikrokristallinen Quarz in ebenfalls mikrokristalliner Ausbildung und mit ebenfalls angerundeten und idiomorphen Kornformen. Kalzit bildet dabei ein Gerüst. Das vorwiegend aus Quarz bestehende residuale Gerüst zeigt meist Abdrücke von weggelösten Schwammnadeln. Vor allem in Kieselkalken der

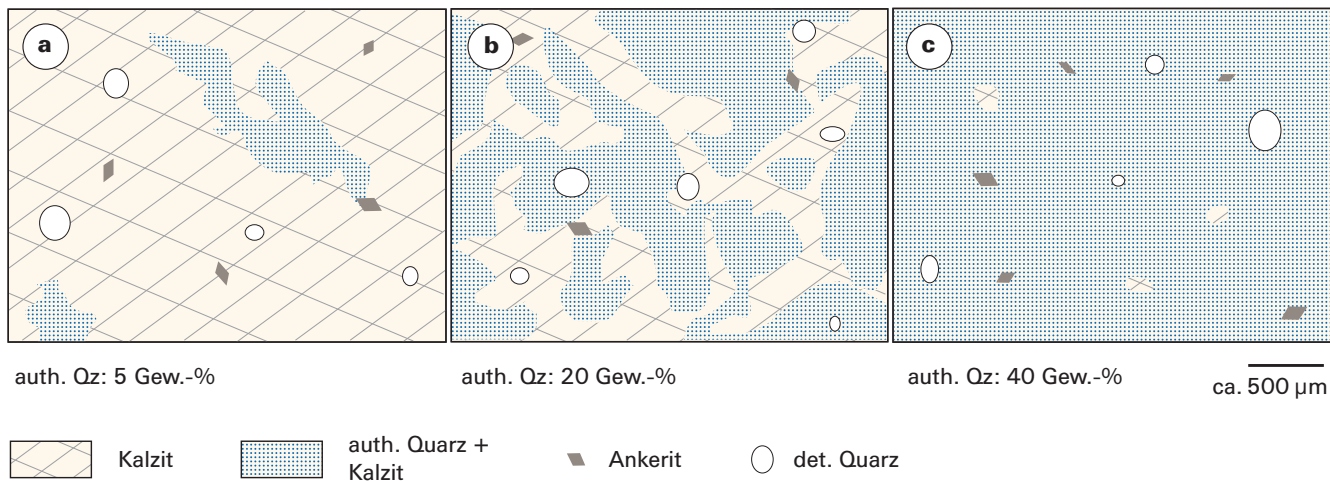


Abbildung 9.4: Schematische Darstellung der Verkieselung bei unterschiedlichen authigenen Quarzgehalten. a) Ca. 5 Gew.-% authigener Quarz im Kieselkalk. Die Verkieselung tritt in lokalen Anhäufungen auf. b) Ca. 20 Gew.-% authigener Quarz. Verkieselte Partien sind verbunden und bauen ein grösstenteils zusammenhängendes Gerüst auf. Lücken im Gerüst sind mit Kalzit verfüllt. c) Kieselkalk mit authigenen Quarzgehalt von ca. 40 Gew.-%. Bereits ab einem authigenem Quarzanteil >30 Gew.-% ist die Verkieselungssubstanz auch submikroskopisch homogen verteilt und beinhaltet vorwiegend <100 µm grosse Partien, die nur mit Kalzit verfüllt sind.

Moltrasio-Formation sind Schwammnadeln festzustellen, die auf Grund einer rohrartigen Ausbildung mit Quarz im Zentrum und weggelöstem Kalzit in der Rohrwand wie Pylonen aus der Probe stechen (Abbildung 9.3 b).

## 9.6 Diskussion

Um den Aufbau der Kieselkalke zu verstehen, müssen die Beobachtungen aus den Untersuchungen im Dünnschliff und im REM in den Kontext der Genese der Kieselkalke gestellt werden. Dazu wird als Basis die noch heute gültige Entstehungsgeschichte der Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation nach FUNK (1971, 1975) und MOJON (1984) aufgegriffen und mit neuen Erkenntnissen aus dieser Studie ergänzt (Abbildung 9.5):

- FUNK (1971, 1975) und MOJON (1984) führen die Herkunft der Kieselsäure im Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation vorwiegend auf Kieselchwammnadeln zurück, die nach dem Absterben von Kieselchwämmen als Opal-A zusammen mit kalzitischen Bioklasten sowie weiteren Komponenten (det. Quarz, Glaukonit) sedimentiert werden. FUNK (1971) stellt fest, dass im Kieselkalk weniger kalzifizierte Schwammnadeln beobachtet werden können, als authigener Quarz vorhanden ist. Diese Feststellung wurde hier auch für Kieselkalke des Helvetischen Valanginiens sowie der Préalpes médianes gemacht. Nur im Fall einer in situ Opal-Lösung und Quarz-Ausfällung müsste aber dieser Beobachtung Aufmerksamkeit geschenkt werden. Wird das gelöste Silizium transportiert, muss das lokale Verhältnis zwischen Schwammnadeln und authigenem Quarz nicht mehr übereinstimmen. MOJON (1984) konnte zudem in den Kieselkalcken aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation mittels Kathodenlumineszenz Relikte von Schwammnadeln nachweisen, die heute vollstän-

dig kalzifiziert sind und lichtmikroskopisch nicht mehr nachgewiesen werden können. Er schätzt deren Anteil auf mindestens 5–15%. In den Kieselkalcken der Moltrasio-Formation, des helvetischen Valanginiens sowie der Préalpes médianes können auf Grund der Beobachtungen im Dünnschliff ebenfalls Schwammnadeln als Hauptkieselsäurequelle betrachtet werden.

- Entweder wandelt sich Opal A nach der Sedimentation über Opal CT (fehlgeordneter Cristobalit/Tridymit) bzw. Opal C (fehlgeordneter Cristobalit) in Chalcedon (RYKART 1995) oder wird bedingt durch chemisch-physikalische Faktoren (pH-Wert, Temperatur) gelöst und in Form von Kieselsäure (z.B.: Orthokieselsäure) mobilisiert. Die Mobilisierung im Sediment könnte mit einem Anstieg des pH-Werts einhergehen, welcher gleichzeitig Ursache für die Lösung von detritischem Quarz ist. LANGMUIR (1997) zeigt auf, dass die Löslichkeit von kristallinem Quarz erst ab einem pH >9 ansteigt (Abbildung 9.6). Im Gegensatz zu FUNK (1975) wird detritischer Quarz ebenfalls als Kieselsäurequelle betrachtet. Denn in Kieselkalcken mit einem detritischen Quarzanteil >10 Gew.-%, könnten die gelösten Quarzmengen bereits mehrere Gew.-% betragen.
- BLAINE CECIL (2004) präsentiert in einem alternativen Modell den Silikaeintrag ins Meeressediment durch einen äolischen Prozess, wobei hochreaktive Quarzpartikel in Siltgrösse durch Windverwehungen in den Meeresraum transportiert und abgelagert werden. Eine kleine Korngrösse, grosse Kantigkeit sowie die grosse Oberfläche der Quarzfraktion begünstigen die Lösungsprozesse. Als Quelle für den authigenen Quarz kann der äolische Silika-Eintragsprozess nicht vollständig ausgeschlossen werden; es stellt sich allerdings die Frage, wohin der grosse Kieselsäureanteil der heute kalzifizierten Kieselchwammnadeln gelangt wäre. Für die Verifizierung dieses Modells müsste zudem abgeklärt wer-

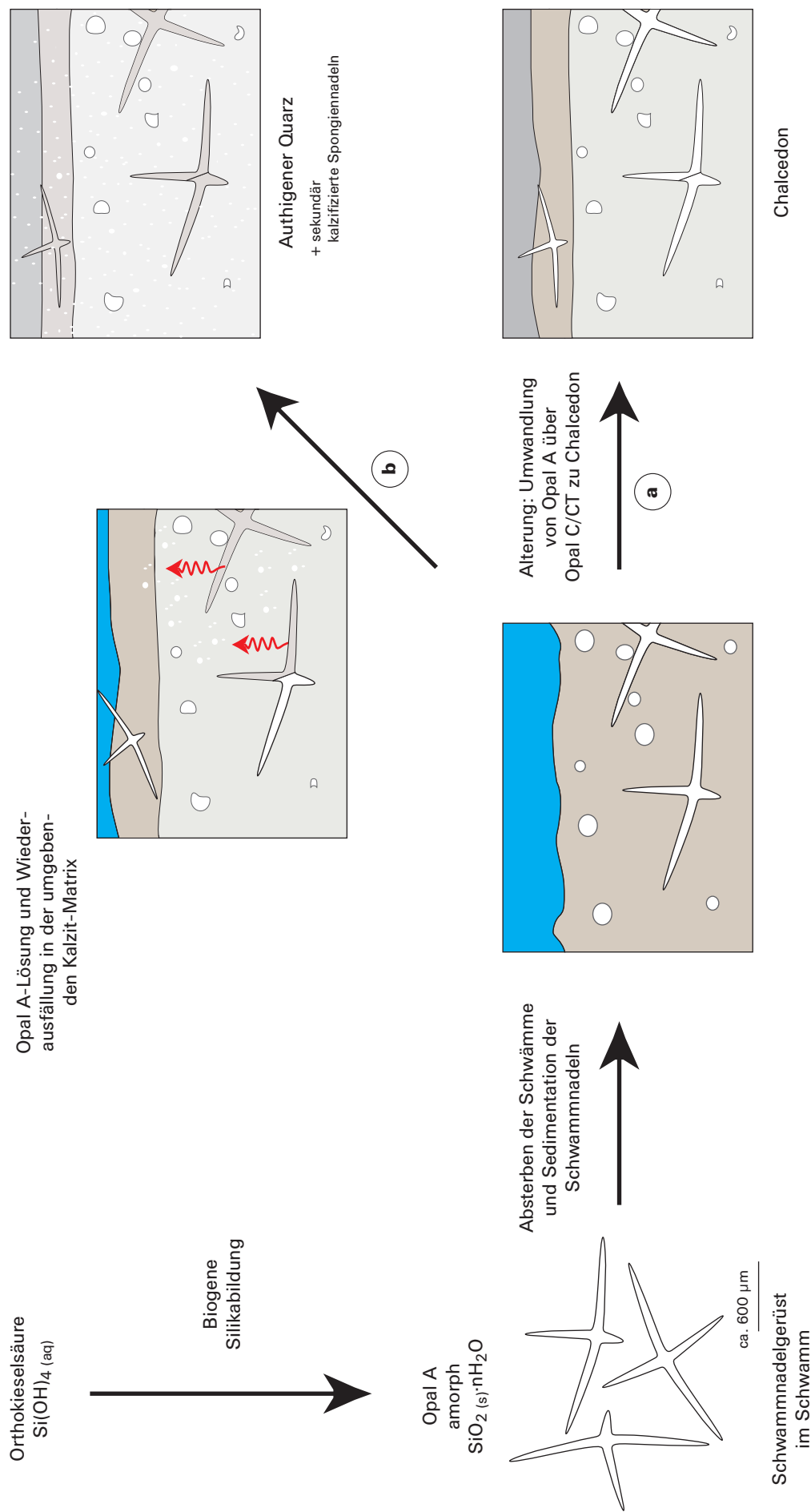


Abbildung 9.5: Modifiziert nach RYKART (1995, S. 356) und FUNK (1975, S. 302 f.). Sedimententstehung: Schwämme füllen für ihren Gerüstaufbau Silikat aus dem Wasser aus. Nach dem Absterben der Schwämme werden die Nadeln zusammen mit detritischem Quarz und, kalzischen Komponenten sedimentiert. Die Schwammnadeln bleiben entweder in Form von Chalcedon im Sediment erhalten (a) oder werden während der frühen Diagenese gelöst (FUNK 1975) und mehrheitlich vollständig sekundär kalzifiziert (b). Die Kieselsäure wird dabei entweder am Ort oder weiter entfernt in Form von Mikroquarz ausgefällt.



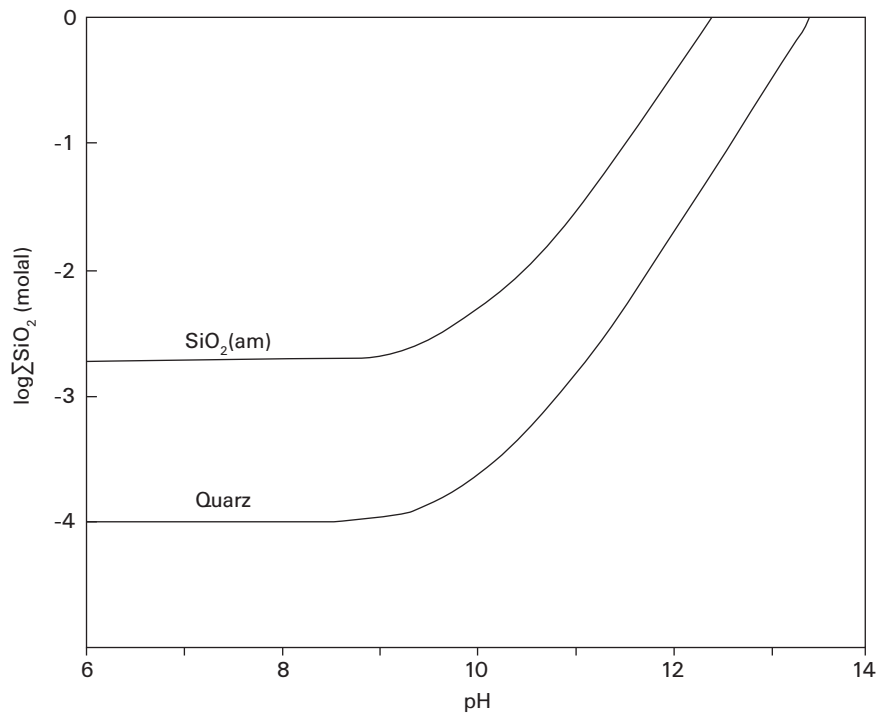


Abbildung 9.6: Vereinfachtes Löslichkeitsdiagramm in Abhängigkeit des pH-Werts nach LANGMUIR (1997). Amorpher Quarz (Opal) ist die am besten lösliche  $\text{SiO}_2$ -Form. Unterhalb eines pH-Werts von 9 ist die Löslichkeit von amorphem und kristallinem Quarz pH-Wert unabhängig. Oberhalb von 9 nimmt die Löslichkeit rapide zu. Die Abhängigkeit der Quarzlöslichkeit im Bezug auf unterschiedliche Temperaturbedingungen wurde experimentell nachgewiesen (LANGMUIR 1997). Mit zunehmender Temperatur steigt die nachgewiesene  $\text{SiO}_2(\text{aq})$ -Konzentration sowohl bei kristallinem, als auch bei amorphem Quarz.

den, ob die paläoklimatischen Bedingungen während der Bildungszeiten der Kieselkalke den oben geschilderten Prozess unterstützen könnten. Im Übrigen kann auch submariner Vulkanismus als Silikaquelle für die Verkieselung nicht ausgeschlossen werden (vgl. HEIN & OBRADOVIĆ 1989).

- Die Mobilisierung der Kieselsäure aus Schwammnadeln verläuft nicht in allen Varietäten des Kieselkalks vollständig. Sie findet jedoch meistens statt und führt zur sekundären Karbonatisierung von Schwammnadeln. In der Moltrasio-Formation können lokal noch Partien mit vollständig silifizierten Schwammnadeln beobachtet werden.
- Die vor dem Kompaktieren und der Verfestigung des Sedimentgesteins vorhandene Porosität ermöglicht dem kieselsäurehaltigen Fluid die Migration in umgebende Bereiche. Bei der Lösung von Kalzit durch das säurehaltige Fluid werden die Porenräume vergrößert. Durch eine Übersättigung des Fluids wird authigener Quarz ausgefällt.

Die Lösung von Kalzit während der Mobilitätsphase des Quarzes kann im REM anhand von geätzten Proben nachweisen werden: Authigener Quarz bildet neben idiomorphen Mikroquarzkrystallen bis  $10\ \mu\text{m}$  grosse Quarzmassen ohne sichtbare Kristallflächen. Die Oberflächen dieser Quarzmassen sind uneben und teilweise rau. Die Topogra-

phie entspricht dabei dem Negativabdruck von Kalzit, der formgebend für den authigenen Quarz ist. Folglich kann angenommen werden, dass Kalzit teilweise vor oder während der Imprägnation des Gesteins gelöst wurde.

Idiomorphe Mikroquarzkrystalle, wie sie FUNK (1975) für den Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation beschreibt, bilden sich im authigenen Quarzgerüst entweder primär während der Ausfällung oder entstehen sekundär durch Rekristallisation aus der authigenen Quarzmasse.

Um den detritischen Quarz herum können weder im Dünnschliff, noch mit dem REM Anhäufungen von authigenem Quarz festgestellt werden. Diese Beobachtung deckt sich einerseits mit FUNK (1975), der detritischen Quarz nicht als Kristallisationskeime für den authigenen Quarz nachweisen konnte. Andererseits wurde bereits in der quantitativen Mineralphasenbestimmung (Kapitel 8) aufgezeigt, dass zwischen den Anteilen an detritischem und authigenem Quarz kein Zusammenhang besteht.

Die Untersuchung von Kieselkalen mit unterschiedlichem Modalbestand zeigt, dass sich authigener Quarz vor allem bei tiefen Mengenanteilen lokal konzentriert. Die Verkieselung tritt dabei im Gestein ausschliesslich partiell auf, unterscheidet sich aber im strukturellen Aufbau kaum von demjenigen bei hohen authigenen Quarzgehalten. Es scheint, dass der Ausfällungsmechanismus des authigenen Quarzes immer derselbe ist. Der unterschiedliche Verkieselungsanteil ist vom Angebot an mit  $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$  gesättigtem Fluid und von der Migrationsfähigkeit des Fluids abhängig.

Makroskopisch sichtbare Sedimentstrukturen wie zum Beispiel Bioturbation im Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation wirken sich nicht auf die Verkieselung aus. Die Verkieselung verläuft ohne Diskordanz durch solche Strukturen hindurch

Zwischen den untersuchten Kieselkalkproben der vier Kieselkalkvarietäten können im Dünnschliff und im Rasterelektronenmikroskop keine wesentlichen Unterschiede im Aufbau festgestellt werden (vgl. Abbildungen 9.7, 9.8, 9.9, 9.10, 9.11). Der authigene Quarz zeigt in allen vier Varietäten ähnlich dicht aufgebaute Verkieselungsstrukturen bestehend aus idiomorphen 1–5 µm grossen Mikroquarzkristallen und bis 10 µm grossen Quarzmassen, die miteinander verbunden sind.

Einzig in den Kieselkalcken der Moltrasio-Formation kann durch das häufige Auftreten von kalzifizierten Schwammnadeln in der geätzten Struktur und dem tendenziell feiner körnigeren Mikroquarz ein etwas anderes Erscheinungsbild entstehen, welches sich aber nicht auf die beschriebene Verkieselungsart auswirkt.

Diese Beobachtungen führen zur Frage, ob die von FUNK (1971, 1975) und MOJON (1984) vorgeschlagene Genese über den helvetischen Kieselkalk eventuell sogar auch auf die anderen drei Kieselkalkvarietäten der Schweiz übertragen werden könnte.

Im Hinblick auf die Verwendung der Kieselkalke im Verkehrsinfrastrukturbereich ist es wichtig, das Verhalten der Gesteine gegenüber mechanischer Belastung einzuschätzen. Durch die Untersuchung des Gefügebau von geätzten Proben der Kieselkalke können wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die eine Einschätzung ermöglichen: In Kieselkalcken mit einem authigenen Quarzanteil <30 Gew.-% treten Bereiche >100 µm auf, in denen ausschliesslich Kalzit vorkommt. Kalzitanhäufungen verhalten sich unter Belastung schwächer, als Bereiche, die verkieselt sind. Je kleiner das Verkieselungsvolumen ist bzw. je grösser der Kalzitanteil ausfällt, umso mehr wird die Bruchbildung durch kalzitische Bereiche verlaufen. Das Gestein wird sich demnach wie ein Kalk verhalten.

Entsprechend der Zunahme des authigenen Quarzgehalts und der zusammenhängenden Verkieselung werden

ab 30 Gew.-% die mechanischen Eigenschaften über das durchgehend verkieselte Gestein definiert. Die bis rund 45 Gew.-% zunehmende Verkieselung bewirkt eine Verdichtung der Kieselmasse, womit ein besserer Zusammenhalt im authigenen Quarz erreicht wird. Innerhalb der Verkieselungsstrukturen ist das Kalzitgerüst eng mit dem authigenen Quarzgerüst verflochten und gegenüber mechanischer Einwirkung resistenter. Der Bruchverlauf wird vorwiegend auf potenzielle Schwachzonen konzentriert.

## 9.7 Folgerungen

Mit der Untersuchung im REM kann der Aufbau der Kieselkalke in Abhängigkeit des Modalbestands aufgezeigt werden. Das Aufbau der Gesteine variiert mit dem Anteil an authigenem Quarz bzw. Kalzit. Kieselkalke mit geringen authigenen Quarzgehalten zeigen eine lokale, partielle Verkieselung, während mit zunehmender Verkieselung quarzreiche Partien engmaschiger verbunden sind und der Aufbau homogener wird. Der authigene Quarz zeigt sich in Form von Mikroquarz, welcher neben idiomorphen Quarzkristallen auch Quarzmassen ohne ebene Kristallflächen umfasst. Die Verkieselung der Kieselkalke ist auf eine Mobilisierung von Kieselsäure aus Schwammnadeln und (sofern vorhanden) detritischem Quarz zurückzuführen. In Abhängigkeit des Quarzgehalts können zwischen den vier untersuchten Varietäten des Kieselkalks der Schweiz keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden.

Der Verkieselungsgrad wirkt sich auf das Verhalten der Gesteine gegenüber mechanischer Beanspruchung aus. Die partielle Verkieselung führt dazu, dass Partien vollständig karbonatisiert sind und sich das Gestein in diesen Bereichen wie ein Kalk verhält. Bei hohem Verkieselungsgrad treten diese kalzitischen Partien ohne Verkieselung zurück, wobei durch die engmaschige Kombination aus authigenem Quarz und Kalzit ein Gestein vorliegt, welches bei Abwesenheit von Heterogenitäten wie potenziellen Schwachzonen sehr gute technische Eigenschaften aufweisen kann.

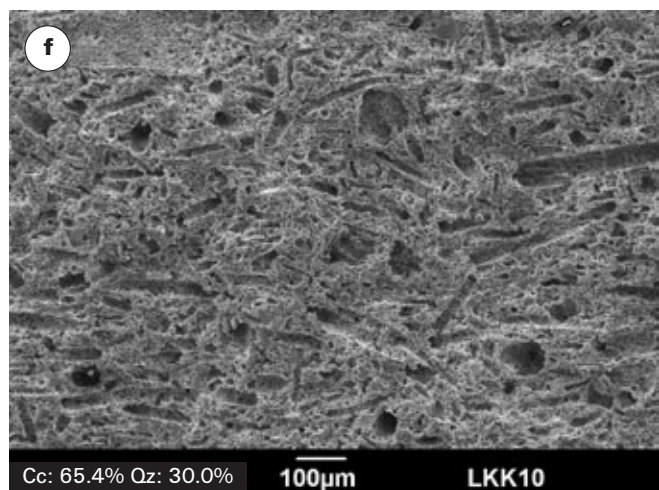
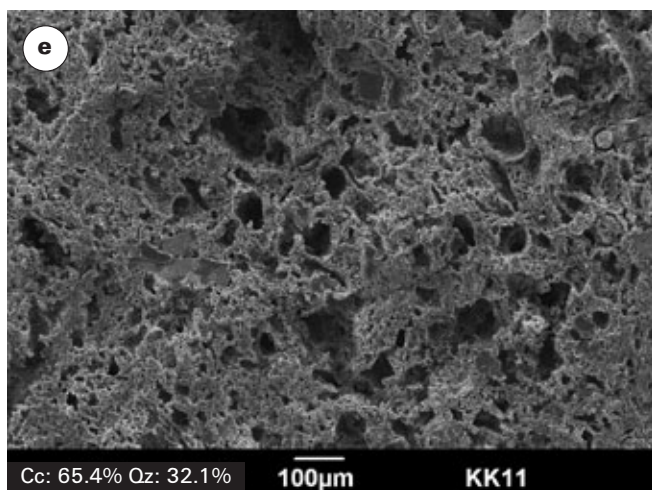
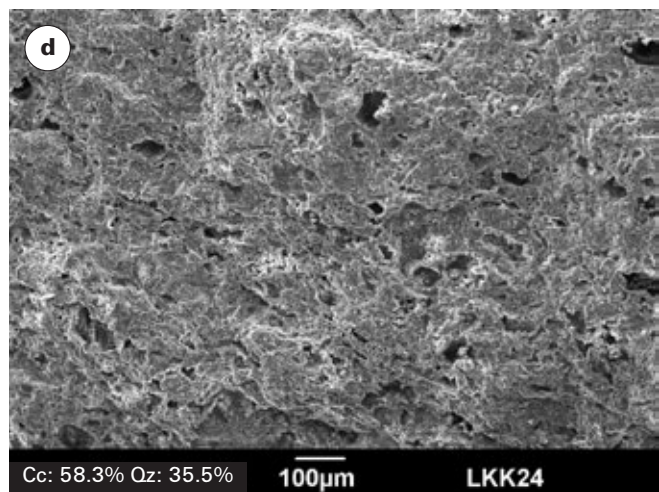
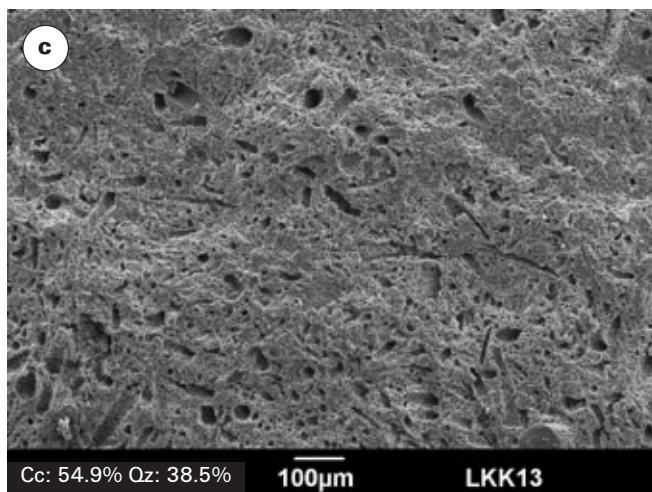
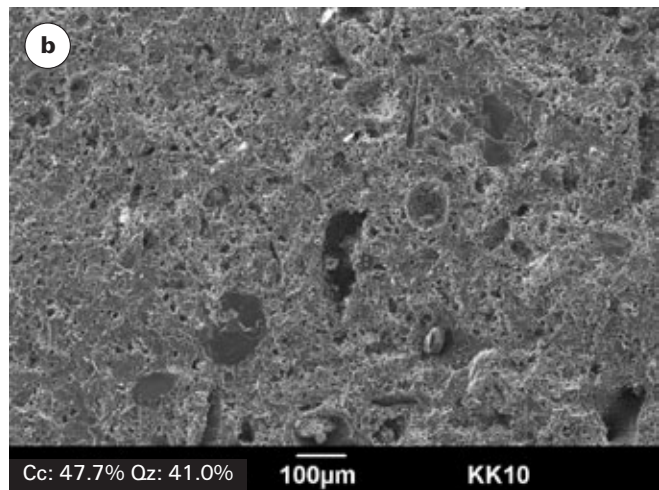
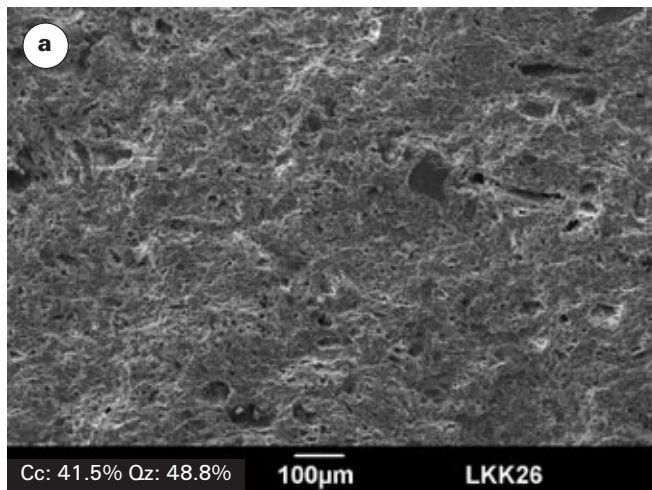
## Anhang: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von angeätzten Kieselkalkproben in fünf verschiedenen Massstäben bis 2000fache Vergrößerung

Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation: KK2, KK10, KK11, KK12, KK22, KK28

Kieselkalke des Valanginiens: VKK2

Kieselkalke der Moltrasio-Formation: LKK9, LKK10, LKK13

Kieselkalke der Préalpes médianes: LKK24, LKK26





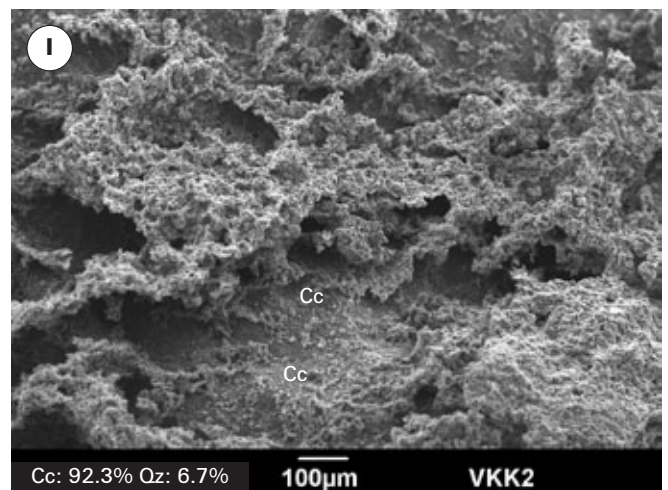
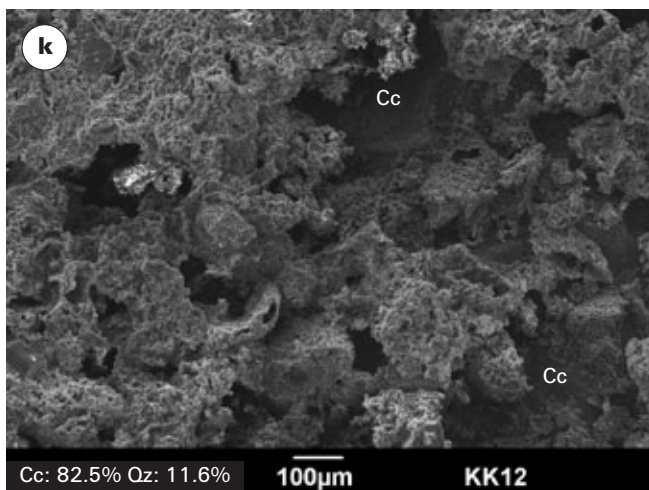
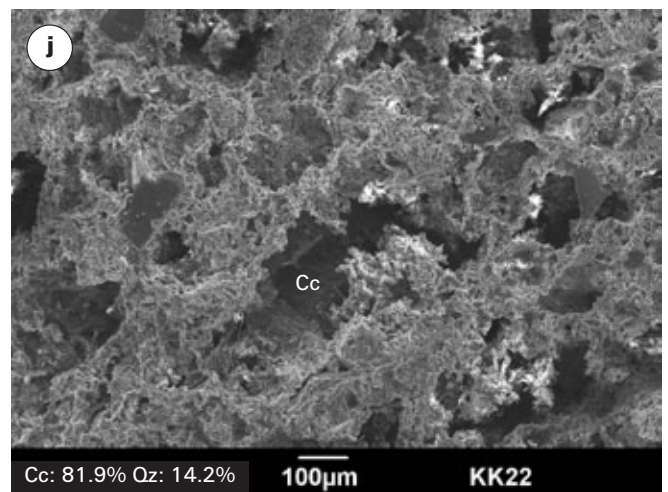
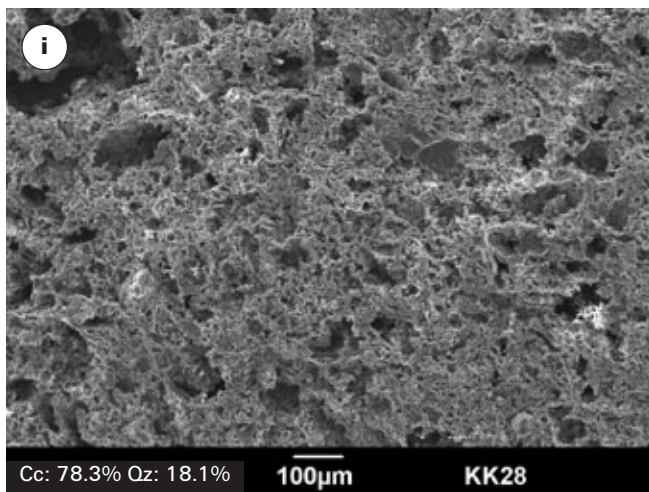
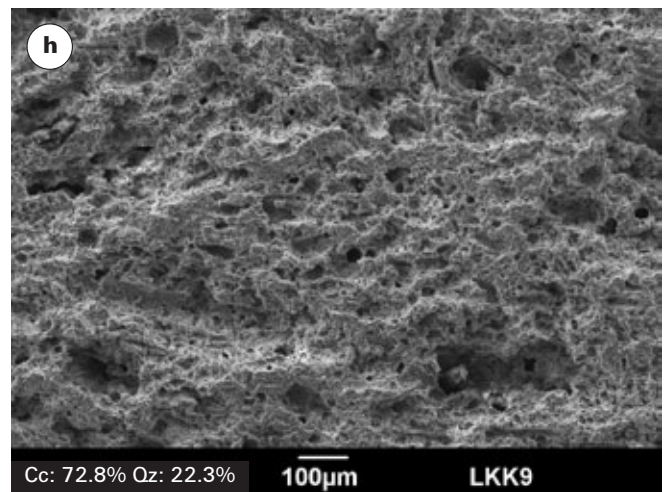
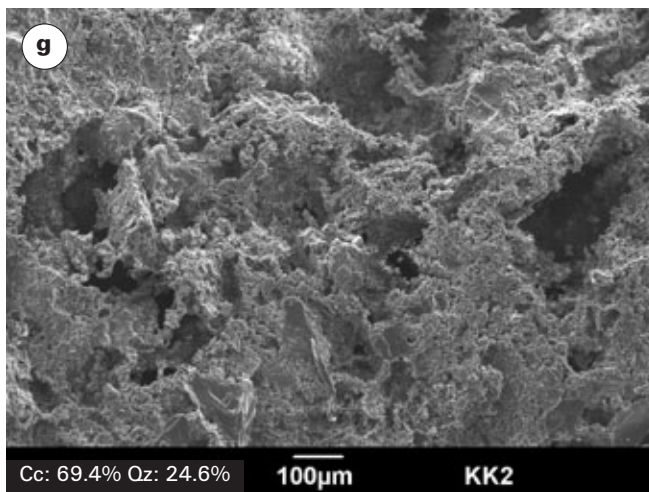
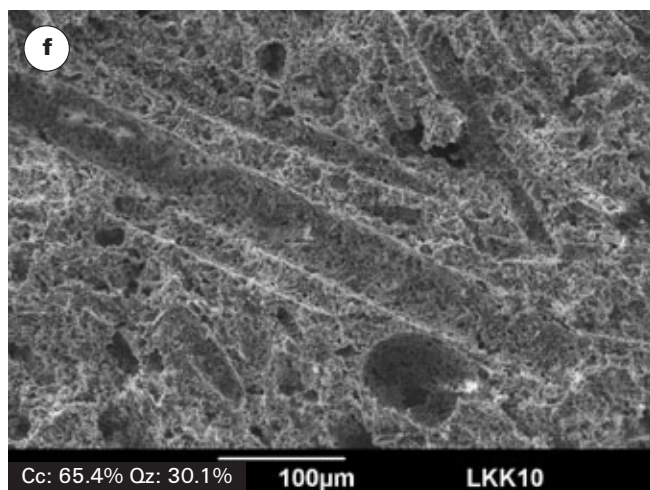
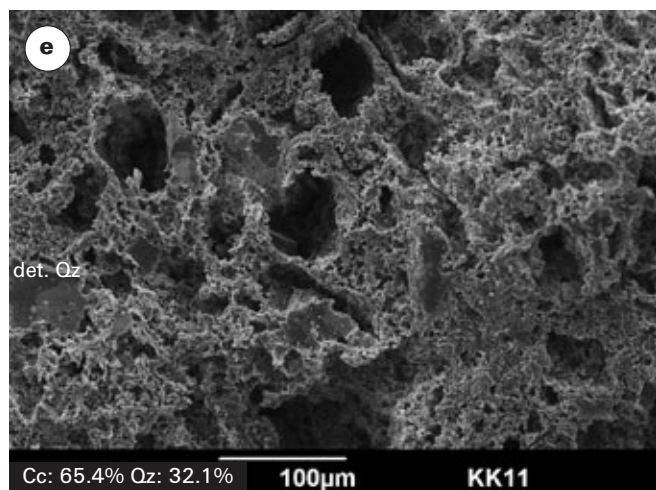
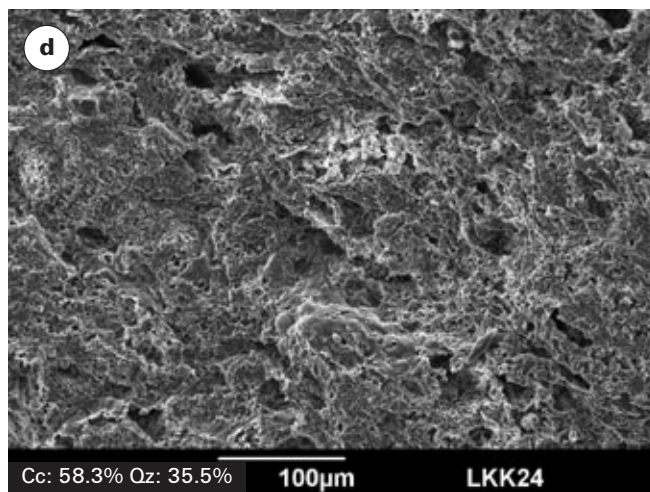
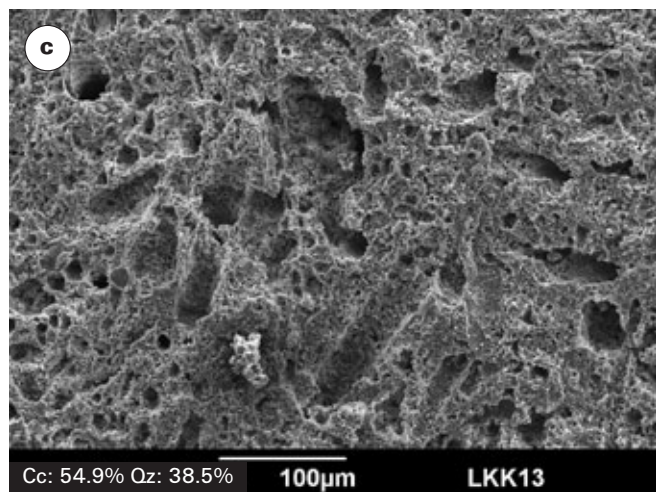
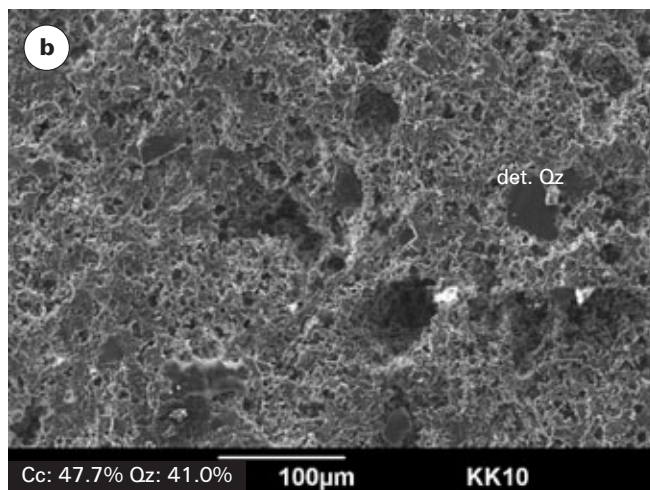
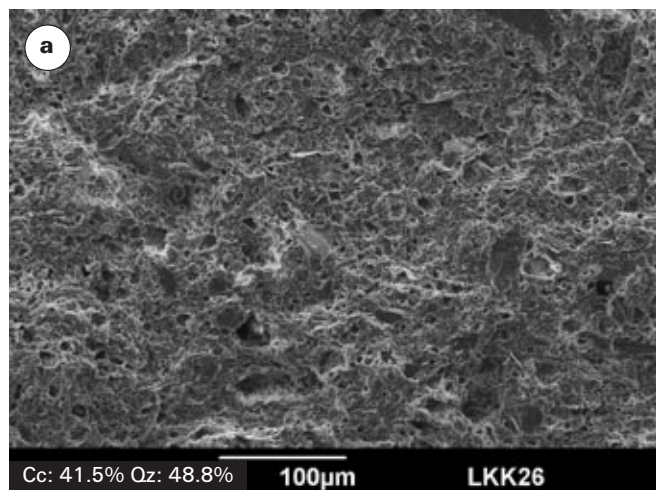


Abbildung 9.7: Behandlung der Proben mit 10%iger Salzsäure. Die Bildaufnahmen (SEI) sind bevorzugt auf verkieselte Partien fokussiert, um die authigene Verkieselung aufzuzeigen. Der Kalzitgehalt (Cc) und der authigene Quarzgehalt (Qz) wird in Gew.-% angegeben. Für die vollständige Gesteinszusammensetzung vgl. Tabelle 8.3 in Kapitel 8. Bei den Proben KK22, KK12 und VKK2 sind noch Kalzitoberflächen erkennbar (mit Cc markiert). Die Bildserie ist nach steigendem Kalzitgehalt geordnet. a) dichte Verkieselungsstruktur bei rund 50 Gew.-% authigenem Quarz; b) dichte Verkieselungsstruktur mit wenig Hohlräumen und detritischem Quarz bei rund 41 Gew.-% authigenem Quarz; c) dichte Verkieselungsstruktur mit Hohlräumen vorwiegend von gelösten Schwamnnadeln bei 38 Gew.-% authigenem Quarz; d) stets dichte Verkieselungsstruktur mit wenigen Hohlräumen bei 35 Gew.-% authigenem Quarz; e) Verkieselungs-

struktur mit einigen Hohlräumen bei rund 32 Gew.-% authigenem Quarz; f) Verkieselungsstruktur bei 30 Gew.-% authigenem Quarz mit Hohlformen von Schwamnnadeln; g) Verkieselungsstruktur mit detritischem Quarz und Hohlformen >100 Mikrometer bei einem authigenen Quarzgehalt von 24 Gew.-%; h) weniger dichte Verkieselung mit vielen kleineren Hohlräumen bei rund 22 Gew.-% authigenem Quarz; i) lokal dichtere Verkieselungsstruktur in einem Kieselkalk mit rund 18 Gew.-% authigenem Quarz; j) lockere Verkieselungsstruktur mit Hohlformen >100 Mikrometer und detritischem Quarz bei authigenem Quarzgehalt von rund 14 Gew.-%. Teilweise ist noch ungelöster Kalzit (Cc) zu sehen; k) lockere Verkieselungsstruktur mit grossen Hohlformen und ungelöstem Kalzit (Cc) bei rund 12 Gew.-% authigenem Quarz; l) Wenige Anhäufungen von authigenem Quarz bei rund 7 Gew.-% authigenem Quarz.







