



Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbelastung

**Indice géotechnique pour l'évaluation du potentiel
d'exposition aux poussières de quartz**

**Geotechnical index for the evaluation of the quartz dust
exposure potential**

**ETH Zürich, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
Dr. John Singer
Dr. Ömer Ündül**

**Lombardi SA Ingegneri Consulenti
Mathias Neuenschwander**

**Marti Tunnelbau AG
François Bertholet**

**Forschungsprojekt FGU 2012/007 auf Antrag der
Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)**

November 2015

1537

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbelastung

**Indice géotechnique pour l'évaluation du potentiel
d'exposition aux poussières de quartz**

**Geotechnical index for the evaluation of the quartz dust
exposure potential**

**ETH Zürich, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
Dr. John Singer
Dr. Ömer Ündül**

**Lombardi SA Ingegneri Consulenti
Mathias Neuenschwander**

**Marti Tunnelbau AG
François Bertholet**

**Forschungsprojekt FGU 2012/007 auf Antrag der
Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. John Singer

Mitglieder

Dr. Ömer Ündül

Begleitkommission

Präsident

Dr. Kurosch Thuro

Mitglieder

Martin Bosshard

Heinz Ehrbar

Matthias Folly

Patrick Steinle

Martin Vogel

Hanspeter Stadelmann

Dirk Dahmann

KO-Finanzierung des Forschungsprojekts

SUVA

Fachgruppe für Untertagebau

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Problembeschreibung	13
1.2 Zielsetzung	13
1.3 Begriffe	14
2 Methodik	17
2.1 Modifizierter LCPC Versuch	17
2.1.1 Versuchsprinzip	17
2.1.2 Versuchseinrichtung	17
2.1.3 Probenvorbereitung	21
2.1.4 Versuchsdurchführung	22
2.1.5 Auswertung	23
2.1.6 Fehlerquellen	26
2.2 Röntgendiffraktometrie	28
2.2.1 Probenvorbereitung	28
2.2.2 Versuchsdurchführung	29
2.2.3 Auswertung	29
2.2.4 Fehlerquellen	30
2.3 Versuchsserie 1: Untersuchung des Einflusses wichtiger Versuchsparameter auf die Ergebnisse des Modifizierten LCPC Versuchs	30
2.3.1 Proben	31
2.3.2 Durchgeführte Versuche	31
2.3.3 Auswertung	31
2.4 Versuchsserie 2: Untersuchung des Quarzstaubpotentials einer breit gefächerten Auswahl verschiedener Gesteine	32
2.4.1 Proben	32
2.4.2 Durchgeführte Versuche	32
2.4.3 Erhebung geotechnischer Kennwerte	33
2.4.4 Auswertung	34
3 Ergebnisse und Interpretation	37
3.1 Versuchsdauer des Modifizierten LCPC-Versuchs	37
3.2 Drehzahl des Modifizierten LCPC-Versuchs	37
3.3 LCPC Abrasivitäts-Koeffizient (LAK)	41
3.4 LCPC Brechbarkeit (LBR)	41
3.5 LCPC Partikelkonzentrationen	42
3.5.1 Durchschnittliche Partikelkonzentrationen	42
3.5.2 Veränderung der Partikelkonzentrationen im Verlaufe des LCPC-Versuchs	44
3.5.3 Korngrößenverteilung des Feinstaubs	46
3.6 Mineralogie	48
3.6.1 Ausgangsgesteine	48
3.6.2 Feinstaub	50
3.7 Fraktionierung	50
3.8 LCPC-Feinstaubkoeffizient	53
3.9 LCPC Quarzstaubkoeffizient	53
3.10 Korrelation des LQK mit anderen geotechnischen Kennwerten	54
3.10.1 Direkte Abhängigkeiten	55
3.10.2 Parameterkombinationen	57

4	Diskussion	61
4.1	LCPC Prozessmodell	61
4.1.1	Grundlegende Prozesse	61
4.1.2	Materialabhängiges Verhalten	62
4.2	Empfehlungen für eine Richtlinie zur Beurteilung der Quarzstaubgefährdung im Tunnelbau	63
4.2.1	Anwendung des LCPC-Quarzstaubkoeffizienten	63
4.2.2	Bestimmung des Quarzstaubpotentials anhand üblicher geotechnischer Parameter	63
4.2.3	Klassifizierung des Quarzstaubpotentials	64
5	Ausblick	67
	Anhänge.....	69
	Glossar.....	79
	Literaturverzeichnis.....	81
	Projektabschluss	83
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	89