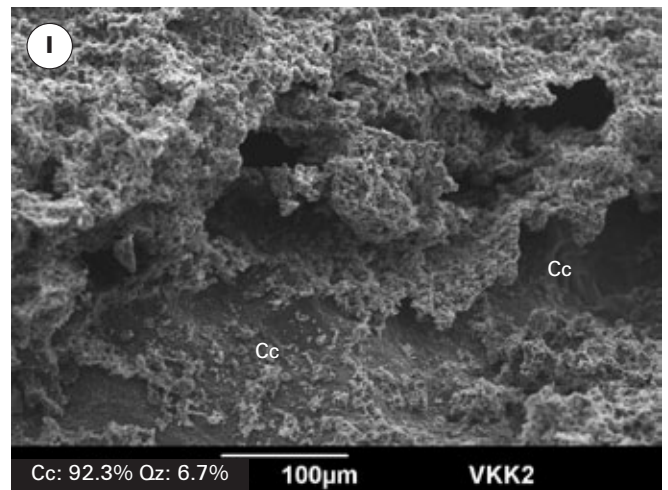
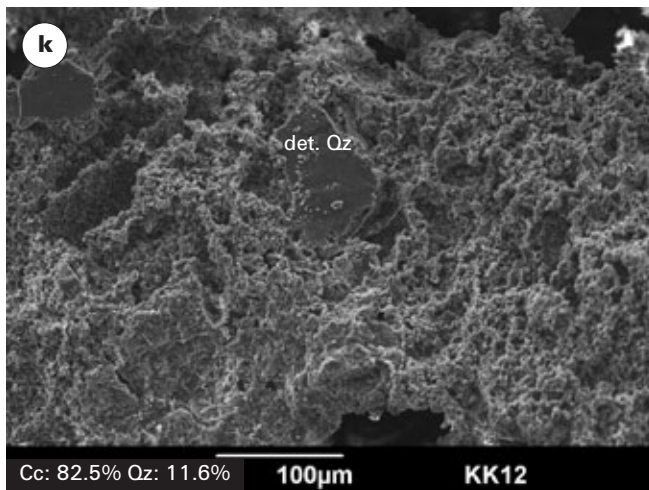
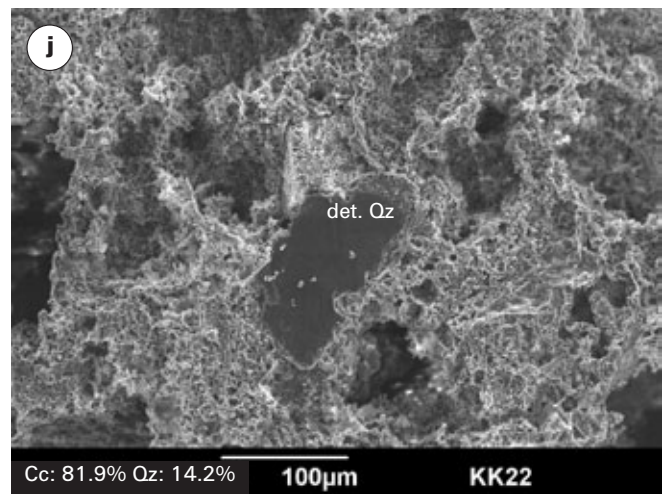
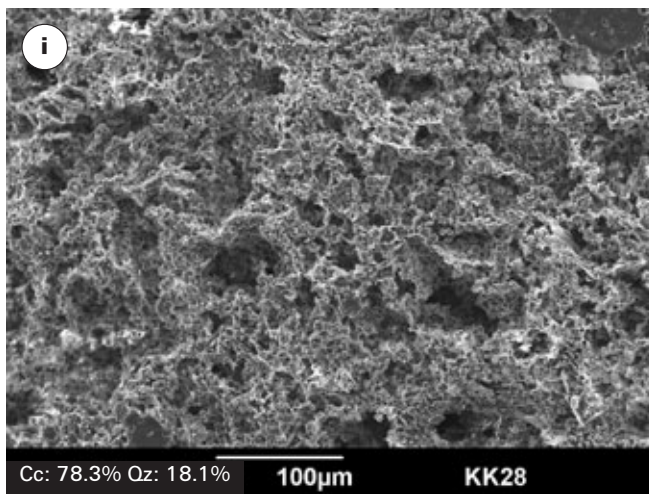
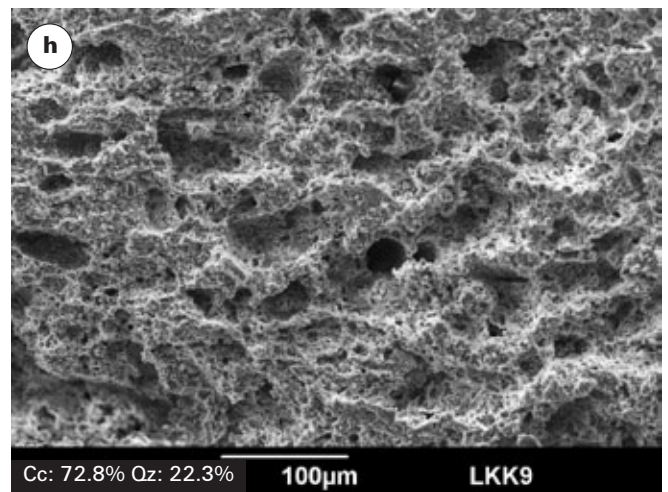
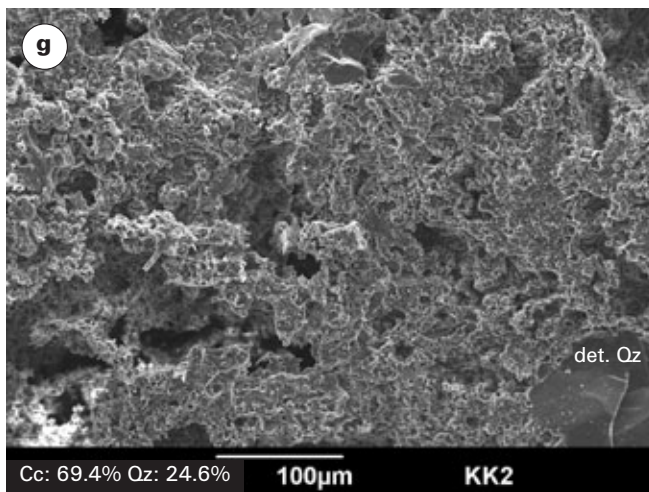
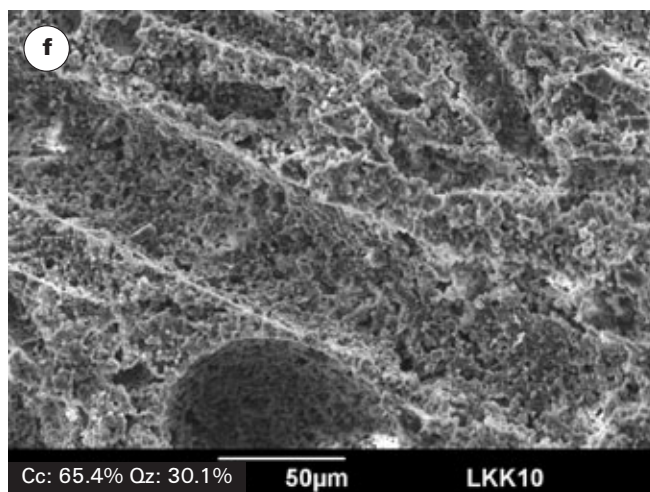
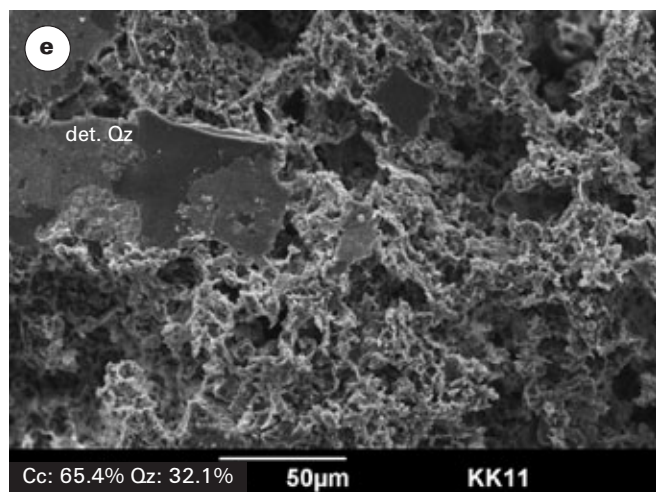
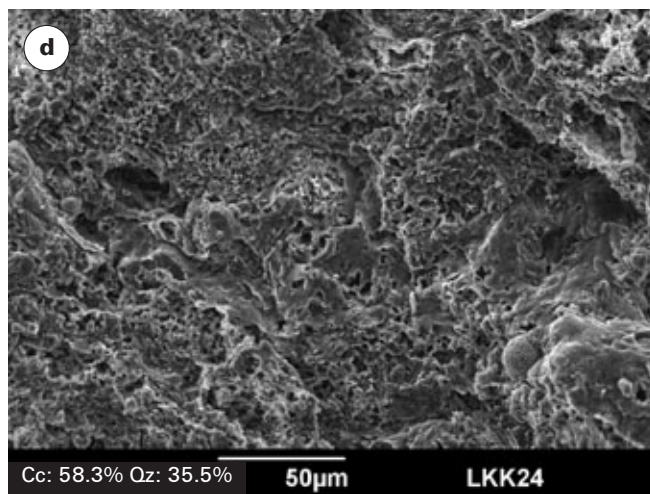
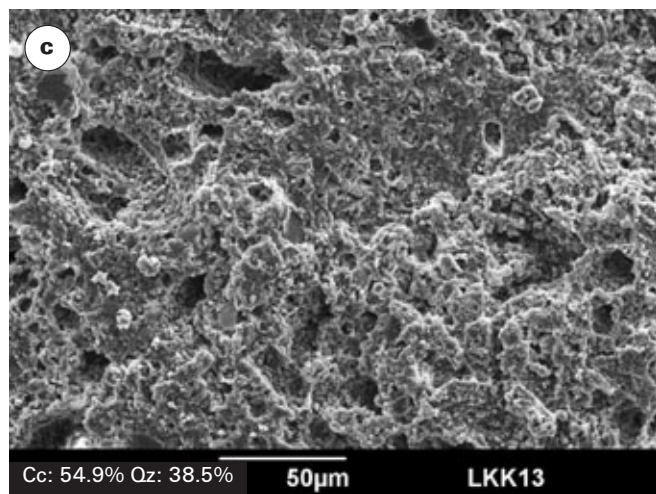
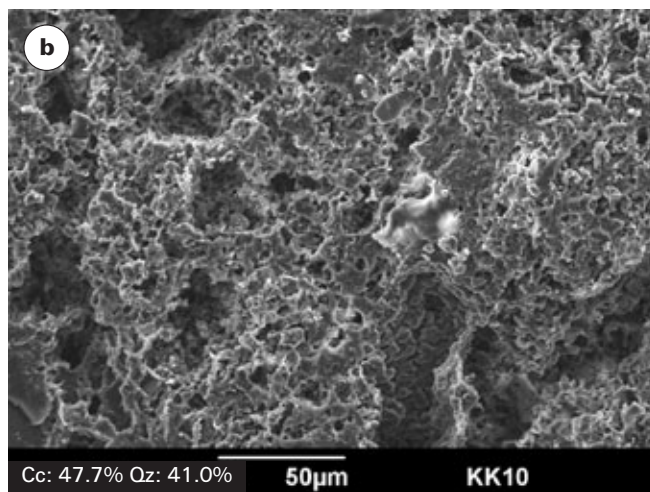
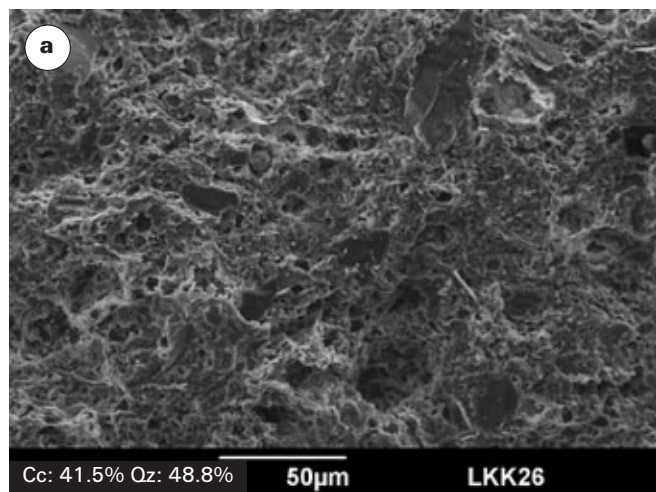


Abbildung 9.8: Kieselkalkproben mit 10%iger Salzsäure angeätzt. 2,5x kleinerer Massstab als Abbildung 9.7. Der Kalzitgehalt (Cc) und der authigene Quarzgehalt (Qz) wird in Gew.-% angegeben. Für die vollständige Gesteinszusammensetzung vgl. Tabelle 8.3 in Kapitel 8. Beachte bei Probe VKK2 sind noch Kalzitoberflächen erkennbar (mit Cc markiert). Die Bildserie ist nach steigendem Kalzitgehalt geordnet. a) dichte, schwammartige Verkieselungsstruktur; b) Verkieselungsstruktur mit kleinen Hohlformen und detritischem Quarz (det. Qz); c) Verkieselungsstruktur mit Hohlformen von Schwammnadeln; d) Verkieselungsstruktur

mit weniger klarer Struktur, jedoch mit kleinen Hohlräumen; e) zusammenhängende Verkieselungsstruktur mit vielen Hohlformen; f) Verkieselungsstruktur unterbrochen durch Hohlformen von Schwammnadeln; g) lockere Verkieselung mit detritischem Quarz; h) schwammartige Verkieselung mit unsystematischen und systematischen Hohlformen von Schwammnadeln; i) lockere Verkieselungsstruktur; j) detritischer Quarz eingebunden in Verkieselungsstruktur mit grossen Hohlformen; k) detritischer Quarz eingebunden in partieller, lockerer Verkieselung; l) partielle Verkieselung mit ungelöstem Kalzit (Cc).







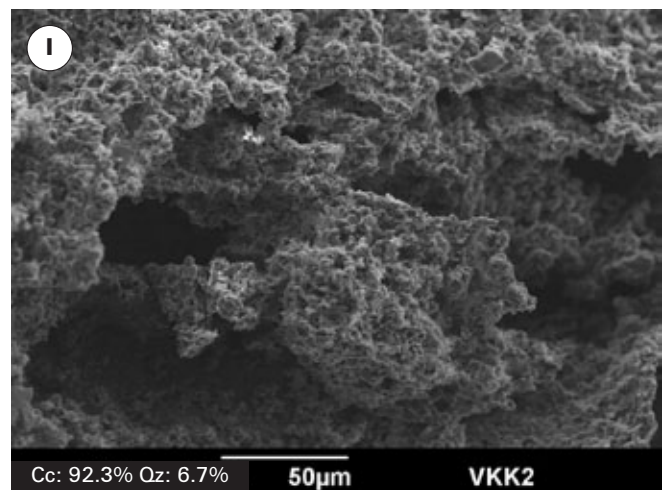
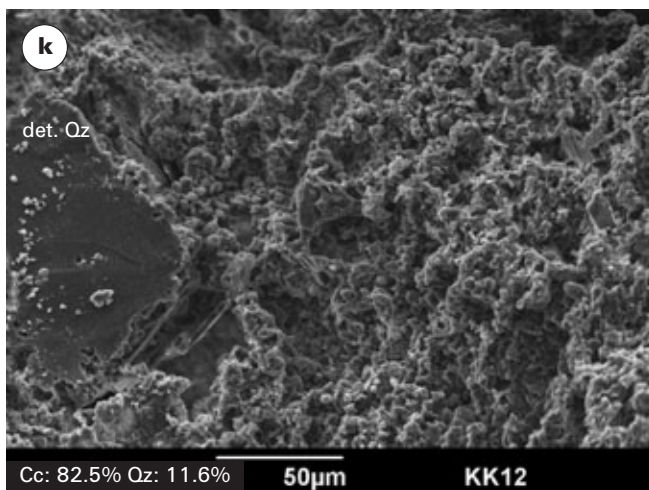
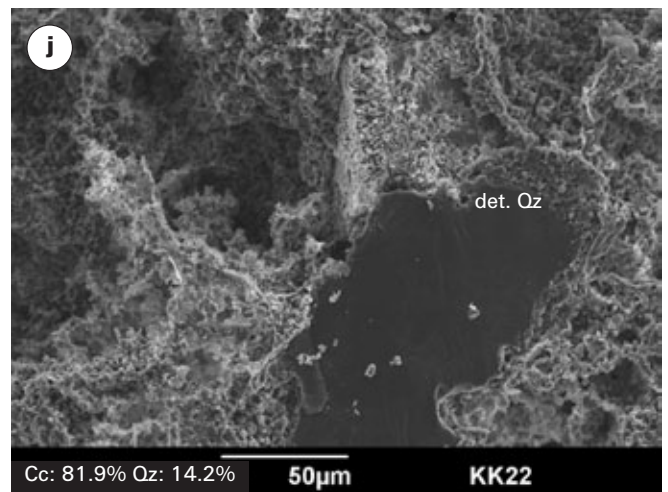
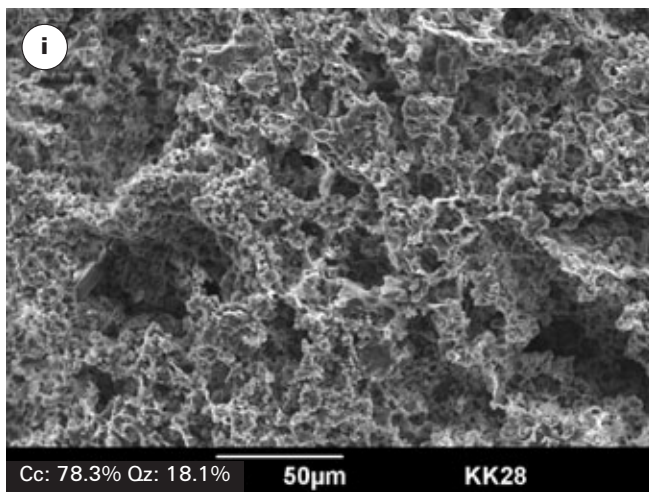
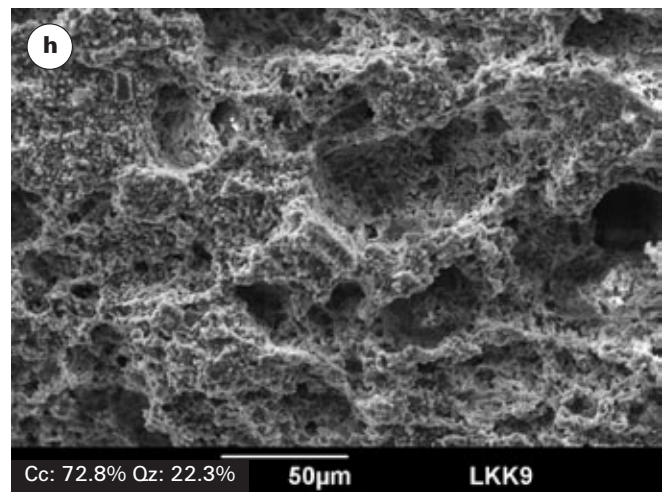
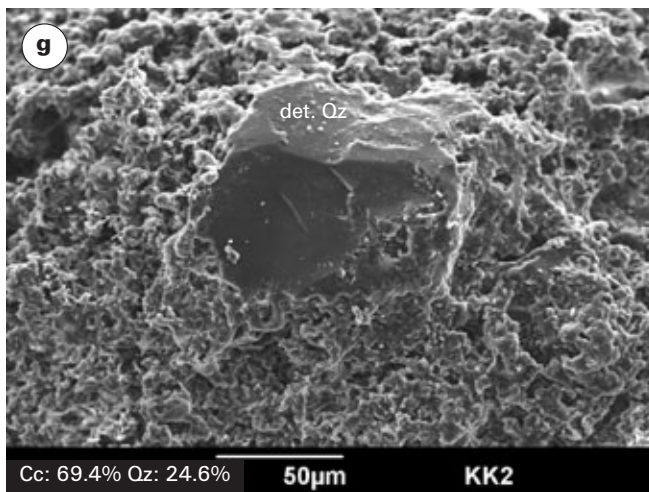
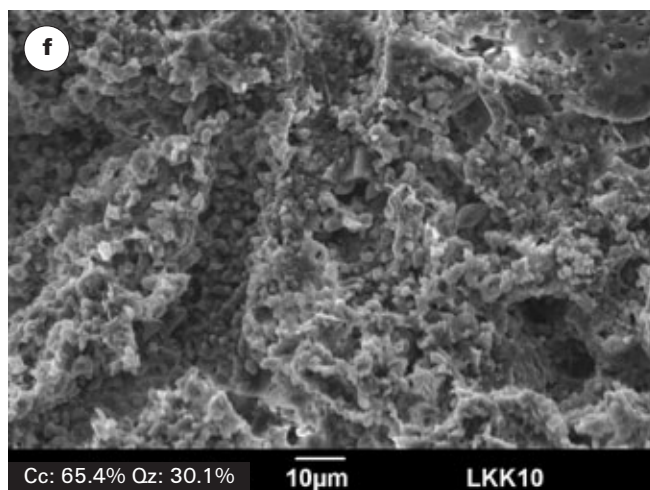
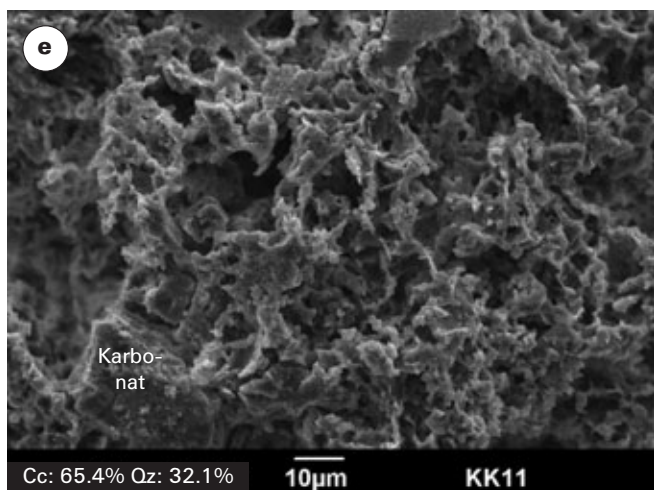
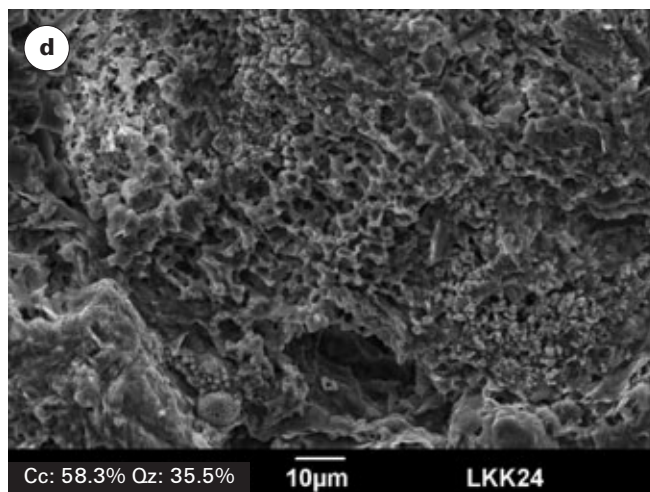
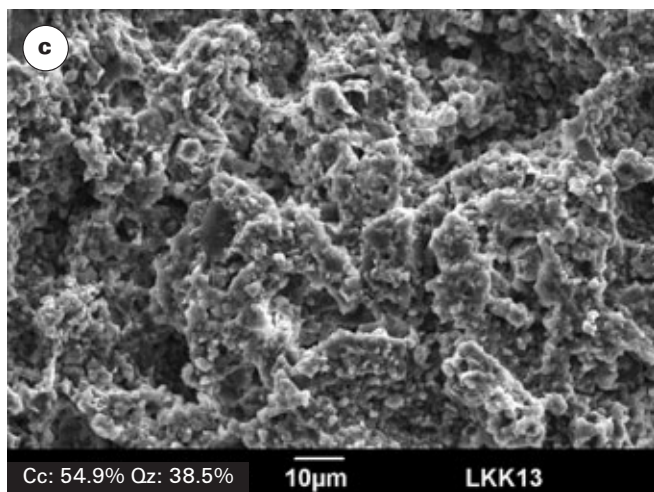
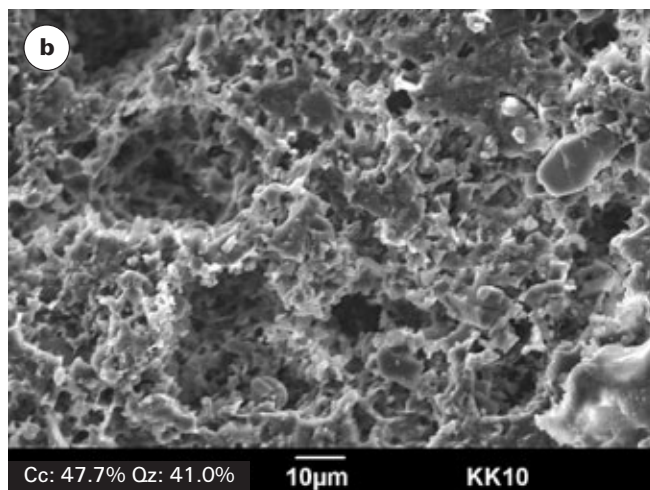
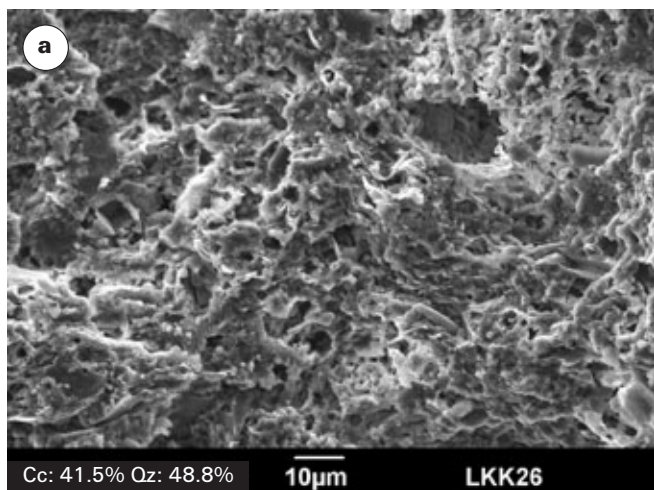


Abbildung 9.9: Behandlung der Proben mit 10%iger Salzsäure. 5 x kleinerer Massstab als Abbildung 9.7. Der Kalzitgehalt (Cc) und der authigene Quarzgehalt (Qz) wird in Gew.-% angegeben. Für die vollständige Gesteinszusammensetzung vgl. Tabelle 8.3 in Kapitel 8. Die Bildserie ist nach steigendem Kalzitgehalt geordnet. a) stets engmaschige Verkieselung mit wenig Hohlräumen. Verkieselung mit weniger schön ausgebildeten Mikroquarzkristallen; b) dichte Verkieselung sowie erkennbare Mikroquarzkristalle; c) dichte Verkieselung mit weniger gut erkennbaren Mikroquarzkristallen; d) dichte Verkieselung mit Schichtsilikaten und

framboidalem Pyrit; e) detritischer Quarz in lockerer, aber durchgehender Verkieselung; f) Hohlformen von Schwammnadeln in Verkieselung bestehend aus Mikroquarz; g) detritischer, angelöster Quarz eingebunden in verkieseltem Gerüst; h) etwas feiner körniger Mikroquarz in Verkieselungsstruktur; i) partiell homogene Verteilung des Mikroquarzes; j) detritischer Quarz eingebunden in lokale dichter Verkieselungsstruktur; k) detritischer Quarz in Verkieselungsstruktur bestehend aus Mikroquarz; l) partielle Verkieselung mit grossen Hohlformen.





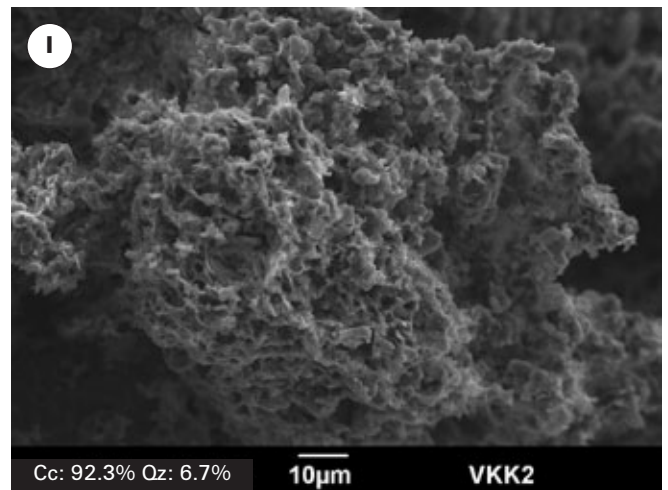
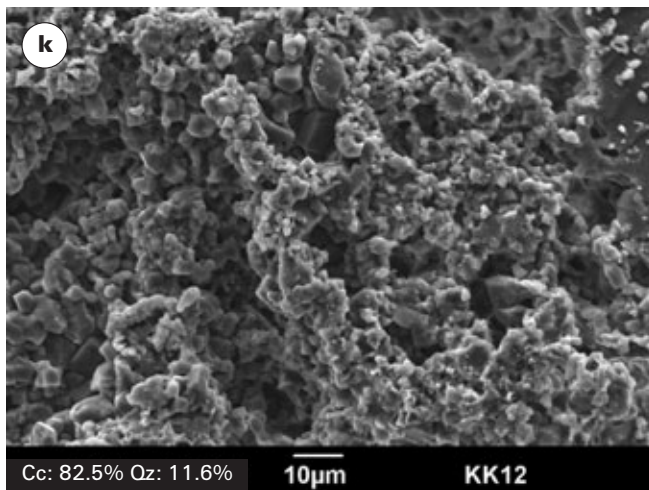
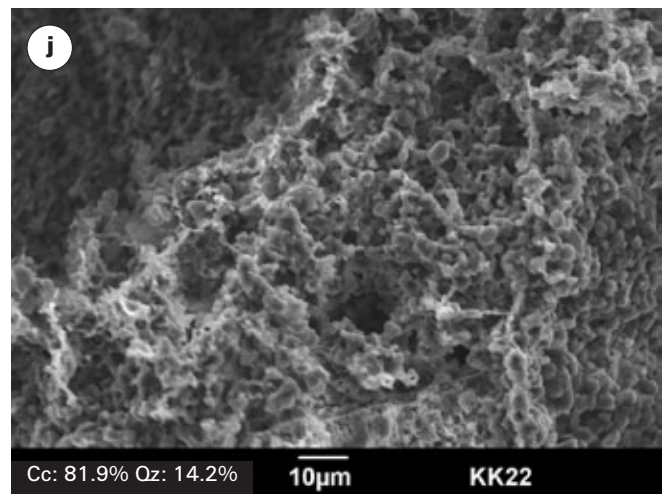
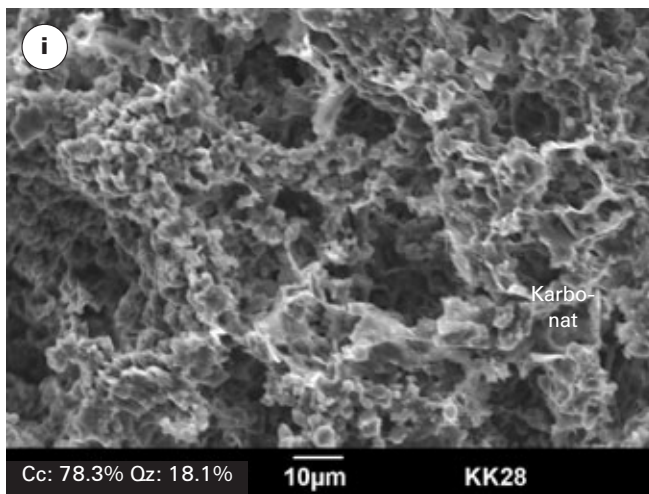
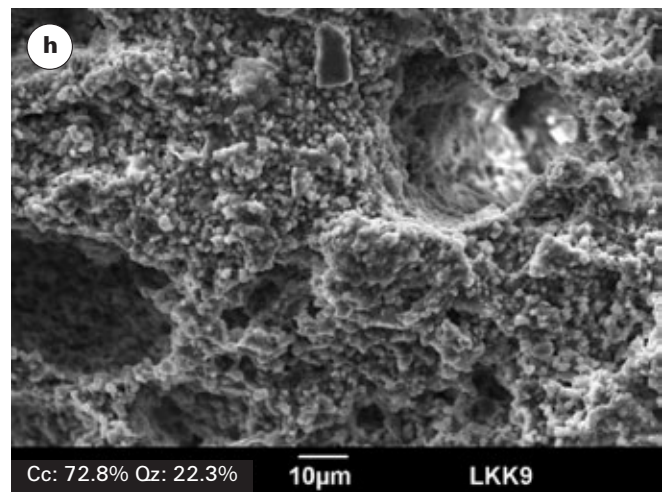
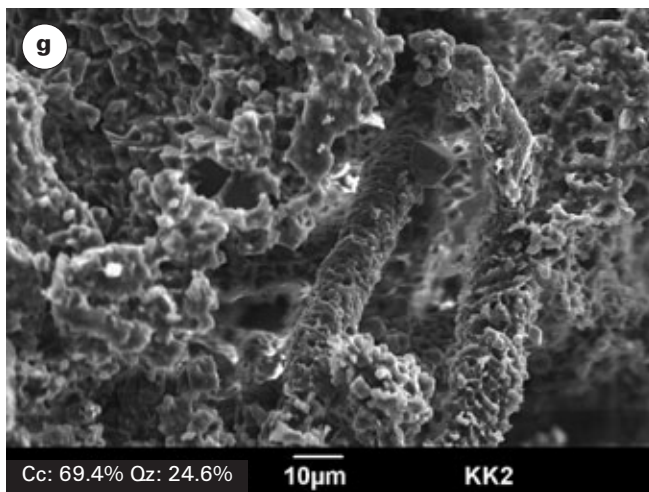
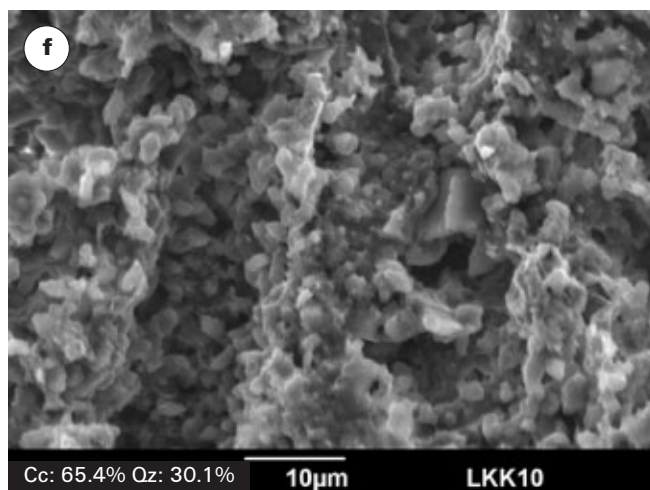
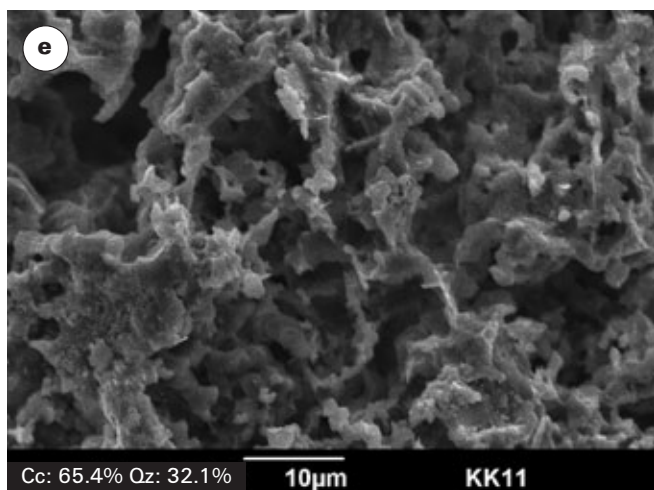
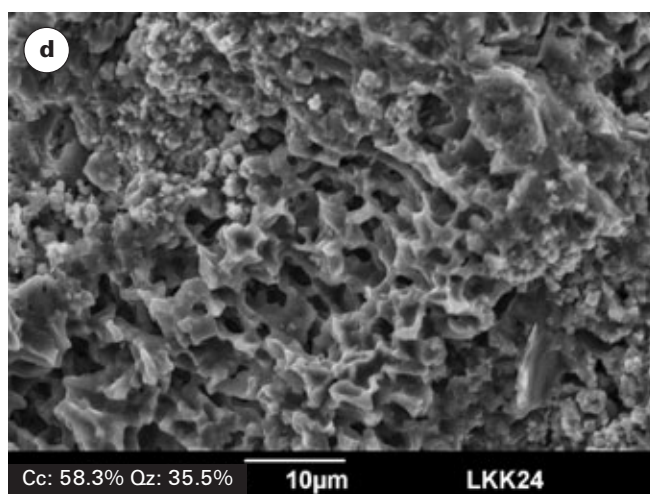
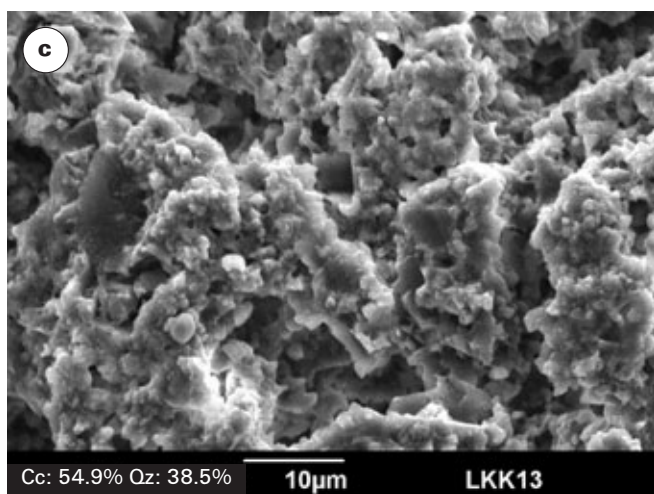
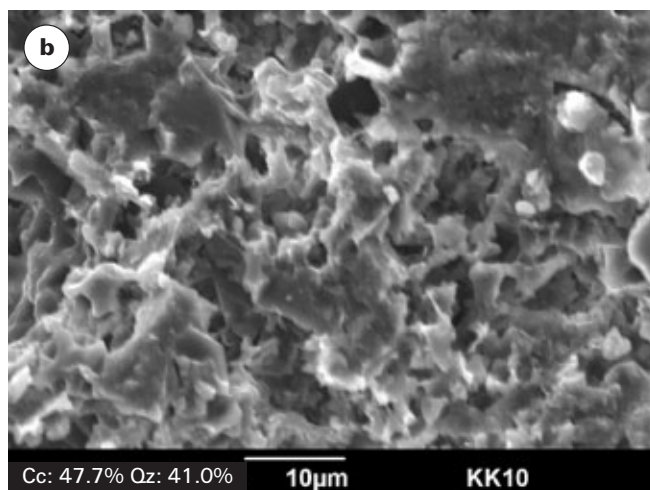
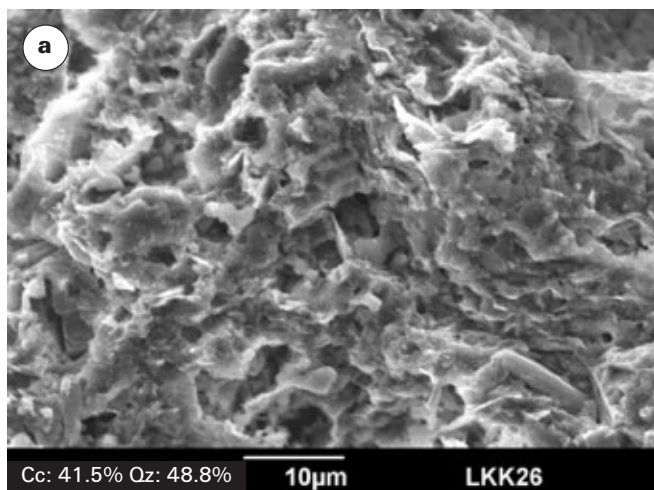


Abbildung 9.10: Behandlung der Proben mit 10%iger Salzsäure. 10x kleinerer Massstab als Abbildung 9.7. Der Kalzitgehalt (Cc) und der authigene Quarzgehalt (Qz) wird in Gew.-% angegeben. Für die vollständige Gesteinszusammensetzung vgl. Tabelle 8.3 in Kapitel 8. Die Bildserie ist nach steigendem Kalzitgehalt geordnet. a) Verkieselungsstruktur mit wenig gut sichtbarem, idiomorphem Mikroquarz; b) Meist idiomorpher Mikroquarz unterschiedlicher Grösse; c) Mikroquarz in feinkörniger Ausbildung; d) teilweise wabenartige Ausbildung der Verkieselungsstruktur; e) lockere Verkieselungsstruktur mit Karbonat; f) mikrokristalliner Quarz in Verkieselungsstruktur; g) verkieselte Schwammnadel in locker aufgebautem Gerüst aus authigenem Quarz; h) feine Ausbildung des Mikroquarzes in der Verkieselungsstruktur; i) Mikroquarz in durchschnittlich grosser Ausbildung, Karbonatrhomboeder; j) Mikroquarz in Durchschnittsgrösse; k) meist idiomorpher Mikroquarz in Verkieselungsgerüst; l) Mikroquarz in gleicher Ausbildung wie in stark verkieselten Kieselkalken.

lungsstruktur; e) lockere Verkieselungsstruktur mit Karbonat; f) mikrokristalliner Quarz in Verkieselungsstruktur; g) verkieselte Schwammnadel in locker aufgebautem Gerüst aus authigenem Quarz; h) feine Ausbildung des Mikroquarzes in der Verkieselungsstruktur; i) Mikroquarz in durchschnittlich grosser Ausbildung, Karbonatrhomboeder; j) Mikroquarz in Durchschnittsgrösse; k) meist idiomorpher Mikroquarz in Verkieselungsgerüst; l) Mikroquarz in gleicher Ausbildung wie in stark verkieselten Kieselkalken.





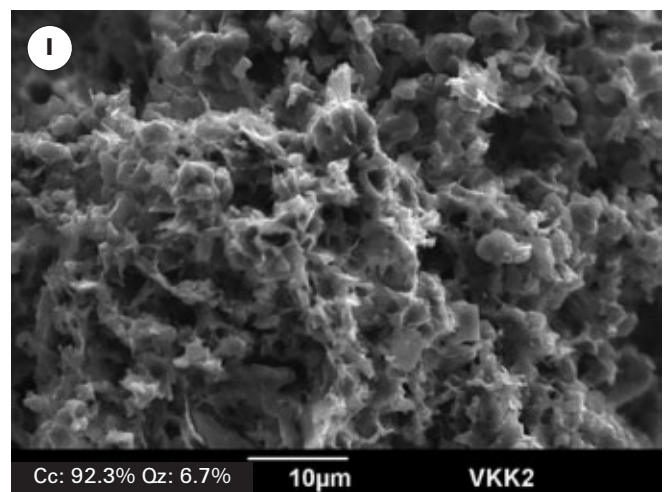
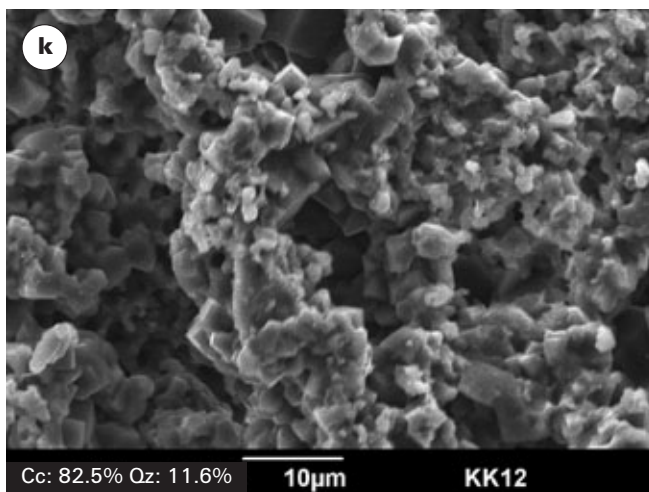
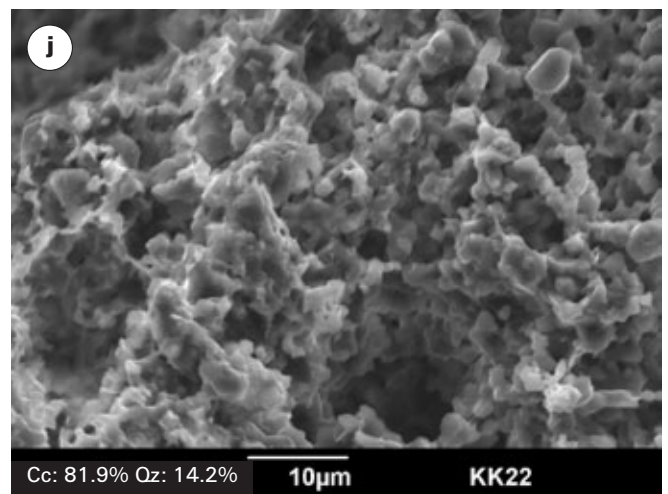
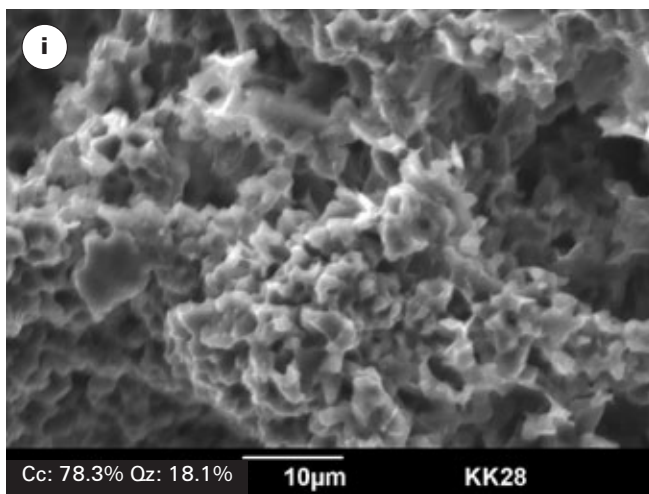
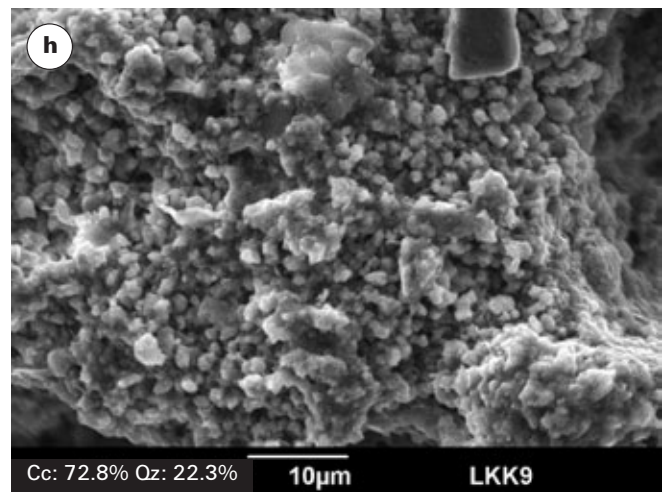
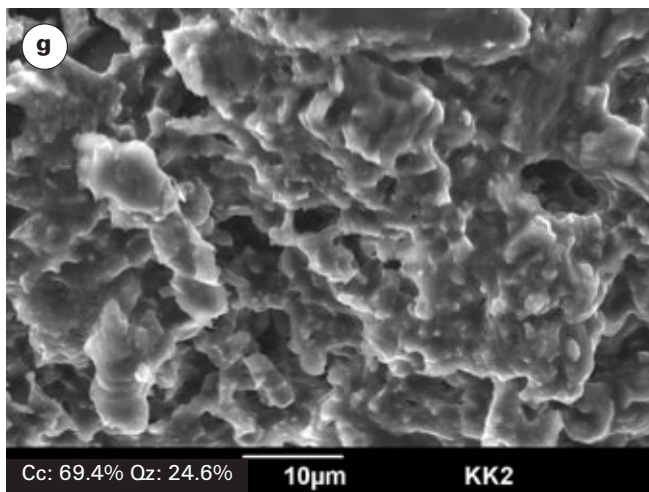


Abbildung 9.11: Behandlung der Proben mit 10%iger Salzsäure. 20x kleinerer Massstab als Abbildung 9.7. Der Kalzitgehalt (Cc) und der authigene Quarzgehalt (Qz) wird in Gew.-% angegeben. Für die vollständige Gesteinszusammensetzung vgl. Tabelle 8.3 in Kapitel 8. Die Bildserie ist nach steigendem Kalzitgehalt geordnet. a) Verkieselungsstruktur vorwiegend aus Quarzmasse bestehend mit wenig idiomorphen Körnern; b) idiomorphe Mikroquarzkörner und Quarzmassen, welche das Kieselgerüst aufbauen; c) meist idiomorphe Mikroquarzkristalle; d) waben-

artige, dichte und mikrokristalline Verkieselungsstruktur; e) idiomorphe und plattige Ausbildung des Mikroquarzes; f) idiomorphe und teilweise unterschiedlich grosse Mikroquarzkristalle; g) Quarzmasse, welche einzelne Mikroquarzkristalle zusammenhält; h) Mikroquarzkristalle vorwiegend im Mikrometerbereich; i) idiomorphe Mikroquarzkristalle in Verkieselungsstruktur; j) überdurchschnittlich grosse Ausbildung der Mikroquarzkristalle; k) grössere, idiomorphe Mikroquarzkristalle neben kleineren Kristallen; l) Mikroquarzkristalle zusammen mit Schichtsilikaten.



## 10. Einachsige Druckfestigkeit von Kieselkalken

### 10.1 Hintergrund und Problemstellung

Die einachsige Druckfestigkeitsprüfung stellt eine einfache und fundamentale Untersuchungsmethode dar, welche das Verhalten genormter Gesteinsstücke gegenüber mechanischer Einwirkung quantifiziert und im Hinblick auf die Interpretation des Verhaltens im Gesteinsverband aufschlussreich ist.

Wegen ihrer Relevanz wird die einachsige Druckfestigkeit in der Definition der Hartsteine nach DE QUERVAIN (1969) festgehalten. Im Weiteren ist das Prüfverfahren seit 2008 in einer Ergänzung des Sachplans Verkehr verankert (ARE 2008 b).

Die Wichtigkeit dieses Prüfverfahrens kann am Beispiel der Schotterbeanspruchung in Gleisanlagen dargestellt werden, wo das Gestein durch den Einbau, Fahrbetrieb und Unterhalt Belastungen bis zur Bruchfestigkeitsgrenze ausgesetzt ist. Je nach Gestein, Orientierung der Schotter und Grösse der Druckübertragungsfläche setzt die Zerkleinerung früher oder später ein. Die Druckbeanspruchung wird dabei am besten durch die einachsige Druckfestigkeitsprüfung angenähert.

Im Folgenden wird der einachsige Druckfestigkeitsversuch an Proben verschiedener Varietäten des Kieselkalks durchgeführt. Dabei wird nicht nur die Proportionalitätsgrenze (Grenze elastisch/unelastisches Verhalten) und die Bruchfestigkeit ermittelt, sondern auch die Verkürzung parallel und die Ausdehnung senkrecht zur Belastungsachse bestimmt und im Elastizitätsmodul sowie der Poisson-Zahl ausgedrückt.

### 10.2 Probenauswahl und -vorbereitung

Für den Druckfestigkeitsversuch wurden intakte, homogene Probenzylinder von Kieselkalk entnommen. Bei den Gesteinsproben handelt es sich um vier Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation (KK10, KK11, KK18, KK28), eine Kieselkalkprobe aus dem Helvetischen Valanginien (VKK1), drei Kieselkalken aus der Moltrasio-Formation sowie eine Kieselkalkprobe aus den Préalpes médianes (LKK26). Die Zylinder wurden bei 25,4 mm Durchmesser (1-Zoll-Kernbohrer) auf mindestens 51 mm (2 Zoll) Länge dimensioniert.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Die Länge der Probenkörper wird auf mindestens das 2-fache des Durchmessers dimensioniert, da ansonsten die ermittelten Druckfestigkeiten um einen nach OBERT et al. (1946) bestimmten Faktor korrigiert werden müssten. Bei zu geringer Dimension des Probenkörpers führen die Druckschatten zu Interferenzen und einem Scherbruchverhalten.

Meist werden die Kieselkalke von Kalzitklüften, Bruchflächen, Chloritlagen oder Verfaltungen durchzogen, die den Versuchsablauf und die Aussagekraft beeinflussen können. Neben der unterschiedlichen mineralogischen Zusammensetzung (vgl. Kapitel 8) wurden deshalb mit einer Ausnahme (LKK26) sowohl makroskopische, als auch Befunde aus der Untersuchung im Dünnschliff berücksichtigt, um Heterogenitäten auszuschliessen.

Da das Gefüge der Gesteine die mechanischen Eigenschaften beeinflusst, wurde die Probenauswahl vorwiegend auf die als Wackestones beschriebenen Kieselkalke konzentriert (vgl. Kapitel 7).

Die Kernbohrungen wurden senkrecht zur Schichtung angesetzt. Vereinzelt wurden auch Probenkörper parallel zur Schichtung entnommen. Die Kernbohrproben wurden auf einer Drehbank zu Zylindern mit planparallelen Grund- und Deckflächen geschliffen. Pro ausgewählte Kieselkalkprobe wurden mindestens zwei, höchstens aber drei in gleicher Art und Weise entnommene Probenzylinder hergestellt.

### 10.3 Versuchsdurchführung / Messanordnung

Die zylindrischen Probenkörper werden zwischen zwei Stahlplatten positioniert (Abbildung 10.1). Mit einer Druckmessdose, die über dem Probenkörper und der oberen Stahlplatte eingesetzt wird, kann die in der hydraulischen Presse erzeugte Kraft bzw. der angewandte Druck erfasst werden. Zwischen der unteren und oberen Stahlplatte wird ein Differentialtransformator (LVDT) installiert, um die Verkürzung der Probenzylinder unter Belastung zu messen. Zudem werden parallel und senkrecht zur Längsachse der Probenkörper Dehnungsmessstreifen angebracht, um die relative Verformung zu erfassen. Entgegen den für die Bestimmung der Längs- und Querdehnung früher verwendeten Drahtwindungen um die Probenkörper (vgl. ATTINGER & KÖPPEL 1983) können heute standardmässig Dehnungsmessstreifen eingesetzt werden, die bei Veränderung der Probenform den elektrischen Widerstand ändern. Die Proben wurden bis zum Bruch ohne Entlastungsphasen stetig belastet. In Abbildung 10.2 ist das Aufbauschema der Messvorrichtung dargestellt.

### 10.4 Messkalibrierungen und -korrekturen

Alle Messinstrumente (Druckmessdose, Differenzialtransformator, Dehnungsmessstreifen) erfassen die Pro-

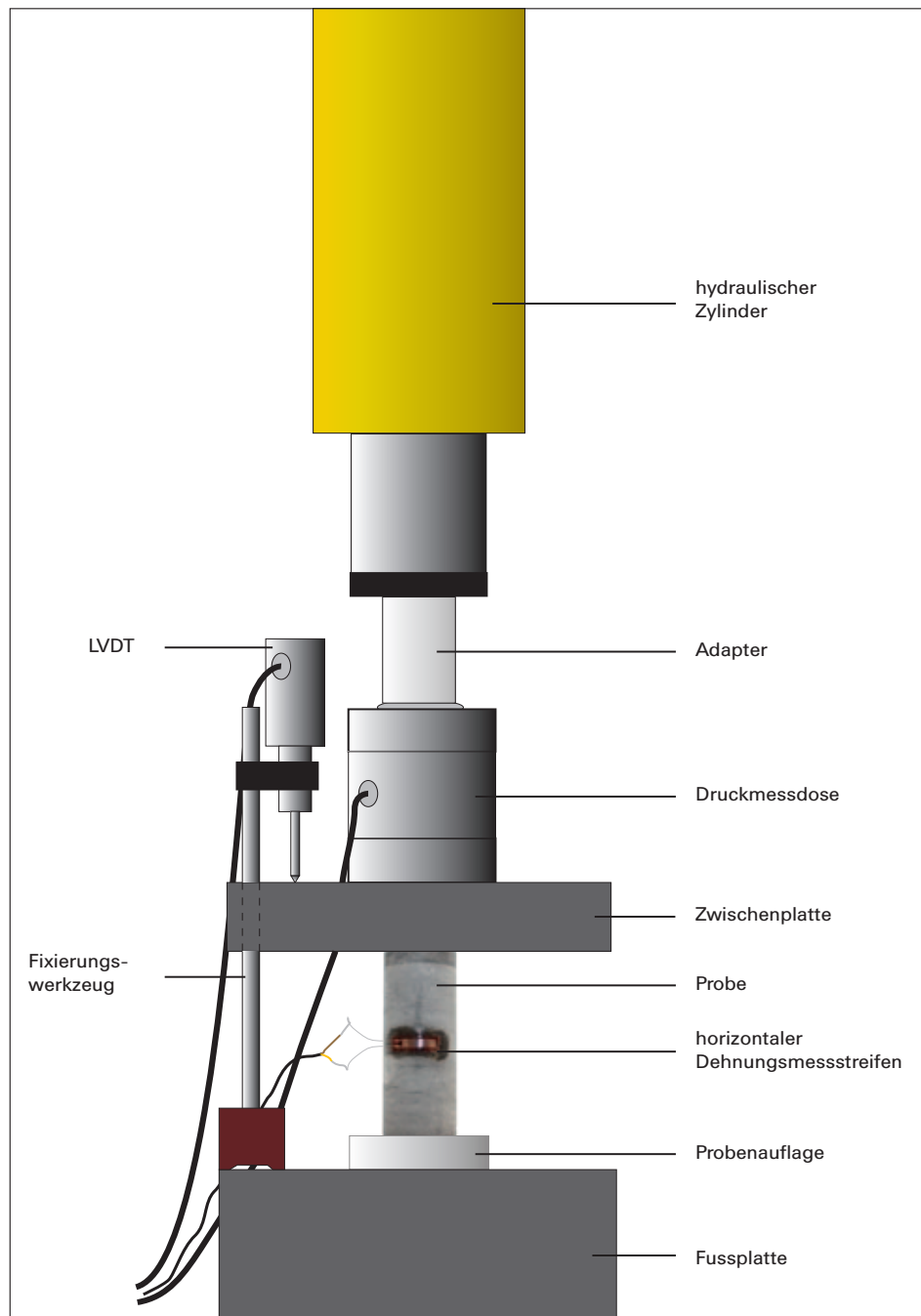


Abbildung 10.1: Aufbauschema des einachsigen Druckfestigkeitsversuchs. Hydraulischer Zylinder: Enerpac, maximale Lastentwicklung 50 t, Zylindertyp RR5013.

benverformung durch Aufzeichnung der geänderten elektrischen Spannung. Um die Resultate in die tatsächliche Verformung und mechanische Spannung umrechnen zu können, wurden Kalibrierungen durchgeführt.

- Für die Kalibrierung der Druckmessdose wurde in der Messanordnung an Stelle des Probenkörpers ein Ring mit einem Membranmanometer eingesetzt. Durch Belastung und Entlastung des Rings kann mit der gleichzeitigen Erfassung der elektrischen Spannung über eine Vorkalibrierung (Zusammenhang zwischen Membranmanometer und Last) die Verbindung zwischen elektrischer Spannung und Gewicht hergestellt werden.

- Der Differentialtransformator (**Linear Variable Differential Transformer**) wurde ebenfalls mit einem Membranmanometer kalibriert.
- Durch die hohen Belastungen während des Versuchs, ist es notwendig, die Verformung der Messapparatur zu berücksichtigen. Dafür wurde als Probenkörper ein Wolframkarbidzylinder mit gleichem Durchmesser (25,4 mm) wie bei den Kieselkalkproben verwendet. Durch die Steifheit des Wolframkarbids kann davon ausgegangen werden, dass die gemessene Verformung ausschliesslich auf die Materialien der Messapparatur zurückzuführen ist. Bis 45 kN Belastung kann die Apparaturverformung

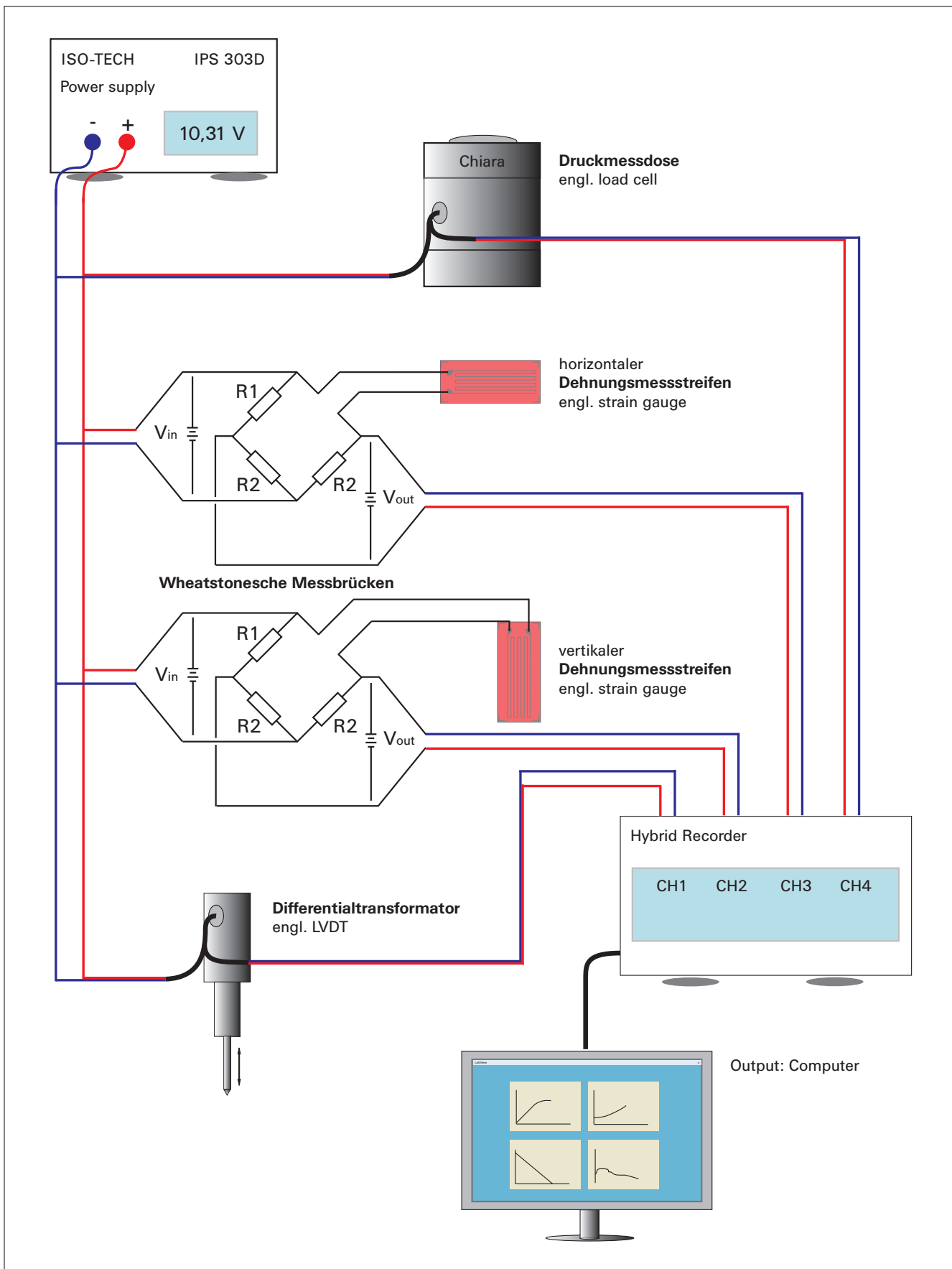


Abbildung 10.2: Aufbauschema der Verformungsmesser für die einaxiale Druckfestigkeitsprüfung. Mit der Druckmessdose wird die von der hydraulischen Presse ausgeübte Auflast erfasst. Mit dem Differentialtransformator wird die Verkürzung der Proben gemessen. Mit den Dehnungsmessstreifen wird die Poisson-Zahl bestimmt. Für die Wheatstonesche Messbrücken wurden folgende Widerstände verwendet:  $R_1 = R_{\text{Dehnungsmessstreifen}} = 120 \text{ Ohm}$   $R_2 = 330 \text{ Ohm}$ .



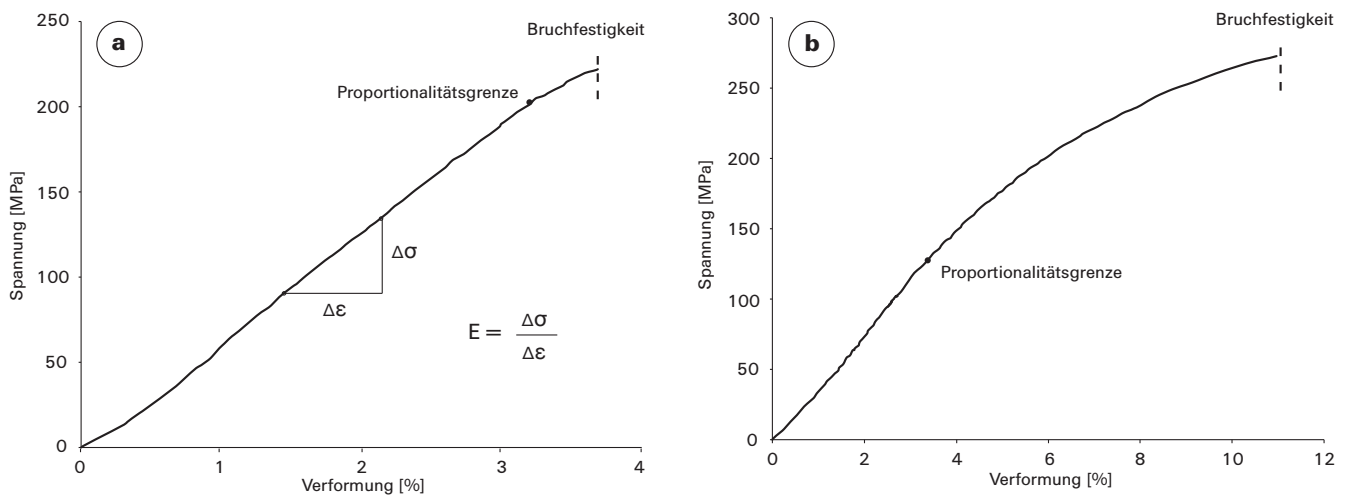


Abbildung 10.3: a) Spannungs-Verformungsdiagramm des Probenkörpers VKK1\_2. Die Steigung im linearen Abhängigkeitsbereich zwischen der Verformung und der Spannung entspricht dem Elastizitätsmodul. Die Proportionalitätsgrenze liegt bei 203 MPa. Die Bruchfestigkeit wird bei 220 MPa erreicht. b) Spannungs-Verformungsdiagramm eines parallel zur Schichtung gebohrten Zylinders der Probe LKK13. Die Proportionalitätsgrenze wird bereits bei rund 125 MPa erreicht.

mit einer Polynomfunktion 3. Grades korrigiert werden. Ab 45 kN ist der Korrekturfaktor linear von der Belastung abhängig.

## 10.5 Erfasste Messgrößen

- **Proportionalitätsgrenze** (engl.: yield point) und **Bruchfestigkeit**: Der Punkt im Verformungs-Spannungs-Diagramm, wo das elastische Verhalten eines Materials in ein plastisches bzw. die lineare Beziehung zwischen Verformung und Spannung in eine nicht lineare Abhängigkeit übergeht, wird als Proportionalitätsgrenze bezeichnet. Wird diese Grenze überschritten, verformt sich das Gestein permanent. Jede weitere Belastung bewirkt eine irreversible Deformation, die in einem Bruchversagen (=Bruchfestigkeit) enden kann. Bei den in dieser Studie angewandten Deformationsgeschwindigkeiten tritt das Bruchversagen bei jeder Probe auf.
- **Probenverformung**: Durch die Auflast verformen sich die Zylinderproben. Es kann zwischen der Probenverformung im elastischen Bereich (Verformung bis zur Proportionalitätsgrenze) und der gesamten Probenverformung bis zum Bruchversagen unterschieden werden. Die in dieser Studie ermittelten Probenverformungswerte stellen die Probenverkürzung parallel zur Belastungsachse bzw. Längsachse der Zylinderproben dar.
- **Elastizitätsmodul** (Young's Modul): Im Verformungs-Spannungs-Diagramm entspricht der konstante Gradient des elastischen Verhaltens dem Elastizitätsmodul (vgl. Hooke'sches Gesetz:  $\sigma = E \cdot \epsilon$ ). Mit dem Elastizitätsmodul kann die Steifheit von Materialien bestimmt werden.
- **Poissonzahl** ( $\nu$ ): Die dimensionslose Poissonzahl  $\nu$  wird verwendet, um das Verhältnis der Streckung gegenüber der Verkürzung eines elastischen Materials unter Belastung auszudrücken. Die Poissonzahl kann für die Gesteinszylinderproben mit den Dehnungsmessstreifen

über folgende Gesetzmässigkeit bestimmt werden (modifiziert nach HEWLETT PACKARD COMPANY 1987):

$$\nu = \frac{\epsilon_{\text{horizontal}}}{\epsilon_{\text{vertikal}}} = \frac{\frac{\Delta R_{s_{\text{horizontal}}}/R_s}{Gf}}{\frac{\Delta R_{s_{\text{vertikal}}}/R_s}{Gf}} = \frac{\Delta R_{s_{\text{horizontal}}}}{\Delta R_{s_{\text{vertikal}}}}$$

wobei  $Gf$  der Gaugefaktor ist und  $R_{s_{\text{horizontal}}}$  bzw.  $R_{s_{\text{vertikal}}}$  den horizontalen bzw. vertikalen Dehnungsmessstreifen mit Anfangswiderstand 120 Ohm (=R1) entsprechen. Dabei wird die Veränderung des elektrischen Widerstands der Dehnungsmessstreifen bei Verformung des Probenmaterials ausgenutzt. Eine Kompression der Dehnungsmessstreifen («vertikaler» Dehnungsmessstreifen parallel zur angelegten Spannung) verursacht einen grösseren Drahtdurchmesser und somit eine Abnahme des elektrischen Widerstands. Der Dehnungsmessstreifen senkrecht zur Belastungsachse erfährt durch die zunehmende Spannung eine Dehnung, womit der elektrische Widerstand zunimmt.

Verwendeter Dehnungsmessstreiftyp: FLA-10-11, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.

## 10.6 Resultate

### 10.6.1 Proportionalitätsgrenzen und Bruchfestigkeit

In Tabelle 10.1 sind die ermittelten Proportionalitätswerte für die einzelnen Probenkörper aufgelistet und nach der Kieselkalkvarietät geordnet. Im Folgenden werden der durchschnittliche Proportionalitätswert und die durchschnittliche Bruchfestigkeit der einzelnen Kieselkalkproben diskutiert:

Es kann festgehalten werden, dass die Proportionalitätsgrenzwerte aller untersuchten Kieselkalke zwischen 175–300 MPa liegen. Bei der Gesteinsprobe LKK26 wird die Proportionalitätsgrenze bereits bei 175 MPa erreicht. Mit

Tabelle 10.1: Resultate aus der einachsigen Druckfestigkeitsprüfung repräsentativer Kieselkalke. KK10 bis KK28 entsprechen Gesteinsproben aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation, VKK1 ist ein Kieselkalk aus dem helvetischen Valanginien, LKK9 bis LKK16 sind Kieselkalke aus der Moltrasio-Formation und LKK26 ist ein Kieselkalk aus den Préalpes médianes. Alle in dieser Tabelle aufgeführten Probenkörper wurden senkrecht zur Schichtung geböhrt.

Proben- bezeichnung	Probenlänge [mm]	Verformung (elast, Bereich) [mm]	Verformung (gesamt) [mm]	Probenverformung (elast, Bereich) [%]	Probenverformung (gesamt) [%]	Elastizitätsmodul [GPa]	Poissonzahl $\nu$	Proportionalitäts- grenze [MPa]	Bruchfestigkeit [MPa]
KK10_1	69,89	1,56	2,91	2,2	4,2	81,4–110,6	0,23–0,28	295	316
KK10_2	79,50	1,62	2,50	2,0	3,1			294	316
KK11_1	67,14	1,91	3,00	2,8	4,5	56,8–103,9	0,22–0,39	266	287
KK11_2	71,63	1,59	2,21	2,2	3,1			266	278
KK11_3	64,04	1,97	2,35	3,1	3,7			270	273
KK18_1	70,80	3,35	4,65	4,7	6,6	43,5–59,4	0,27–0,28	295	301
KK18_2	62,43	2,06	3,00	3,3	4,8			287	313
KK28_1	74,33	1,30	1,35	1,7	1,8	82,4–95,4	0,30	238	253
KK28_2	72,81	1,47	1,84	2,0	2,5			239	256
KK28_3	72,58	1,50	1,89	2,1	2,6			223	236
VKK1_1	71,22	1,40	1,53	2,0	2,1	46,2–103,9	0,24	202	218
VKK1_2	68,05	2,00	2,32	2,9	3,4			201	222
VKK1_3	66,05	2,07	2,44	3,1	3,7			182	183
LKK9_1	53,81	1,90	2,54	3,5	4,7	47,0–53,8	0,32	222	262
LKK9_3	62,62	2,02	2,55	3,2	4,1			190	198
LKK13_1	60,81	1,15	2,32	1,9	3,8	77,0–95,8	0,24–0,28	294	332
LKK13_2	74,50	2,32	3,00	3,1	4,0			303	342
LKK16_1	63,06	1,17	1,19	1,9	1,9	87,0–95,6	0,39	206	210
LKK16_2	71,22	–	–	–	–			174	174
LKK16_3	69,27	1,25	1,35	1,8	1,9			184	190
LKK26_1	63,35	1,51	3,20	2,4	5,1	44,9–59,9	0,27–0,28	161	170
LKK26_2	63,32	1,56	2,00	2,5	3,2			184	184

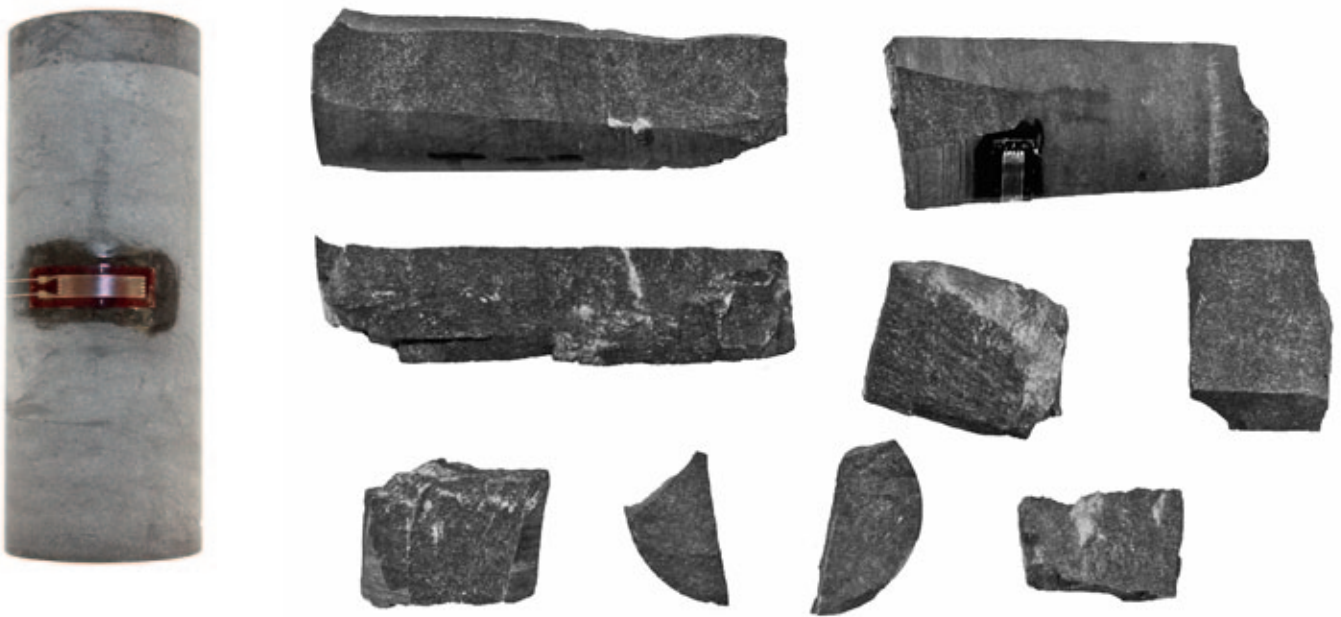


Abbildung 10.4: Spröde Verformung des Probenkörpers LKK26. Links: intakter Zustand vor dem einaxialen Druckfestigkeitsversuch mit Dehnungsmessstreifen. Probenkörperlänge: ca. 6,3 cm. Rechts: Einzelteile nach dem Druckfestigkeitsversuch. Bei tiefem Umgebungsdruck entwickeln sich die Bruchflächen parallel zur angewandten Hauptspannungsrichtung.

300 MPa erreicht die Probe LKK13 den höchsten Proportionalitätsgrenzwert. Fünf von zehn Kieselkalkproben weisen Proportionalitätsgrenzen  $>230$  MPa auf. Die vier Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation weisen Proportionalitätsgrenzwerte über 220 MPa auf. Die Kieselkalke der Moltrasio-Formation zeigen in den Proportionalitätsgrenzwerten eine grössere Bandbreite, die bereits bei 190 MPa beginnt und bei maximal 300 MPa endet. Die Kieselkalkproben des helvetischen Valanginien und der Préalpes médianes liegen bei 175–190 MPa (vgl. Beispiel VKK1\_2, Abbildung 10.3 a).

Die Bruchfestigkeit der Kieselkalke liegt bei 175–335 MPa. Fünf von zehn Gesteinsproben brechen erst bei Spannungen  $>245$  MPa. Beim Zersplittern der Probe entstehen vorwiegend längliche Bruchstücke (Abbildung 10.4). Die Bruchflächen, bilden sich dabei bevorzugt parallel zur Längsachse der Zylinderprobe bzw. parallel zur Belastungsachse aus. Zwischen der Proportionalitätsgrenze und der Bruchfestigkeit besteht eine lineare Korrelation (Abbildung 10.5 a).

#### 10.6.2 Probenverformung

Im elastischen Bereich verformen sich die Proben zwischen 1,7 und 4,7%. Im Bezug auf die totale Verformung bis zur Bruchfestigkeit können Werte von 1,9–6,6% festgestellt werden. Die Gesamtverformung kann dabei mehr als das Doppelte der Verformung bis zur Proportionalitätsgrenze betragen.

Die Proportionalitätsgrenze zeigt sich unabhängig von der Probenverformungsgeschwindigkeit (Abbildung 10.5 b).

#### 10.6.3 Elastizitätsmodul

Die in Tabelle 10.1 aufgeführten Elastizitätsmodule beziehen sich auf die Prüfkörper, deren Längsachse senkrecht

zur Schichtung stehen. Die Werte, die über die Steigung der linearen Abhängigkeit zwischen der Spannung und der Verformung ermittelt wurden, betragen 43,5–110,6 GPa. Das Elastizitätsmodul variiert für dieselbe Kieselkalkprobe teilweise stark.

### 10.7 Diskussion

Der Druckfestigkeitsversuch wird in einem gegenüber der EuroNorm (Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit; EN 126:2006, Anhang A) modifizierten Verfahren durchgeführt. Aus den gesammelten Kieselkalkproben konnten keine vollständig intakten Zylinderkörper in den Dimensionen von 50 oder 70 mm Durchmesser hergestellt werden, weshalb für alle Zylinder ein kleinerer, 1-Zoll (25,4 mm)-Bohrdurchmesser gewählt wurde. Zudem wäre für die vorgeschlagenen Dimensionen eine Auflast von bis zu 100 Tonnen nötig gewesen, was mit der zur Verfügung stehenden hydraulischen Presse nicht erreicht werden konnte. Die Feinkörnigkeit der Kieselkalke ( $<1$  mm) stellt bei der Wahl des 1-Zoll-Bohrdurchmessers kein Problem dar.

Im Weiteren wurde anstatt der konstanten Belastungszunahme von 1 MPa/s eine Belastungszunahme von durchschnittlich  $\varnothing 3,8$  MPa/s simuliert (Abbildung 10.5 b). Allenfalls wäre zu prüfen, ob sich die Proportionalitätsgrenze bei höheren Verformungsgeschwindigkeiten, wie sie in verschiedenen Anwendungsbereichen wie Strassen- und Bahnwesen vorkommen, ändert.

Die Interpretation der Verformungs-Spannungsdiagramme ist nicht bei allen Proben eindeutig: Es gibt Proben, bei denen die Proportionalitätsgrenzen erst nach Auswertung von Videoaufnahmen und der anderen Prüfkörper der glei-



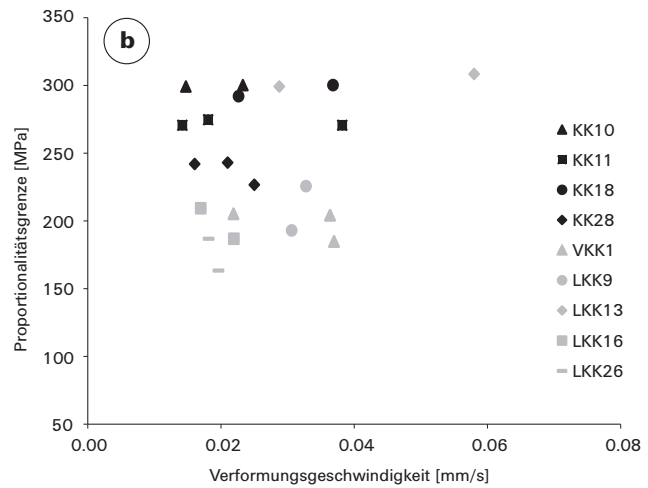
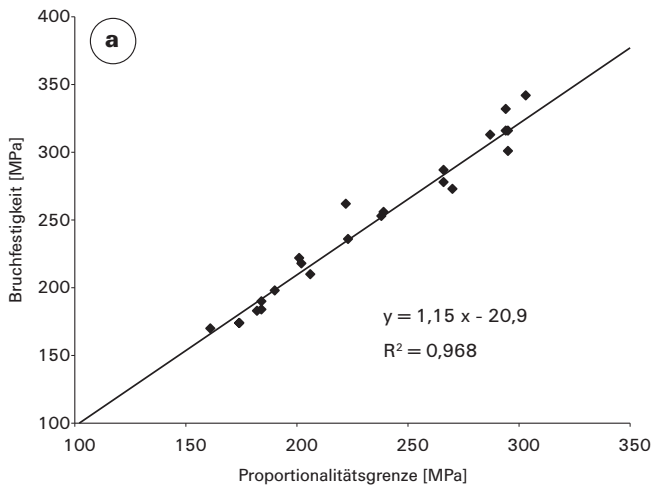


Abbildung 10.5: a) Lineare Korrelation zwischen der Proportionalitätsgrenze und der Bruchfestigkeit. b) Verformungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Proportionalitätsgrenze. Die unterschiedliche Verformungsgeschwindigkeit spielt hierbei keine Rolle.

chen Gesteinsprobe festgelegt werden konnten. Vor allem das durch die Kraftübertragung ausgelöste Absplittern von mm-kleinen Bruchstücken an der randlichen Ober- und Untergrenze der Zylinderproben verursacht Einwirkungen auf die Messungen, die sich auf den Kurvenverlauf des Spannungs-Verformungs-Diagramm auswirken und die Interpretation teils erschweren.

Die Streuung der Proportionalitätsgrenzen von verschiedenen Prüfkörpern aus der gleichen Gesteinsprobe ist mit maximal 30 MPa bei so hohen Spannungen klein. Bei den Bruchgrenzen gibt es mit einer Ausnahme (LKK9) maximale Abweichungen von 40 MPa zwischen dem tiefsten und dem höchsten Wert.

Bei zwei Gesteinen (KK10 und LKK13) wurde die Druckfestigkeitsprüfung mit Zylinderproben durchgeführt, deren Längsachse parallel zur Schichtung verlaufen (Daten in dieser Studie nicht dargestellt). Die Proportionalitätsgrenze konnte auf Grund des nicht elastischen Verhaltens bzw. der nichtlinearen Abhängigkeit zwischen Spannung und Probenverformung nicht bestimmt werden (Abbildung 10.3b). Der Kurvenverlauf kann als parabelförmig beschrieben, bevor das Gestein unter der Last zerbricht. Die Bruchfestigkeit liegt 35–70 MPa unter der Bruchfestigkeit der Probenkörper, die senkrecht zur Schichtung entnommen wurden. Die Spannungswerte parallel zur Schieferung liegen somit zwischen 80 und 90% und entsprechen damit ungefähr dem richtungsabhängigen Druckfestigkeitsverhalten von geschieferten Gesteinen (vgl. DE QUERVAIN 1967). Das anisotropische Druckverhalten der Gesteine kann auf den sedimentären Ursprung des Gesteins und das teilweise sichtbare, planare Gefüge zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 7). Besonders in der Kieselkalkprobe LKK13 ist eine Lamination durch Einregelung von Schwammnadeln zu beobachten. Die Bruchfestigkeit ist mit minimalen 265 MPa stets noch weit über dem Grenzwert von 180 MPa, der gemäss der Definition von DE QUERVAIN (1969) für Hartsteine mit einem Anteil an harten Mineralen von 25–75% eingehalten werden sollte.

Die ausgewählten Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation erzielten beim Druckfestigkeitsversuch hö-

here Werte, als die Kieselkalke aus dem helvetischen Valanginien und der Préalpes médianes. In einer Gegenüberstellung der Druckfestigkeit mit dem Mineralinhalt kann eine gute Korrelation aufgezeigt werden, die diesen Sachverhalt klärt (Abbildung 10.6): Bei der Darstellung der ermittelten einachsigen Druckfestigkeitswerte gegenüber dem Gesamtquarzgehalt (vgl. Kapitel 8) kann eine lineare Abhängigkeit festgestellt werden. Je höher der Gesamtquarzgehalt ist, desto höher ist die Druckfestigkeit der Kieselkalke. Einzige Probe LKK26 bildet eine Ausnahme. Der Grund dafür ist wahrscheinlich auf die Deformation des Gesteins zurückzuführen, welche bereits in der Untersuchung im Dünnschliff als schwache Runzelschieferung aufgefallen ist.

Die lineare Abhängigkeit zwischen der Proportionalitätsgrenze und dem Gesamtquarz kann mit folgender Formel ausgedrückt werden (exkl. LKK26):

$$y = 3,8 * x + 136, R^2 = 0,81$$

Unter Berücksichtigung nur von Wackestones gilt dabei (Abbildung 10.6a):

$$y = 3,4 * x + 159, R^2 = 0,96$$

Die lineare Abhängigkeit zwischen der Bruchfestigkeit und dem Gesamtquarz kann folgendermassen ausgedrückt werden (exkl. LKK26):

$$y = 4,4 * x + 137, R^2 = 0,81$$

Nur für Wackestones gilt dabei (Abbildung 10.6b):

$$y = 4,0 * x + 156, R^2 = 0,90$$

Somit kann für intakte Wackestones die Proportionalitätsgrenze und die Bruchfestigkeit in Abhängigkeit des Quarzgehalts angegeben werden. Bei bekanntem Quarzgehalt liegt der Fehler für die berechnete Proportionalitätsgrenze in einem Spannungsbereich von 30 MPa. Für die Bruchfestigkeit liegt der Fehler in einem Spannungsbereich von rund 40 MPa. Unter Einbezug von Kieselkalken, die als

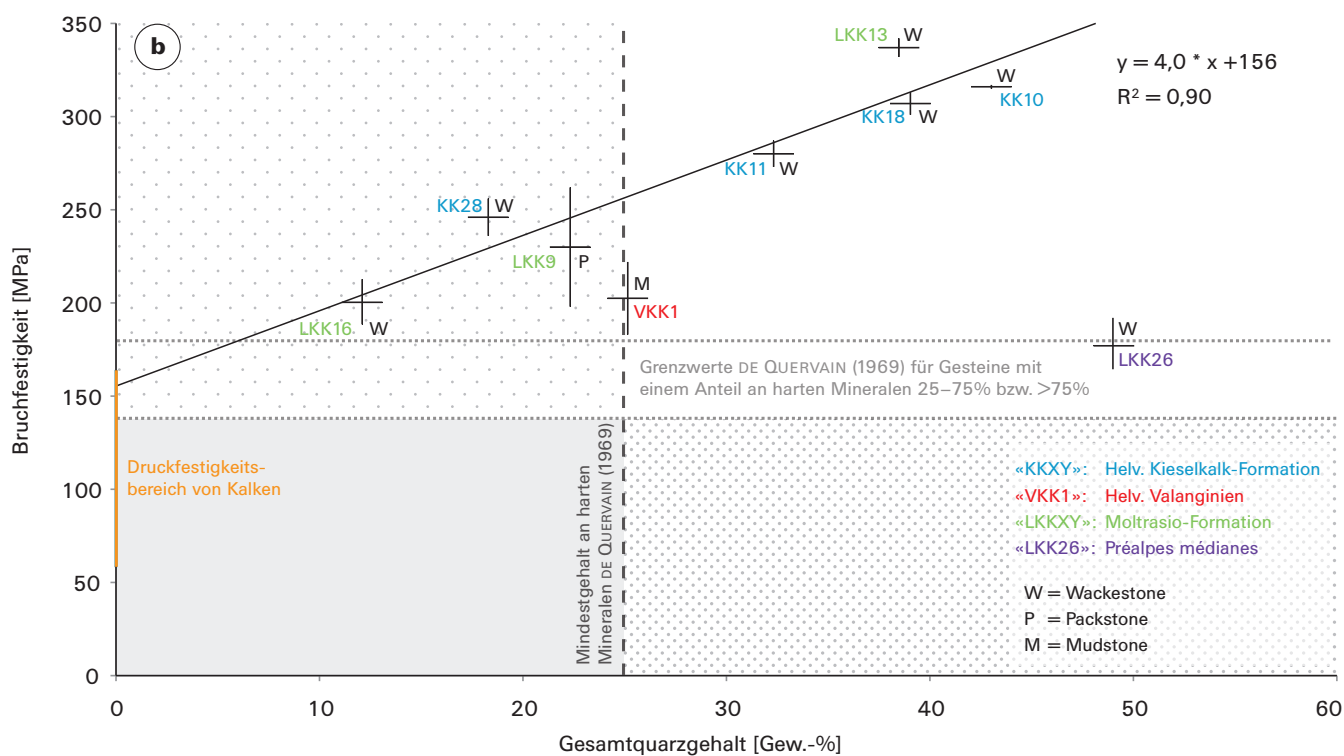
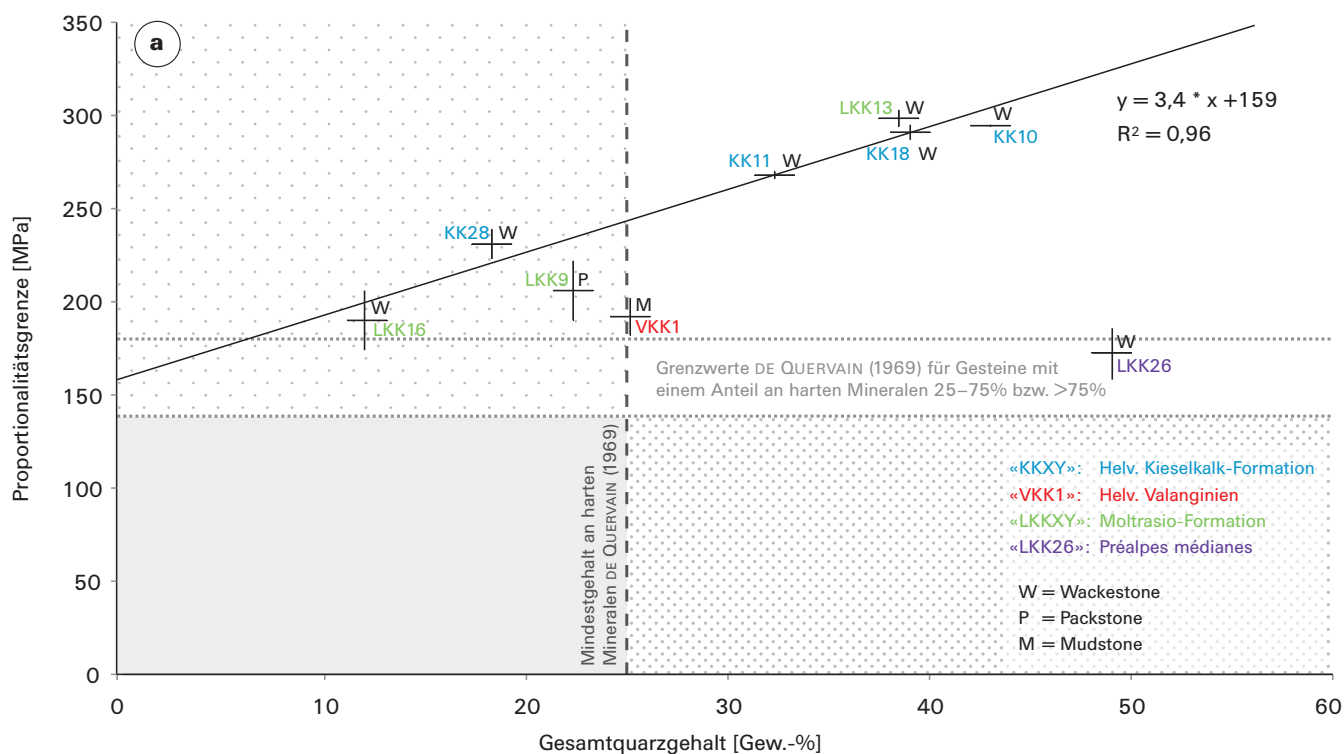


Abbildung 10.6: Gesamtquarzgehalt in Abhängigkeit a) der Proportionalitätsgrenze und b) der Bruchfestigkeit. Die vertikale Grenzlinie (gestrichelt) zeichnet den Gehalt an harten Mineralen von 25 Gew.-% nach (vgl. Hartsteindefinition DE QUERVAIN 1969). Bei den Kieselkalen tritt nur Quarz als hartes Mineral auf. Die gestrichelten horizontalen Linien entsprechen den Druckfestigkeitsgrenzwerten für Hartsteine in der Schweiz. Die orange Linie entspricht Bruchfestigkeitswerten, die für Kalke bestimmt wurden (BÖRNER & HILL 2009). Die lineare Abhängigkeit und das Bestimmtheitsmass sind in diesen Darstellungen für Wackestones (exkl. LKK26) angegeben.

Mudstones oder Packstones bezeichnet werden, wird die Vorhersage der zu erwartenden Proportionalitätswerte und Bruchfestigkeiten ungenauer.

DE QUERVAIN (1969) gibt für Hartsteine, die im Verkehrsinfrastrukturwesen genutzt werden Druckfestigkeitswerte von 175–265 MPa für Flyschsandsteine bzw. 240–335 MPa für Glaukonitsandsteine an. Die heute als Hartsteine genutzten subalpinen Molassesandsteine erlangen Druckfestigkeitswerte von 210–240 MPa (FAMSA 2010).

Im Vergleich dazu erreichen die untersuchten Kieselkalke mit der gesamten Spannweite von 190–340 MPa sehr gute einachsige Druckfestigkeitswerte. Auffallend sind vor allem Wackestone-Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation, die auf Grund ihres meist hohen Gesamtquarzgehaltes >25 Gew.-% sehr hohe Druckfestigkeitswerte >250 MPa erreichen.

Die Poissonzahl beträgt für inkompressible Materialien 0,5. Solche Materialien halten bei einer Spannungszunahme bzw. Entlastung ein konstantes Volumen. Die Poissonzahl eines vollständig kompressiblen Materials wie Kork ist nahe 0 (LAKES 1987). Im Allgemeinen haben Gesteine Werte zwischen 0,25 und 0,33 (BURG 2004). GERCEK (2007) hat zusammenfassend aus diversen Untersuchungen Poissonzahlen für verschiedene Gesteine, u.a. Sedimentgesteine wie Kalke, Dolomite und Sandsteine aufgezählt: Die Poissonzahlen betragen für Kalke 0,1–0,33, Dolomite 0,1–0,35, Sandsteine 0,05–0,4, Tonstein 0,25–0,4 und für Siltsteine werden Poissonzahlen von 0,15–0,35 angegeben. Im Vergleich dazu sind die ermittelten Poissonzahlen von 0,22–0,39 gegenüber denjenigen von Sedimenten durchschnittlich. Im Vergleich zu Kalksteinen und Dolomiten werden teils Wer-

te über der Obergrenze von 0,33 bzw. 0,35 erreicht. Dies kann unter Berücksichtigung des internen Aufbaus der Kieselkalke mit Quarz und Kalzit jedoch auch erwartet werden.

## 10.8 Folgerungen

Mit dem einachsigen Druckfestigkeitsversuch können die Belastungsgrenzen eines Gesteins ermittelt werden. Bei den untersuchten Kieselkalken handelt es sich zumindest nach der Messmethode der einachsigen Druckfestigkeit um Hartsteine. Gegenüber anderen, in der Schweiz für Verkehrsinfrastrukturwesen verwendete Hartsteine zeigen Kieselkalke mit 190–340 MPa sehr gute Druckfestigkeitswerte. Unter Berücksichtigung des Anteils an harten Mineralen müssen die Gesteine KK28, LKK9, LKK16 gemäss Definition nach DE QUERVAIN (1969) zu den mittelharten Gesteinen gezählt werden.

Der Strukturtyp beeinflusst die Druckfestigkeitswerte. Für Kieselkalke, die als Wackestone klassifiziert wurden und deren Gefüge nicht durch Inhomogenitäten gestört wird gilt: Je höher der Quarzanteil im Gestein ist umso höher sind die Proportionalitäts- und die Bruchgrenze. Mudstone- und Packstone-Kieselkalke zeigen tiefere Grenzwerte.

Mit dem Druckfestigkeitsversuch können Erkenntnisse gewonnen werden, die für die Interpretation weiterführender Prüfversuche (Bsp. Druckfestigkeitsversuch am Haufwerk, SN 670830a) fundamental sind. Für die Prognostizierung der Lebensdauer von Schotter im Gleisbett stellt das Prüfverfahren eine billige und präzise Bestimmungsmethode dar.



## 11. Abrasivität und Brechbarkeit

### 11.1 Hintergrund und Problemstellung

Im internationalen Rahmen gibt es verschiedene Untersuchungsmethoden, die zur Bewertung von Gesteinskörnungen eingesetzt werden. LORENZ & GWOSDZ (2003) geben einen Überblick über Prüfverfahren, die im europäischen Raum angewendet werden. In Tabelle 11.1 sind einige davon aufgeführt.

Ein Verfahren, welches in den letzten Jahren vermehrt für die Bewertung von Gesteinskörnungen eingesetzt wurde, ist der LCPC Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch (AFNOR P18-579, siehe Anhang A). Es handelt sich dabei um einen vom Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) entwickelten und von der französischen Gesellschaft für Normalisierung (AFNOR) anerkannten Test. Das schnelle und kostengünstige Prüfverfahren wird heute vorwiegend für die Bestimmung der Abrasivität von Fest- und Lockergesteinen genutzt (BÜCHI et al. 1995, THURO et al. 2006). Die Abrasivität «gilt als Faktor für den Werkzeugverschleiss bei allen gebirgslösenden Verfahren über und unter Tage» (THURO & KÄSLING 2009). Die Brechbarkeit, welche ebenfalls mit diesem Verfahren ermittelt wird, erlangte bisher nur im Bezug auf die Weiterverwertung von Ausbruchsmaterial aus Gebirgslösungsprozessen eine Bedeutung (vgl. LEEMANN et al. 1999). Schweizer Hartsteine wurden mit diesem Prüfverfahren selten auf ihr Brechbarkeitsverhalten untersucht.