Zusammenfassung

In der Vergangenheit kam es bei Untertagebauten in der Schweiz wiederholt zu unvorhergesehenen Überschreitungen der zulässigen Arbeitsplatzkonzentration von Quarzfeinstaub in der Luft. Dies führte zum Teil zu Unterbrechungen im Baubetrieb und damit zu erheblichen Verzögerungen im Bauablauf. Der Zeitverlust und die notwendigen technischen Gegenmaßnahmen führten zu erheblichen Mehrkosten. Um in Zukunft die Arbeitssicherheit im Untertagebau gewährleisten zu können und um Planungssicherheit zu schaffen, müssen potentiell Quarzstaub produzierende Gesteine möglichst früh bei der Projektierung entsprechender Baumassnahmen erkannt und durch das Vorsehen entsprechender Gegenmaßnahmen berücksichtigt werden. Bislang fehlt jedoch ein einfaches, objektives planerisches Instrument, um die potentielle Quarzstaubbelastung in der Frühphase der Planung eines Projektes abschätzen zu können.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Definition eines geotechnischen Indexwertes für die Beurteilung des Potentials von Gesteinen zur Quarzstaubbelastung. Dazu wurde ein neuer Laborversuch entwickelt, mit dem das Quarzstaubpotential von Gesteinen quantifiziert werden kann: der modifizierte LCPC-Versuch. In diesem wird der während des LCPC-Abrasivitäts-Versuchs erzeugte Gesteinsstaub aufgefangen und hinsichtlich Menge, Korngrößenverteilung und Mineralzusammensetzung (Quarzgehalt) untersucht. Dies ermöglicht eine Quantifizierung der freiwerdenden Quarzstaubmenge der untersuchten Gesteine. Das Quarzstaubpotential wird dabei in Form des neu definierten LCPC-Quarzstaubkoeffizienten (LQK) als Gramm Quarzfeinstaub pro Tonne Ausgangsgestein ausgedrückt.

Insgesamt wurden 14 verschiedene, in der Schweiz vorkommende, Gesteinsarten untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass der LQK das unterschiedliche Quarzstaubpotential der Gesteine gut abbilden kann. Außerdem war es über eine genaue Untersuchung der Korngrößenzusammensetzung und Mineralogie des im modifizierten LCPC-Versuch freiwerdenden Staubes möglich, grundsätzliche Unterschiede im Staubungsverhalten verschiedener Gesteine zu identifizieren. So konnten z.B. eine wechselnde Fraktionierung der Mineralgehalte im freigesetzten Staub und deutliche Veränderungen in den Korngrößenzusammensetzungen des Staubes im Laufe des Versuches beobachtet und quantifiziert werden. Anhand dieser Ergebnisse konnten erste Hypothesen zu den bei verschiedenen Gesteinen im LCPC-Versuch ablaufenden Bruchprozessen angestellt werden.

Auf Grundlage der ermittelten LQK Werte wurde zudem untersucht, ob, und wenn ja wie, typische geotechnische Parameter bzw. Parameterkombinationen mit dem Quarzstaubpotential korrelieren. Damit kann eine Aussage über die potentielle Quarzstaubgefährdung anhand bereits existierender geotechnischer Parameter realisiert werden. So ergab sich z.B. für den CAI (Cerchar Abrasivitäts Index) eine gute Korrelation mit dem LQK, wobei diese auf Gesteine, in denen Quarz das dominierend abrasive Mineral ist, beschränkt ist.

Abschließend wurde für den LQK eine erste deskriptive Klassifizierung mit den Klassen niedrig (0-4 g/t), mittel (4-12 g/t) und hoch (> 12 g/t) definiert.

Die Ergebnisse dieser Studie sind die wissenschaftliche Basis für eine praxisrelevante Einteilung des Quarzstaubpotentials in Gefährdungsstufen (z.B. geringe/mittlere/hohe Quarzstaubgefährdung) im Rahmen der Erarbeitung des SIA Merkblattes 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“. Dabei werden die hier ermittelten Laboruntersuchungen mit realen Fallbeispielen / Schadensfällen korreliert.