In der vorliegenden Studie wird der Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch an Schweizer Hartsteinen sowie po-

tenziellen Schweizer Hartsteinen (SGTK 2006) angewandt. Der Schwerpunkt der Untersuchung wird dabei auf die Brechbarkeit gelegt.

### 11.2 Methode

Der Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch nach AFNOR P18-579 wird an  $500\text{ g} \pm 2\text{ g}$  der ausgesiebten Probenfraktion  $4/6,3\text{ mm}$  durchgeführt. Die Probe wird durch einen Einfülltrichter in einen Stahlbehälter mit  $93\text{ mm}$  Innendurchmesser und  $100\text{ mm}$  Höhe gefüllt, wo ein  $45\text{--}48\text{ g}$  schwerer Metallflügel der Grösse  $5 \times 25 \times 50\text{ mm}$  (genormte Stahlgüte und Härte; Rockwell B 60–75, glatte, geschnittene Endflächen) das Gesteinsmaterial ähnlich wie ein Stabmixer zerkleinert (Abbildung 11.1). Die Versuchsdauer beträgt  $5\text{ min}$  bei  $4500\text{ U/min}$ . Teilweise werden für den Versuch Metallflügel verwendet, von denen zwei Aussenkanten eine gerundete Aussenfläche aufweisen. B. Weiher (pers. Mitt. 2008) weist darauf hin, dass deshalb zwischen den beiden Metallflügeln beim Abrasivitätskoeffizienten eine Differenz von  $5\%$  beobachtet werden kann. Die Brechbarkeit wird durch die unterschiedliche Flügelart nicht verändert.

#### 11.2.1 LCPC-Abrasivitätskoeffizient (LAK)

Der Abrasivitätskoeffizient gibt an, welchen mechanischen Einfluss das Probenmaterial auf den Metallflügel hat. Je nach Zusammensetzung der Komponenten, Korngrös-

Tabelle 11.1: Prüfverfahren für die Bestimmung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen (nach LORENZ & GWOSDZ 2003).

Prüfverfahren	Norm/ Standard	Kurzbeschreibung	Anwendungsbereiche
Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung: Los-Angeles-Prüfverfahren	EN 1097-2	Kornzerkleinerung durch Abrieb, Schlag und Mahlen von definierten Korngrössen mittels Stahlkugeln in einer drehenden Trommel	Bahn- und Strassenwesen
Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung: Schlagversuch	EN 1097-2	Zertrümmerung einer Kornklasse ( $8\text{--}12,5\text{ mm}$ ) durch Einwirkung eines Fallhammers ( $50\text{ kg}$ ) aus bestimmter Höhe	Strassenwesen
Aggregate impact value (AIV)	BS 812 Teil 112 (British standard)	Zertrümmerung der Kornklasse $10/14\text{ mm}$ durch Schlageinwirkung einer $14\text{ kg}$ schweren Schlagmasse	Strassenwesen
Prüfung von Gesteinskörnungen – Schlagversuch	DIN 52 115-2	Kornklasse ( $35/45$ oder $8/12,5$ ) wird mit Schlagprüfgerät durch Einwirkung eines Fallhammers aus bestimmter Höhe zertrümmert	Bahn- und Strassenwesen
Bestimmung des Polierwerts von Splitt (polished stone value, PSV)	EN 1097-8	Polieren einer bestimmten Gesteinskörnung mittels Gummirad und Zuschlagstoffen. Bestimmung der Griffigkeit des Probenkörpers mit Pendelgerät	Strassenwesen

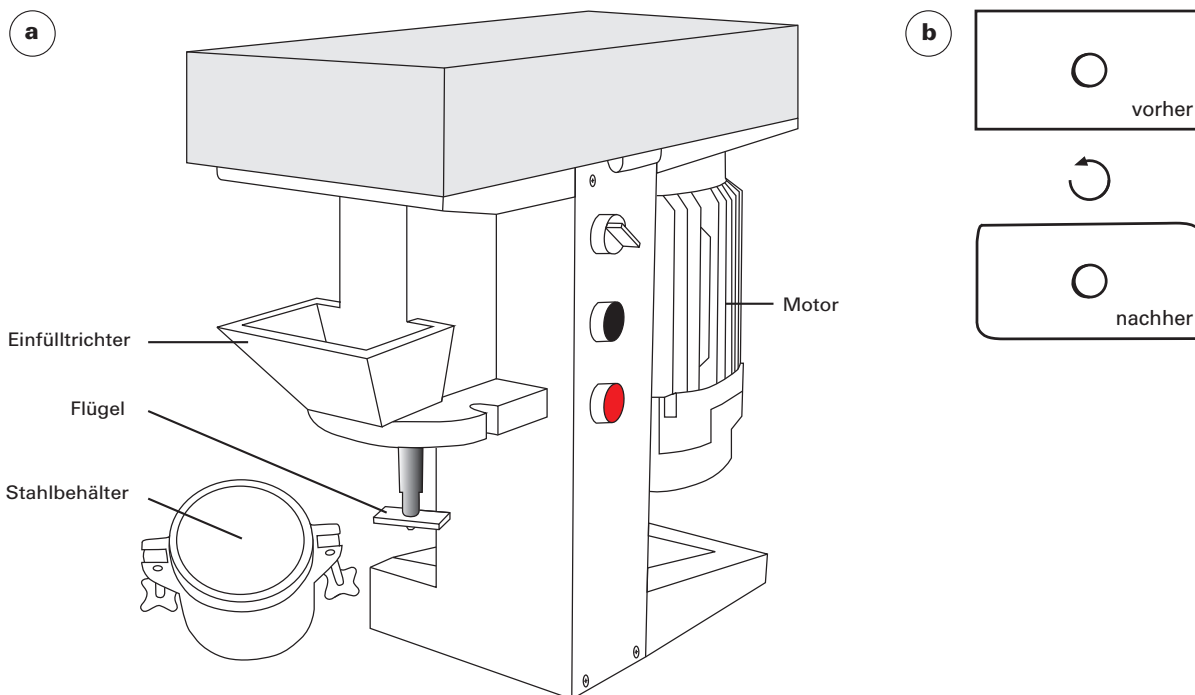


Abbildung 11.1: LCPC Abrasivitäts- und Brechbarkeitstest. a) Prüfapparatur: LxHxB 0,45 x 0,475 x 0,225 m; Gewicht: 60 kg. b) Metallflügel vor und nach dem Test. Durch die Rotation wird der Flügel vorwiegend an zwei Ecken abgenutzt.

senverteilung, Kornform und Kornrundung übt das Probenmaterial eine grössere oder kleinere abrasive Wirkung auf den Metallflügel aus (THURO et al. 2006).

Der Abrasivitätskoeffizient wird als Gewichtsverlust (in Gramm) des Metallflügels im Bezug auf das Probengewicht (in Tonnen) angegeben:

$$LAK = \frac{mF_0 - mF}{mP}$$

wobei

mF<sub>0</sub>: Masse Metallflügel vor Versuch [g]

mF: Masse Metallflügel nach Versuch [g]

mP: Masse Probe [t]

Die Abrasivität wird nach THURO et al. (2006) folgendermassen klassifiziert:

Tabelle 11.2: Klassifikation der Abrasivität.

LAK [g/t]	0–50	50–100	100–250	250–500	500–1250	1250–2000
Klassifikation	nicht abrasiv	kaum abrasiv	schwach abrasiv	abrasiv	stark abrasiv	extrem abrasiv

### 11.2.2 LCPC-Brechbarkeitskoeffizient (LBK)

Mit dem LCPC Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch kann ohne wesentlichen Mehraufwand zur Bestimmung der Abrasivität die «Mahlbarkeit» (übersetzt: broyabilité) bzw. Brechbarkeit der Gesteinsprobe bestimmt werden.

Der Brechbarkeitskoeffizient LBK wird als Gewichtsdivergenz der ursprünglichen Gesteinsfraktion (4/6,3 mm) zur

Fraktion ≥ 1,6 mm in Bezug auf das Probengewicht definiert:

$$LBK = \frac{mP - mP_{1,6}}{mP}$$

wobei

mP: Masse Probe [g]

mP<sub>1,6</sub>: Masse Siebrückstand ≥ 1,6 mm [g]

Um den Brechbarkeitskoeffizienten in % anzugeben, muss der LBK mit dem Faktor 100 multipliziert werden. Je tiefer der Brechbarkeitskoeffizient ist, umso schlechter lassen sich die Gesteine brechen. Für die Einteilung der Brechbarkeit wird folgendes Schema vorgeschlagen, welches u. a. auf Erfahrungswerten aus dem Tunnelbau (NEAT) basiert.

Tabelle 11.3: Vorgeschlagene Klassifikation der Brechbarkeit.

LBK [%]	0–15	16–31	32–50	51–69	70–100
Klassifikation	kaum brechbar	schwach brechbar	brechbar	stark brechbar	extrem brechbar

### 11.2.3 Genauigkeit des Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuchs

Die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des LCPC-Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuchs wurde im Rahmen dieser Arbeit überprüft. Dazu wurde von einem homogenen Kieselkalk aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation durch Zerkleinerung mit einem Backenbrecher rund 2,5 kg Splitt der Korngrösse 4–6,3 mm hergestellt. Diese wurden in fünf Proben von je 500 g eingeteilt und geprüft.

Tabelle 11.4: Überprüfung der Genauigkeit des Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuchs (AFNOR P18-579) mittels Kieselkalk aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation (Koord.: 625.640/170.330). Masse Probe:  $m_P$ ; Masse Flügel vor Versuch:  $mF_0$ ; Masse Flügel nach Versuch:  $mF$ ; Masse Probe  $>1,6$  mm nach Versuch:  $mP_{1,6}$ ; LAK: Abrasivitätskoeffizient; LBK: Brechbarkeitskoeffizient; Mittelwert; Standardabweichung.

Probe	$m_P$ [g]	$mF_0$ [g]	$mF$ [g]	$mP_{1,6}$ [g]	LAK [g/t]	LBK [%]	Mittelwert	Standardabweichung
KKR <sub>1</sub>	500,3	47,769	47,705	362,8	128	27,5	LAKØ = 125 LBKØ = 27,3	s = 2 s = 0,1
KKR <sub>2</sub>	500,2	47,796	47,735	363,2	122	27,4		
KKR <sub>3</sub>	500,3	47,816	47,753	364,1	126	27,2		
KKR <sub>4</sub>	500,0	47,762	47,700	363,7	124	27,3		
KKR <sub>5</sub>	500,2	47,768	47,706	363,3	124	27,4		

In Tabelle 11.4 sind die Resultate der Messungen aufgeführt. Die Auswertung hat ergeben, dass die Genauigkeit sowohl für den Abrasivitätskoeffizienten LAK, als auch für den Brechbarkeitskoeffizienten LBK gross ist. Bei einem Mittelwert von 125 g/t für den LAK beträgt die Standardabweichung 2 wobei die Bandbreite des LAK's verschiedener Gesteine von 0–1800 reicht (vgl. Kap. 11.4). Die Differenz zwischen dem Maximal- und Minimalwert beträgt dabei 6 g/t. Der LBK beträgt im Durchschnitt 27,3 % bei einer Standardabweichung von 0,1. Die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert liegt bei 0,3 %, womit die Angabe des Brechbarkeitskoeffizienten auf eine Stelle nach dem Punkt sinnvoll ist.

### 11.3 Probenauswahl und -aufbereitung

Für den Versuch wurden zwei Probenreihen verwendet:

- Die erste Serie bestand aus einer Auswahl der gesammelten Proben. Sie beinhaltete Gesteinsmaterial aus bestehenden Hartsteinbrüchen und aus potenziellen Hartsteinvorkommen der Schweiz (SGTK 2006). Die Probenreihe umfasste Kieselkalke, Sandsteine und einen Metarhyolith ( $n_{\text{total}} = 44$ ).
- Die zweite Serie stammte aus Beständen der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB). Sie beinhaltete Schotter, welcher im Labor der SBB mit dem Los-Angeles-Prüfverfahren (nach EN 13450 bzw. 1097-2) auf dessen Eignung als Schotter der Klasse I untersucht wurde. Die Probenreihe umfasste Kieselkalke, Sandsteine sowie magmatische Gesteine und deren metamorphe Äquivalente ( $n_{\text{total}} = 22$ ). Die magmatischen Gesteine und deren metamorphe Äquivalente werden in einer Gesteinsgruppe zusammengefasst. Die SBB-Proben wurden ab Werk oder ab Wagen entnommen. Es sind Mischungen, die einem «Durchschnittsschotter» entsprechen und teilweise aus mehreren Abbaubereichen eines Steinbruchs stammen können.

Die bis zu 20 x 20 x 20 cm grossen Proben aus der ersten Serie wurden mit einem Hammer auf Grobschotterkorngrösse zerkleinert und anschliessend wie auch die Proben der zweiten Serie in einem Backenbrecher einmal gebrochen.

Aus ca. 2,5 kg Gesteinsmaterial ergaben sich so je nach Gesteinsart rund 600–1000 g Splitt der Korngrösse 4/6,3 mm.

## 11.4 Resultate

### 11.4.1 Plattigkeit

Vor dem Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch wurde die Korngruppe 4/6,3 mm mit einem Spaltsieb 3,15 mm gesiebt. Somit konnte die Plattigkeit der gebrochenen Körner festgestellt werden (Tabelle 11.5, P). Die Plattigkeitszahl wird als prozentualer Anteil des Siebdurchgangs gegenüber dem Gesamtprobengewicht bestimmt. Die Untersuchung zeigt, dass Kieselkalke im Brechvorgang mit dem Backenbrecher plattiger gebrochen werden als die übrigen Gesteinsarten. Sie erreichen Werte von 33,5–50, wobei bei 38–43 % eine Häufung auftritt. Im Gegensatz dazu bewegen sich die Plattigkeitszahlen der meisten übrigen Gesteinsarten vorwiegend im Bereich von 35.

### 11.4.2 Abrasivität

Die Abrasivität der Kieselkalke variiert von 0–816 (Abbildung 11.2, Tabelle 11.5). Die Proben der ersten Serie reichen nach THURO et al. (2006) von nicht abrasiv bis stark abrasiv. Diejenigen der zweiten Serie von abrasiv bis stark abrasiv.

Die Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation zeigen im Mittel eine Abrasivität von  $LAK_0 = 383$  g/t (Minimum: 76, Maximum: 816). Die Kieselkalke aus dem helvetischen Valanginien zeigen eine sehr niedrige Abrasivität ( $LAK_0 = 39$  g/t; Minimum: 0, Maximum: 110; wobei  $n = 3$ ). Die durchschnittlichen Abrasivitätskoeffizienten der Kieselkalke der Moltrasio-Formation und der Préalpes médianes betragen 251 (Minimum: 104, Maximum: 450) bzw. 282 g/t (Minimum: 14, Maximum: 526).

Für die übrigen Gesteinsarten wurden mit Ausnahme einer Probe (FS) Abrasivitätskoeffizienten  $>960$  g/t ermittelt. Die Flyschsandsteine zeigen im Durchschnitt die grösste Abrasivität ( $LAK_0 = 1557$  g/t; Minimum: 1412, Maximum: 1732). Der  $LAK_0$  beträgt für Molassesandsteine



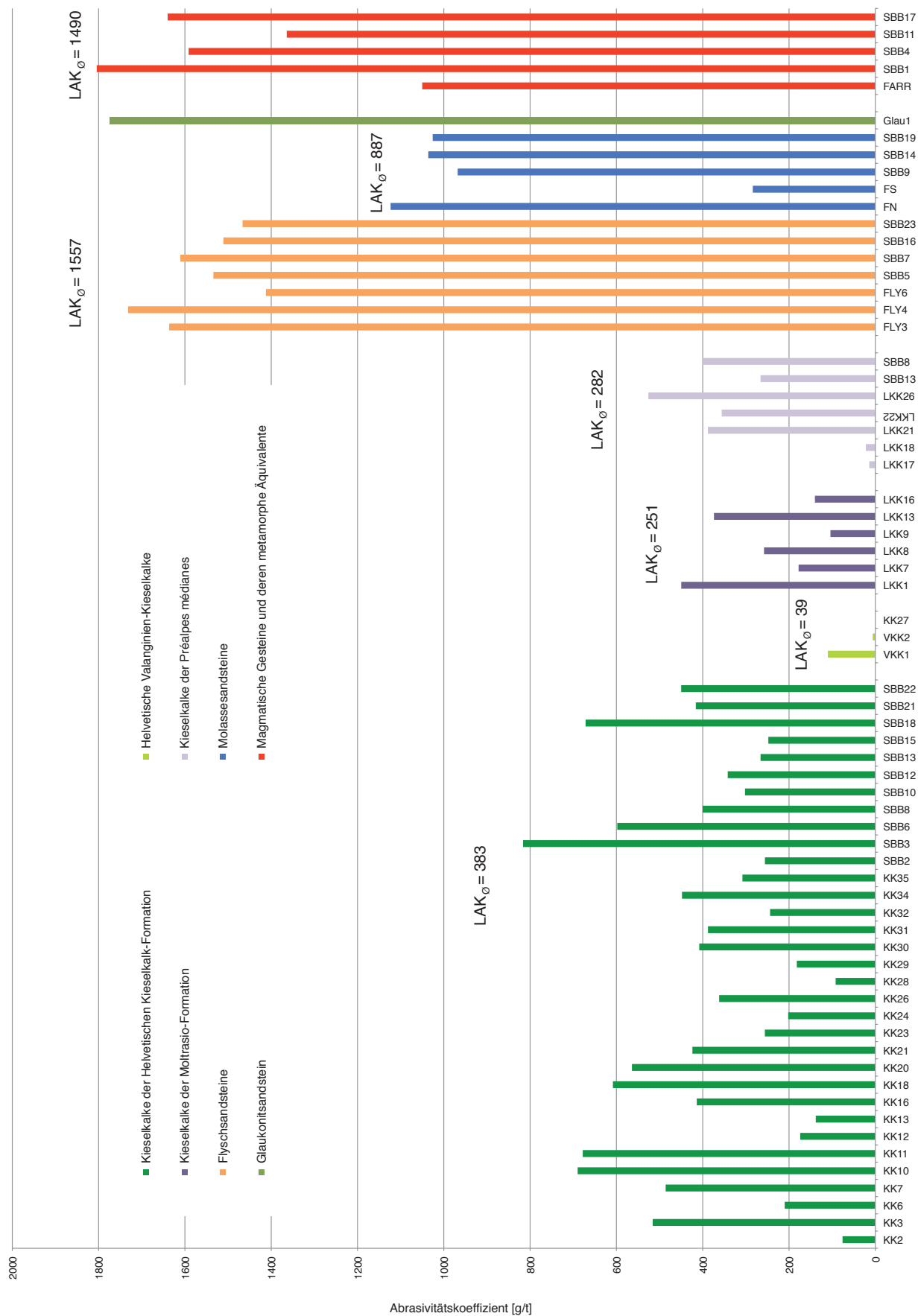


Abbildung 11.2: Abrasivitätskoeffizienten LAK für ausgewählte Proben aus der eigenen Sammlung und der SBB ( $n_{\text{total}} = 67$ ). Geordnet nach Kieselkalkvarietät bzw. Gesteinsart. Zudem ist der LAK<sub>0</sub> in g/t angegeben.

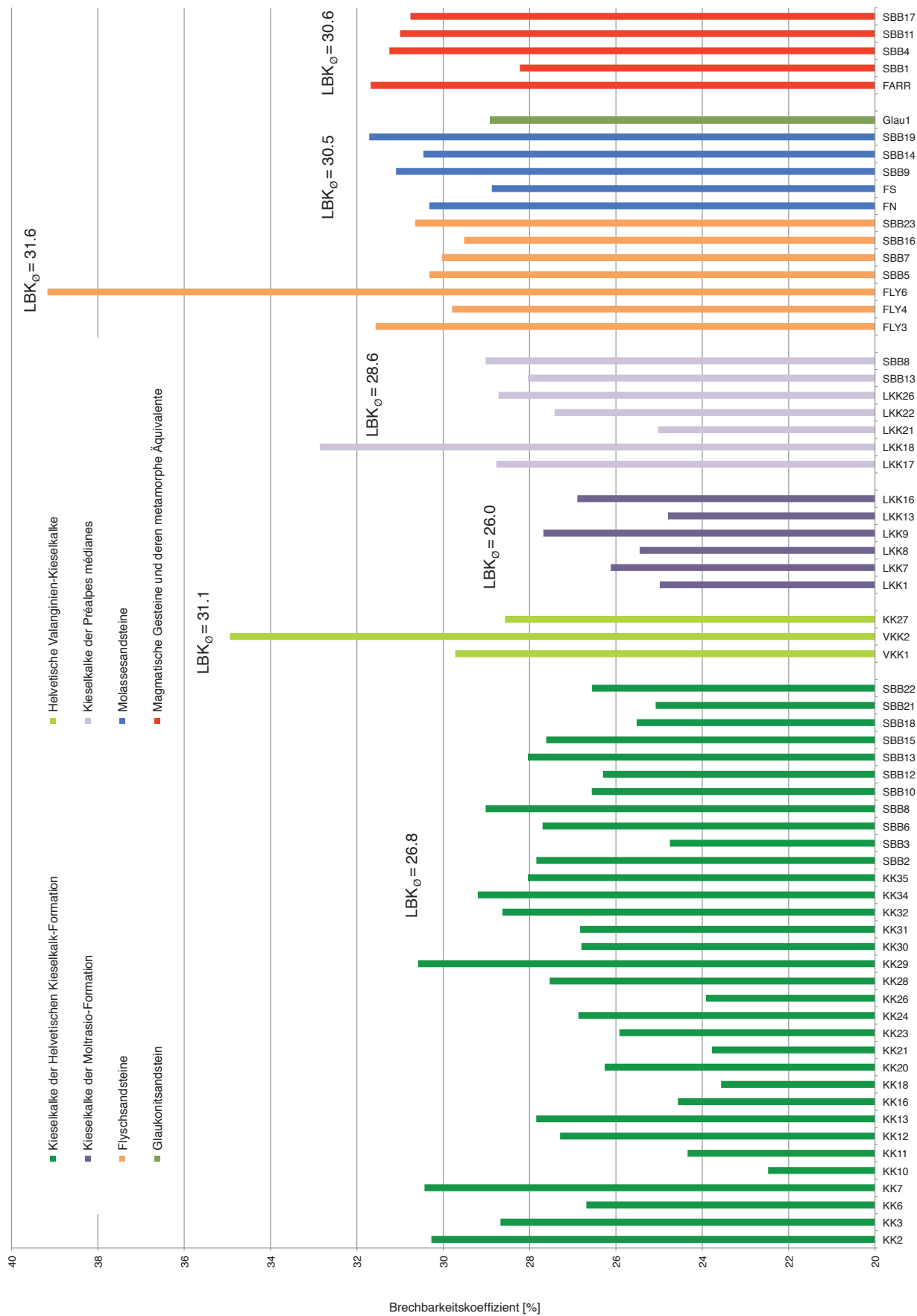


Abbildung 11.3: Brechbarkeitskoeffizienten LBK [%] für ausgewählte Proben aus der eigenen Sammlung und der SBB ( $n_{\text{total}} = 67$ ). Geordnet nach Kieselkalkvarietät bzw. Gesteinsart.

Tabelle 11.5: *Resultate des Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuchs. P: Plattigkeit (Massenanteil <3,15 mm im Spaltsieb); mP: Masse Probe; mF<sub>0</sub>: Masse Flügel vor Versuch; mF: Masse Flügel nach Versuch; mP<sub>1,6</sub>: Masse Probe >1,6 mm nach Versuch; LAK: Abrasivitätskoeffizient; LBK: Brechbarkeitskoeffizient.*

Probe	Gestein	P [%]	mp [g]	mF <sub>0</sub> [g]	mF [g]	mP <sub>1,6</sub> [g]	LAK [g/t]	LBK [%]
KK2	Kieselkalk	40,8	500,1	46,760	46,722	348,7	76	30,3
KK3	Kieselkalk	49,4	500,1	45,663	45,405	356,7	516	28,7
KK6	Kieselkalk	38,5	499,9	46,439	46,334	366,5	210	26,7
KK7	Kieselkalk	39,8	500,1	46,698	46,455	347,9	486	30,4
KK10	Kieselkalk	41,3	500,1	45,358	45,013	387,7	690	22,5
KK11	Kieselkalk	43,2	500,0	46,436	46,097	378,3	678	24,3
KK12	Kieselkalk	39,6	500,1	46,247	46,160	363,6	174	27,3
KK13	Kieselkalk	34,6	499,9	46,640	46,571	360,7	138	27,8
KK16	Kieselkalk	39,4	500,3	45,926	45,719	377,4	414	24,6
KK18	Kieselkalk	44,4	499,9	46,242	45,938	382,1	608	23,6
KK20	Kieselkalk	44,4	500,0	45,891	45,609	368,7	564	26,3
KK21	Kieselkalk	40,0	500,1	46,556	46,344	381,2	424	23,8
KK23	Kieselkalk	40,0	500,0	46,840	46,712	370,4	256	25,9
KK24	Kieselkalk	39,9	500,2	46,490	46,389	365,8	202	26,9
KK26	Kieselkalk	40,2	500,1	46,645	46,464	380,5	362	23,9
KK28	Kieselkalk	40,6	500,1	46,609	46,563	362,4	92	27,5
KK29	Kieselkalk	37,5	500,3	46,650	46,559	347,3	182	30,6
KK30	Kieselkalk	36,3	500,0	45,522	45,318	366,0	408	26,8
KK31	Kieselkalk	33,4	500,2	46,603	46,409	366,0	388	26,8
KK32	Kieselkalk	39,3	500,2	46,208	46,086	357,0	244	28,6
KK34	Kieselkalk	50,0	500,0	45,698	45,474	354,0	448	29,2
KK35	Kieselkalk	48,0	500,0	45,447	45,293	359,8	308	28,0
VKK1	Kieselkalk	39,5	500,3	45,334	45,279	351,6	110	29,7
VKK2	Kieselkalk	33,6	500,0	46,819	46,816	325,3	6	34,9
KK27	Kieselkalk	37,0	500,2	46,330	46,330	357,3	0	28,6
LKK1	Kieselkalk	39,0	500,3	45,812	45,587	375,3	450	25,0
LKK7	Kieselkalk	43,9	500,4	46,584	46,495	369,7	178	26,1
LKK8	Kieselkalk	37,9	500,2	46,410	46,281	372,9	258	25,4
LKK9	Kieselkalk	42,8	500,0	46,477	46,425	361,6	104	27,7
LKK13	Kieselkalk	45,7	500,1	46,723	46,536	376,1	374	24,8
LKK16	Kieselkalk	42,1	500,1	45,884	45,814	365,6	140	26,9
LKK17	Kieselkalk	41,9	499,8	46,257	46,250	356,0	14	28,8
LKK18	Kieselkalk	39,2	500,0	46,972	46,961	335,7	22	32,9
LKK21	Kieselkalk	37,1	499,9	46,242	46,048	374,8	388	25,0
LKK22	Kieselkalk	35,3	500,0	47,186	47,008	362,9	356	27,4
LKK26	Kieselkalk	42,3	500,0	45,948	45,685	356,4	526	28,7
FLY3	Flyschsandstein	36,8	499,9	46,495	45,677	342,1	1636	31,6
FLY4	Flyschsandstein	35,2	500,1	46,459	45,593	351,1	1732	29,8
FLY6	Flyschsandstein	34,6	499,9	46,812	46,106	304,1	1412	39,2
FN	Molassesandstein	35,5	500,3	46,490	45,928	348,6	1123	30,3



Fortsetzung Tabelle 11.5.

Probe	Gestein	P [%]	mp [g]	mF <sub>0</sub> [g]	mF [g]	mP <sub>1,6</sub> [g]	LAK [g/t]	LBK [%]
FS	Molassesandstein	34,0	500,1	46,680	46,538	355,7	284	28,9
Glau1	Glaukonitsandstein	46,4	500,0	46,546	45,659	355,4	1774	28,9
FARR	Rhyolith	36,6	500,0	46,461	45,936	341,6	1050	31,7
SBB2	Kieselkalk	38,4	500,3	47,027	46,899	361,0	256	27,8
SBB3	Kieselkalk	44,2	499,8	45,462	45,054	376,1	816	24,7
SBB6	Kieselkalk	39,1	500,0	46,668	46,369	361,5	598	27,7
SBB8	Kieselkalk	42,4	499,7	46,250	46,050	354,7	400	29,0
SBB10	Kieselkalk	40,8	500,0	46,667	46,516	367,2	302	26,6
SBB12	Kieselkalk	47,8	500,0	46,970	46,799	368,5	342	26,3
SBB13	Kieselkalk	43,8	500,0	46,380	46,247	359,8	266	28,0
SBB15	Kieselkalk	44,9	500,1	46,562	46,438	362,0	248	27,6
SBB18	Kieselkalk	41,8	500,4	46,876	46,540	372,7	671	25,5
SBB21	Kieselkalk	44,3	500,0	46,922	46,714	374,6	416	25,1
SBB22	Kieselkalk	43,7	500,1	46,543	46,318	367,3	450	26,5
SBB1	Mikrogranit	34,7	499,9	46,603	45,701	358,8	1804	28,2
SBB4	Ganggranit/Gneis	34,3	500,2	46,520	45,724	343,9	1591	31,2
SBB11	Ganggranit/Gneis	31,3	500,0	46,273	45,591	345,0	1364	31,0
SBB17	Ganggranit/Gneis	36,6	500,0	46,749	45,929	346,2	1640	30,8
SBB5	Flyschsandstein	35,7	500,0	47,115	46,348	348,4	1534	30,3
SBB7	Flyschsandstein	34,2	499,8	46,510	45,705	349,7	1611	30,0
SBB16	Flyschsandstein	34,5	500,4	46,646	45,890	352,7	1511	29,5
SBB23	Flyschsandstein	34,9	499,2	46,505	45,773	346,2	1466	30,6
SBB9	Molassesandstein	35,1	500,1	46,437	45,953	344,6	968	31,1
SBB14	Molassesandstein	35,4	500,0	46,145	45,627	347,7	1036	30,5
SBB19	Molassesandstein	35,4	500,1	46,571	46,058	341,5	1026	31,7

887 g/t (Minimum: 284, Maximum: 1611). Für die magmatischen Gesteine und deren metamorphe Äquivalente wurde ein LAK<sub>0</sub> von 1490 g/t (Minimum: 1050, Maximum: 1804) ermittelt. Diese übrigen Gesteinsarten sind somit stark bis extrem abrasiv.

#### 11.4.3 Brechbarkeit

Die Brechbarkeit der Kieselkalke liegt zwischen 34,9 und 22,5 (Abbildung 11.3, Tabelle 11.5). Gemäss Klassifikation sind Kieselkalke schwach brechbar bis brechbar. Im Durchschnitt zeigen die Kieselkalke aus der Moltrasio-Formation mit einem LBK<sub>0</sub> von 26,0 den tiefsten Wert (Minimum: 24,8, Maximum: 27,7). Für die Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation beträgt der LBK<sub>0</sub> 26,8 (Minimum: 22,5, Maximum: 30,4). Mit einem LBK<sub>0</sub> von 22,5 (KK10) wurde in dieser Kieselkalk-Formation die tiefste Brechbarkeit überhaupt gemessen. Die Kieselkalke der Préalpes médianes zeigen einen LBK<sub>0</sub> von 28,6 (Mini-

mum: 25,0, Maximum: 32,9). Bei den Helvetischen Valanginien Kieselkalken wurde durchschnittlich der höchste Brechbarkeitswert aller Kieselkalke gemessen (LBK<sub>0</sub>=31,1; Minimum: 28,6, Maximum: 34,9; n=3). Die durchschnittlichen Brechbarkeitskoeffizienten der untersuchten Flysch- und Molassesandsteine liegen bei 31,6 (Minimum: 29,5, Maximum: 31,6) bzw. 30,5 (Minimum: 28,9, Maximum: 31,7). Der LBK<sub>0</sub> der magmatischen und deren metamorphen Äquivalente betragen 30,6 (Minimum: 28,2, Maximum: 31,7).

#### 11.4.4 Erweiterter Datensatz

Für die Diskussion werden die Resultate aus dieser Studie in Beziehung mit Untersuchungsergebnissen der SBB gesetzt. Die SBB haben im betriebseigenen Labor Gesteinsproben auf deren Eignung als Schotter I geprüft und Los-Angeles-Koeffizienten ermittelt (vgl. Kapitel 2). In Tabelle 11.6 sind die Werte aufgeführt.

Tabelle 11.6: Schotter-Los-Angeles-Koeffizienten der SBB-Proben.

Probe	Gestein	Los-Angeles-Koeffizient	Probe	Gestein	Los-Angeles-Koeffizient
SBB2	Kieselkalk	14,5	SBB1	Mikrogranit	13,9
SBB3	Kieselkalk	14,2	SBB4	Ganggranit/Gneis	16,6
SBB6	Kieselkalk	13,4	SBB11	Ganggranit/Gneis	12,8
SBB8	Kieselkalk	15,2	SBB17	Ganggranit/Gneis	12,5
SBB10	Kieselkalk	14,9	SBB5	Flyschsandstein	13,4
SBB12	Kieselkalk	14,2	SBB7	Flyschsandstein	10,3
SBB13	Kieselkalk	15,3	SBB16	Flyschsandstein	11,3
SBB15	Kieselkalk	15,1	SBB23	Flyschsandstein	12,1
SBB18	Kieselkalk	12,6	SBB9	Molassesandstein	15,0
SBB21	Kieselkalk	13,8	SBB14	Molassesandstein	14,4
SBB22	Kieselkalk	14,4	SBB19	Molassesandstein	14,5

## 11.5 Diskussion

### 11.5.1 Abrasivität vs. Brechbarkeit

Für eine vereinfachte Darstellung der Abrasivitäts- und den Brechbarkeitskoeffizienten werden die Mittelwerte der untersuchten Gesteine mit den dazugehörigen maximalen Abweichungen dargestellt (Abbildung 11.4a). Während für die einzelnen Gesteinsgruppen Abweichungen bestehen, kann unter Berücksichtigung der Durchschnittswerte eine Korrelation festgestellt werden, wonach mit zunehmendem Abrasivitätskoeffizient die Brechbarkeitskoeffizienten grösser ausfallen.

Die Gegenüberstellung von Abrasivität und Brechbarkeit verschiedener Gesteinsarten zeigt keine einfache Korrelation (Abbildung 11.4b). Eine Unterteilung in Kieselkalke, Sandsteine, saure und basische Gesteine zeigt, dass jede Gesteinsgruppe eine ähnliche Tendenz hat: Je tiefer die Brechbarkeit ist, umso höher wird die Abrasivität. Für Kieselkalke ist diese Beziehung zwischen der Abrasivität und der Brechbarkeit in Abbildung 11.5a dargestellt, wobei sie für alle Varietäten des Kieselkalks gleichermassen gilt.

### 11.5.2 Abrasivität vs. Quarzgehalt

Die Gegenüberstellung vom Quarzgehalt zum Abrasivitätskoeffizienten zeigt eine positive Korrelation (Abbildung 11.5b). FESTL (2006) und THURO & KÄSLING (2009) geben dafür bei Lockergesteinen einen exponentiellen Zusammenhang an. Bei den Kieselkalken fällt der Korrelationskoeffizient einer exponentiellen Korrelation mit  $R^2=0,46$  weniger gut aus, als bei einer linearen Korrelation, wo der Korrelationskoeffizient  $R^2=0,57$  mit bzw.  $0,61$  ohne Schnittpunkt im Ursprung beträgt. Die Gegenüberstellung von authigenem Quarz und Abrasivitätskoeffizient führt im Vergleich zum Gesamtquarzgehalt zu keinem verbesserten Korrelationskoeffizienten: Exponentielle Funktion:  $R^2=0,34$ , lineare Korrelation:  $R^2=0,09$  mit bzw.  $0,52$  ohne Schnittpunkt im Ursprung.

### 11.5.3 Brechbarkeiten verschiedener Gesteinsarten

THALMANN (1996) bestimmte für verschiedene Gesteine Brechbarkeitskoeffizienten von 37–84. Kalke zeigten dabei minimale LBK von 41. Die Differenz zu den schwach verkieselten Kieselkalken ist dabei mit  $>6$  Indexpunkten bemerkenswert. Dies zeigt, dass bereits eine geringe Verkieselung der Kieselkalke wesentlich zur Festigkeit bzw. zum Brechbarkeitsverhalten der Gesteine beiträgt.

Im Vergleich zu den Kieselkalken lassen sich Flysch-, Molasse- und Glaukonitsandsteine, die in der Schweiz ebenfalls als Hartsteine Verwendung finden, leichter brechen. Dieses Brechbarkeitsverhalten könnte auf sedimentäre Strukturen zurückzuführen sein. Bei den in dieser Studie geprüften magmatischen Gesteinen und deren metamorphen Äquivalente (zweite Probenserie) kann das schlechtere Bruchverhalten auf das planare Gefüge in Gesteinsbruchstücken der Proben zurückgeführt werden.

PAPELITZKY (2007) stellt für eine Auswahl von Hartsteinen aus Deutschland fest, dass nur ein untersuchter Basalt einen  $LBK \leq 31$  aufwies. Dieser zeigt im Vergleich zu allen in dieser Studie gemessenen Brechbarkeitskoeffizienten die tiefste Brechbarkeit. Für die übrigen Hartsteine (Granit, Diabas, Amphibolit, Porphyry) wurden in seiner Studie Brechbarkeitskoeffizienten  $>31$  ermittelt, womit die Werte über denjenigen der Kieselkalke liegen.

### 11.5.4 Brechbarkeit vs. Quarzgehalt

Die Beziehung zwischen der Abrasivität und der Brechbarkeit (Abbildung 11.5a) sowie dem Quarzgehalt (Abbildung 11.5b) lässt bei den Kieselkalken vermuten, dass auch zwischen Gesamtquarzgehalt und Brechbarkeit ein direkter Zusammenhang besteht. Eine Korrelation ist ersichtlich, wobei  $R^2$  für eine lineare Korrelation nur  $0,25$  beträgt (Abbildung 11.5c). Die Datenpunkte der Kieselkalke können mit einer Kurve von einem Bereich ohne Messwerte abgegrenzt werden (Abbildung 11.6). Grundsätzlich gilt bei dieser Darstellung: Je höher der Quarzgehalt ist, umso weniger

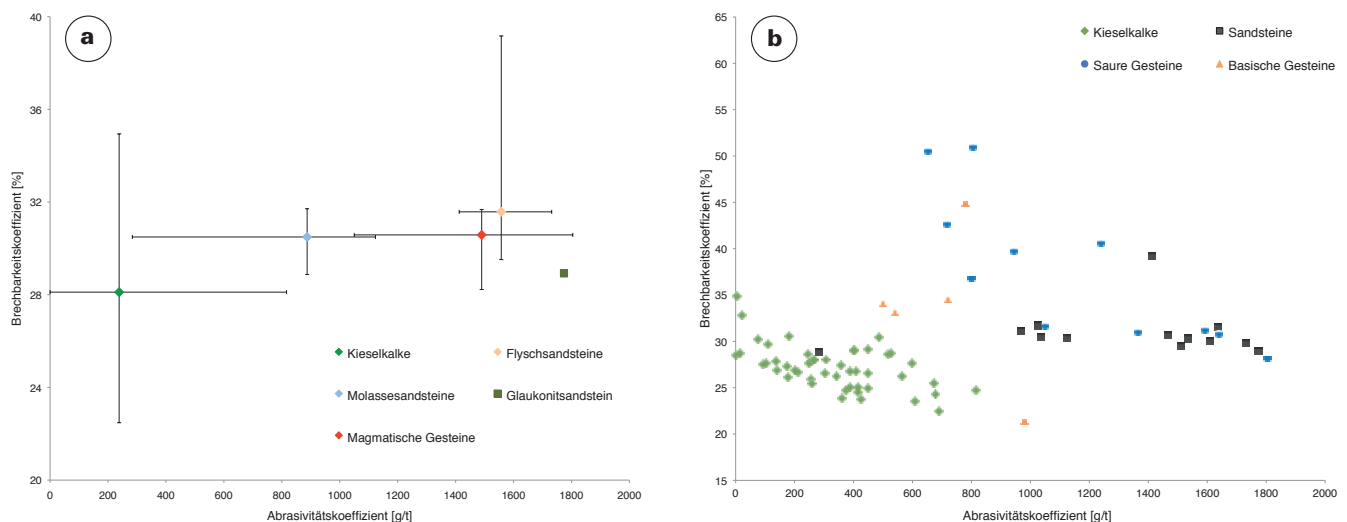


Abbildung 11.4: Gegenüberstellung von Abrasivitäts- und Brechbarkeitskoeffizienten verschiedener Gesteinsarten. a) Mittelwerte und maximale Abweichungen für Kieselkalke (in einer Gruppe zusammengefasst), Flysch-, Molasse- und Glaukonitsandsteine sowie magmatische Gesteine. b) Darstellung einzelner Messwerte von Kieselkalke (n=47) und Sandsteinen (n=12) aus der Schweiz sowie sauren (n=11) und basischen Gesteinen (n=5) aus der Schweiz und dem Ausland (n<sub>Ausland</sub>=9). Dabei wurden zu den in dieser Untersuchung ermittelten Werten 5 Datensätze aus PAPELITZKY (2007) einbezogen.

lassen sich die Gesteine brechen. Dies ist besonders bei den Kieselkalke der Moltrasio-Formation zu beobachten, welche mit einer Ausnahme auf einer Kurve parallel zu oben beschriebener Kurve liegen. Die Aufteilung des Gesamtquarzes in authigenen Quarzgehalt und detritischen Quarz führt zu keiner besseren Korrelation.

### 11.5.5 Faktoren, welche die Brechbarkeit der Kieselkalke beeinflussen können

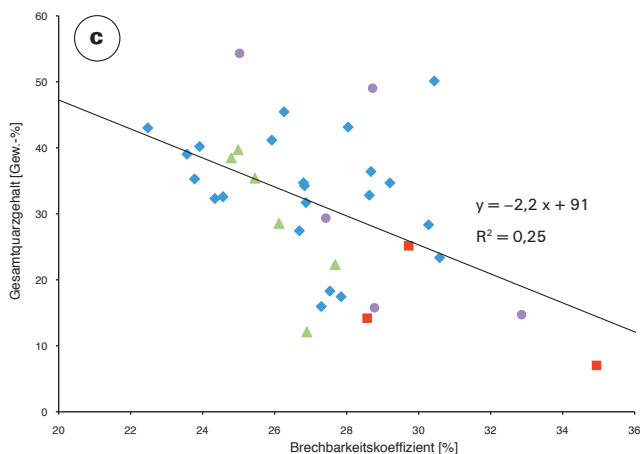
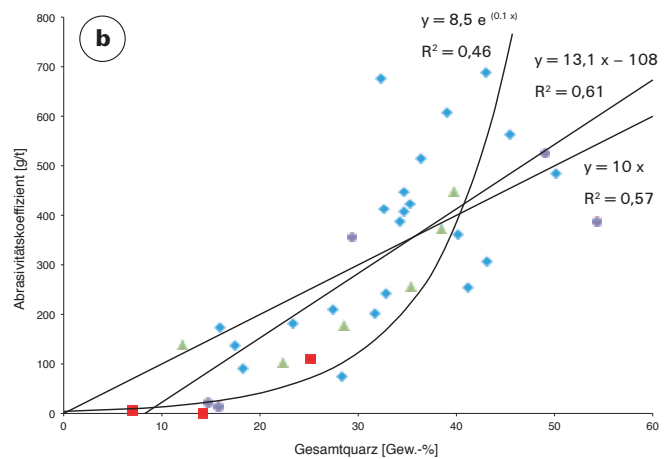
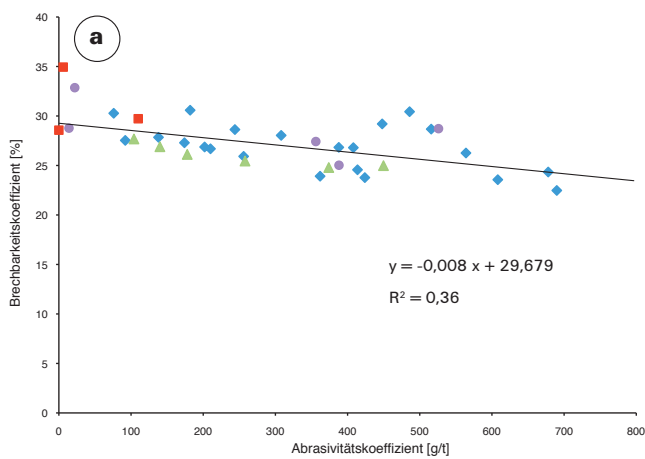
Mit den bisherigen Untersuchungen der Kieselkalke (Kapitel 7, 9, 10, 11) kann abgeschätzt werden, wie sich der Quarzgehalt auf das Brechbarkeitsverhalten auswirkt. Die Daten zeigen aber auch, dass die Brechbarkeit der Kieselkalke von weiteren Faktoren abhängig ist. Nachfolgend werden auf Basis des Gesamtquarzgehalts mögliche Faktoren (vgl. Kapitel 7, Tabelle 7.1) aufgeführt und geprüft.

- **Gefügeklassifikation:** Unter Berücksichtigung des Gefügebegriffs nach DUNHAM (1962) zeigt sich, dass Kieselkalke, die als Wackestones klassifiziert wurden, im Vergleich mit Packstones und Mudstones die tiefsten Brechbarkeitswerte (bis 22,5) erreichen (Abbildung 11.6). Zudem kann eine Obergrenze bestimmt werden, ab welcher keine Wackestones mehr festgestellt wurden. Sie liegt bei 28,7. Bei Packstones und Mudstones liegen die tiefsten gemessenen Brechbarkeitswerte bei 25 respektive 29,3.
- **Mikrit/Sparit-Verhältnis:** Das für die Kieselkalkproben bestimmte Verhältnis von Mikrit/Sparit (M/S) ist nach DUNHAM (1962) an den Gefügebegriff gebunden und liefert betreffend der Erklärung des Brechbarkeitsverhaltens keine neuen Erkenntnisse.
- **Potenzielle Schwachzonen:** Sie zeichnen sich durch eine Alteration des Gesteins aus, in welcher meist sekundärer Pyrit und Eisenhydroxide entlang von Lagen

auftreten. In rund 80% aller Proben sind die Schwachzonen vorwiegend parallel zur Schichtung ausgebildet. In den übrigen Proben finden sich Schwachzonen auch diskordant zur Schichtung. Die Erfassung der potenziellen Schwachzonen in einer vierteiligen, rein qualitativen Abstufung konzentrierte sich vorwiegend auf die Häufigkeit des Auftretens im Dünnschliff. Dieser Faktor ist für die Erklärung des Brechbarkeitsverhaltens von grosser Bedeutung da besonders Gesteine mit sehr vielen potenziellen Schwachzonen gegenüber Kieselkalke mit gleichem Quarzgehalt und keinen potenziellen Schwachzonen wesentlich höhere Brechbarkeitswerte zeigen (Abbildung 11.7a). Kalzitklüfte wurden bei dieser Untersuchung nicht eingeschlossen, da Klüftscharen im Feld nur teilweise erfasst wurden und die Abstände paralleler Klüftflächen meist grösser als 4 cm waren.

- **Schichtsilikatannteil:** In Abbildung 11.7b ist der röntgendiffraktometrisch bestimmte Gehalt an Muskowit und Chlorit dargestellt. Auffallend ist, dass viele Chlorit-haltige Kieselkalke im Vergleich mit Gesteinen, die einen ähnlichen Quarzgehalt haben, eine höhere Brechbarkeit aufweisen. Für grosse Muskowitanteile kann hingegen nicht generell eine erhöhte Brechbarkeit nachgewiesen werden. Dies hängt vermutlich mit der homogenen Verteilung und feinkörnigen Ausbildung des Muskowits in den Kieselkalke zusammen, während Chlorit – im Dünnschliff sichtbar – tendenziell in Lagen angehäuft vorkommt und das Bruchverhalten unterstützt. Allgemein kann festgehalten werden, dass Schichtsilikate die Brechbarkeit heraufsetzen. Dabei spielt die Verteilung der Schichtsilikate im Gestein eine wesentliche Rolle; Anhäufungen in Lagen bedeuten eine leichtere Brechbarkeit.
- **Eingeregelter Gefüge:** Das eingeregelter Gefüge, welches anhand von ausgerichteten Mineralen und durch die





- ◆ Helvetische Kieselkalk-Formation
- ▲ Kieselkalke der Moltrasio-Formation
- Valanginien-Kieselkalke
- Kieselkalke der Préalpes médianes

Abbildung 11.5: Darstellung der Beziehungen zwischen Abrasivität bzw. Brechbarkeit und Quarzgehalt [Gew.-%] der Kieselkalke (n=36). Der Quarz (zusammengefasst als authigenen und detritischen Quarz) ist in den Kieselkalcken die einzige harte Mineralphase (>6 Mohs). a) Abrasivität vs. Brechbarkeit. b) Gesamtquarzgehalt vs. Abrasivität mit drei Korrelationsvarianten. c) Brechbarkeit vs. Gesamtquarzgehalt.

Einregelung von Schwammnadeln festgestellt werden kann, verursacht keinen messbaren Einfluss: Einerseits gibt es Kieselkalke, die eine starke Einregelung zeigen (z.B. KK der Moltrasio-Formation) und trotzdem sehr tiefe Brechbarkeitswerte aufweisen. Andererseits gibt es Kieselkalke, die keine Einregelung zeigen und trotzdem hohe Brechbarkeitskoeffizienten aufweisen.

- **Mineralkorngrößen:** Dieser Faktor ist in den mikro- bis kryptokristallinen Kieselkalcken schwierig zu bestimmen (vgl. Tabelle 7.1). Bei den sichtbaren Mineralkörnern sind im Weiteren so starke Größenunterschiede festzustellen, dass die Interpretation des Brechbarkeitsverhaltens mit diesem Faktor zusätzlich erschwert wird. Von der Bestimmung des Einflusses der mittleren Korngrösse auf die Brechbarkeit wird deshalb abgesehen.
- **Detritischer Quarz:** Zwischen dem Brechbarkeitsverhalten und dem Anteil an detritischem Quarz kann kein Zusammenhang bestätigt werden. Allerdings kann vermutet werden, dass sich ein hoher detritischer Quarzgehalt bei geringem Gesamtquarzanteil auf die Brechbarkeit auswirkt.

**Fazit:** Die Bestimmung des Quarzgehalts, die Erfassung von Schichtsilikaten, die Klassifikation nach DUNHAM (1962) sowie die Erfassung von potenziellen Schwachzonen stellen

bei den Kieselkalcken wesentliche Faktoren dar, mit denen das Brechbarkeitsverhalten erklärt werden kann.

### 11.5.6 Brechbarkeit vs. Druckfestigkeit

In Abbildung 11.8 ist die Beziehung zwischen der Brechbarkeit und des Gesamtquarzgehalts unter Berücksichtigung der Proportionalitätsgrenzen und Druckfestigkeitswerte (vgl. Kapitel 10) dargestellt. In einem Bereich von 25–27 des Brechbarkeitskoeffizienten findet sich eine Grenze, bei der sowohl die Proportionalitätsgrenze, als auch die Druckfestigkeitsgrenze 250 MPa über- bzw. unterschreiten. Bei Kieselkalcken, deren Druckfestigkeit >250 MPa ist, kann davon ausgegangen werden, dass Brechbarkeitswerte <27 erreicht werden. Für vollkommen intakte Kieselkalkproben (vgl. Kapitel 7) mit einem Brechbarkeitswert <30 werden Druckfestigkeitswerte >200 MPa erreicht. Für die Kieselkalke macht der Mindestgehalt an harten Mineralen nach DE QUERVAIN (1969) insofern Sinn, als dass damit Kieselkalke mit Bruchfestigkeiten > bzw. <250 MPa unterschieden werden können. In Abbildung 11.9 ist die Brechbarkeit von Kieselkalcken gegenüber der einachsigen Druckfestigkeit aufgetragen. Es besteht eine lineare Korrelation, welche wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$\text{Brechbarkeitskoeffizient} = -20 \cdot \text{Bruchfestigkeit} + 785.$$

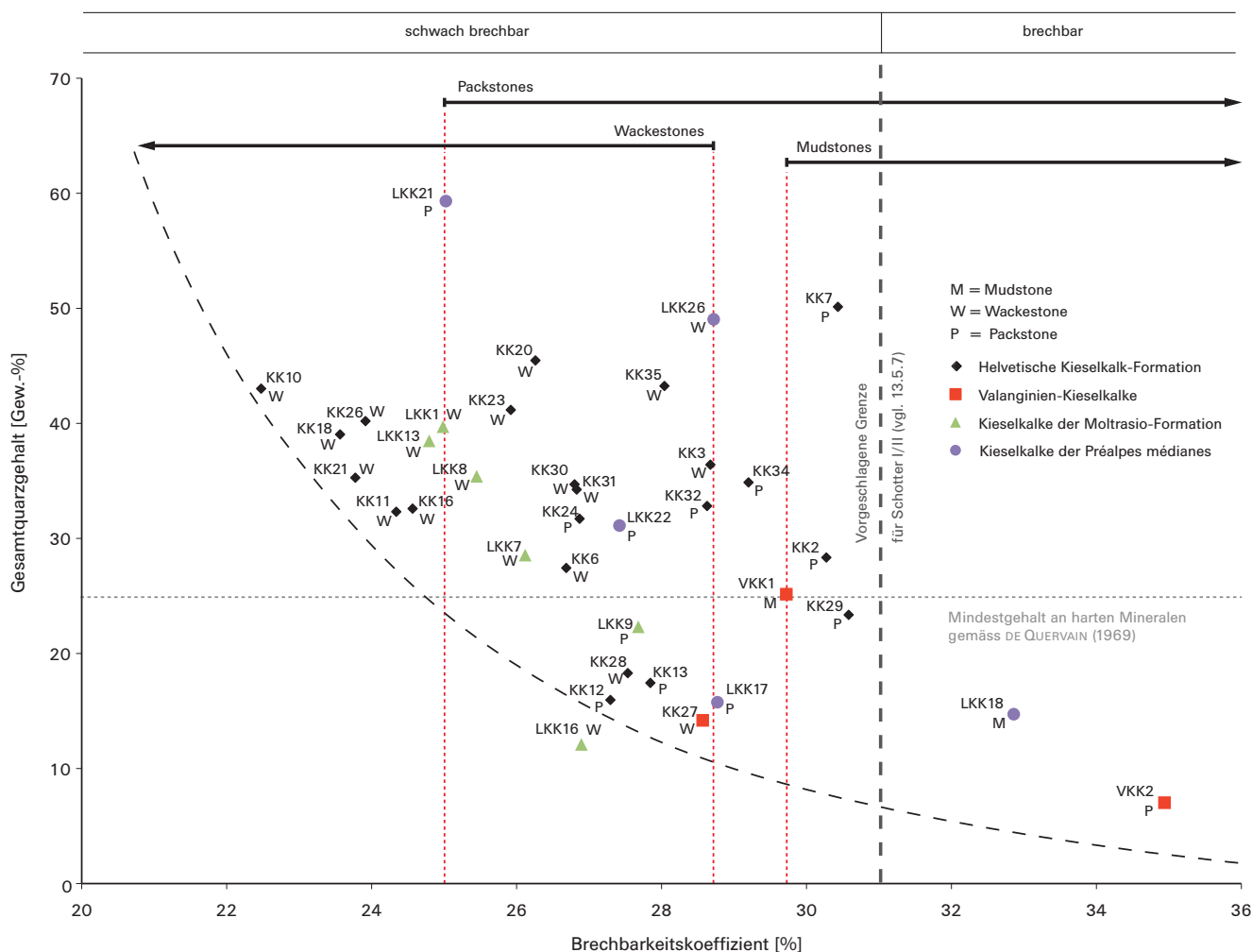


Abbildung 11.6: Beziehung zwischen Gesamtquarzgehalt und Brechbarkeit von Kieselkalen. Die schwarz gestrichelte Kurve grenzt die Datenpunkte von einem Bereich ohne Messwerte ab. LKK16 wird davon ausgeschlossen, da das Verhalten nicht mit vorangehenden Untersuchungen begründet werden kann. Es wird vermutet, dass diese Probe aus der Moltrasio-Formation heterogen aufgebaut war. Rot gestrichelte Linien geben Brechbarkeitsgrenzen für die drei Gefügetypen Mudstone (M), Wackestone (W) sowie Packstone (P) an. Als Grenzwerte sind der Mindestgehalt an harten Mineralen (DE QUERVAIN 1969) sowie eine vorgeschlagene Brechbarkeitsgrenze für Schotter I/II Qualität (Diskussionspunkt 11.5.8) dargestellt. Demnach eignen sich schwach brechbare Kieselkalke mit einem Brechbarkeitskoeffizienten <32 für die Schotter I. Qualität.

### 11.5.7 Grenzwert für Brechbarkeitskoeffizient

Bereits THALMANN (1996) hat für verschiedene Gesteinsarten eine lineare Korrelation zwischen der Brechbarkeit und dem Los-Angeles-Koeffizienten festgestellt. Da THALMANN (1996) das Prüfverfahren nach heutiger EN 1097-2:1998 + A1:2006 für Splittkörnungen durchgeführt hat, kann die von ihm berechnete Korrelation nicht direkt für die Vorhersage des Brechverhaltens von Schotterkörnungen verwendet werden. Es kann aber aus seinen Erkenntnissen geschlossen werden, dass auch für Hartschotter mit abnehmendem Los-Angeles-Koeffizienten die Brechbarkeitskoeffizienten kleiner ausfallen. Ebenfalls hat WEIHER (2009) für verschiedene Gesteinsarten eine Korrelation festgestellt, nach der mit abnehmendem Los-Angeles-Koeffizienten die Brechbarkeitskoeffizienten tiefer ausfallen.

Anhand der zweiten Probenreihe kann der Zusammenhang zwischen den Brechbarkeits- und den Schotter-Los-Angeles-Koeffizienten dargestellt werden (Abbildung 11.10). Folgende Feststellungen können gemacht werden:

- Alle Hartsteinsproben der zweiten Probenreihe zeigen Brechbarkeitskoeffizienten <32. Der tiefste Wert liegt bei 24,8.
- Es können zwei Gruppen von Hartsteinen zusammengefasst werden: A) Vorwiegend Kieselkalke. Innerhalb von ca. 3 Punkten des Los-Angeles-Koeffizienten unterscheiden sich die Brechbarkeitswerte um ca. 4 Punkte. Die Brechbarkeitskoeffizienten sind dabei für alle Kieselkalke <29. B) Hartsteine, die innerhalb von ca. 6 Punkten auf der Los-Angeles-Skala ca. 3,5 Punkte Differenz im Brechbarkeitskoeffizient erreichen. Der höchste Brechbarkeitswert wird bei 31,7, der tiefste bei 28,2 erreicht. Diese Gruppe umfasst Flyschsandsteine, Molassesandsteine sowie die meisten magmatische Gesteine (inkl. deren metamorphe Äquivalente).
- Eine lineare Korrelation kann bei Betrachtung beider Gruppen nicht festgestellt werden. Auch für die einzelnen Gruppen ist eine Festlegung einer linearen Korrelation auf Grund des engen Datenbereichs der Hartsteine nicht sinnvoll.

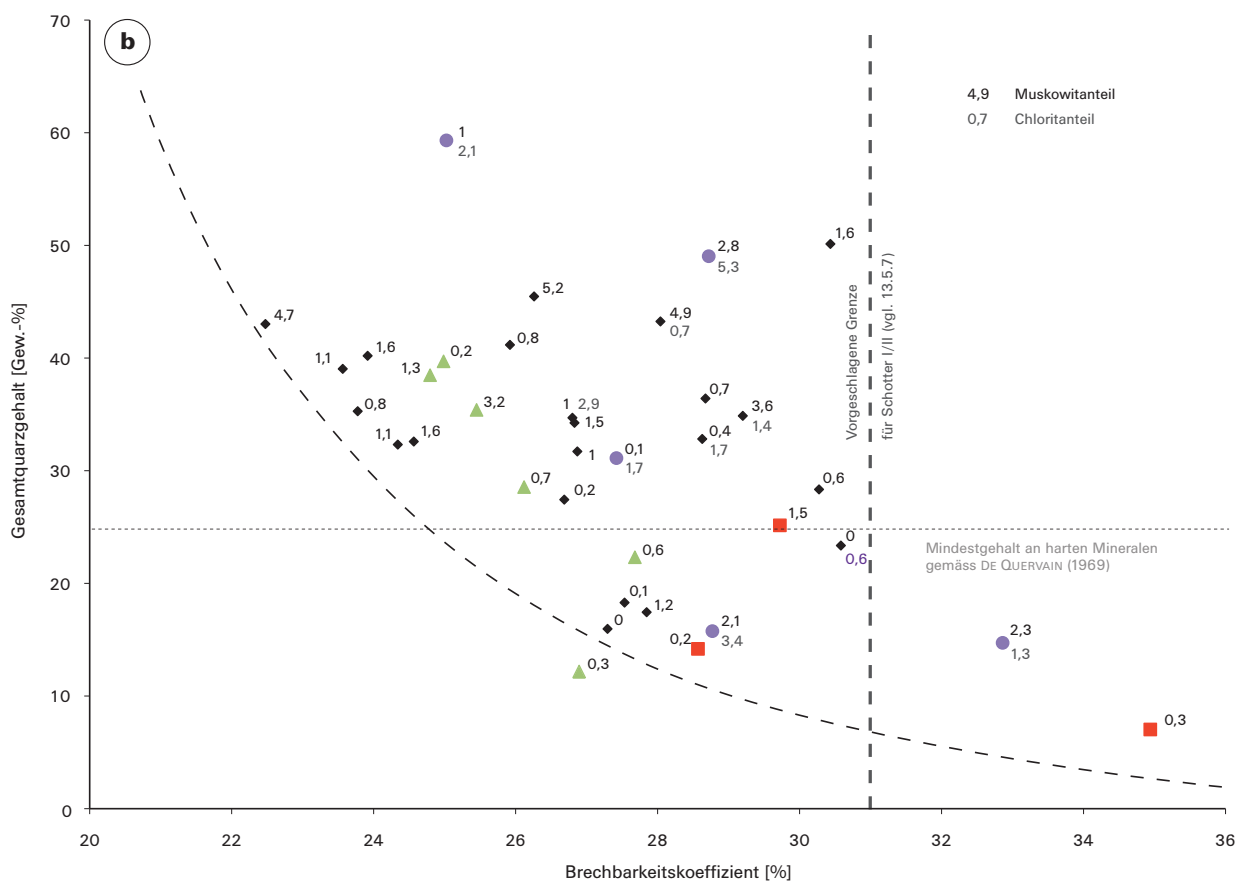
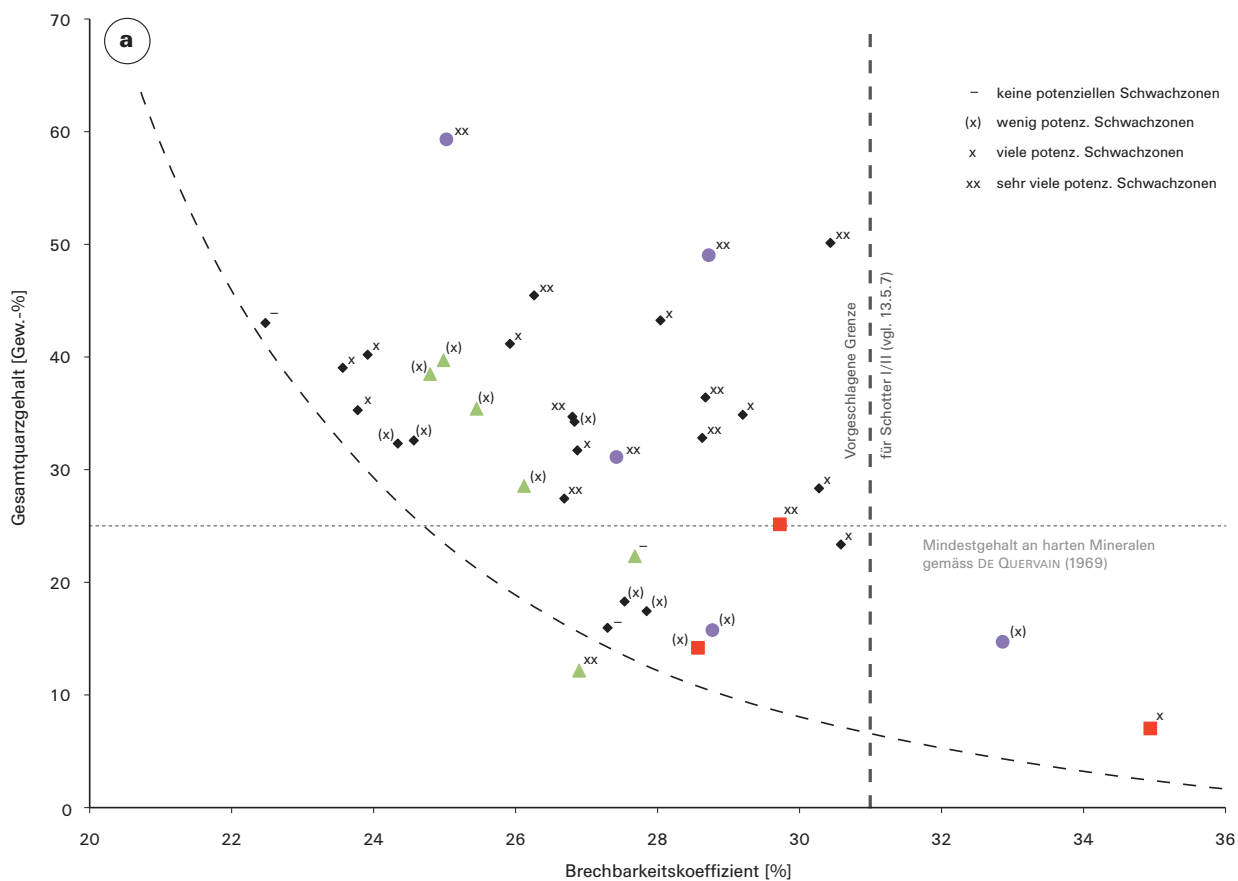


Abbildung 11.7: Darstellung der Brechbarkeit von Kieselkalen gegenüber dem Quarzgehalt unter a) Berücksichtigung potenzieller Schwachzonen im Gestein. b) Berücksichtigung der beiden röntgendiffraktometrisch bestimmten Schichtsilikate Muskowit (schwarz) und Chlorit (grau). Die schwarz gestrichelte Kurve trennt die Datenpunkte von einem Bereich ohne Messwerte ab.



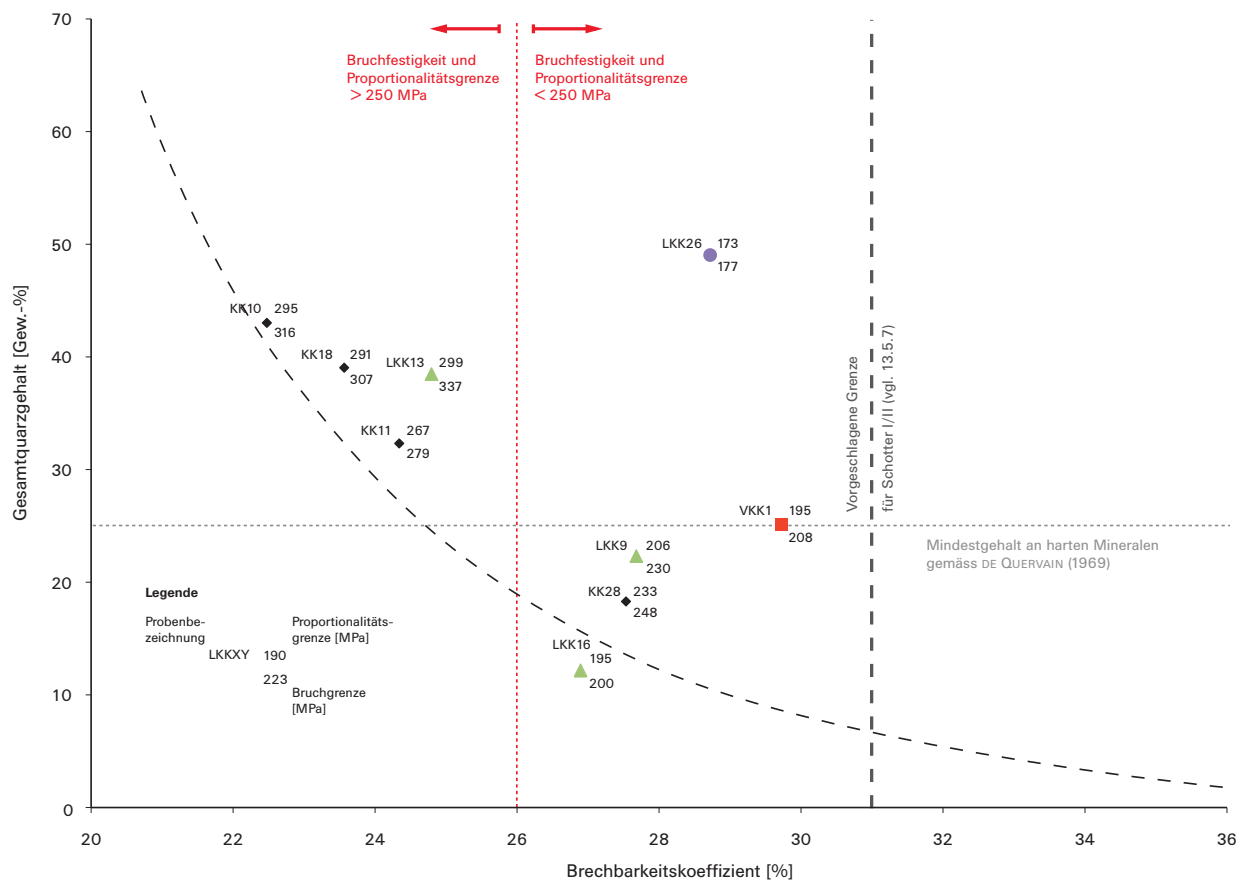


Abbildung 11.8: Darstellung der Brechbarkeit von Kieselkalen gegenüber dem Quarzgehalt unter Berücksichtigung der einachsigen Druckfestigkeit. Probe LKK26 fällt punkto LBK aus dem Rahmen, da die tektonische Störung des Gesteins (vgl. Kapitel 7) sowohl die Brechbarkeit (zu hoch), als auch die Druckfestigkeit (zu tief) beeinflusst. In einer Zusatzgrafik (oben rechts) ist zudem die Abhängigkeit zwischen der Brechbarkeit und der einachsigen Bruchfestigkeit angegeben. Dabei fällt Probe LKK16 auf, die im Vergleich mit den anderen Proben für die bestimmten Druckfestigkeitswerte eine relativ geringe Brechbarkeit aufweist.

Im Bezug auf die Verwendung der Gesteine im Bahnwesen zeigt die Gegenüberstellung von Brechbarkeitskoeffizient und Los-Angeles-Koeffizient, dass Hartsteine mit einem LBK >31 nicht als Schotter I verwendet werden sollten. Der LBK-Grenzwert von 31 ergibt sich aus der Beobachtung, dass ab diesem Grenzwert für Schotter Los-Angeles-Koeffizienten >16 bestimmt wurden (=Schotter II. Qualität) und mit Ausnahme von zwei Proben Werte <31 gemessen wurden. In der Klassifizierung der Brechbarkeit kann Schotter I mit der angepassten Brechbarkeitsskala als schwach brechbares Gestein eingeordnet werden.

### 11.5.8 Rückschluss auf Varietäten des Kieselkalks

Unter Einbezug des Brechbarkeitsgrenzwerts für Schotter I/II Qualität und dem Mindestgehalt an harten Mineralen kann in Abbildung 11.6 ein Feld bestimmt werden, in welchem sich diejenigen Kieselkalke finden, die für die Herstellung von Schotter I. Qualität am geeignetsten sind. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme der Kieselkalke aus dem Helvetischen Valanginien alle Varietäten des Kieselkalks mehrheitlich in diesem Feld liegen.

### 11.5.9 Brechbarkeitsversuch vs. Los-Angeles-Prüfverfahren

Obwohl zwischen der Brechbarkeit und den Los-Angeles-Werten für weiche und mittelharte Gesteine eine Korrelation besteht, ergibt sich für Hartsteine eine Differenzierung. Die Vermutung liegt nahe, dass die beiden Hartsteingruppen durch die intensivere mechanische Beanspruchung des Brechbarkeitsversuchs hervorgerufen wird:

- **Brechbarkeitsversuch:** Einerseits wird das Drehen des scharfkantigen Metallflügels das Material durch Fremdeinwirkung zerkleinert. Andererseits findet angetrieben durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit des Metallflügels eine hochenergetische Korn-zu-Korn-Kollision statt, welche das Material zerkleinert. In beiden Prozessen beeinflusst der innere Aufbau der Gesteine bzw. der Zusammenhalt der Mineralkörner die Zerkleinerung.
- **Los-Angeles-Prüfverfahren:** In diesem Verfahren wird ebenfalls eine Fremdeinwirkung durch Stahlkugeln ausgeübt. Die Intensität der Fremdeinwirkung bzw. des Schlags ist aber geringer und bewirkt nur eine Beanspruchung an der Kornoberfläche. Dasselbe gilt für den Abrieb der Gesteinskörnungen. Während bei mittelharten und weichen Gesteinen die mechanische Beeinflussung genügend gross ist und zu einer Zerkleinerung des Ma-

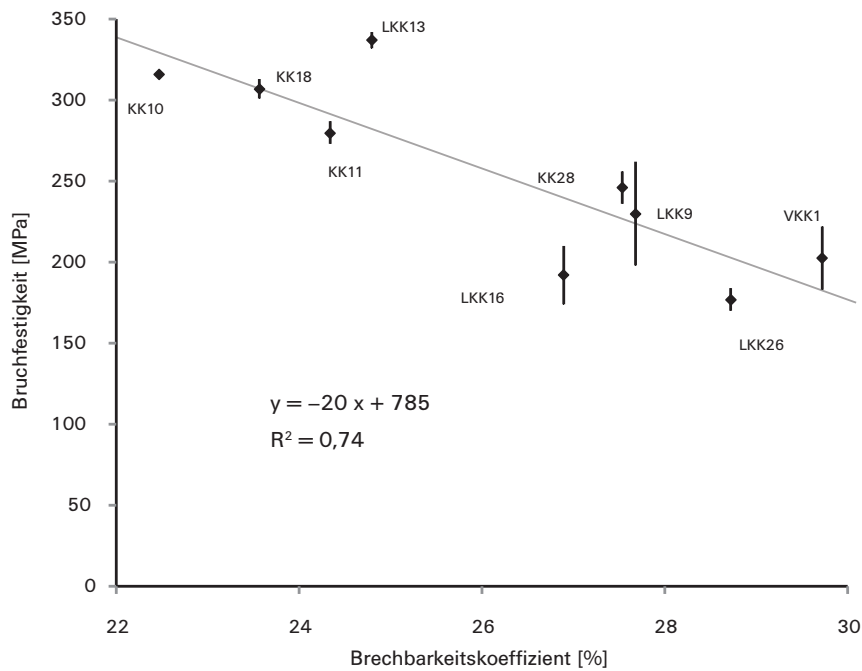


Abbildung 11.9: Gegenüberstellung von Brechbarkeitskoeffizient [%] und einachsiger Bruchfestigkeit [MPa]. Es besteht eine lineare Korrelation, welche folgendermassen ausgedrückt werden kann:  
 $\text{Brechbarkeitskoeffizient} = -20 \cdot \text{Bruchfestigkeit} + 785$ ;  $R^2 = 0,74$ .

terials führt, zeigt die Beanspruchung bei Hartsteinen nur Auswirkungen auf die Oberflächenbeschaffenheit.

Im Übrigen ergeben sich mit dem Brechbarkeitsversuch gegenüber dem Los-Angeles-Prüfverfahren weiterführende Vorteile:

- Für den Brechbarkeitsversuch werden je nach Gesteinsart rund 2–2,5 kg Gesteinsmaterial benötigt. Zum Vergleich: Das Schotter Los-Angeles-Prüfverfahren erfordert mindestens 15 kg der Korngrösse 31,5/50.
- Das Prüfverfahren ist schnell: Die Gesteinsprobe wird bei einer hohen Drehzahl (4500 U/Min.) während 5 Min. einer mechanischen Belastung ausgesetzt. Für das Los-Angeles-Verfahren werden bei durchschnittlich 31 U/Min. rund 15 bzw. für Schotter 30 Min. benötigt.
- Die mechanische Belastung erfolgt im Brechbarkeitsversuch während einem kürzeren Zeitraum. Die Belastung ist intensiver und verursacht eine stärkere Beanspruchung des Probenmaterials. Der Brechbarkeitsversuch erlaubt so eine optimale Differenzierung der Hartsteine.

Als Nachteile zeigen sich verschiedene Faktoren wie das Mikrit/Sparit-Verhältnis oder potenzielle Schwachzonen, welche die Brechbarkeit beeinflussen und nicht ohne Einwand für die Beschreibung des Verhaltens herangezogen werden können. Interpretationsprobleme ergeben sich aber auch beim Los-Angeles-Prüfverfahren, welches von vielen Parametern beeinflusst wird (RÖTHLISBERGER et. al. 2005). Zudem kann der Brechbarkeitsversuch nur an Splittkörnungen und nicht direkt an Schotter ausgeführt werden.

#### 11.5.10 Klassifikation der Festgesteine mittels LCPC-Brechbarkeitskoeffizient

Der Brechbarkeitsversuch kann als alleiniges, rein technisches Prüfverfahren für eine dreiteilige Klassifizierung von Festgesteinen in harte, mittelharte und weiche Gesteine in Betracht gezogen werden. Vor allem die intensivere Belastung der Gesteinskörnung und folglich stärkere Prüfung des Mineralverbands im Gesteinskorn ist ein wesentliches Argument für die Aussagekraft des Versuchs. Mit dem Brechbarkeitsversuch können nicht nur Hartsteine identifiziert, sondern auch klassifiziert werden. Demnach sind kaum bis schwach brechbare Gesteine ( $\text{LBK} \leq 31$ ) Hartsteine. Brechbare und stark brechbare Gesteine ( $\text{LBK} 32\text{--}69$ ) sind mittelharte Gesteine. Extrem brechbare Gesteine ( $\text{LBK} \geq 70$ ) sind als weiche Gesteine zu bezeichnen (Tabelle 11.7).

Tabelle 11.7: Neue Klassifikation der Festgesteine in Hartsteine, Mittelhartsteine und Weichsteine.

LBK [%]	0–31	32–69	70–100
Klassifikation	hart	mittelhart	weich

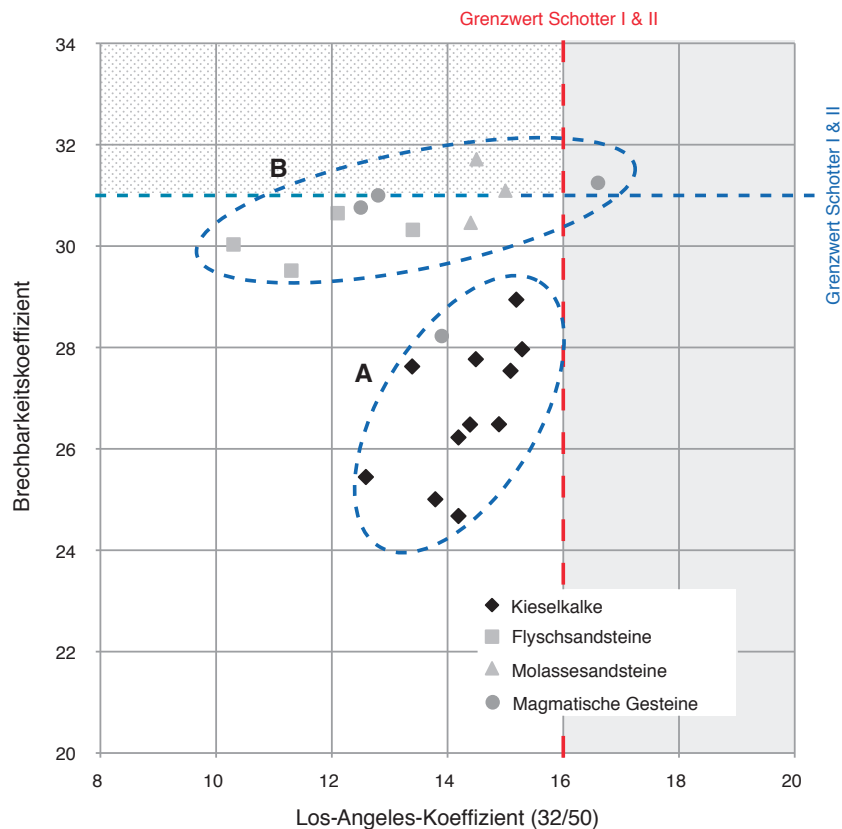


Abbildung 11.10: Zusammenhang zwischen dem Los-Angeles-Koeffizienten (nach EN 13450:2002, Anhang C) und dem Brechbarkeitskoeffizienten (nach AFNOR P18-579). Die zwei Hartsteingruppen A (hauptsächlich Kieselkalke) und B (Flysch- und Molassesandsteine sowie die meisten magmatischen Gesteine) unterscheiden sich im Brechbarkeitsverhalten: Gesteine der Gruppe A werden weniger stark gebrochen und erreichen tiefere Brechbarkeitswerte als diejenigen der Gruppe B.

## 11.6 Folgerungen

Die Abrasivität der Kieselkalke hängt vom Quarzgehalt ab. Der Quarzgehalt, das Gefüge sowie die metamorphe und tektonische Überprägung tragen wesentlich zum Brechbarkeitsverhalten der Gesteine bei. Kieselkalke sind schwach brechbar bis brechbar. Gegenüber anderen Schweizer Hartsteinen und potenziellen Hartsteinen zeigen drei der vier untersuchten Kieselkalkvarietäten im Durchschnitt tiefere Brechbarkeitswerte und dementsprechend Potenzial für Produkte höchster Qualität.

Mit dem Brechbarkeitsversuch kann eine Differenzierung von Gesteinen, die heute als Schotter der Klasse I ver-

wendet werden, in zwei Kategorien vorgenommen werden. Diese Differenzierung lässt vermuten, dass in verschiedenen Bereichen, wo heute Hartsteine verwendet werden, Unterschiede in der Beständigkeit der Gesteinskörnungen beobachtet werden können.

Für die Beurteilung von potenziellen Hartsteinsvorkommen kann der Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch als einfaches und schnelles Prüfverfahren herangezogen werden. Bereits kleine Probenmengen ermöglichen Aussagen über die Qualitätseigenschaften der Rohstoffvorkommen.

Der Brechbarkeitsversuch wird für eine dreiteilige Klassifizierung der Festgesteine vorgeschlagen. Dabei werden harte, mittelharte und weiche Gesteine differenziert.



## 12. Schlussfolgerungen und Ausblick

### 12.1 Schlussfolgerungen

Hartsteine sind für den Bau von Verkehrsinfrastrukturanlagen unerlässlich. Der Abbau von Hartsteinen und insbesondere von Kieselkalk wird in der Schweiz aber durch unterschiedliche Interessen eingeschränkt. Konflikte ergeben sich v. a. bei der Nutzung von Hartsteinvorkommen, da ein Abbau stets einen Eingriff in ein bestehendes Landschaftsbild bedeutet. Seit zehn Jahren wird deshalb auf nationaler Ebene die Hartsteinnutzung untersucht. Heute wird noch an sieben Standorten Kieselkalk abgebaut.

Vier Varietäten des Kieselkalks erlangten im Bezug auf die Nutzung als Hartsteine historisch an Bedeutung: Die Kieselkalke der Helvetischen Kieselkalk-Formation, des helvetischen Valanginiens, der Moltrasio-Formation sowie der Préalpes médianes. Mit Ausnahme der Moltrasio-Formation liegen alle Kieselkalkvorkommen entlang des nördlichen Alpenrandes.

Das Verhalten der Kieselkalke unter mechanischer Beanspruchung konnte durch Kombination verschiedener mineralogisch-petrographischer Untersuchungsmethoden abgeleitet werden. Dabei erwiesen sich die Untersuchung im Dünnschliff und die qualitative sowie quantitative Röntgendiffraktometrie als wichtige Methoden.

Petrographisch können die sehr ähnlich aussehenden Gesteine der Moltrasio- und der Helvetischen Kieselkalk-Formation folgendermassen unterschieden werden: Mikroquarz konnte ausser im Kieselkalk der Moltrasio-Formation im Dünnschliff nur selten beobachtet werden. Zudem fand sich im Kieselkalk der Moltrasio-Formation kein detritischer Quarz. Glaukonit kommt nur in den Kieselkalken der Helvetischen Kieselkalk-Formation vor.

Bei den Kieselkalken existieren im Wesentlichen drei Gefügetypen: Mudstones, Wackestones und Packstones. In jeder Varietät des Kieselkalks treten mindestens zwei der drei genannten Gefügetypen auf. Die unterschiedlichen Gefüge sind hauptsächlich Abbild der variierenden Anteile an Bioklasten, detritischem Quarz und Kalzit in der mikritischen und/oder sparitischen Grundmasse.

Die qualitative und quantitative Röntgendiffraktometrie ergibt je nach Kieselkalk Kalzitanteile von 21 bis 93 Gew.-%. Der Gesamtquarzanteil variiert zwischen 7 und 64 Gew.-%. Ankerit, Muskowit  $2M_1$  und Pyrit können in den meisten Kieselkalken nachgewiesen werden. Chlorit tritt ausschliesslich in Kieselkalken des Berner Oberlands und im Wallis auf. Die mineralogische Zusammensetzung der Kieselkalke kann sowohl in der lateralen als auch vertikalen Ausdehnung einer Abfolge stark variieren.

An geätzten Proben wurde im Rasterelektronenmikroskop der Aufbau der Kieselkalke untersucht. Zwischen den

vier Varietäten des Kieselkalks der Schweiz wurden keine wesentlichen Unterschiede festgestellt. Das Gesteinsgefüge variiert aber mit dem Anteil an authigenem Quarz bzw. Kalzit. Kieselkalke mit geringen authigenen Quarzgehalten zeigten eine lokale, partielle Verkieselung. Mit zunehmender Verkieselung werden quarzreiche Partien engmaschiger verbunden und der Aufbau homogener. Ab einem Gesamtquarzgehalt von  $>30$  Gew.-% wurde eine engmaschige Verkieselung mit Gerüstcharakter beobachtet, welche vollkommen homogen durch das Gestein verläuft.

Die einachsige Druckfestigkeitsprüfung an intakten Probenzylindern zeigt, dass es sich bei ausgewählten Kieselkalken um Hartsteine handelt. Die Druckfestigkeitswerte lagen bei einem Gesamtquarzgehalt von 12 bis 44 Gew.-% in einem Bereich zwischen 180 und 340 MPa. Die Druckfestigkeit stieg mit zunehmendem Quarzgehalt, wobei für Kieselkalke mit Wackestone-Gefüge eine lineare Korrelation besteht.

Die Untersuchung von Kieselkalken mit dem LCPC Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch (AFNOR P18-579) ergibt, dass Kieselkalke schwach brechbar (LBK 16–31) bis brechbar (LBK 31–50) sind. Die durchschnittlichen Brechbarkeitskoeffizienten betragen 26–31. Gegenüber anderen Hartsteinen und potenziellen Schweizer Hartsteinen zeigten drei der vier Varietäten im Mittel tiefere Brechbarkeitswerte und dementsprechend Potenzial für Produkte höchster Qualität.

Zwischen dem Brechbarkeitsverhalten und der einachsigen Druckfestigkeit wurde eine lineare Korrelation festgestellt. Unter Einbezug des Quarzes wurde aufgezeigt, dass Kieselkalke mit einem Quarzgehalt  $>25$  Gew.-% Druckfestigkeitswerte  $>250$  MPa und Brechbarkeitswerte  $>26$  erreichen.

Über die Korrelation mit dem Schotter-Los-Angeles-Prüfverfahren wurde mit dem Brechbarkeitsversuch eine Differenzierung von Kieselkalken und anderen Gesteinen, die heute als Hartstein für Schotter I verwendet werden, in zwei Kategorien festgestellt. Kieselkalke werden dabei zu den beständigsten Gesteinen gezählt. Diese Differenzierung lässt vermuten, dass in verschiedenen Bereichen, wo heute Hartsteine verwendet werden, Unterschiede in der Beständigkeit der Gesteinskörnungen beobachtet werden können.

Kieselkalke zeigten in Abhängigkeit des Gefüges und den Mineralgehalten unterschiedliche Brechbarkeit. Der Verkieselungsanteil und der Verkieselungsaufbau wirkten sich wesentlich auf das Verhalten gegenüber mechanischer Beanspruchung aus. Je kleiner der Verkieselungsanteil, desto mehr kalzitische Partien wurden beobachtet. Dementsprechend verhielten sich Kieselkalke mit sehr geringem Quarz-

anteil ähnlich wie druckfeste und brechresistente Kalke. Die Festigkeit des gegenseitigen Verbandes der Mikroquarzkörner wie auch der Kombinationsaufbau von Quarz und Kalzit mit Gerüstcharakter sind von grösster Bedeutung.

Die detaillierte Erfassung von Heterogenitäten im Aufbau sowie von potenziellen Schwachzonen erlauben eine Einschätzung des Verhaltens unter mechanischer Beanspruchung. Unter Kombination folgender Kriterien können Kieselkalke aufgeführt werden, welche für die Herstellung von Hartsteinkörnungen besonders geeignet sind:

- Kieselkalke, die als Wackestones klassifiziert wurden.
- Kieselkalke mit wenig Heterogenitäten, parallelen Einregelung von Mineralen, Schwachzonen, Klüften usw.
- Kieselkalke, die einen Quarzgehalt >30 Gew.-% aufweisen.

Diese Ergebnisse können wesentlich zum mineralogisch-petrographischen Verständnis der Kieselkalke beitragen und als wissenschaftliche Grundlage zu Diskussionen über die Nutzung von Hartsteinvorkommen dienen.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen auf, dass mit dem LCPC Abrasivitäts- und Brechbarkeitsversuch ein Prüfverfahren vorliegt, welches nicht nur bei der Materialbewirtschaftung von Ausbruchsmaterial genutzt werden kann, sondern eine Klassierung von Festgesteinen in Hartsteine, Mittelhart- und Weichsteine zulässt. Die Klassierung erfolgt ausschliesslich über den Brechbarkeitskoeffizienten. Das Prüfverfahren ist anwendungsfreundlich, für alle Gesteinsarten gültig und weist gegenüber dem heute international genutzten Los-Angeles-Prüfverfahren Vorteile auf. Bereits kleine Probenmengen ermöglichen Aussagen über die Qualitätseigenschaften der Rohstoffvorkommen und die Resultate können schnell und einfach ermittelt werden.

## 12.2 Ausblick

Bei der Erarbeitung und Umsetzung des Projekts ergaben sich Fragen und Forschungsbereiche, die im Rahmen der vorliegenden Studie nicht behandelt werden konnten. Die nachfolgende Zusammenstellung erfasst Fragestellungen, deren Bearbeitung zu einem erweiterten Verständnis der Kieselkalke und der Hartsteine im Allgemeinen beitragen würden:

- Die Untersuchung des Brechbarkeitsverhaltens hat gezeigt, dass sich Kieselkalke gegenüber anderen Hartsteinen bzw. Hartsteingruppen unterschiedlich verhalten. Hier drängt sich die Frage auf, ob dieses Verhalten auch in der Praxis zu beobachten ist. Fallen zum Beispiel bei Geleiseanlagen, in denen Schotter aus Kieselkalk verwendet wurde, weniger Unterhaltsarbeiten an? Kann gegenüber anderen Hartsteinarten ein längerer Lebenszyklus festgestellt werden?
- Zum einen haben die Untersuchungen der Kieselkalkvarietäten mittels Röntgendiffraktometrie ergeben, dass die Mineralanteile zum Teil grosse Variabilität aufweisen. Zum anderen wird im Bezug auf die Verwendung der Hartsteine in Deckschichten seit Jahrzehnten die Polierbarkeit geprüft (PSV nach EN 1097-8). Daher stellt sich die Frage, ob zwischen dem Mineralgehalt und der

Polierbarkeit ein einfacher Zusammenhang besteht. Sind Kieselkalke mit hohem Quarzgehalt weniger polierbar als jene, in denen der Quarzanteil geringer ist? Allenfalls kann mit dieser Fragestellung auch der Einfluss des Schichtsilikatgehalts eruiert werden. Die Bearbeitung dieser Thematik ist wichtig, weil zusammen mit den Beobachtungen aus dem Brechbarkeitsverhalten und nachfolgenden Fragestellungen eine optimierte Nutzung von Kieselkalcken und Hartsteinen im Verkehrsinfrastrukturwesen erreicht werden könnte.

- Im Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Gesteinen ist die Prüfung der Verwitterungsbeständigkeit relevant. Die heute genutzten Kieselkalke werden erfahrungsgemäss als sehr verwitterungsresistent bezeichnet (EMPA 1993). Unter Berücksichtigung der Mineralanteile und des Aufbaus der Kieselkalke sollte die Verwitterungsbeständigkeit aber in einer Studie neu untersucht werden. Dabei soll vor allem untersucht werden, ob Kieselkalke einen Mindestgehalt an witterungsbeständigen Mineralen aufweisen müssen, damit sie den Anforderungen der Verwitterungsbeständigkeit entsprechen.
- Bei der Belastung im Schotterbett oder Strassenbelag erfahren die Gesteine nicht nur Druckbeanspruchung, sondern auch Biegezug- und Scherbeanspruchung (vgl. DE QUERVAIN 1967). Da die Lebensdauer des Gesteins wesentlich von diesen Beanspruchungen abhängt, wären weiterführende Untersuchungen an Hartsteinen und speziell an unterschiedlich stark verkieselten Kieselkalcken hilfreich. Besonders der Untersuchung der Biegezugfestigkeit wird eine grosse Bedeutung zugeschrieben. Diese kann mit Prüfverfahren, die in der Natursteinindustrie angewandt werden, standardmässig ermittelt werden.
- Da der Verkieselungsanteil in Kieselkalcken innerhalb mehrerer Meter variiert, bedarf es einer Detailuntersuchung. Mit dieser Untersuchung soll dargestellt werden, wie sich die Verkieselung in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung verändert. Wichtig ist zu erfassen, welche Unterschiede in lateraler und vertikaler Ausdehnung einer Kieselkalkabfolge beobachtet werden können. Die Resultate einer solchen Untersuchung sind für die Prospektion und Qualitätsabschätzung des Rohstoffs von grösster Bedeutung.
- Zwischenschichten, wie sie in jeder Kieselkalkabfolge mehr oder weniger mächtig ausgebildet sind, sollten weiter untersucht werden. Die Genese, die Zusammensetzungen, die mechanischen Eigenschaften, und letztlich auch die Bedeutung der Zwischenschichten für Produktion von hochwertigen Materialien sind noch heute weitgehend unbekannt.
- Ferner sollte auch die Rolle der Kieselkalke bei der Alkali-Aggregat-Reaktion abgeklärt werden. Diesbezüglich gibt es bereits Studien, in denen Kieselkalke miteinbezogen wurden. Fraglich ist, ob sich alle Kieselkalke ähnlich reaktiv verhalten, oder ob es Kieselkalke gibt, bei denen die Reaktivität weniger stark ausfällt.
- Analog zu den detaillierten Untersuchungen der Kieselkalke sollte in weiteren Forschungsarbeiten das Hartsteinpotenzial von Flysch-, Glaukonit- und Molasse-sandsteinen erforscht werden.