Mit dem modifizierten LCPC Versuch wurde ein geeignetes Instrument geschaffen, um das Quarzstaubpotential von Gesteinen zu beurteilen. Der Versuch sollte jedoch noch mit weiteren Gesteinsarten erprobt werden, um die hier gemachten Beobachtungen zu bestätigen. Insbesondere die Hypothesen bezüglich der während des LCPC Versuchs ablaufenden Bruchvorgänge müssen noch verifiziert werden. Auch die ermittelten Korrelationen mit anderen geotechnischen Parametern (insb. Cerchar Abrasivity Index,

CAI) sollten durch weitere Versuche an anderen Gesteinsarten ergänzt und aktualisiert werden.

Auf Grundlage der hier erarbeiteten Laborergebnisse sowie Feldmessungen von Schadensfällen bei verschiedenen Untertagebauprojekten hat die Arbeitsgruppe Quarzstaub der Fachgruppe für Untertagebau (FGU) den CAI als geeigneten Parameter identifiziert, um eine Gefährdungseinstufung der Gesteine bzgl. Quarzstaub vorzunehmen. Diese Einstufung sollte bei Verfügbarkeit von neuen Daten (aus der Praxis wie im Labor) wiederholt überprüft werden.

Résumé

Autrefois, dans les exploitations minières souterraines en Suisse, la concentration de poussière de silice cristalline dans l'air, admissible en milieu de travail, dépassait souvent les normes. Cela entraînait en partie des interruptions de chantier et donc des retards importants dans le déroulement des travaux. La perte de temps et les contre-mesures techniques nécessaires engendraient des coûts supplémentaires importants. Afin d'assurer la sécurité au travail dans les mines souterraines à l'avenir et garantir la sécurité de la planification, les roches renfermant de la silice cristalline doivent être détectées le plus tôt possible lors de l'étude des travaux de construction correspondants et prises en compte en élaborant des contre-mesures appropriées. Cependant, il n'existe à ce jour aucun instrument de planification simple et objectif permettant d'évaluer l'exposition potentielle à la poussière de quartz aux premiers stades d'un projet.

Le but de cette recherche consiste à déterminer un indice géotechnique permettant d'évaluer quelles sont les roches susceptibles d'émettre de la poussière de quartz. À cet effet, un nouveau test de laboratoire a été développé, qui permet de quantifier le potentiel de poussière de quartz des roches : l'essai LCPC modifié. Au cours de ce test, la poussière de roche générée pendant l'essai d'abrasivité LCPC est recueillie et examinée quant à la quantité, la répartition granulométrique et la composition minérale (teneur en quartz). Cette méthode permet de quantifier le dégagement de poussière de quartz présent dans les roches examinées. Le potentiel de poussière de quartz est exprimé sous forme d'un coefficient de poussière de quartz LCPC nouvellement défini (*LQK, LCPC-Quarzstaubkoeffizienten*) en grammes de poussière de silice cristalline par tonne de roche mère.

Un total de 14 types de roches différentes, présentes en Suisse, ont été étudiées. Ainsi, on a pu démontrer que le coefficient LQK peut exactement reproduire le potentiel de poussière de quartz des roches. Il a également été possible, grâce à un examen minutieux de la composition granulométrique et minéralogique de la poussière libérée lors de l'essai LCPC modifié, d'identifier les différences fondamentales d'empoussièrement des différentes roches. On a également pu observer et quantifier p. ex. un fractionnement variable des matières minérales dans la poussière libérée et des changements importants dans les compositions granulométriques de la poussière au cours de l'essai. Ces résultats ont permis de confirmer les premières hypothèses sur les processus de rupture dans différentes roches ayant eu lieu lors de l'essai LCPC.

En se basant sur les valeurs LQK établies, on a également étudié si, et le cas échéant, comment des paramètres ou des combinaisons de paramètres géotechniques typiques sont en corrélation avec le potentiel de poussière de quartz. Ainsi, le risque potentiel lié à la poussière de quartz peut être déterminé sur la base des paramètres géotechniques existants. Par exemple, pour l'IAC (Indice d'Abrasivité Cerchar), on a trouvé une bonne corrélation avec le LQK, limitée aux roches dans lesquelles le quartz est le minéral dominant.

Enfin, on a défini pour le LQK une première classification descriptive par catégories : faible (0-4 g/t), moyenne (4-12 g/t) et élevée (> 12 g/t).

Les résultats de cette étude fournissent une base scientifique pour un classement concret du potentiel de poussière de quartz en niveaux de risque (p. ex. risque de poussière de quartz faible/moyen/élevé) dans le cadre de l'élaboration de la fiche signalétique SIA 2054 « Poussière de quartz dans les exploitations minières souterraines ». Les tests de laboratoire étudiés ici ont été corrélés avec des études de cas/sinistres réels.

Avec l'essai modifié LCPC, un outil approprié a été créé pour évaluer le potentiel de poussières de silice cristalline. L'essai doit cependant être testé avec d'autres types de roches pour confirmer les observations faites ici. Plus précisément, les hypothèses relatives au processus de rupture se déroulant au cours de l'essai LCPC doivent encore être vérifiées. Les corrélations identifiées avec d'autres paramètres géotechniques (en

particulier Cerchar Abrasivity Index, CAI) doivent être complétées et actualisées par d'autres essais sur d'autres types de roches.

Basé sur les résultats de laboratoire effectués ici et sur les mesures des cas de dommages dans divers projets de constructions souterraines, le groupe de travail a identifié la poussière de quartz du groupe spécialisé pour la construction souterraine (FGU), le CAI comme paramètre établi pour une classification du degré de dangerosité de la roche en ce qui concerne la poussière de silice cristalline. Cette classification doit être vérifiée à plusieurs reprises pour la disponibilité des nouvelles données (sur le terrain comme en laboratoire).

Summary

In the past, the maximum workplace concentration of airborne quartz dust repeatedly was surpassed during underground construction works in Switzerland. This sometimes led to an interruption of tunnel drive work and thereby to significant delays in the building process. The loss of time and the necessity to install mitigation measures led to considerable additional costs. In order to ensure the work safety in mining and to create future planning security, potentially quartz dust producing rocks must be identified as early as possible during the project planning process and must be addressed with suitable mitigation measures. However, to date there is no simple and objective planning tool, which allows to evaluate the potential quartz dust exposure in an early project planning phase.

The aim of this research project is the definition of a geotechnical index value for the assessment of the quartz dust potential of rocks. For this purpose, a new laboratory test was developed, which allows to quantify the quartz dust potential of rocks: the modified LCPC test. In this the rock dust generated during the LCPC abrasivity test is collected and examined for quantity, grain size distribution and mineral composition (quartz content). This enables to determine the amount of quartz dust released from the different studied rock samples. The quartz dust potential is then expressed as the new "LCPC quartz dust coefficient" (LQK), which is defined as grams of released dust per ton of rock.

A total of 14 different rock types, which occur in Switzerland, were investigated. It could be demonstrated that the LQK can depict the different quartz dust potential of the rocks quite well. Through a detailed examination of the grain size distribution and mineralogy of the dust released during the modified LCPC test it was possible to identify differences in the dust release behavior of different rocks. For instance, variable mineral fractioning and differences in the grain size distribution throughout the LCPC test were observed. These results allowed to create first hypotheses regarding the fracture processes of different rock types during the LCPC test.

Based on the acquired LQK values it also was investigated whether, and if so how, typical geotechnical parameters or combinations of parameters correlate with the quartz dust potential. This potentially allows to evaluate the quartz dust hazard based on existing geotechnical parameters. E.g. a clear correlation was proven between the LQK and the Cerchar Abrasivity Index (CAI), which however is restricted to rocks in which quartz is the dominant abrasive mineral.

Finally, a first descriptive classification with the classes low (0-4 g / t), medium (4-12 g / t) and high (> 12 g / t) quartz dust potential was introduced based on lithological considerations.

The results of this study are the scientific basis for a practice-oriented definition of quartz dust hazard levels (e.g. low / medium / high silica dust hazard), which is presented in the new SIA recommendation 2054 "quartz dust in mining". In this the laboratory test results of this study are correlated with real case studies in order to define quartz dust hazard levels.

With the modified LCPC test, a suitable tool was created to assess the quartz dust potential of rocks. The test, however, still needs to be performed with other rock types to confirm the observations made here. Especially the hypotheses regarding the fracture processes during the LCPC test need to be verified. The calculated correlations with other geotechnical parameters (esp. Cerchar Abrasivity Index, CAI) should be supplemented and updated by further experiments on other rock types.