## Anhang A:

### Normen und Bestimmungen

Bei der Produktion von Hartsteinen für den Strassen- und Bahnbau sowie als Zuschlagstoff für Beton richten sich die Unternehmen in der Schweiz nach folgenden Normen (SN: Schweizer Norm; EN: Europäische Norm):

- SN 670 102 / EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton
- SN 670 103 / EN 13043: Gesteinskörnungen für Asphal- te und Oberflächenbehandlungen für Strassen, Flug- plätze und andere Verkehrsflächen
- SN 670 110 / EN 13450: Gesteinskörnungen für Gleis- schotter

In diesen Normen wird für die Qualitätsprüfung auf weitere Normen verwiesen. Dabei kommen hauptsächlich nachstehende Normen zur Anwendung:

- EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaf- ten von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrössenverteilung – Siebverfahren, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- EN 933-3: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaf- ten von Gesteinskörnungen – Teil 3: Bestimmung der Kornform; Plattigkeitszahl, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- EN 933-4: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaf- ten von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- EN 1067-2: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnun- gen – Teil 2: Magnesiumsulfat-Verfahren , Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- EN 1097-2: Prüfverfahren für mechanische und physi- kalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung (Los-Angeles-Versuch), Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physi- kalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6:

Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel

- EN 1097-8: Prüfverfahren für mechanische und physi- kalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 8: Bestimmung des Polierwertes (PSV), Europäisches Ko- mittee für Normung, Brüssel
- SN 670115: Qualitative und quantitative Mineralogie und Petrographie von Gesteinskörnungen, Schweizeri- sche Normen-Vereinigung, Winterthur

Hinweise: Entsprechend der CEN/CENELEC-Ge- schäftsordnung ist das nationale Normungsinstitut der Schweiz gehalten, Europäische Normen zu übernehmen. Durch die in den Normen vorgeschriebenen Prüfverfahren werden mechanische und physikalischen Eigenschaften von Gesteinen und Gesteinskörnungen festgestellt. Grenz- werte, die in den Normen oder in den Regelwerken festge- halten sind, zeigen auf, ob ein Gestein als Werkstoff für einen bestimmten Anwendungsbereich geeignet ist. Die Grenzwerte werden laufend den Anforderungen angepasst.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit sind ausserdem folgende Normen und Regelwerke aufzuführen:

- EN 1926, 1999: Prüfverfahren für Naturstein. Bestim- mung der Druckfestigkeit, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- AFNOR P 18-579, 1990: Granulats – essai d'abrasivité et de broyabilité, Association Française de Normalisation, Paris
- R RTE 21110: Unterbau und Schotter Normalspur, Re- gelwerk Technik Eisenbahn RTE, Verband öffentlicher Verkehr, Schweiz

Für einen Überblick über die angewandten Normen und Bestimmungen zur geologisch-technischen Bewer- tung von mineralischen Baurohstoffen sei auf LORENZ & GWOSDZ (2003) verwiesen.

## Anhang B:

### Kartenmaterial

Folgendes Kartenmaterial wurde verwendet:

Geologischer Atlas der Schweiz 1: 25 000,  
Bundesamt für Landestopographie swisstopo,  
Landesgeologie

GA 6	Lauterbrunnen, 1933
GA 8	Val-d'Illiez, 1934
GA 32	Gemmi, 1956
GA 35	St-Léonard, 1959
GA 37	Monthey, 1960
GA 39	Tesserete, 1962
GA 41	Lenk, 1962
GA 47	Montreux, 1965
GA 58	Dt de Morcles, 1971
GA 64	Les Mosses, 1974
GA 69	Lugano, 1976
GA 75	Eggiwil, 1980
GA 78	Säntis, 1982
GA 81	Albulapass, 1987
GA 83	Schächental, 1987
GA 87	Adelboden, 1993
GA 88	Les Diablerets, 1991
GA 92	Châtel-St-Denis, 1993
GA 106	Walensee, 2003
GA 115	Gruyères, 2004
GA 116	Rigi, 2006

Geologische Spezialkarten 1: 25 000 oder 1: 50 000,  
Bundesamt für Landestopographie swisstopo,  
Landesgeologie

GS 9	Carte Géologique du Pays D'enhaut Vaudois, 1: 50 000
GS 43	Geologische Karte der Gebirge zwischen Lauterbrunnenthal, Kanderthal und Thunersee, 1: 50 000, 1905
GS 55	Geologische Karte des Gebirges zwischen Engelberg und Meiringen, 1: 50 000, 1909
GS 56	Geologische Karte der Gebirge nördlich von Interlaken, 1: 50 000, 1909
GS 63	Geologische Karte der Alpen zwischen Linthgebiet und Rhein, 1: 50 000, 1920
GS 66	Geologische Vierwaldstättersee-Karte, 1: 50 000, 1916
GS 76	Geologische Karte der Schratzenfluh, 1: 25 000, 1913
GS 80	Geologische Karte der Alvier-Gruppe, 1: 25 000, 1917
GS 84	Axendecke (Urirotstockgruppe-Isental), 1: 50 000, 1918
GS 91	Geologische Karte des Schafmatt-Schimberggebietes, 1: 25 000, 1919
GS 95	Geologische Karte und Profile des Brienzergrates, 1: 50 000, 1921
GS 96	Geologische Karte Thun – Stockhorn, 1: 25 000, 1922
GS 117	Geologische Karte des Kantons Glarus, 1: 50 000, 1942

Geotechnische Karte der Schweiz 1: 200 000,  
Schweizerische Geotechnische Kommission

Blatt 1	Neuchâtel – Bern – Basel, 1964
Blatt 2	Luzern – Zürich – St. Gallen – Chur, 1963
Blatt 3	Genève – Lausanne – Sion, 1967
Blatt 4	Bellinzona – St. Moritz

Geologische Karte der Schweiz 1: 500 000,  
Bundesamt für Landestopographie swisstopo,  
Landesgeologie

Anhang C: Übersichtstabelle technisch-wissenschaftlicher Teil

Probe	Gestein	Stratigraphische Bezeichnung	Koordinaten (CH1903)	Klassifizierung Dunham	M/S	Korn- grösse (mm)	Pot. Schw.- zonen	Eingere- geltes Gefüge	Homogener Aufbau	CC	OZ total	ANK	PG	MUSK	CHL	GLAU	Det. OZ	Auth. OZ	LAK	LBK	Prop - Bruch Grenze
KK1	Kieselkalk	Hauterivien	6451.44/191.590																		
KK2	Kieselkalk	Hauterivien	671.558/193.572	Packstone	0,5	0,30	x	teilweise	nein	69,4	28,3	1,4	0,3	0,6	-	0,5	3,7	24,6	76	30,3	
KK3	Kieselkalk	Hauterivien	673.203/194.423	Wackestone	3,0	0,10	xx	nein	nein	60,2	36,4	2,3	0,3	0,7	-	0,1	3,2	33,2	516	28,7	
KK4	Kieselkalk	Hauterivien	671.558/193.572																		
KK5	Kieselkalk	Hauterivien	672.995/194.485																		
KK6	Kieselkalk	Hauterivien	754.351/219.378	Wackestone	6,0	<0,1	xx	nein	ja	70,9	27,4	1,2	0,2	0,2	-	-	5,1	22,3	210	26,7	
KK7	Kieselkalk	Hauterivien	756.970/213.529	Packstone	0,3	0,10	xx	teilweise	ja	45,1	50,1	3,0	0,2	1,6	-	0,1	7,2	42,9	486	30,4	
KK8	Kieselkalk	Hauterivien	727.342/222.579	Wackestone						45,9	44,2	6,3	0,5	3,0	-	-	4,8	39,3			
KK9	Kieselkalk	Hauterivien	728.890/222.173	Wackestone						55,1	41,4	2,0	0,4	1,1	-	0,1	1,7	39,7			
KK10	Kieselkalk	Hauterivien	722.638/217.167	Wackestone	5,0	<0,1	-	nein	nein	47,7	43,0	3,9	0,7	4,7	-	-	2,0	41,0	690	22,5	295 316
KK11	Kieselkalk	Hauterivien	686.889/206.224	Wackestone	10,0	<0,1	(x)	nein	nein	65,4	32,3	0,9	0,3	1,1	-	0,1	0,2	32,1	678	24,3	267 279
KK12	Kieselkalk	Hauterivien	685.858/205.821	Packstone	0,5	0,35	-	nein	ja	82,5	16,0	1,3	0,2	0,0	-	0,2	4,3	11,6	174	27,3	
KK13	Kieselkalk	Hauterivien	695.130/204.958	Packstone	0,2	0,20	(x)-x	nein	ja	79,5	17,4	1,4	0,4	1,2	-	0,2	3,3	14,1	138	27,8	
KK14	Kieselkalk	Hauterivien	689.716/199.510	Packstone						77,3	17,1	3,6	0,4	1,6	-	3,6	5,1	12,0			
KK15	Kieselkalk	Hauterivien	687.512/203.567	Packstone						58,4	32,7	6,3	0,5	2,0	-	0,2	2,3	30,4			
KK16	Kieselkalk	Hauterivien	685.832/203.296	Wackestone	3,0	<0,1	(x)	teilweise	nein	63,3	32,6	1,9	0,6	1,6	-	1,2	1,6	31,0	414	24,6	
KK17	Kieselkalk	Hauterivien	653.050/199.373	Wackestone						66,9	30,4	2,3	0,2	0,2	-	0,1	1,0	29,4			
KK18	Kieselkalk	Hauterivien	638.825/183.340	Wackestone	4,0	<0,1	x	nein	nein	57,4	39,0	2,1	0,3	1,1	-	0,1	0,6	38,4	608	23,6	291 307
KK19	Kieselkalk	Hauterivien	633.010/171.510	Wackestone						54,5	40,5	2,5	0,3	2,1	-	-	0,2	40,3			
KK20	Kieselkalk	Hauterivien	668.080/202.020	Wackestone	3,0	0,10	xx	ja	nein	42,3	45,5	5,8	1,2	5,2	-	0,2	8,4	37,1	564	26,3	
KK21	Kieselkalk	Hauterivien	669.788/204.772	Wackestone	1,0	0,15	x	nein	nein	58,7	35,3	4,9	0,3	0,8	-	-	2,1	33,2	424	23,8	
KK22	Kieselkalk	Hauterivien	669.823/204.734	Packstone						81,9	15,5	1,5	0,4	0,8	-	0,2	1,3	14,2			
KK23	Kieselkalk	Hauterivien	669.760/204.694	Wackestone	2,0	0,10	x	nein	nein	54,6	41,2	3,1	0,3	0,8	-	0,1	1,7	39,5	256	25,9	
KK24	Kieselkalk	Hauterivien	689.598/209.129	Packstone	0,3	0,20	x	teilweise	nein	65,0	31,7	2,0	0,3	1,0	-	0,6	11,0	20,7	202	26,9	
KK25	Kieselkalk	Hauterivien	659.594/188.049							52,9	43,8	1,7	0,4	1,2	-	-	0,2	43,6			
KK26	Kieselkalk	Hauterivien	631.699/168.717	Wackestone	1,5	<0,1	x	ja	nein	53,2	40,2	4,6	0,3	1,6	-	-	1,8	38,4	362	23,9	
KK28	Kieselkalk	Hauterivien	611.741/152.055	Wackestone	3,0	0,20	(x)	nein	nein	78,3	18,3	2,9	0,3	0,1	0,1	-	0,2	18,1	92	27,5	233 248
KK29	Kieselkalk	Hauterivien	618.277/148.804	Packstone	1,0	0,10	x	ja	nein	76,0	23,4	0,1	0,0	0,0	0,6	-	20,0	3,4	182	30,6	
KK30	Kieselkalk	Hauterivien	565.569/120.271	Wackestone	1,0	0,10	xx	nein	ja	60,5	34,7	0,7	0,1	1,0	2,9	-	17,8	16,9	408	26,8	
KK31	Kieselkalk	Hauterivien	685.122/203.314	Wackestone	2,0	0,15	(x)	nein	ja	62,5	34,2	1,2	0,5	1,5	-	2,7	6,1	28,1	388	26,8	
KK32	Kieselkalk	Hauterivien	585.201/118.701	Packstone	0,5	0,10	xx	ja	ja	64,8	32,8	0,0	0,2	0,4	1,7	-	8,1	24,7	244	28,6	
KK33	Kieselkalk	Hauterivien	585.249/118.529	Packstone						36,5	54,5	0,0	1,1	0,0	7,9	-	10,0	44,5			



Probe	Gestein	Stratigraphische Bezeichnung	Koordinaten (CH1903)	Klassifizierung Dunham	M/S	Korn- grösse (mm)	Pot. Schw.- zonen	Eingere- geltes Gefüge	Homogener Aufbau	CC	OZ total	ANK	PG	MUSK	CHL	GLAU	Det. OZ	Auth. OZ	LAK	LBK	Prop.- Bruch Grenze
KK34	Kieselkalk	Hauterivien	625.479/170.288	Packstone	1,0	0,10	x	teilweise	nein	56,8	34,7	2,9	0,6	3,6	1,4	-	0,2	34,5	448	29,2	
KK35	Kieselkalk	Hauterivien	625.082/170.314	Wackestone	3,0	<0,1	-	ja	ja	42,6	43,1	7,8	0,8	4,9	0,7	0,1	0,2	43,0	308	28,0	
BKK1	Kieselkalk	Hauterivien	669.418/202.720	Wackestone						61,9	35,1	2,3	0,2	0,5	-	0,1	0,9	34,2			
BMKK1	Kieselkalk	Hauterivien	618.047/151.769																		
BMKK2	Kieselkalk	Hauterivien	618.047/151.769																		
HKK1	Kieselkalk	Hauterivien	631.787/169.524																		
HVKK1	Kieselkalk	Hauterivien	566.420/120.650																		
HVKK2	Kieselkalk	Hauterivien	566.400/120.715																		
Kehr1	Kieselkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
Kehr2	Kieselkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
Kehr5	Kieselkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
Kehr6	Kieselkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
Kehr7	Kieselkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
Kehr8	Kieselkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
Pityp1	Kieselkalk	Hauterivien	661.789/203.548																		
Pityp2	Kieselkalk	Hauterivien	661.801/203.559																		
Pityp3	Kieselkalk	Hauterivien	661.838/203.554																		
Pityp4	Kieselkalk	Hauterivien	661.855/203.512																		
Pityp5	Kieselkalk	Hauterivien	661.875/203.528																		
SKK1	Kieselkalk	Hauterivien	736.239/228.146	Wackestone						59,4	36,2	2,7	0,4	1,3	-	0,1	3,5	32,7			
LKK1	Kieselkalk	Lias	721.253/81.036	Wackestone	5,0	<0,1	(x)	ja	nein	54,9	39,7	5,0	0,2	0,2	-	-	-	39,7	450	25,0	
LKK2	Kieselkalk	Lias	720.837/91.146																		
LKK3	Kieselkalk	Lias	720.851/91.226																		
LKK4	Kieselkalk	Lias	719.640/93.944	Wackestone						32,5	54,6	12,7	0,2	0,1	-	-	-	54,6			
LKK5	Kieselkalk	Lias	719.551/93.851																		
LKK6	Kieselkalk	Lias	721.543/96.414	Wackestone						74,6	18,7	6,1	0,1	0,6	-	-	-	18,7			
LKK7	Kieselkalk	Lias	721.431/96.326	Wackestone	3,0	<0,1	(x)	ja	nein	61,5	28,5	8,9	0,3	0,7	-	-	-	28,5	178	26,1	
LKK8	Kieselkalk	Lias	721.214/80.989	Wackestone	4,0	<0,1	(x)	ja	nein	49,2	35,4	11,5	0,7	3,2	-	-	-	35,4	258	25,4	
LKK9	Kieselkalk	Lias	721.160/80.987	Packstone	1,0	0,10	-	ja	nein	72,8	22,3	3,8	0,4	0,6	-	-	-	22,3	104	27,7	230
LKK10	Kieselkalk	Lias	723.552/81.618	Packstone						65,4	30,1	3,7	0,3	0,5	-	-	-	30,1			
LKK11	Kieselkalk	Lias	723.915/83.290	Wackestone																	
LKK12	Kieselkalk	Lias	732.375/83.750	Wackestone						50,4	35,2	10,4	0,7	3,2	-	-	-	35,2			
LKK13	Kieselkalk	Lias	727.895/80.080	Wackestone	4,0	<0,1	(x)	teilweise	nein	54,9	38,5	4,7	0,6	1,3	-	-	-	38,5	374	24,8	299
LKK14	Kieselkalk	Lias	720.297/95.835	Wackestone						41,8	31,3	22,2	0,6	4,1	-	-	-	31,3			
LKK15	Kieselkalk	Lias	720.305/95.835							76,1	20,4	1,3	0,1	2,0	-	-	-	20,4			

Probe	Gestein	Stratigraphische Bezeichnung	Koordinaten (CH1903)	Klassifizierung Dunham	M/S	Korn- grösse (mm)	Pot. Schw.- zonen	Eingere- geltes Gefüge	Homogener Aufbau	CC	OZ total	ANK	PG	MUSK	CHL	GLAU	Det. OZ	Auth. OZ	LAK	LBK	Prop.- Grenze	Bruch
LKK16	Kieselkalk	Lias	722.093/96.954	Wackestone	3,0	<0,1	xx	teilweise	nein	74,6	12,1	12,6	0,4	0,3	-	-	-	12,1	140	26,9	195	200
LKK17	Kieselkalk	Lias	559.770/143.959	Packstone	0,5	0,10	(x)	nein	nein	73,8	15,8	4,5	0,3	2,1	3,4	-	0,1	15,7	14	28,8		
LKK18	Kieselkalk	Lias	561.089/144.337	Mudstone	15,0	<0,1	(x)	nein	nein	77,2	14,7	3,9	0,4	2,3	1,3	-	0,1	14,7	22	32,9		
LKK19	Kieselkalk	Lias	573.224/158.740	Wackestone						21,7	64,2	8,9	0,4	3,4	1,3	-	1,5	62,7				
LKK21	Kieselkalk	Lias	560.265/142.532	Wackestone	0,5	0,15	xx	ja	nein	33,8	54,3	8,0	0,7	1,0	2,1	-	2,3	52,0	388	25,0		
LKK22	Kieselkalk	Lias	561.157/142.280	Packstone	0,3	0,20	xx	nein	nein	62,0	29,3	6,4	0,4	0,1	1,7	-	4,2	25,1	356	27,4		
LKK24	Kieselkalk	Lias	561.091/136.574	Packstone						58,3	35,6	3,6	0,5	1,9	-	-	0,1	35,5				
LKK25	Kieselkalk	Lias	561.091/136.574																			
LKK26	Kieselkalk	Lias	561.091/136.574	Wackestone	2,0	<0,1	xx	ja	ja	41,5	49,0	0,1	1,2	2,8	5,3	-	0,2	48,8	526	28,7	173	177
VKK1	Kieselkalk	Valanginien	636.118/173.382	Mudstone	15,0	<0,1	xx	teilweise	nein	71,5	25,1	1,5	0,3	1,5	-	-	0,2	24,9	110	29,7	195	208
VKK2	Kieselkalk	Valanginien	631.990/168.680	Packstone	0,3	0,30	x	teilweise	nein	92,3	7,0	0,3	0,1	0,3	-	-	0,3	6,8	6	34,9		
VKK3	Kieselkalk	Valanginien	636.118/173.393	Wackestone						69,3	27,4	1,4	0,3	1,6	-	-	0,2	27,2				
VKK4	Kieselkalk	Valanginien	636.112/173.388																			
VKK5	Kieselkalk	Valanginien	636.118/173.393																			
VKK6	Kieselkalk	Valanginien	636.086/173.382																			
VKK7	Kieselkalk	Valanginien	636.067/173.367																			
VKK8	Kieselkalk	Valanginien	636.067/173.367																			
KK27	Kieselkalk	Valanginien	631.601/168.274	Wackestone	8,0	0,10	(x)	nein	nein	84,1	14,2	1,3	0,2	0,2	-	-	1,3	12,9	0	28,6		
FLY1	Flyschschiefer	Frühes Oligozän	731.880/203.320																			
FLY2	Flyschsandstein	Frühes Oligozän	731.880/203.320																			
FLY3	Flyschsandstein	Eozän – Oligozän	689.455/192.006																1636	31,6		
FLY4	Flyschsandstein	Eozän – Oligozän	689.160/192.246																1732	29,8		
FLY5	Flyschsandstein	Eozän	660.481/197.850																			
FLY6	Flyschsandstein	Eozän	660.481/197.850																1412	39,2		
FLY7	Flyschsandstein	Eozän	660.481/197.850																			
FN	Molassesandstein	Frühes Oligozän	564.050/120.250																1123	30,3		
FS	Molassesandstein	Frühes Oligozän	564.250/120.220																284	28,9		
FARR	Meta-Rhyolith	Ober-O./Perm	774.619/169.403																1050	31,7		
Campiun	Glaukonitsandstein	Gault s.l.	7545.68/223.084																			
GLAU1	Glaukonitsandstein	Gault s.l.	754.942/220.213																			
GLAU2	Glaukonitsandstein	Aptien	728.000/222.621																1774	28,9		
GLAU3	Glaukonitsandstein	Aptien	728.000/222.621																			

Probe	Gestein	Stratigraphische Bezeichnung	Koordinaten (CH1903)	Klassifizierung Dunham	M/S	Korn- grösse (mm)	Pot. Schw.- zonen	Eingere- geltes Gefüge	Homogener Aufbau	CC	OZ total	ANK	PG	MUSK	CHL	GLAU	Det. OZ	Auth. OZ	LAK	LBK	Prop.- Bruch Grenze
GLAU4	Glaukonitsandstein	Albien	682.546/202.422																		
GLAU5	Glaukonitsandstein	Albien	681.162/201.475																		
OKK1	Kieselkalk	Lias-Dogger	787.757/163.143																		
OKK2	Kieselkalk	Lias-Dogger	787.758/163.143																		
OKK3	Kieselkalk	Lias-Dogger	784.277/161.704																		
OKK4	Kieselkalk	Lias-Dogger	784.277/161.704																		
LKK20	Grès siliceux	Lias	580.746/113.817																		
Kehr3	Schrattenkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
Kehr4	Schrattenkalk	Hauterivien	669.870/204.725																		
VK1	Kalk	Valanginien	566.007/118.490																		
LKK23	Kalk	Lias	561.670/137.482																		
SBB2	Kieselkalk																		256	27,8	
SBB3	Kieselkalk																		816	24,7	
SBB6	Kieselkalk																		598	27,7	
SBB8	Kieselkalk																		400	29,0	
SBB10	Kieselkalk																		302	26,6	
SBB12	Kieselkalk																		342	26,3	
SBB13	Kieselkalk																		266	28,0	
SBB15	Kieselkalk																		248	27,6	
SBB18	Kieselkalk																		671	25,5	
SBB21	Kieselkalk																		416	25,1	
SBB22	Kieselkalk																		450	26,5	
SBB1	Mikrogranit																		1804	28,2	
SBB4	Ganggranit/Gneis																		1591	31,2	
SBB11	Ganggranit/Gneis																		1364	31,0	
SBB17	Ganggranit/Gneis																		1640	30,8	
SBB5	Flyschsandstein																		1534	30,3	
SBB7	Flyschsandstein																		1611	30,0	
SBB16	Flyschsandstein																		1511	29,5	
SBB23	Flyschsandstein																		1466	30,6	
SBB9	Molassesandstein																		968	31,1	
SBB14	Molassesandstein																		1036	30,5	
SBB19	Molassesandstein																		1026	31,7	



### **Bemerkung zu Proben**

Bei den Proben OKK1–OKK4 handelt es sich um kieselige Kalke und Kieselkalke aus den Ostalpinen Decken. Auf Grund ihrer, tektonisch bedingt, gestörten Ausbildung wurden die Gesteine nicht genauer analysiert und in die Studie miteinbezogen (Beprobungsgebiet nördlich und südlich der Albulapasstrasse (Ober- und Unterostalpin). Dünnschliffe dieser Proben sind vorhanden.

Bei den Proben LKK20, Kehr3, Kehr4, VK1, LKK23 handelt es sich um Gesteine aus dem Liegenden und Hangenden von Kieselkalkabfolgen. Sie wurden als Vergleich zu den eigentlichen potenziellen Hartsteinabfolgen im Dünnschliff untersucht, jedoch nicht weiter abgehandelt.

## Anhang D: Röntgendiffraktogramme (XRD)

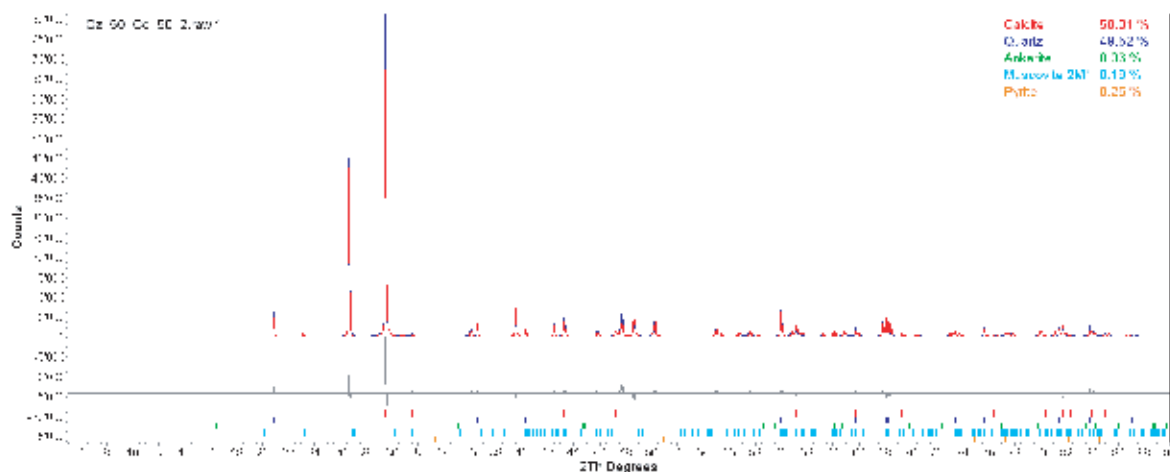
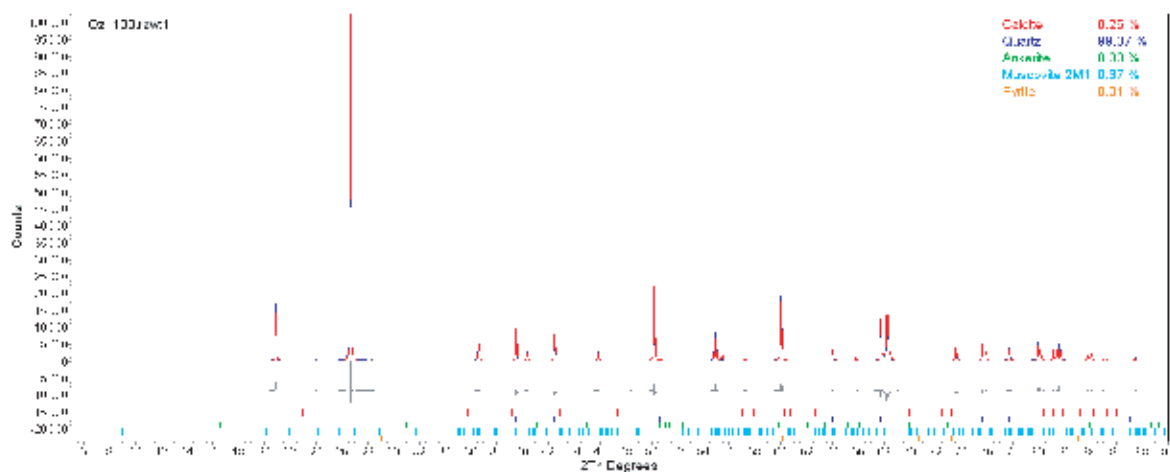
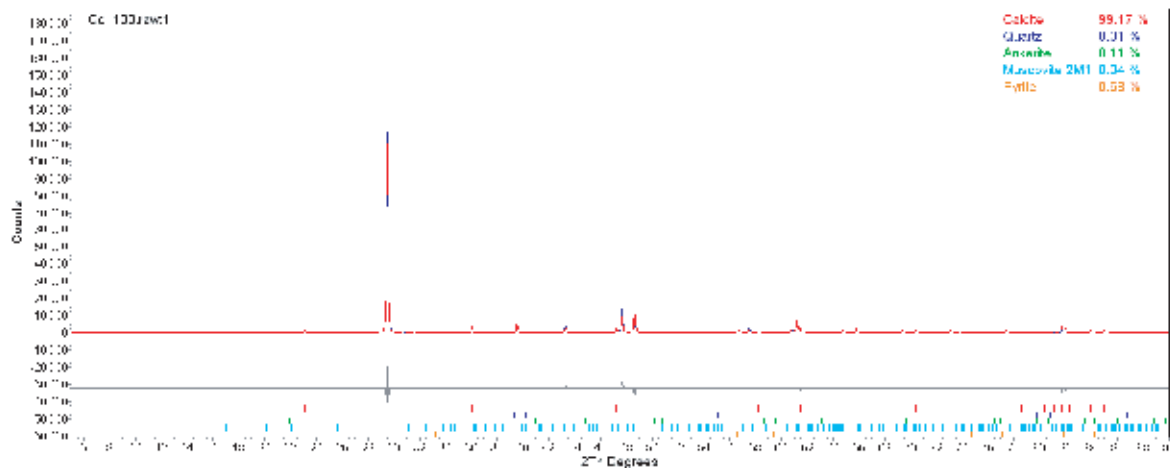
### Bemerkung zu den Diffraktogrammen

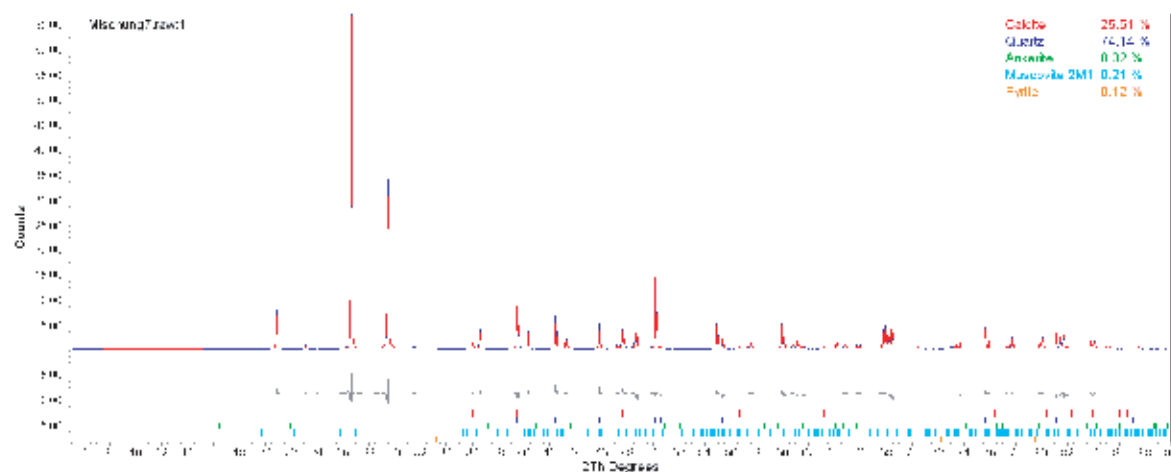
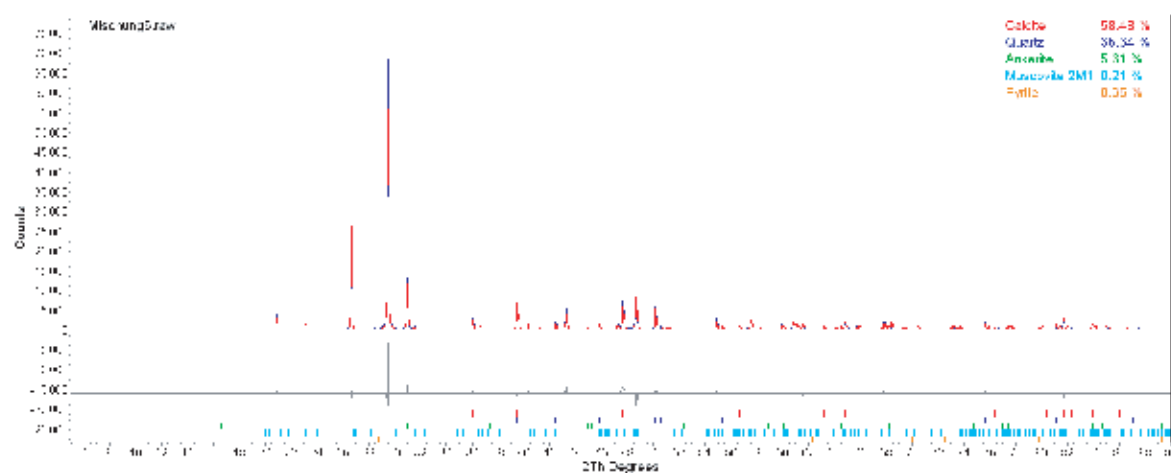
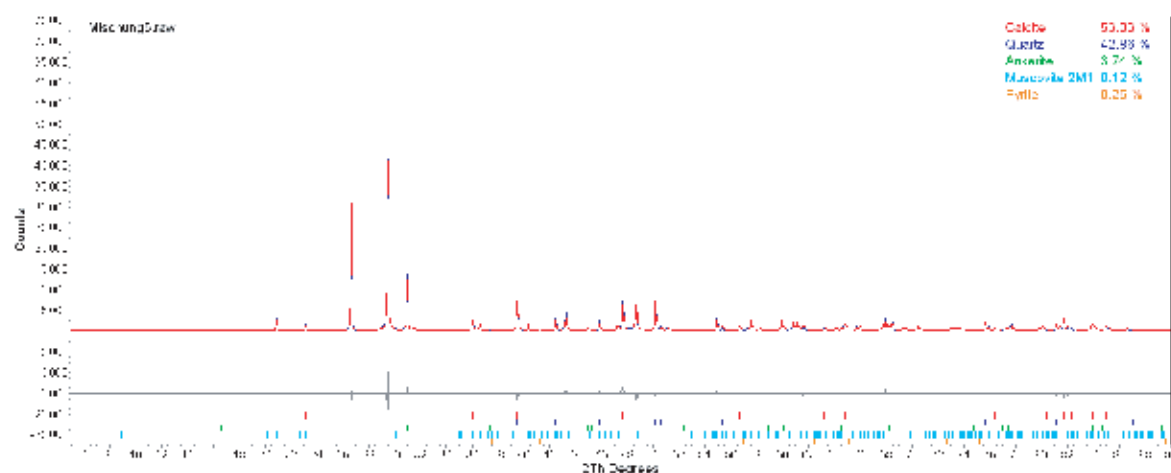
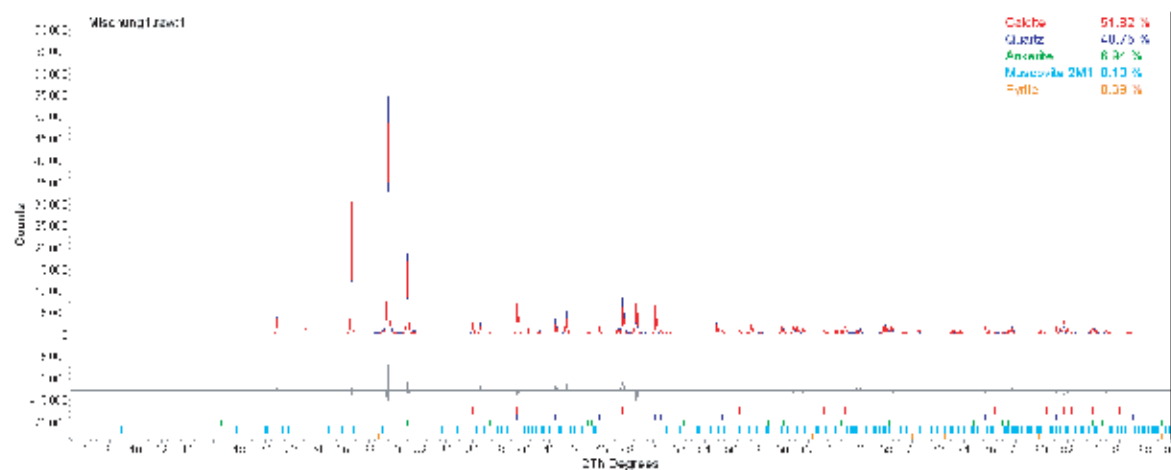
Die gemessenen Diffraktogramme sind blau dargestellt.

Die berechneten Diffraktogramme sind rot dargestellt.

Die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Diffraktogrammen ist grau dargestellt.

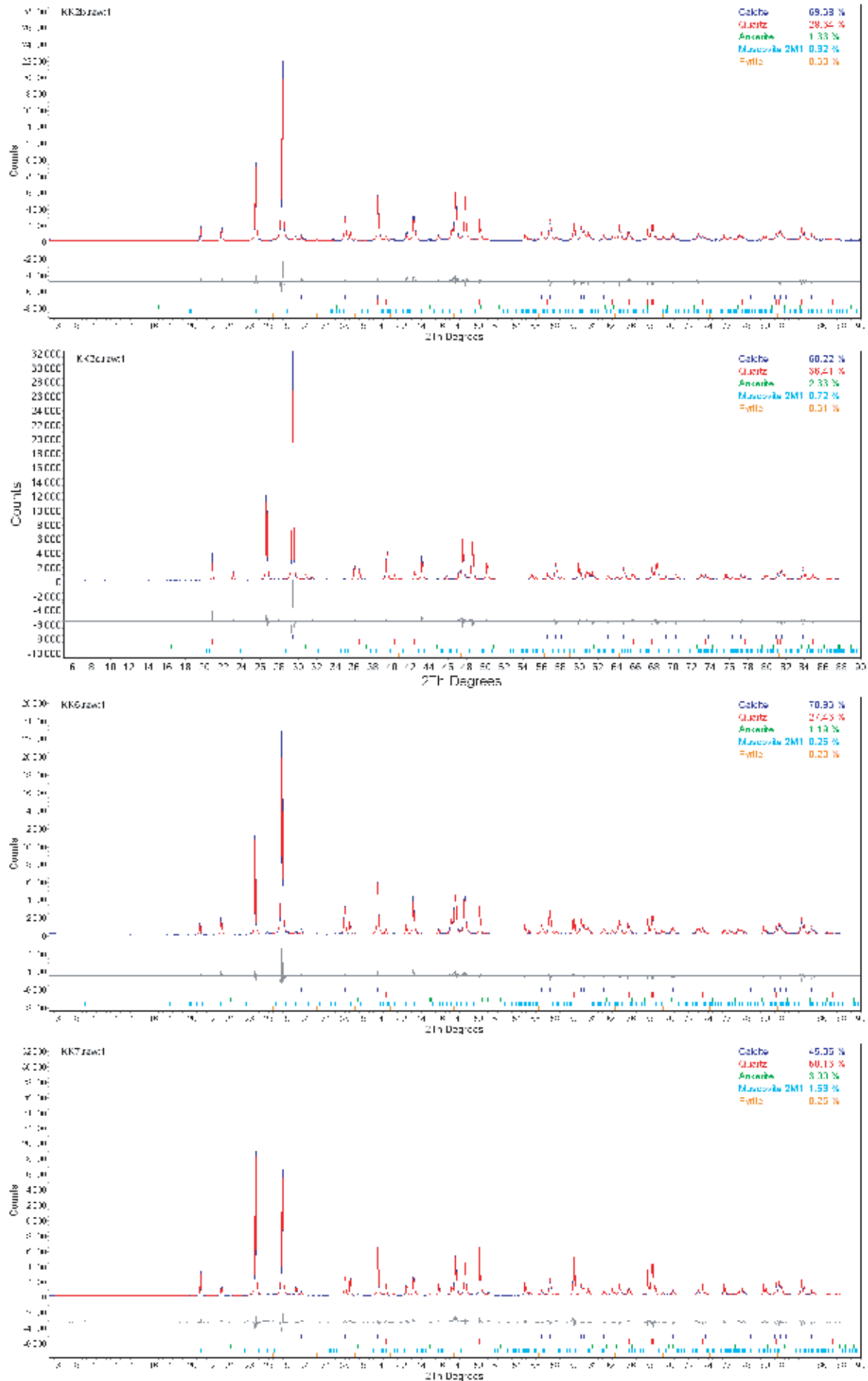
### D1: Standardzusammensetzungen

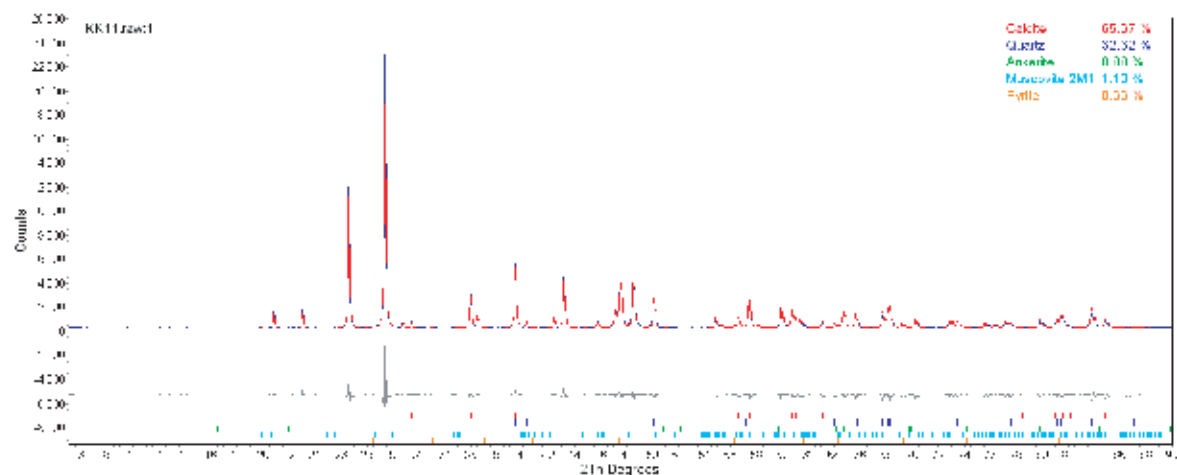
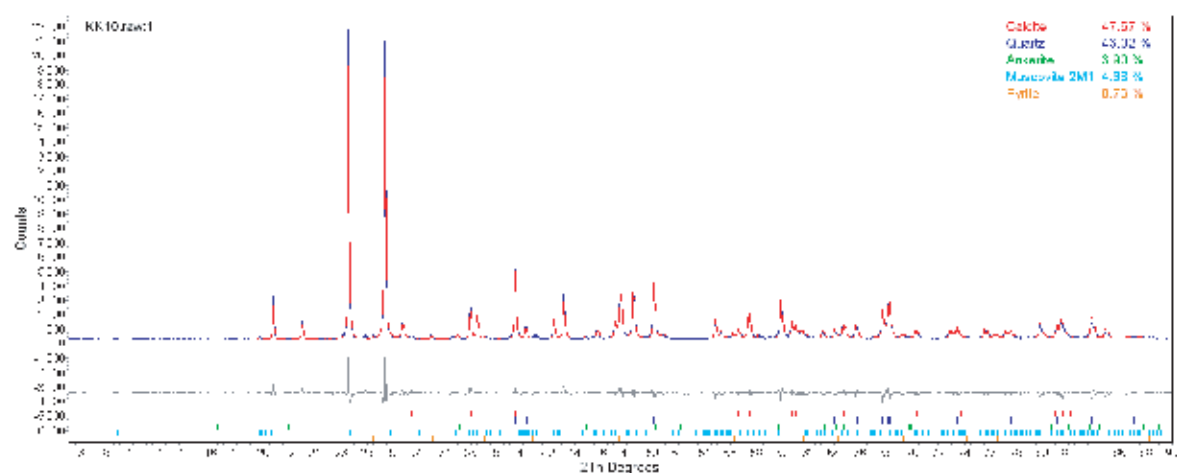
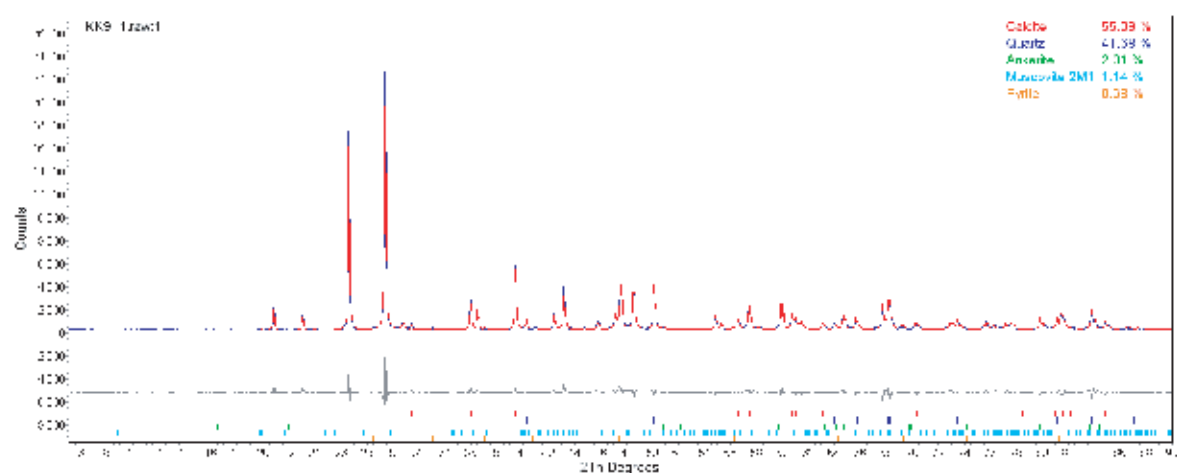
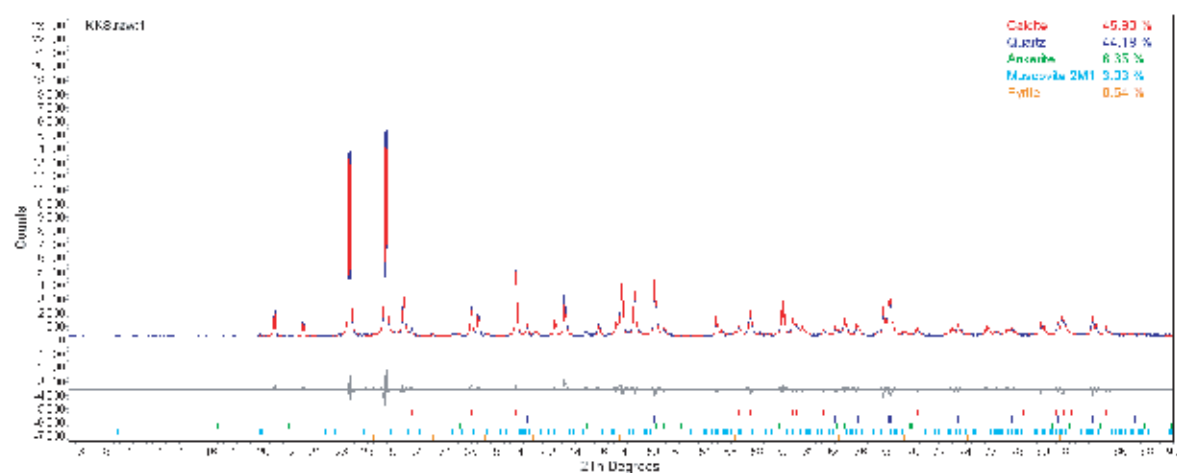