Based on the laboratory results presented in this report and data from case studies of various underground construction projects with quartz dust problems, the working group "Quartzdust" of the Swiss Tunneling Society (STS) has identified the CAI as a suitable parameter to perform a first risk assessment regarding the quartz dust potential of silica bearing rocks. In future this classification should be repeatedly checked for availability of new data (from case studies as from laboratory tests).

1 Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Der schädliche Einfluss des lungengängigen Quarzstaubes auf den menschlichen Organismus (insb. chronische Bronchitis, Silikose und neuerdings auch Lungenkrebs) wurde in einer Vielzahl von medizinischen Studien und entsprechenden Publikationen nachgewiesen (z.B. Pelucchi 2006 [12], Holland 1990 [9]). Aus diesem Grund gilt in der Schweiz momentan die von der SUVA festgelegte maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für Quarzfeinstaub von $0,15 \text{ mg/m}^3$ (SUVA 2012 [14]). Dabei ist aufgrund der kanzerogenen Eigenschaften des Quarzfeinstaubes mittelfristig eine weitere Absenkung der maximalen Arbeitsplatzkonzentration für lungengängigen Quarzfeinstaub von $0,15 \text{ mg/m}^3$ auf $0,10 \text{ mg/m}^3$ in Diskussion.

In der Vergangenheit kam es bei Untertagebauten in der Schweiz wiederholt zu unvorhergesehenen Überschreitungen der zulässigen Arbeitsplatzkonzentration von Quarzfeinstaub in der Luft. Dies führte zum Teil zu Unterbrechungen im Baubetrieb und damit zu erheblichen Verzögerungen im Bauablauf. Die notwendigen technischen Gegenmaßnahmen führten zu erheblichen Mehrkosten. Aufgrund der diskutierten Absenkung des MAK Wertes könnte sich diese Problematik also in Zukunft noch deutlich verstärken.

Um in Zukunft die Arbeitssicherheit im Untertagebau gewährleisten zu können und um Planungssicherheit zu schaffen, müssen potentiell Quarzstaub produzierende Gesteine möglichst früh bei der Projektierung entsprechender Baumassnahmen erkannt und durch das Vorsehen entsprechender Gegenmaßnahmen berücksichtigt werden.

Ob und in welchem Umfang während des Untertagebaus Quarzstaub freisetzt wird hängt stark von den jeweils eingesetzten bautechnischen Verfahren, der Zusammensetzung und dem Gefüge (insb. Durchtrennungsgrad) des Gebirges und dem Vorhandensein von Wasser ab. Exemplarisch wurden die vielfältigen und komplexen Prozesse, die zur Quarzstaubbildung führen, für einzelne Verfahren (z.B. Rotary-Bohren (Listak 2003 [10]) oder Rohrvortrieb (Oliver & Miracle-McMahill 2006 [11])) und geologische Situationen (z.B. Kohlevorkommen im Osten der USA (Schatzel 2009 [13]) bereits intensiv untersucht. Dabei werden in der Regel der Quarzgehalt des Gesteins, die Bindung des Quarzes im Gestein und – allgemein formuliert – der Energieeintrag in das Gestein (z.B. Drehgeschwindigkeit und Anpressdruck beim Bohren (Listak 2003 [10])) als maßgebliche Faktoren für die Bildung von Quarzstaub genannt.

Gerade in der Frühphase der Planung eines Untertagebauprojektes liegen die für eine zufriedenstellende Beurteilung der Quarzstaubproblematik notwendigen detaillierten mineralogischen und geologischen Untersuchungen meist nicht vor. Deshalb wird die Quarzstaubproblematik häufig zunächst falsch eingeschätzt oder gar nicht berücksichtigt. Ein einfaches, objektives planerisches Instrument, um die potentielle Quarzstaubbelastung in der Frühphase der Planung eines Projektes abschätzen zu können, existiert derzeit nicht.

1.2 Zielsetzung

Ziel ist die Entwicklung eines objektiven Verfahrens zur Abschätzung des Quarzstaubpotentials von Gesteinen, welches bereits in der Frühphase der Planung von Untertagebauprojekten zum Einsatz gebracht werden kann. Dieses soll unabhängig von der zum Einsatz gebrachten Bautechnik die geologische Disposition zur Entstehung von Quarzstaub beurteilen.

Die Grundlage der Beurteilung ist dabei ein neu- bzw. weiterentwickelter Laborversuch, der eine Quantifizierung des bei Bruchvorgängen im Gestein freiwerdenden Quarzstaubes

ermöglichen soll: der sogenannte „Modifizierte LCPC Versuch¹“. Der Nachweis der Tauglichkeit des Modifizierten LCPC Versuchs zur Bestimmung des Quarzstaubpotentials wird anhand folgender Untersuchungen erbracht:

- systematische Untersuchung des Einflusses der wichtigsten Versuchsparameter (Drehzahl des LCPC Metallflügels und Versuchsdauer) auf die Versuchsergebnisse;
- exemplarische Untersuchung von 14 verschiedenen Gesteinsarten mit bekanntermaßen unterschiedlichem Quarzstaubpotential.

Zusätzlich wird untersucht in wie weit die Ergebnisse des modifizierten LCPC Versuchs mit anderen geotechnischen Gesteinskenngößen wie z.B. die einaxiale Druckfestigkeit oder Abrasivitätskennzahlen (Cerchar Abrasivitäts Index (CAI) und LCPC Abrasivitäts Koeffizient (LAK)) korrelieren. Dies geschieht mit dem Ziel die Abschätzung des Quarzstaubpotentials auf Grundlage dieser meist in der Frühphase von Projekten bereits zur Verfügung stehenden geotechnischen Kennwerte zu ermöglichen.

Wenn möglich soll auf Grundlage der Ergebnisse dieser ersten Testreihen eine Einteilung in mindestens drei Quarzstaubpotential-Klassen (geringes / mittleres / hohes Quarzstaubpotential) erfolgen. Unter Berücksichtigung weiterer Faktoren (Durchtrennungsgrad des Gebirges und Gebirgsfeuchte) sollte diese Klassifizierung eine Auswahl der in der ASA²-Branchenlösung des SBV³ (Teil Untertage) festgelegten technischen Massnahmen zur Minimierung der Quarzstaubkonzentration in der Luft für verschiedene Prozesse bei der Bauausführung ermöglichen.

1.3 Begriffe

Im Folgenden werden einige wichtige Begriffe definiert, die in diesem Bericht verwendet werden. Weitere Begriffsdefinitionen finden sich im Glossar.

Staub: Staub ist die Sammelbezeichnung für feinste feste Teilchen, die in Gasen, insbesondere in der Luft aufgewirbelt lange Zeit schweben können.

Feinstaub: Feinstaub ist ein Teil des Schwebstaubs. In diesem Bericht wird umgangssprachliche Begriff «Feinstaub» – sofern nicht näher spezifiziert – als synonym für A-Staub (s.u.) verwendet.

A-Staub: Unter der alveolengängigen Fraktion (A-Staub) versteht man den Massenanteil des einatembaren Staubes, der so fein ist, dass er bis in die kleinsten Verzweigungen der Lunge, in die Alveolen (Lungenbläschen), vordringen kann (DGUV 2014 [8]). Für diese Teilchen lässt sich keine genaue Größe angeben, sondern lediglich eine Größenverteilung. Beschrieben wird dieser Bereich in der DIN EN 481 [2] (siehe Abb. 1). Die abgebildete Kurve für die A-Fraktion stellt somit die Wahrscheinlichkeit dar, mit der Teilchen mit einem bestimmten aerodynamischen Durchmesser in die Alveolen gelangen. Ein Probenahmegerät für die A-Staubmessung muss daher die gleiche Abscheidecharakteristik aufweisen.

¹ LCPC: *Laboratoire central des ponts et chaussées; französisches Forschungsinstitut.*

² ASA: Abkürzung für „Beizug von Arbeitsärzten und anderen Spezialisten der Arbeitssicherheit“