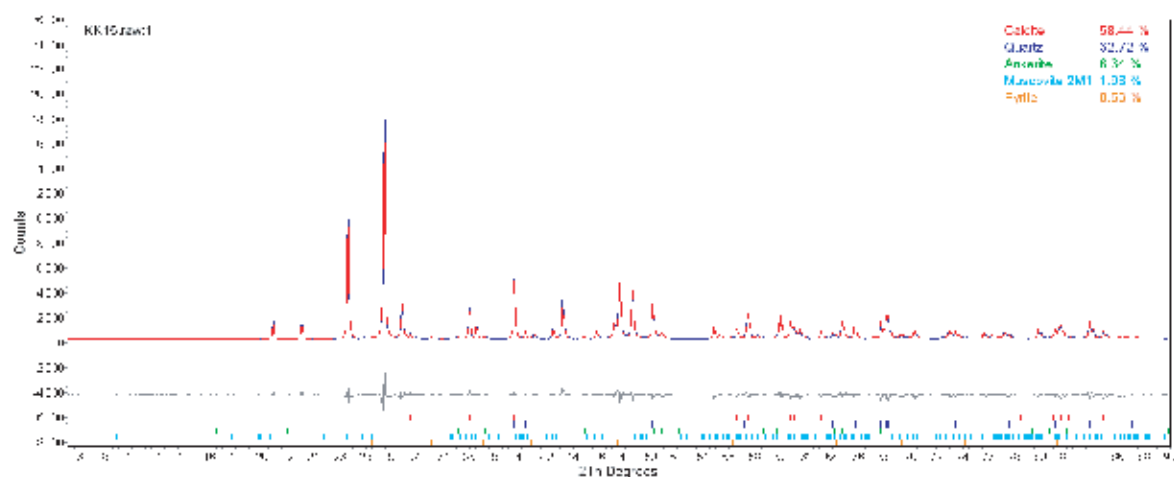
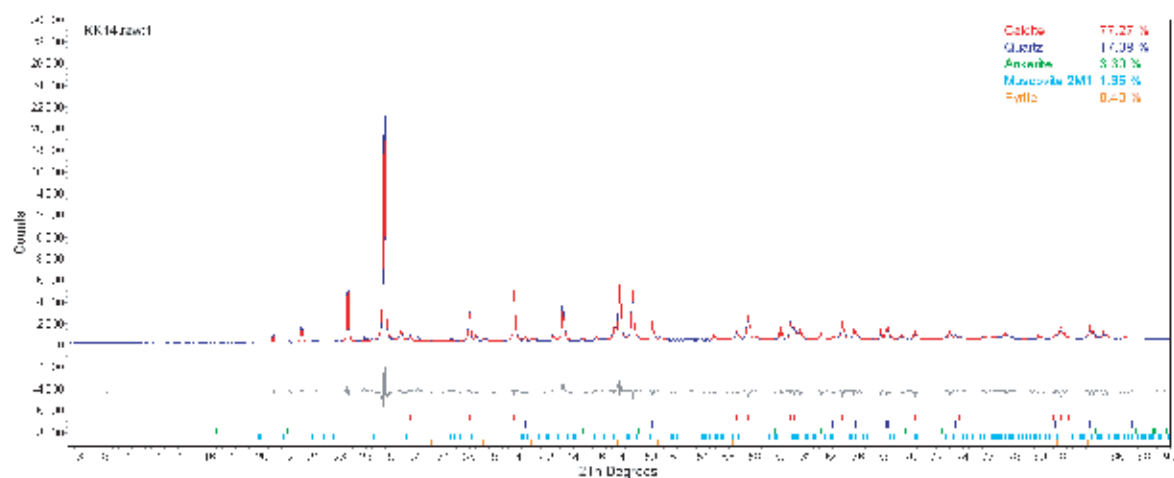
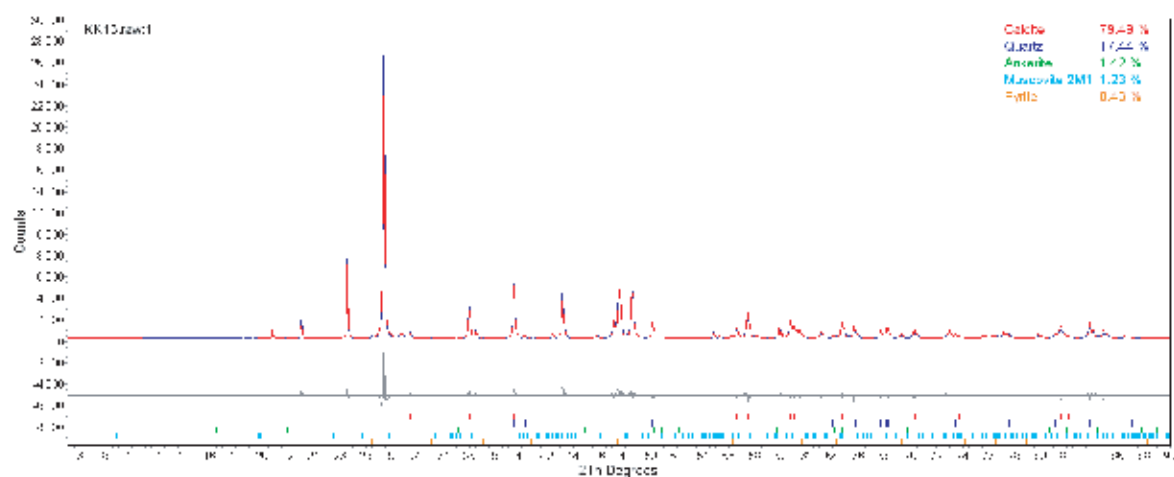
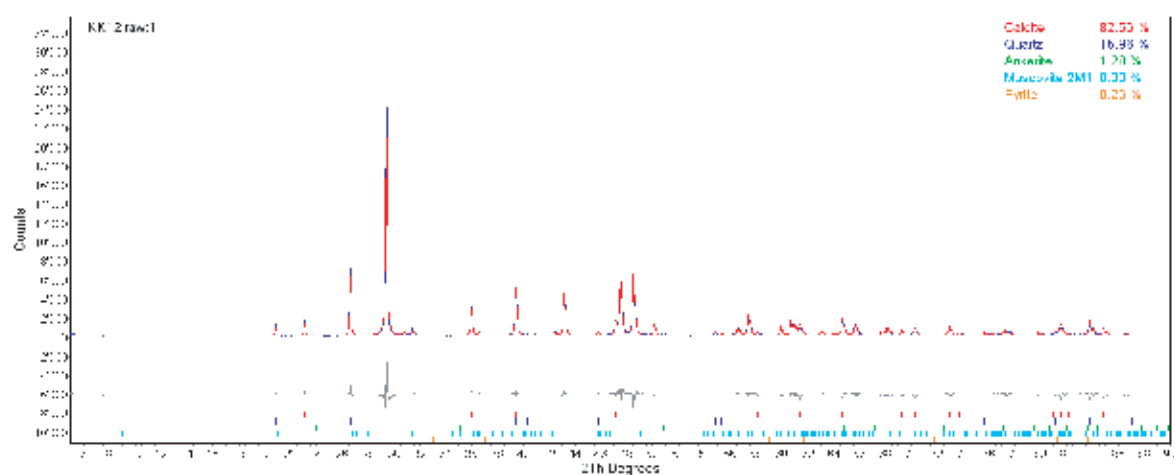




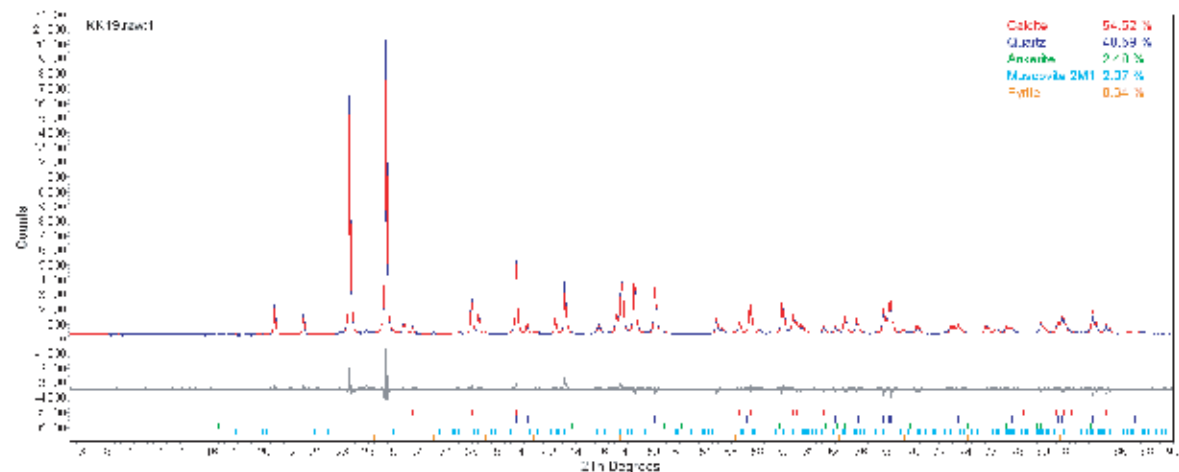
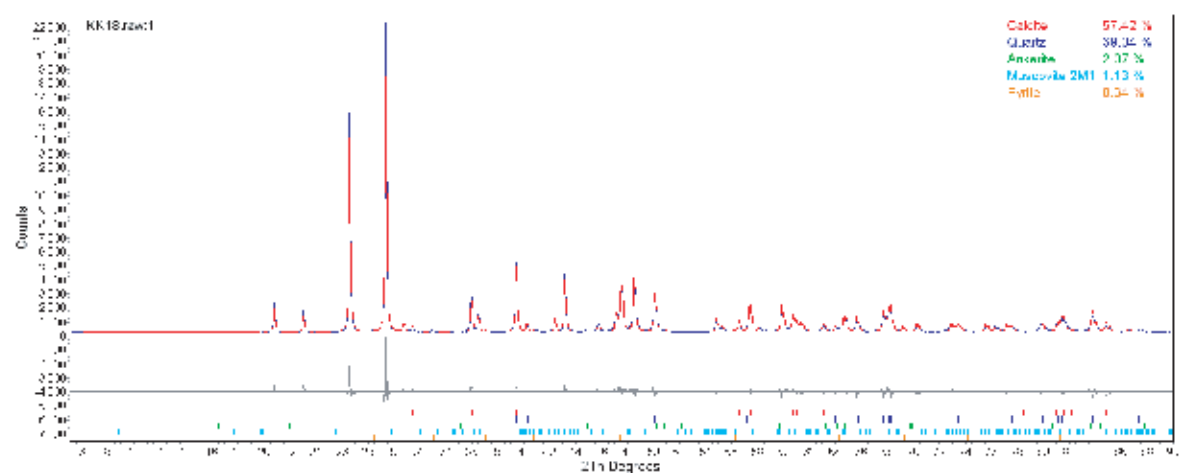
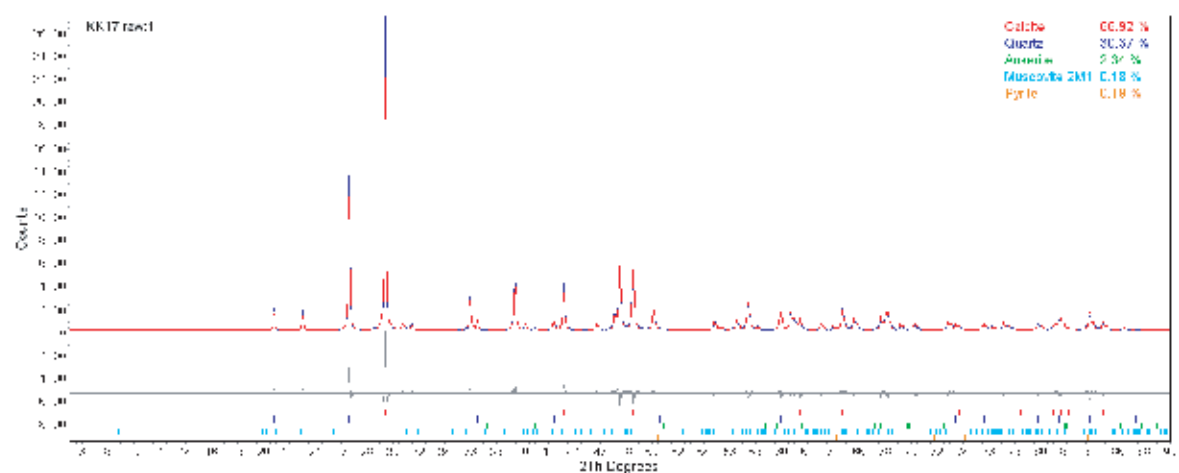
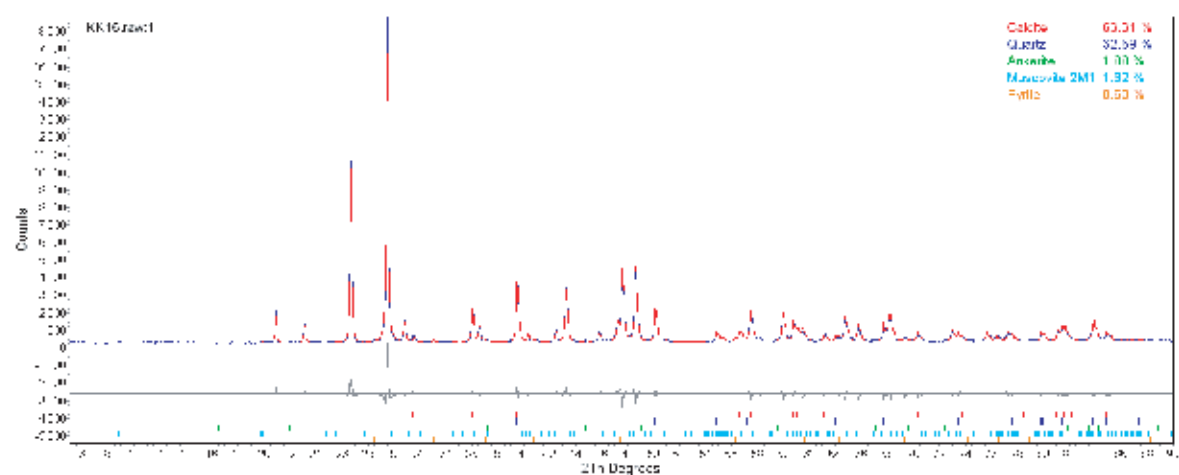
## D2: Kieselkalk der Helvetischen Kieselkalk-Formation (Hauterivien)

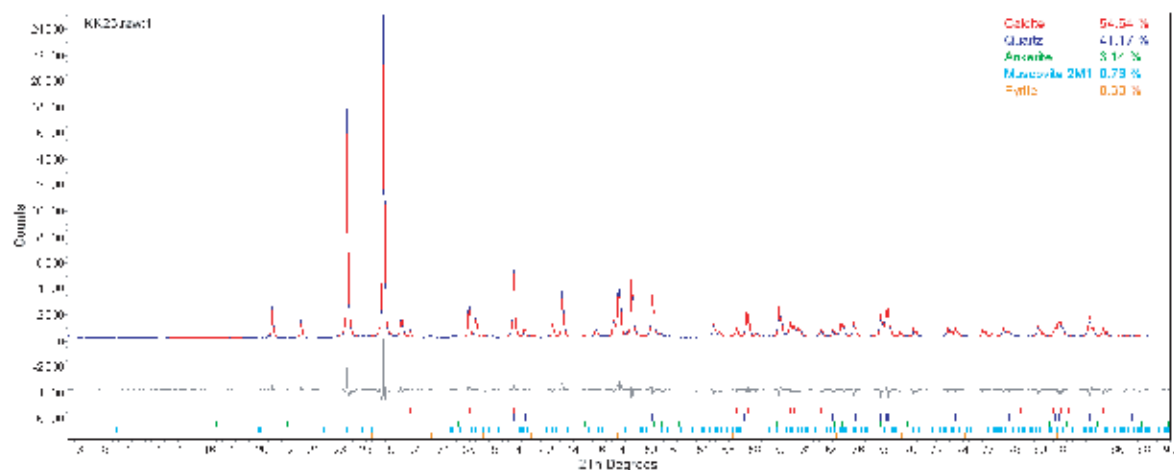
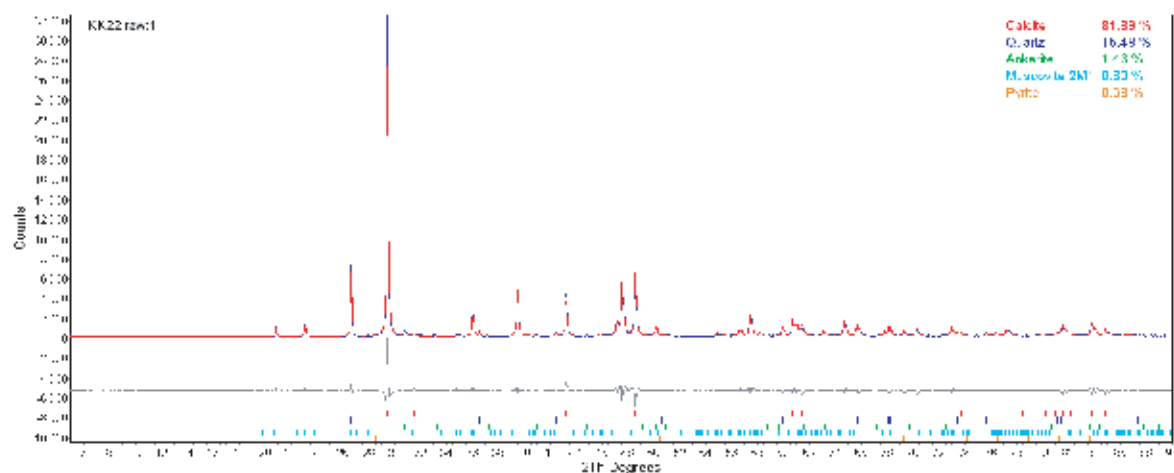
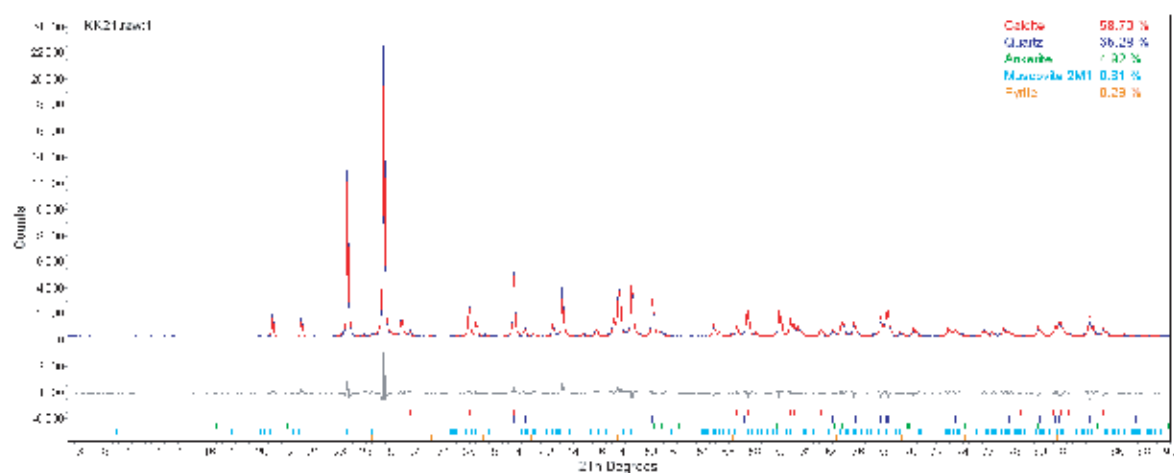
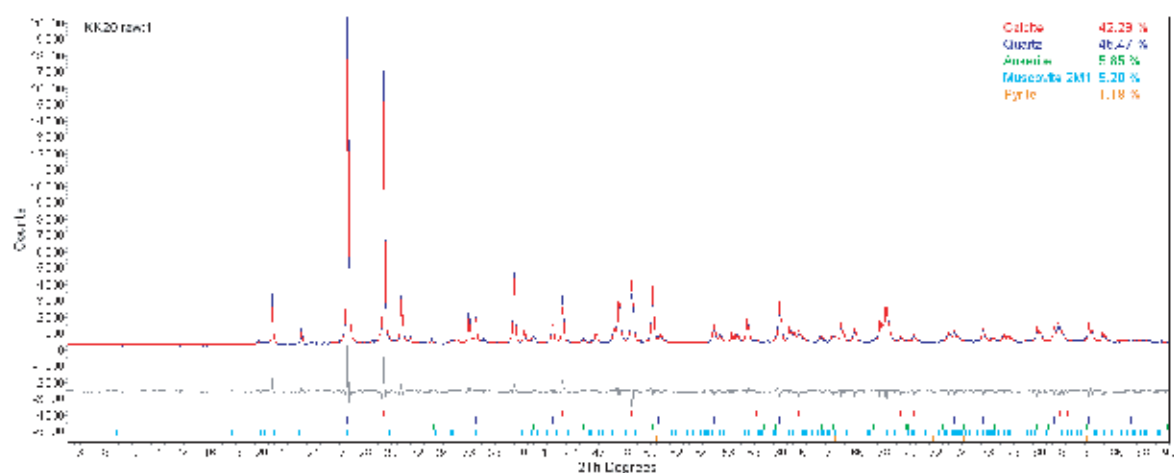


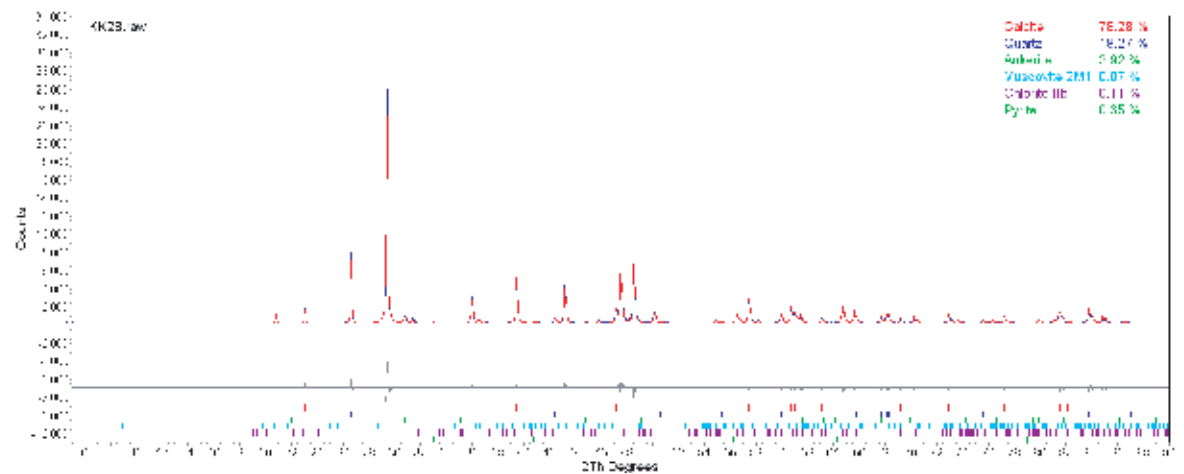
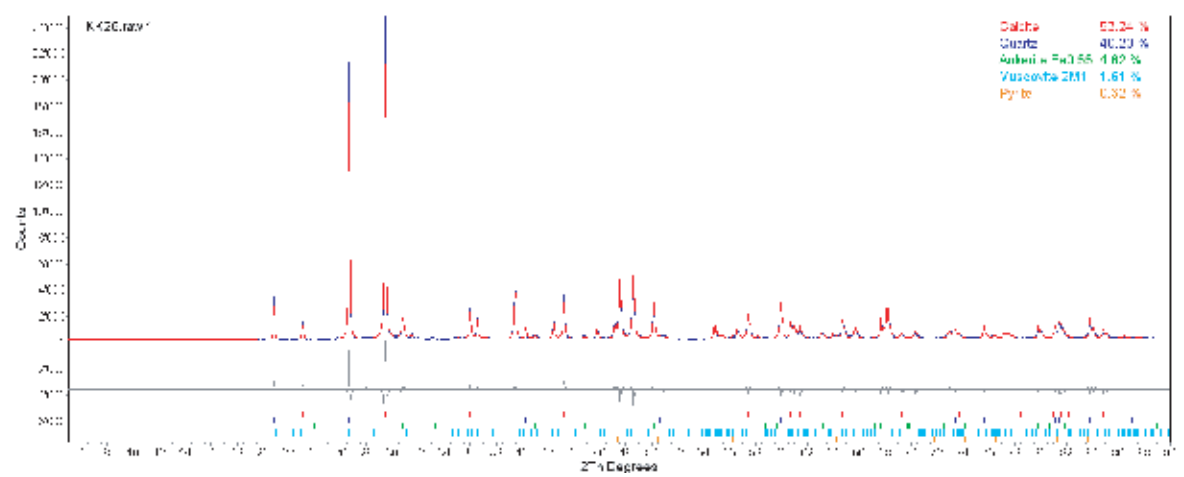
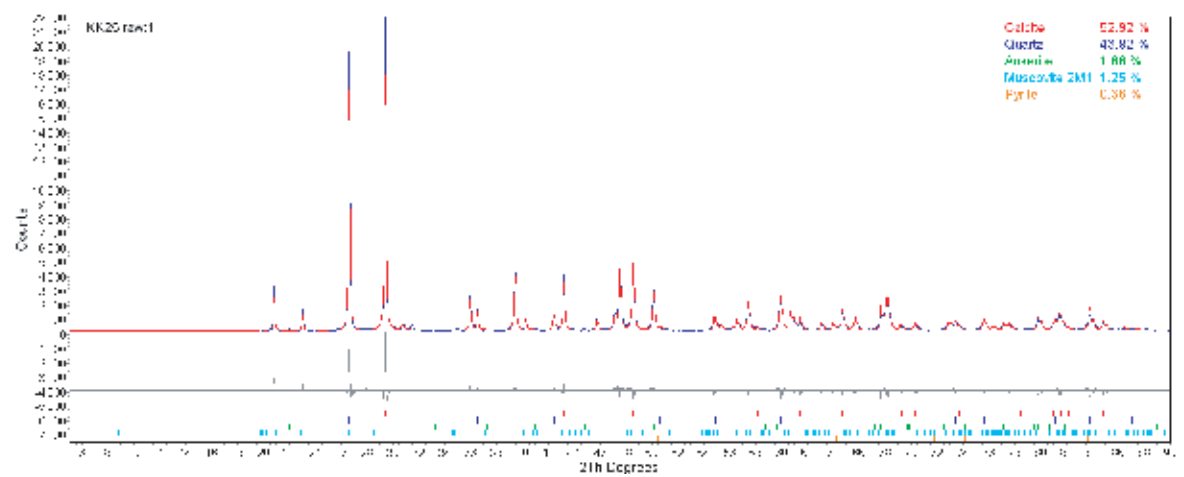
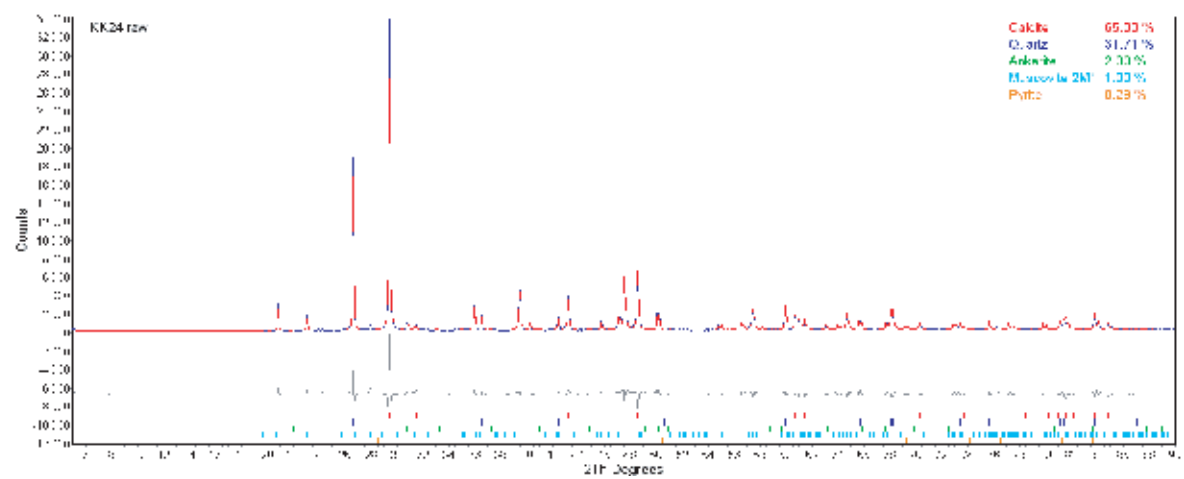


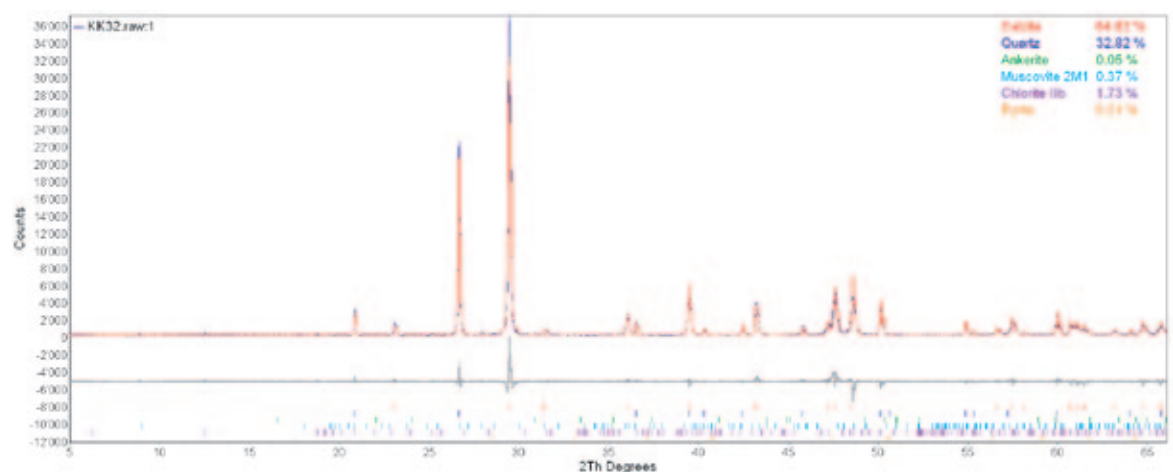
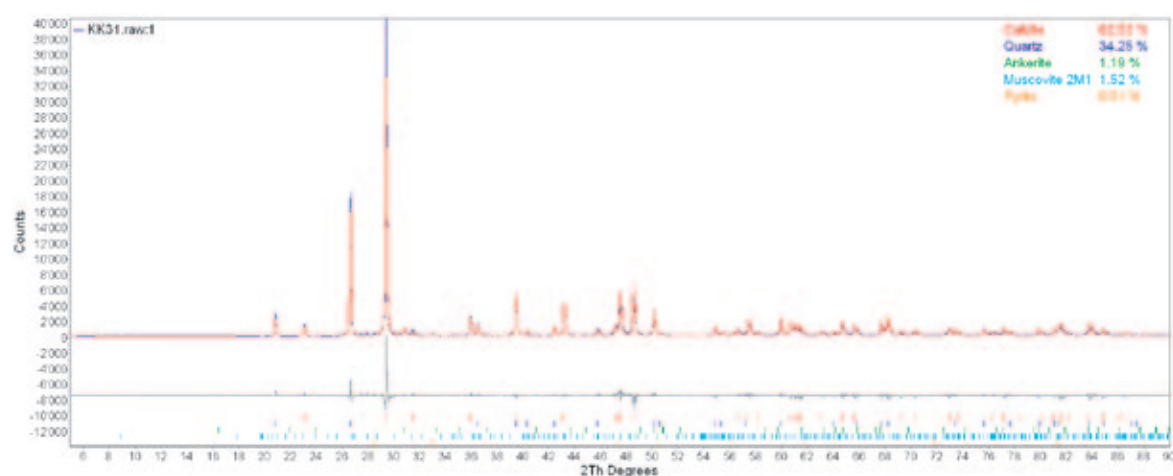
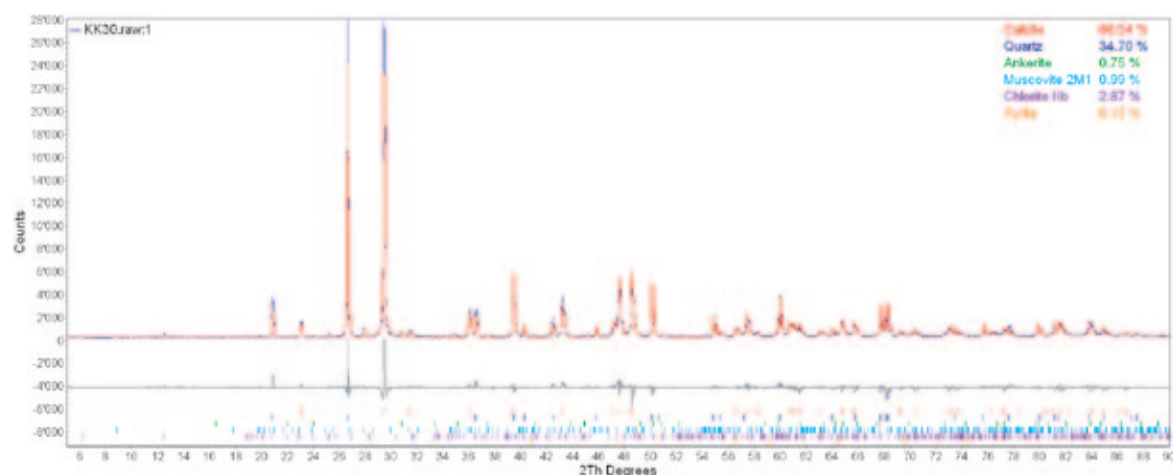
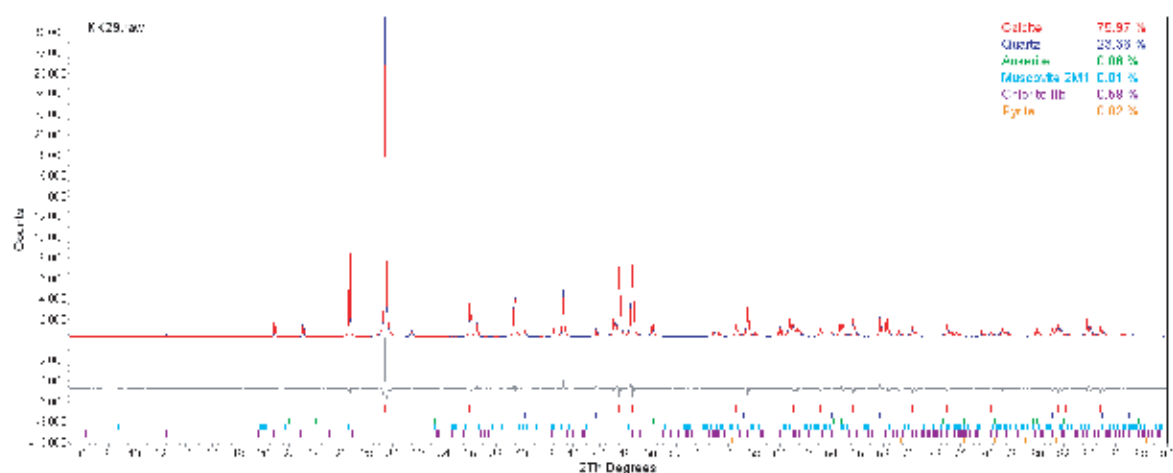




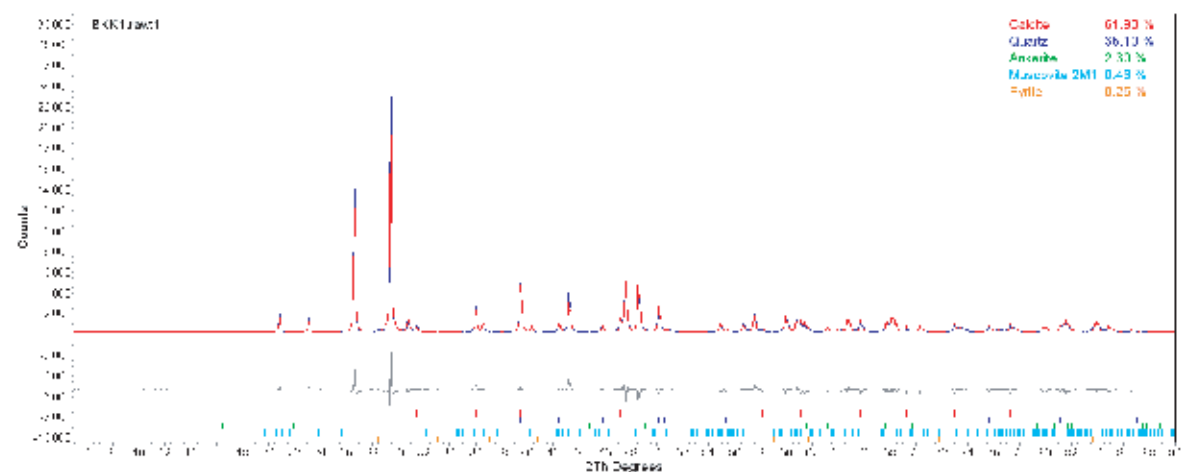
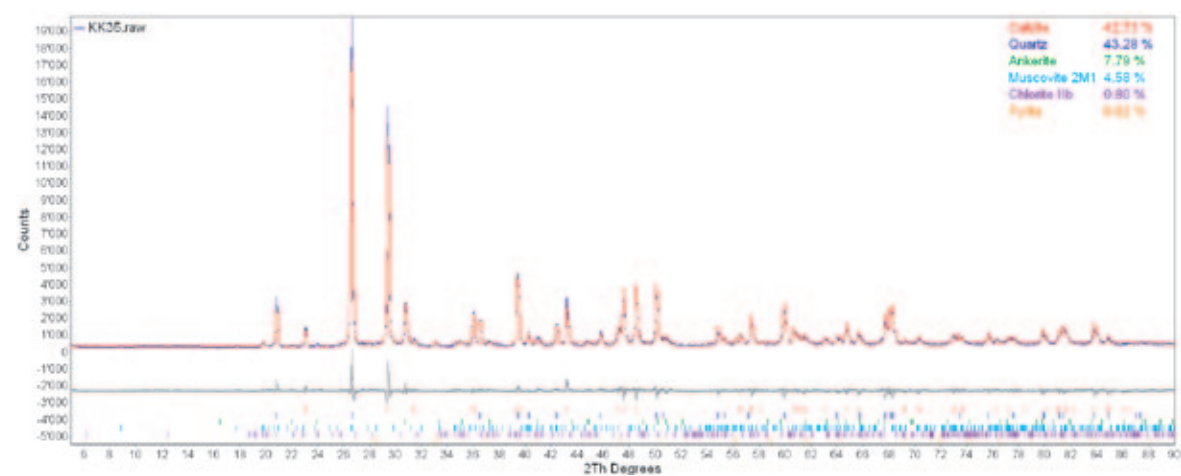
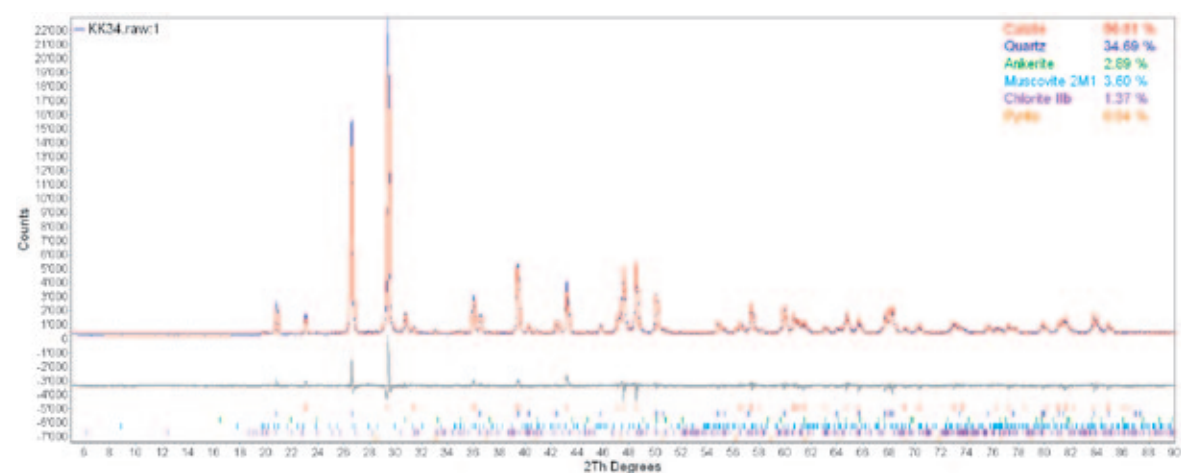
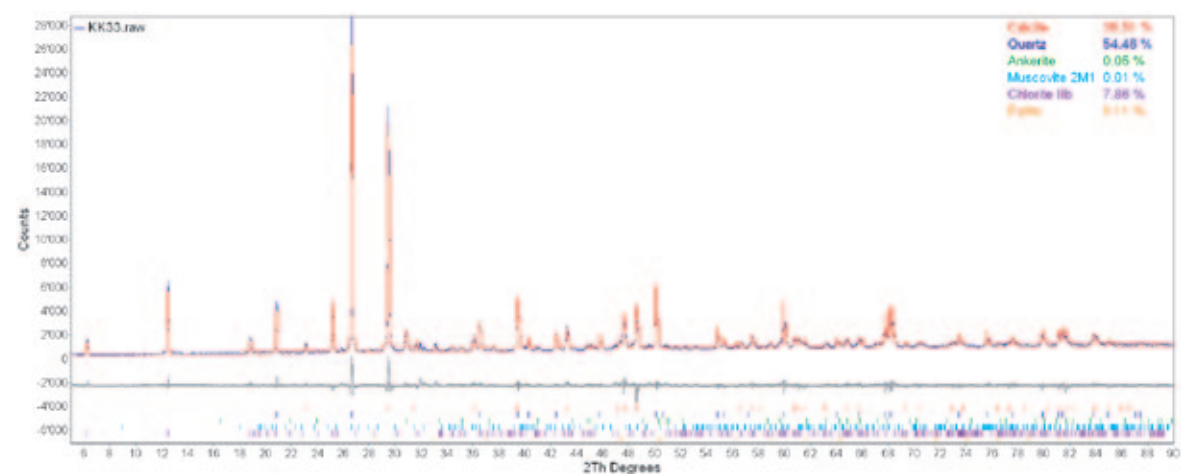




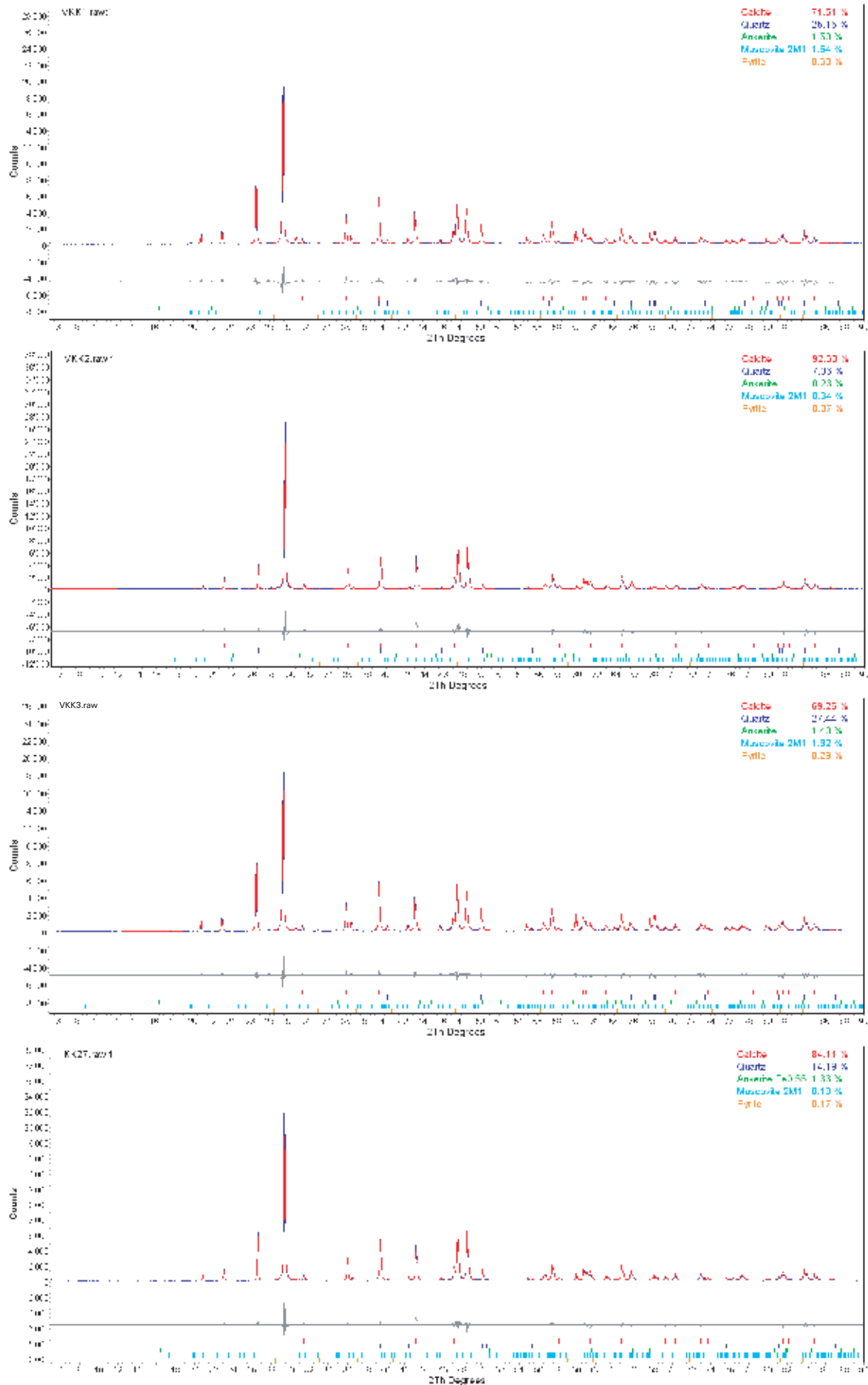




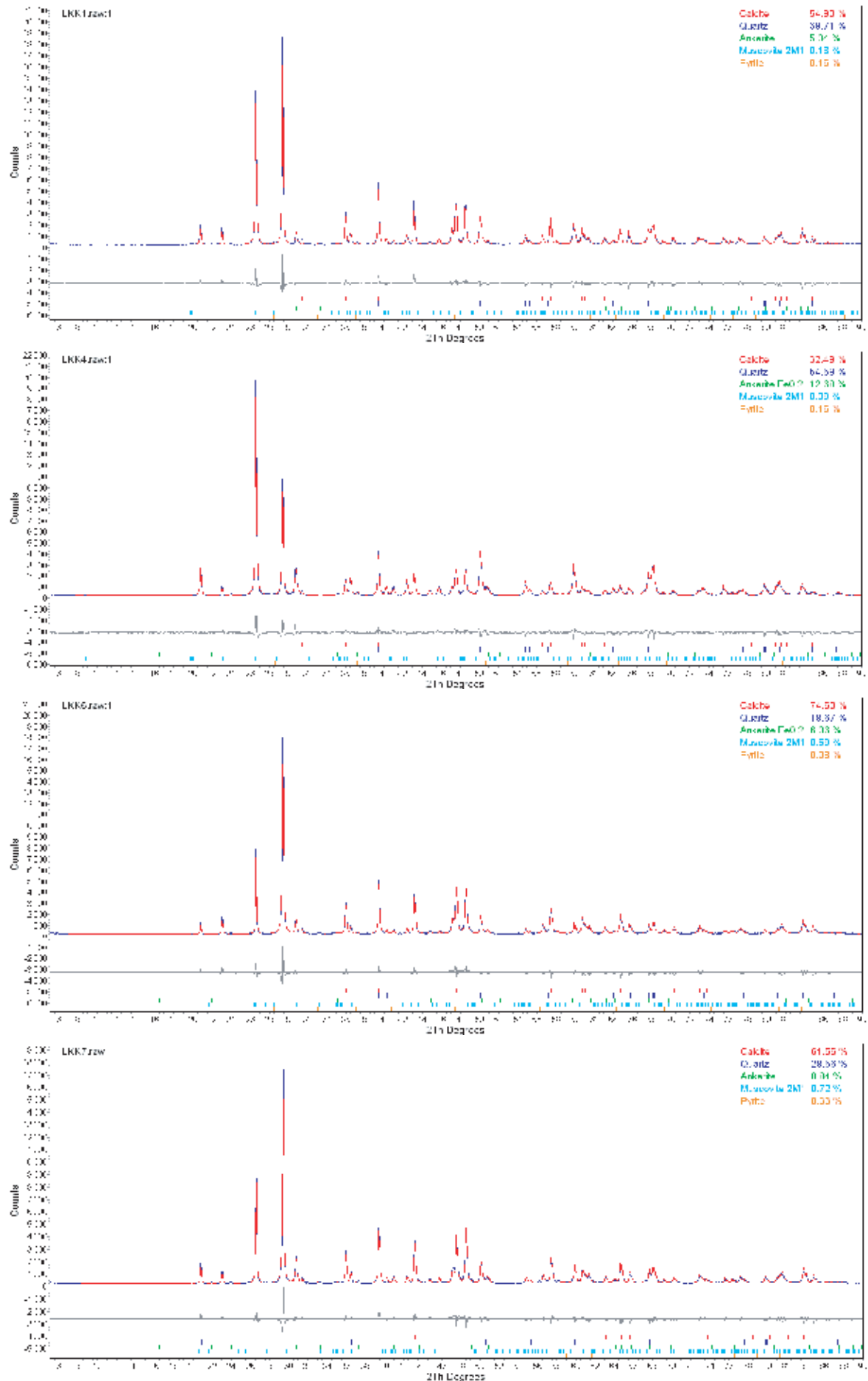


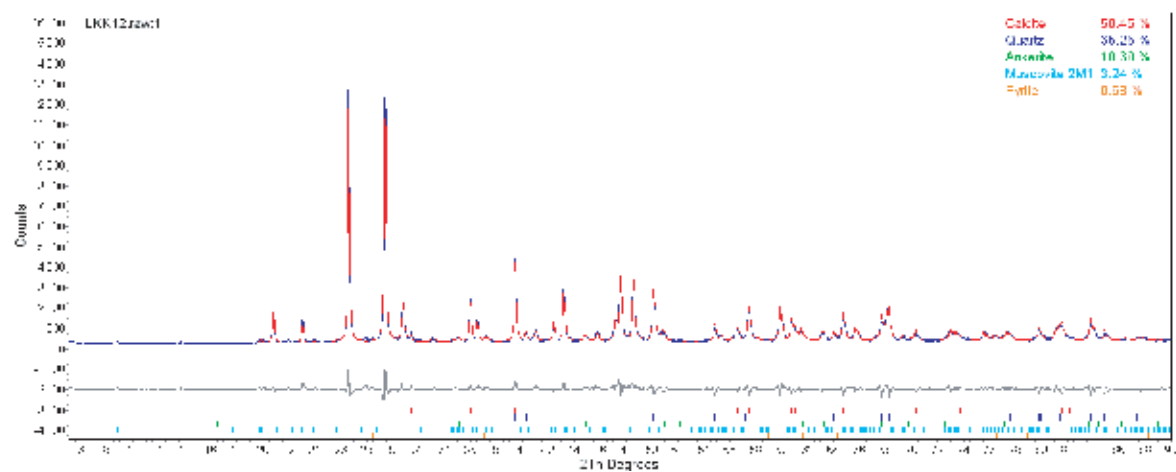
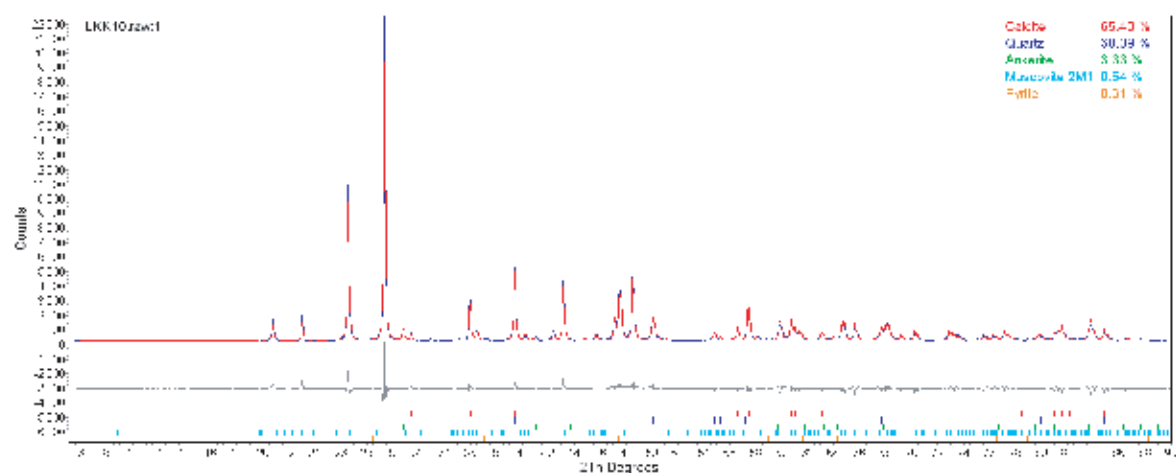
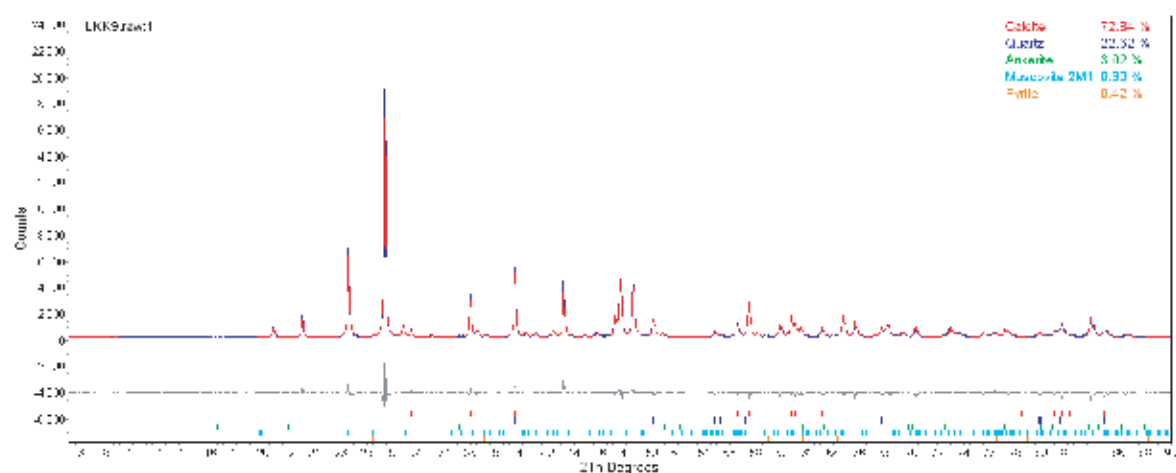
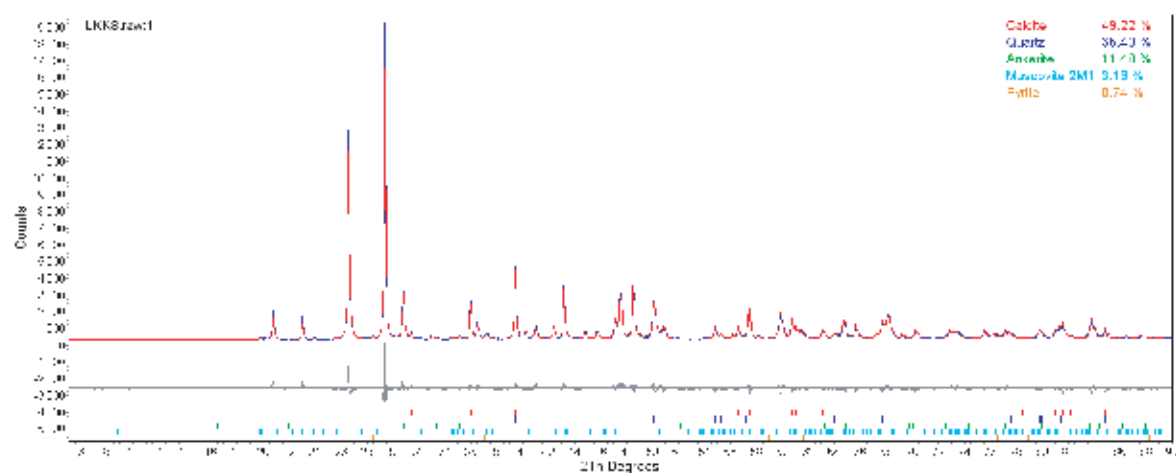


### D3: Kieselkalk des Helvetischen Valanginien

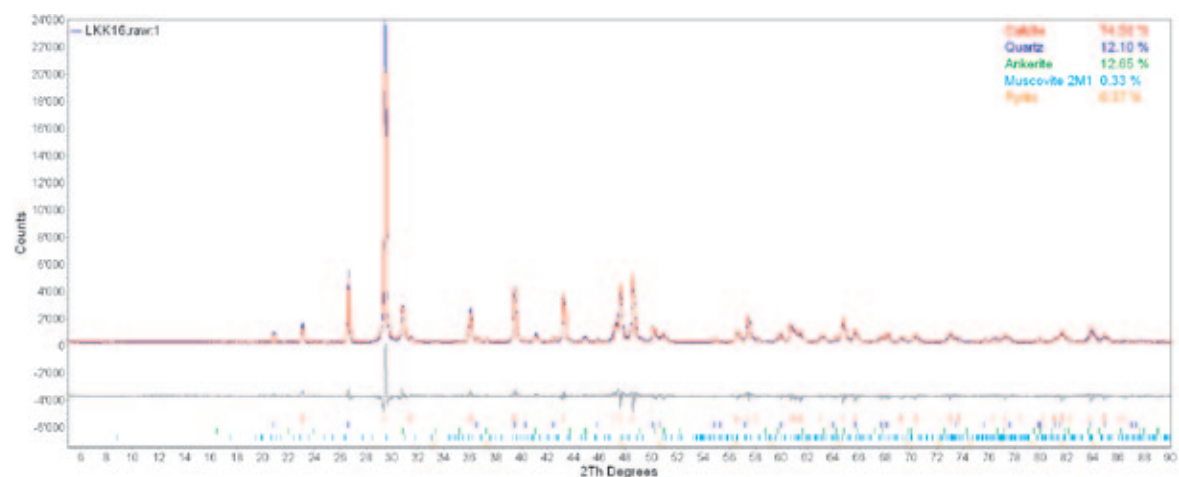
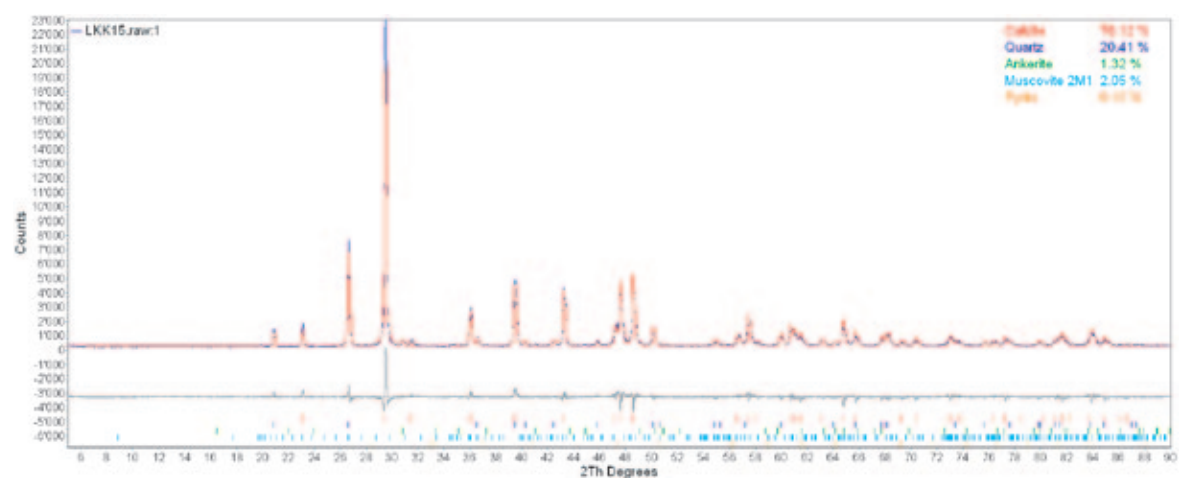
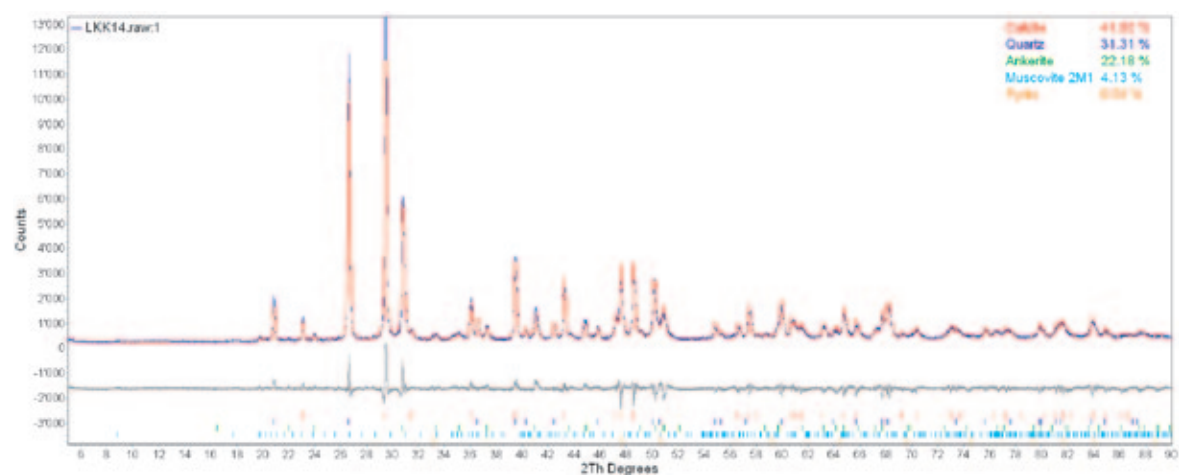
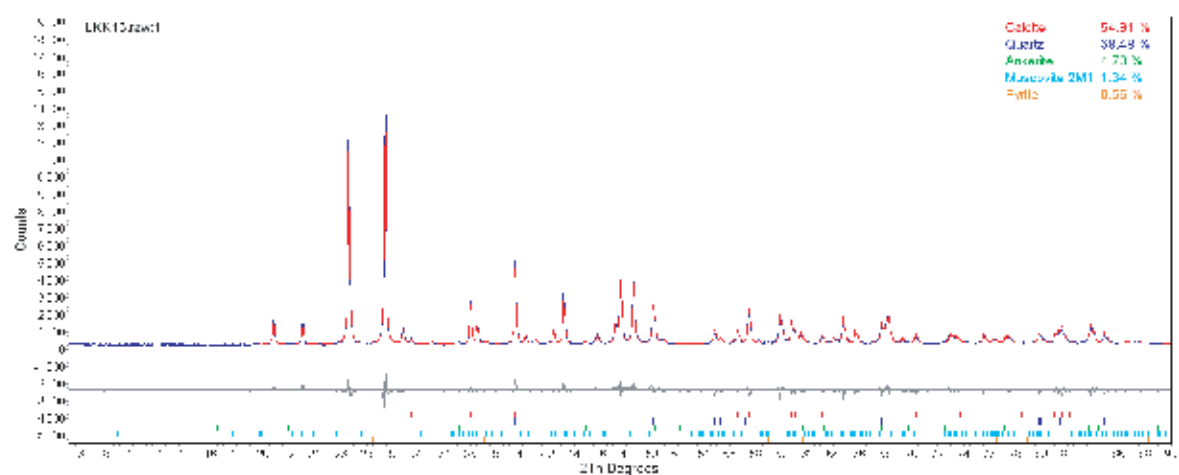


#### D4: Kieselkalk der Moltrasio-Formation (Südalpen)

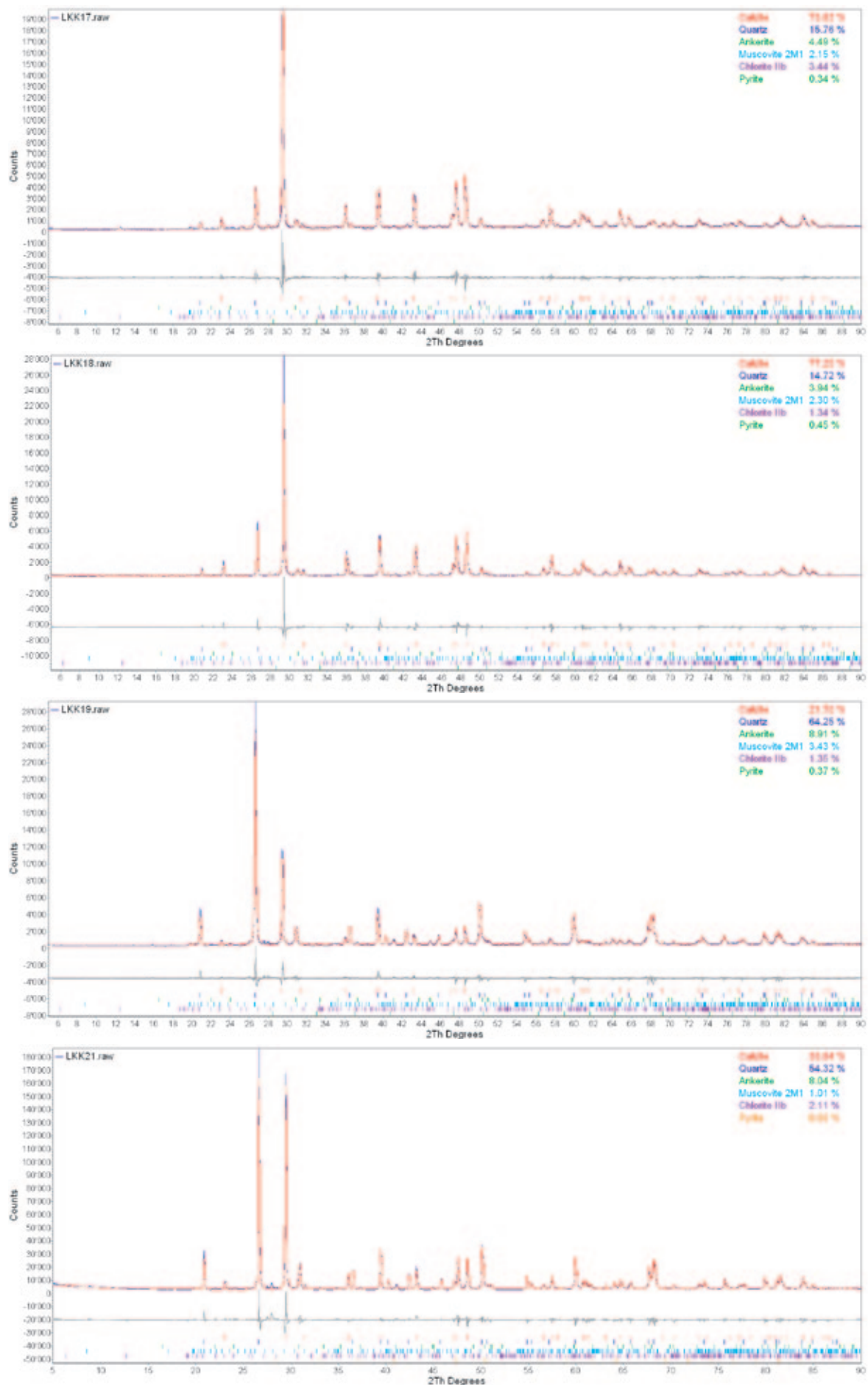


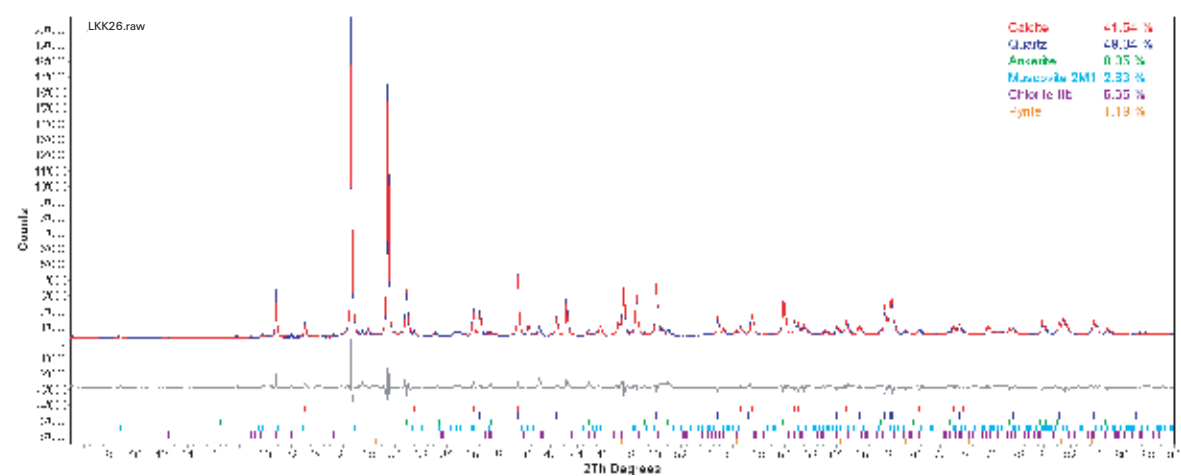
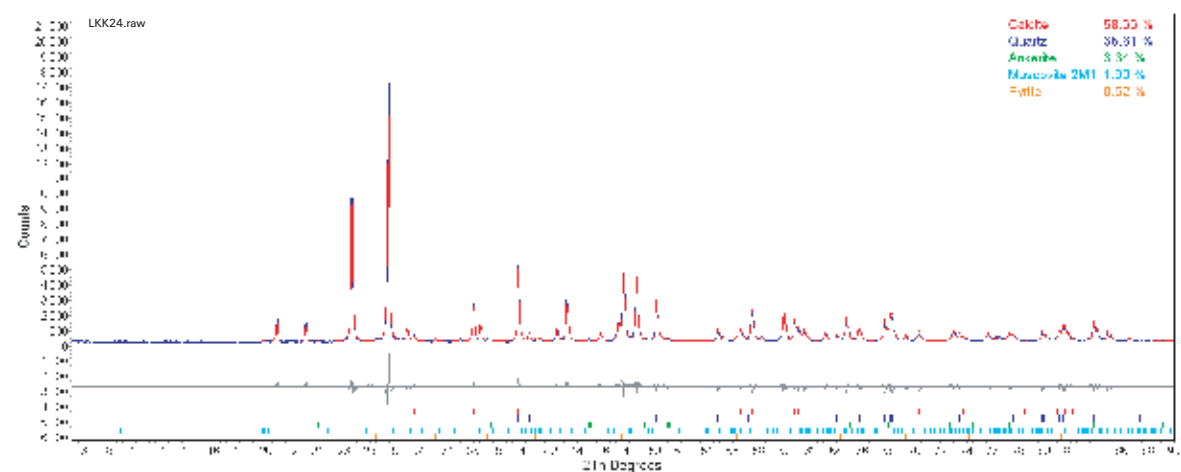
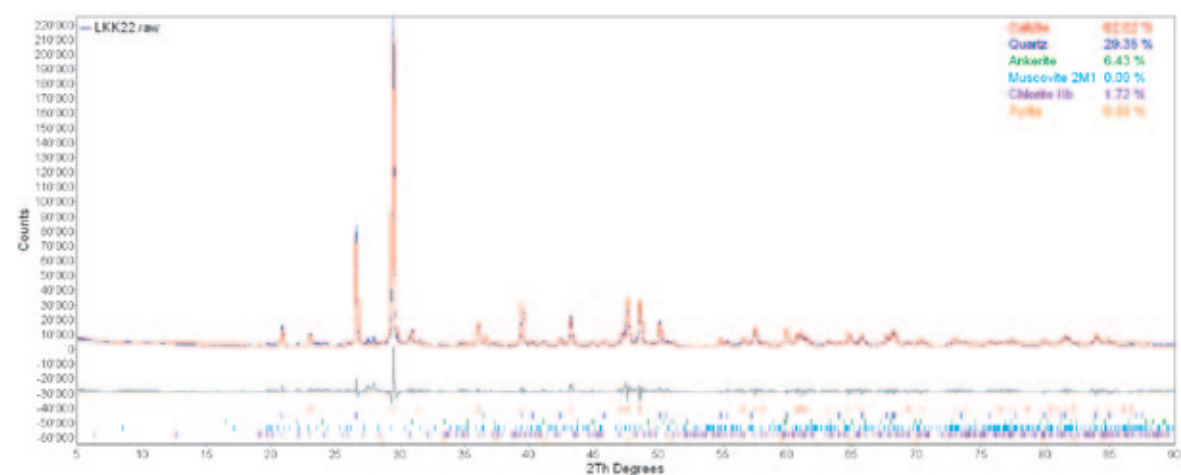






# D5: Kieselkalke aus dem Lias der Préalpes médianes





## Anhang E: Zusatzinformation Radioaktivität von Kieselkalk

In einem von H. Surbeck (pers. Mitt. 2010) untersuchten Kieselkalk aus der Helvetischen Kieselkalk-Formation wurde Radioaktivität auf extrem niedriger Stufe nachgewiesen («extremely low level»). Dies kommt vermutlich daher, dass im Kieselkalk meist vorhandener Pyrit und andere eisenhaltige Minerale radioaktive Elemente anlagern können. In der Nähe solcher Minerale finden sich häufig als Folge geochemischer Prozesse Eisenoxihydroxide, die Uran und insbesondere Radium sehr gut adsorbieren. Im Falle des Radiums müssten aber rezente Prozesse von Bedeutung sein, da Radium eine Halbwertszeit von 1600 Jahren hat.



## Literaturverzeichnis

- ALLMANN, R. (2003): Röntgenpulverdiffraktometrie. Rechnergestützte Auswertung, Phasenanalyse und Strukturbestimmung. – Springer, Heidelberg.
- ARE [Bundesamt für Raumentwicklung] (2006): Hartsteinbrüche: Planungshilfe für die Standortplanung. – Bundesamt f. Raumentwicklung.
- (2008a): Hartgesteinsversorgung: einige Fragen und Antworten. – Bundesamt f. Raumentwicklung.
- (2008b): Grundsätze zur Hartgesteinsversorgung: Ergänzung Sachplan Verkehr (Bundesratsentscheid). – Bundesamt f. Raumentwicklung, Medienmitt. 12.12.2008.
- ASTRA [Bundesamt für Strassen] (2004): Konfliktanalyse bezüglich Vermeidung eines Versorgungsnotstandes der schweizerischen Bauwirtschaft mit felsgebrochenen Hartgesteinen zur Herstellung hochwertiger Beläge und Bahnschotter. – Proj. ASTRA 2001/008.
- ATTINGER, R. O. & KÖPPEL, J. (1983): A new method to measure lateral strain in uniaxial and triaxial compression test (tech. note). – Rock Mech. and Rock Eng. 17, 73–78.
- BAFU [Bundesamt für Umwelt] (2010): Projekt Aufwertung BLN. – [www.bafu.admin.ch/bln/02683/](http://www.bafu.admin.ch/bln/02683/) (10.10.2012).
- BAU + WISSEN (2010): Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten: aktueller Stand der Kenntnisse und Massnahmen zur Vermeidung. – Fachtagbd. Bau + Wissen, Verband schweiz. Cementindustrie.
- BECK, P. (1942): Natursteine als Bunkerverkleidung: erster Auszug aus dem Bericht als Begleitwort zur Tabelle «Geotechnische Prüfungsergebnisse der Gesteinsarten der Schweizeralpen». – Geol. Experienter. (unpubl.).
- BERNOULLI, D. (1964): Zur Geologie des Monte Generoso (Lombardische Alpen. – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 118.
- (1980): Southern Alps of Ticino. In: TRÜMPY, R. (Ed.): Geology of Switzerland, a guide-book (p. 80–82). – Schweiz. geol. Komm., Wepf, Basel.
- (2007): The pre-Alpine geodynamic evolution of the Southern Alps: a short summary. – Bull. angew. Geol. 12/2, 3–10.
- BISH, D. L. & POST, J. E. (1989): Modern powder diffraction. – Mineral. Soc. Amer., Rev. Mineral. 20.
- BLAINE CECIL, C. (2004): Eolian dust and the origin of sedimentary chert. – U.S. geol. Surv., Open-File Rep. 2004-1098.
- BLS (2008): Interview mit Samuel Jüni, Leiter Fahrbahn BLS, zum Thema Materialbeschaffungs- und Bewirtschaftungswesen (unpubl.).
- BÖRNER, K. & HILL, D. (2009): Grosse Enzyklopädie der Steine (CD-ROM). – Abraxas, Hasede.
- BRAGG, W. H. & BRAGG, W. L. (1913): The reflection of X-rays by crystals. – Proc. r. Soc. London 88, 428–438.
- BRAGG, W. L. (1912): The mirror reflection of X-rays. – Nature 90, 410.
- BRÜCKNER, W. (1946): Über die Gliederung des Kieselkalks in der Zentralschweiz. – Eclogae geol. Helv. 39/2, 159–164.
- BRUKER AXS (2006a): Diffrac<sup>plus</sup> EVA.
- (2006b): Diffrac<sup>plus</sup> Topas/TopasR/TopasP, Version 3.0, tech. Ref.
- (2010): [www.bruker-axs.com/](http://www.bruker-axs.com/)
- BÜCHI, E., MATHIER, J.-F. & WYSS, C. (1995): Gesteinsabrasivität – ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein. – Tunnel 5, 38–43.
- BUNDESGERICHT [Schweizerisches Bundesgericht] (2010): <http://www.bger.ch>.
- BUNDESGESETZ (1977): Verordnung über das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (VBLN), SR-Nr. 451.11.
- BUNDESVERFASSUNG (1966): Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NGH), SR-Nr. 451.
- BURG, J. P. (2004): Rheologie der Lithosphäre, Vorlesungsunterlagen Tektonik, WS 03/04. – Eidg. tech. Hochsch. [ETH] Zürich.
- BURGER, H. & STRASSER, A. (1981): Lithostratigraphische Einheiten der untersten Helvetischen Kreide in der Zentral- und Ostschweiz. – Eclogae geol. Helv. 74/2, 529–560.
- BÜRGI, C. (2009): Ungebundene Gemische. Frühjahrsseminar (3.3.2009). – Verb. schweiz. Hartsteinbrüche (VSH), Bern.
- BUXTORF, A. (1915): Geologische Profile längs des Urnersees (gezeichnet v. A. Amsler) (unpubl.).
- CEMSUISSE (2005): Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) in der Schweiz. – Cemsuisse, Verband schweiz. Cementindustrie.
- CHALLANDES, C. & DÄPPEN, J. (2005): R RTE 21110: Unterbau und Schotter Normalspur. – Regelwerk Tech. Eisenbahn RTE, Verband öff. Verkehr VÖV.
- DALL'AGNOLO, S. (1997): Die Kreide und das Tertiär der Brekziendecke in den französischen und schweizerischen Voralpen: Stratigraphie, Sedimentologie und Geodynamik. – Diss. Univ. Fribourg.
- DEBELMAS, J. (1974): Géologie de la France. – Doin, Paris.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. (1966): An introduction to the rock-forming minerals. – Longman, London.
- DIETRICH, V. (1982): Geologisch-petrographische Evaluation von Hartschotter-Vorkommen im St. Galler Rheintal zwischen Altstätten und Sargans, unter besonderer Berücksichtigung der Situation im Steinbruch Gampion [Campiun]. – Eidg. tech. Hochsch. [ETH] Zürich.
- DIETRICH, V. & WAHRENBARGER, C. (1997): Gutachten über die Hartgesteinsvorkommen der Ostschweiz. Allgemeine Übersicht und spezielle Beurteilung des Steinbruches Campiun hinsichtlich technischer Qualifikation und Standortproblematik. – Schweiz. geotech. Komm.
- DUNHAM, R. J. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. – Mem. amer. Assoc. Petroleum Geol. 1, 108–121.
- ELORZA, J. & BUSTILLO, M. A. (1989): Early and late diagenetic chert in carbonate turbidites of the Senonian flysch, northeast Bilbao, Spain. In: HEIN, J. R. & OBRADOVIĆ, J. (Ed.): Siliceous deposits of the Tethys and Pacific regions (p. 93–105). – Springer, New York.
- EMBRY, A. F. & KLOVAN, J. E. (1971): A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. – Bull. canad. Petroleum Geol. 19/4, 730–781.
- EMPA [Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt] (1993): Schlussbericht über die Eignungsprüfungen der Bahnschotter, Ber. Nr. 141092 (unpubl.).
- FAMSA [Fabrique d'Agglomérés Monthey SA] (2010): Carrière de Choëx-Massongex. – [www.famsa.ch](http://www.famsa.ch)
- FESTL, J. (2006): Der LCPC-Versuch – eine Möglichkeit, die Abrasivität

- von Lockergesteinen zu bestimmen? – Bachelorarb. tech. Univ. München (unpubl.).
- FICHTER, H. J. (1934): Geologie der Bauen-Brisen-Kette am Vierwaldstättersee und die zyklische Gliederung der Kreide und des Malm der helvetischen Decken. – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 69.
- FLÜGEL, E. (2004): Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application. – Springer, Berlin.
- FÖLLMI, K. B., BODIN, S., GODET, A., LINDER, P. & SCHOOTBRUGGE, B. VAN DE (2007): Unlocking paleo-environmental information from Early Cretaceous shelf sediments in the Helvetic Alps: stratigraphy is the key! – Swiss J. Geosci. 100/3, 349–369.
- FRAUENFELDER, A. (1916): Beiträge zur Geologie der Tessiner Kalkalpen. – Eclogae geol. Helv. 14/2, 247–371.
- FREY, F. (1965): Geologie der östlichen Claridenkette. – Vjschr. natf. Ges. Zürich 110, 1–287.
- FUNK, H. (1969): Typusprofile der helvetischen Kieselkalk-Formation und der Altmann-Schichten. – Eclogae geol. Helv. 62/1, 191–203.
- (1971): Zur Stratigraphie und Lithologie des Helvetischen Kieselkalkes und der Altmannschichten in der Säntis-Churfürsten-Gruppe (Nordostschweiz). – Eclogae geol. Helv. 64/2, 345–433.
- (1975): The origin of authigenic quartz in the Helvetic Siliceous Limestone (Helvetischer Kieselkalk), Switzerland. – Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich [N.F.] 22, 299–306.
- FUNK, H., OBERHÄNSLI, R., PFIFFNER, A., SCHMID, S. & WILDI, W. (1987): The evolution of the northern margin of the Tethys in eastern Switzerland. – Episodes 10/2, 102–107.
- FURRER, H. (1962): Blatt 1267 Gemmi. – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000, Erläut. 32.
- FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. (1977): Sediment-Petrologie Teil II. Sedimente und Sedimentgesteine (3. Aufl.). – Schweizerbart, Stuttgart.
- GAMMON, P. R., JAMES, N. P. & PISERA, A. (2000): Eocene spiculites and spongiolites in south-western Australia: not deep, not polar, but shallow and warm. – Geology 28/9, 855–858.
- GERCEK, H. (2007): Poisson's ratio values for rocks. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 44/1, 1–13.
- GISIGER, M. (1967): Géologie de la région Lac Noir–Kaiseregg–Schafberg (Préalpes médianes plastiques de Fribourg et Berne). – Diss. Univ. Fribourg.
- GRUBENMANN, U. (1915): Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz, III. Tabellarische Übersicht der Resultate der geologischen, petrographischen und technologischen Untersuchungen. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 5.
- GURSKY, H.-J. (1997): Die Kieselgesteine des Unter-Karbons im Rhenoharzynikum: Sedimentologie, Petrographie, Geochemie und Paläozooanographie. – Geol. Abh. Hessen 100.
- HANTKE, R. (1961): Tektonik der helvetischen Kalkalpen zwischen Obwalden und dem St. Galler Rheintal. – Vjschr. natf. Ges. Zürich 106/1, 1–212.
- HEIN, J. & OBRADOVIĆ, J. (1989): Siliceous deposits of the Tethys and Pacific regions. – Springer, New York.
- HERB, R. (1962): Geologie von Amden, mit besonderer Berücksichtigung der Flyschbildungen. – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 114.
- HEWLETT PACKARD COMPANY (1987): Practical strain gage measurements. – Application Note 290–1.
- HILL, R. J. & HOWARD, C. J. (1987): Quantitative phase analysis from neutron powder diffraction data using Rietveld method. – J. appl. Crystallogr. 20, 467–474.
- HIRSTEIN, A. (2009): Zu wenig Schotter in der Schweiz. – NZZ am Sonntag, 15. Nov. 2009, 68.
- HOUTEN, J. VAN (1929): Geologie der Kalkalpen am Ostufer des Lago Maggiore. – Eclogae geol. Helv. 22/1, 1–40.
- ICS [International Commission on Stratigraphy] (2009): International stratigraphic chart. – www.stratigraphy.org.
- JÄCKLI, H. & SCHINDLER, C. (1986): Möglichkeiten der Substitution hochwertiger Alluvialkiese durch andere mineralische Rohstoffe. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 68.
- KAUFMANN, F. J. (1867): Der Pilatus. – Beitr. geol. Karte Schweiz 5.
- KERN, A. (1992): Präzisionspulverdiffraktometrie: ein Vergleich verschiedener Methoden. – Heidelb. geowiss. Abh. 58.
- (1998): Hochtemperatur-Rietveldanalysen: Möglichkeiten und Grenzen. – Heidelb. geowiss. Abh. 89.
- KLEEBOEG, R., MOENCKE, T. & HILLER, S. (2008): Preferred orientation of mineral grains in sample mounts for quantitative XRD measurements: how random are powder samples? – Clays and Clay Miner. 56/4, 404–415.
- KROPF, K. (2008): Morphologischer und biochemischer Aufbau von Silikatnadeln der Hexactinelliden am Beispiel von *Monorhaphis chuni*. – Diss. Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz.
- LAKES, R. S. (1987): Foam structures with a negative Poisson's ratio. – Science 235, 1038–1040.
- LANGMUIR, D. (1997): Aqueous environmental geochemistry. – Prentice Hall.
- LEEMANN, A., THALMANN, C. & KRUSE, M. (1999): Gebrochene Zuschlagstoffe. Ergänzende Prüfungen zu den bestehenden Beton-Normen für gebrochene Zuschlagstoffe – Erfahrungen bei Alp-Transit Gotthard. – Schweizer Ing. u. Architekt 24, 532–536.
- LEEMANN, A., THALMANN, C. & STUDER, W. (2005): Alkali-aggregate reaction in Swiss tunnels. – Materials and Structures 38, 381–386.
- LORENZ, W. & GWOSDZ, W. (1999): Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden. Teil 3: Quarzrohstoffe. – Geol. Jb., Reihe H6, 3–119.
- (2003): Handbuch zur geologisch-technischen Bewertung von mineralischen Baurohstoffen. – Geol. Jb., Sonderh. Reihe H, Heft 16.
- METTRAUX, M. (1989): Sédimentologie, paléotectonique et paléo-océanographie des Préalpes médianes (Suisse romande) du Rhétien au Toarcien. – Diss. Univ. Fribourg.
- MOJON, A. (1984): Geologie des Helvetischen Kieselkalkes zwischen dem Kiental (Berner Oberland) und Vierwaldstättersee. – Diss. Univ. Bern.
- OBERT, L., WINDES, S. L. & DUWALL, W. I. (1946): Standardized test for determining the physical properties of mine rock. – U.S. Bur. Mines, Rep. Invest. 3891.
- PAPELITZKY, C. (2007): Beurteilung von Hartgesteinskörnungen mithilfe des LCPC-Abrasivitätstests und der Kornformanalyse. – Bachelorarb. tech. Univ. München.
- PFIFFNER, O. A. (2009): Geologie der Alpen. – Haupt, Bern.
- QUERVAIN, F. DE (1956): Beziehungen zwischen Gesteinsbeschaffenheit, Form und Festigkeit bei Strassensplitt. – Teilber. zum Forschungsauftr. Nr. 6/1956: Splittuntersuchungen und Splittnormierung.
- (1967): Technische Gesteinskunde (2. Aufl.). – Birkhäuser, Basel.
- (1969): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz (3. Aufl.). – Schweiz. geotech. Komm.
- REY, L. (2009): Materialkreisläufe: Die Bausubstanz ist unser grösstes Rohstofflager. – Umwelt 3/2009, Rohstoffe aus Abfällen, Bundesamt f. Umwelt BAFU, 9–13.
- RIETVELD, H. M. (1967): Line profiles of neutron powder diffraction peaks for structure refinement (WO3). – Acta crystallogr. 22, 151–152.
- (1969): A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. – J. appl. Crystallogr. 2, 65–71.
- RÖTHLISBERGER, B. (2000): Stopfversuch in Ostermundigen. Teil I und II.
- RÖTHLISBERGER, F., SCHMUTZ, G., DÄPPEN, J., KURZEN, E. & WÜRSCH, E. (2005): Alterungsphänomene von Gleisschotter. – Eisenbahning. 56/6, 56–59.
- RYKART, R. (1995): Quarz-Monographie. – Ott, Thun.
- SCHENKER, F. (2008): Shocked quartz in Ticino, and beyond. – Abstr. Vol., 6th Swiss Geosci. Meet., 100–101.

- SCHOOTBRUGGE, B. VAN DE (2001): Influence of paleo-environmental changes during the Hauterivian (Early Cretaceous) on carbonate deposition along the northern margin of the Tethys: evidence from geochemical records. – Diss. Univ. Neuchâtel.
- SGTK [Schweizerisches Geotechnische Kommission] (2006): Potenzielle Hartgesteinsvorkommen der Schweiz: Potenzialkarten für die Planungsstudie. – Schweiz. geotech. Komm., [www.sgtk.ch](http://www.sgtk.ch)
- (2010): Geotechnischer Umweltatlas GUA. – Schweiz. geotech. Komm., [www.sgtk.ch](http://www.sgtk.ch)
- SKS [Schweizerisches Komitee für Stratigraphie] (2005): Richtlinien zur stratigraphischen Nomenklatur. – *Eclogae geol. Helv.* 98/3, 385–405.
- SPIESS, L., TEICHERT, G., SCHWARZER, R., BEHNKEN, H. & GENZEL, C. (2009): Moderne Röntgenbeugung. Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker (2. Aufl.). – Vieweg + Teubner, Wiesbaden, DOI:10.1007/978-3-8349-9434-9\_9.
- STAHEL, A. (1968): Die Eignung von Splitten verschiedener schweizerischer Steinbrüche für den Bau von Strassenbelägen. – *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 45.
- STREIT, R. (1987): Neuburger Kieselerde (Kieselkreide). – *Geologica bavar.* 91, 153–158.
- THALMANN, C. (1996): Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen. – *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 91.
- THALMANN, C., ZINGG, J., RYTZ, G., STRAHM, K. & WYSS, C. (2001): Verhinderung von Betonschäden infolge Alkali-Aggregat-Reaktion. – *Tec21* 15, 19–25.
- THURO, K. & KÄSLING, H. (2009): Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels. – *Geomech. and Tunnelling* 2/2, 179–188.
- THURO, K., SINGER, J., KÄSLING, H. & BAUER, M. (2006): Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung. – *Beitr. 29. Baugrundtag. Bremen, dtsh. Ges. Geotech.*, 283–290.
- TRÉGUER, P., NELSON, D. M., BENNEKOM, A. J. VAN, DEMASTER, D. J., LEYNAERT, A. & QUÉGUINER, B. (1995): The silica balance in the world ocean: a re-estimate. – *Science* 268, 375–379.
- TRÜMPY, R. (1949): Der Lias der Glarner Alpen. – Diss. eidg. tech. Hochsch. [ETH] Zürich.
- (1980): *Geology of Switzerland, a guide-book.* – Schweiz. geol. Komm., Wepf, Basel.
- TUCKER, M.E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. – Enke, Stuttgart.
- TURTSCHY, J.-C., BLUMER, M., PARTL, M., STAHEL, E., BÜHLER, T., WERNER, R., & HORAT, M. (2005): Schweizerisches Handbuch für die Konzeption des Strassenoberbaus. – Bundesamt f. Strassen ASTRA, Forschungsauftr. VSS 2000/412.
- VSH [Verband schweizerischer Hartsteinbrüche] (1997): Filler aus Zuschlagstoff im bituminösen Belagsbau.
- (2007): Hartgestein aus der Schweiz – das unverzichtbare Produkt. – Information VSH.
- (2010a): Verband schweizerischer Hartsteinbrüche, [www.vsh-web.ch](http://www.vsh-web.ch).
- (2010b): Absatzstatistik der Mitgliederfirmen (unpubl.).
- WECK, M. (2002): Werkzeugmaschinen-Fertigungssysteme, Bd. 2: Konstruktion und Berechnung. – Springer, Berlin.
- WEIHER, B. (2009): Kennwertprognosen in der Natursteinindustrie als Hilfestellung für Erkundung und Qualitätssicherung. – Diss. tech. Univ. München.
- WIEDENMAYER, F. (1980): Die Ammoniten der mediterranen Provinz im Pliensbachian und im unteren Toarcian aufgrund neuer Untersuchungen im Generoso-Becken (Lombardische Alpen). – *Denkschr. schweiz. natf. Ges.* 93.
- WYSSLING, G.W. (1986): Der frühkretazische helvetische Schelf im Vorarlberg und Allgäu. – *Jb. geol. Bundesanst.* 129, 161–265.
- YOUNG, R. A. (1993): Introduction to the Rietveld method. In: YOUNG, R. A. (Ed.): *The Rietveld method* (p. 1–38). – Oxford Univ. Press.

## Verdankungen

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde im Rahmen einer Dissertation am Institut für Geochemie und Petrologie an der ETH Zürich durchgeführt (Diss. ETH Nr. 19451).

Für die Unterstützung dieser Arbeit darf ich folgenden Personen danken: Prof. Dr. M. Schmidt, Referent und Präsident der Schweizerischen Geotechnischen Kommission (SGTK), Dr. R. Kündig, Korreferent und Geschäftsführer der SGTK, Dr. C. Thalmann, Korreferent (Büro für Ingenieurgeologie B-I-G, Gümligen). Ebenfalls danke ich den Korreferenten Prof. Dr. B. Grobety (Universität Fribourg) und Prof. Dr. K. Thuro (Technische Universität München) für ihre Mitwirkung und Begutachtung der Arbeit.

Mein Dank gilt auch einer Vielzahl weiterer Personen. Insbesondere möchte ich A. Baumeler (GRENZEN – Digitale Kartographie, vorher SGTK), Dr. E. Reusser (ETH Zürich), Dr. C. Pudack (OMYA), Dr. M. E. Gerber (Geologisches Gutachtenbüro, Uettiligen), Prof. Dr. D. Bernoulli (Universität Basel), F. Pirovino (ETH Zürich), M. Oertle, Dr. T. Burri, Dr. K. Zehnder und D. Fulda erwähnen. Letztere vier Personen gehören zum Kernteam der SGTK, welches mich während mehrerer Jahre meiner Dissertationsarbeit stets auf breiter Basis unterstützt hat.

Ein besonderer Dank geht auch an den Präsidenten R. Rist sowie alle Mitglieder des Verbands schweizerischer Hartsteinbrüche (VSH). Dank ihrer Offenheit, Hilfsbereitschaft, Erfahrungen und ideellen Unterstützung konnte die Arbeit in dieser Art überhaupt durchgeführt werden. Aktuelle Problemkreise im Zusammenhang mit dem Abbau und der Nutzung von Hartsteinen konnten dadurch festgestellt und erfasst werden, was für den Arbeitsgang unerlässlich war.

In Zusammenhang mit der Probenbeschaffung ist auch die Hilfsbereitschaft der SBB (Bereich Infrastruktur, Ingenieurbau) zu erwähnen, die mir für Untersuchungen Proben von aktuell verwendeten Hartsteinen zur Verfügung gestellt hat.

Schliesslich danke ich der Schweizerischen Geotechnischen Kommission für die Möglichkeit, die Dissertation in die «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie» aufzunehmen. Damit verbunden geht auch ein Dank an die Landesgeologie (swisstopo), welche die Gestaltung und den Druck der Publikation übernommen hat.