³ SBV: Schweizerischer Baumeisterverband

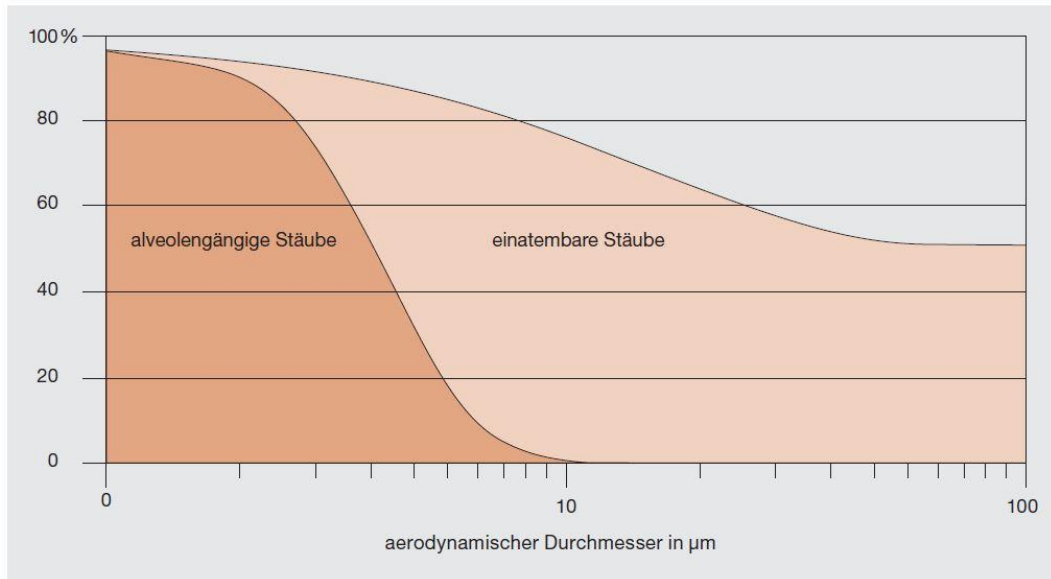


Abb. 1 Grafische Darstellung der Beziehung zwischen aerodynamischem Partikeldurchmesser und Durchlassgrad eines Vorabschneiders nach DIN EN 481 (1993) [2] für einatembare und alveolengängige Stäube.

Aerodynamischer Durchmesser: Die funktionsbestimmende Größe für Transport und Ablagerung des Staubes. Er bezeichnet den Durchmesser einer Kugel mit der Dichte 1 g/cm^3 und der gleichen Sinkgeschwindigkeit in ruhender Luft wie das betrachtete Partikel (DGUV 2014 [8]).

MAK-Wert: Der MAK-Wert ist die höchstzulässige Durchschnittskonzentration eines gas-, dampf- oder staubförmigen Arbeitsstoffes in der Luft, die nach derzeitiger Kenntnis in der Regel bei Einwirkung während einer Arbeitszeit von 8 Stunden täglich und bis 42 Stunden pro Woche auch über längere Perioden bei der ganz stark überwiegenden Zahl der gesunden, am Arbeitsplatz Beschäftigten die Gesundheit nicht gefährdet (SIA 196 1998).

2 Methodik

Zentrales Element der Methodik dieses Projektes ist das hier erstmals zur Anwendung gebrachte Verfahren zur Ermittlung des Quarzstaubpotentials, welches auf dem LCPC Versuch (AFNOR 1990 [1]) basiert. In dem sog. „Modifizierten LCPC Versuch“ wird der während des Versuchs bei Bruch- und Stoßvorgängen freiwerdende Feinstaub aufgefangen und hinsichtlich Menge, Korngrößenverteilung und Mineralzusammensetzung (Quarzgehalt) untersucht. Dies ermöglicht eine Quantifizierung der freiwerdenden Quarzstaubmenge und damit eine objektive Beurteilung des Quarzstaubpotentials der verschiedenen untersuchten Gesteine.

2.1 Modifizierter LCPC Versuch

Der originale LCPC-Abrasivitätsversuch wurde für die Untersuchung der Abrasivität und Brechbarkeit von Festgesteinen im *Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées* (LCPC) entwickelt. Bei den Versuchen wird jeweils der LCPC-Abrasivitäts-Koeffizient LAK und der LCPC-Brechbarkeits-Koeffizient LBK ermittelt. Die LCPC-Abrasivitätsversuche werden entsprechend der französischen Norm AFNOR (1990) [1] durchgeführt. Weitere Versuchsbedingungen sind von THURO et al. (2006) [16] im Detail beschrieben worden. Der hier vorgestellte Modifizierte LCPC Versuch wurde in diesem Forschungsprojekt entwickelt und erstmals zum Einsatz gebracht. Dabei wird der LCPC-Versuch um eine Anordnung zur Erfassung und Analyse des während des LCPC-Versuches freiwerdenden Feinstaubes erweitert.

2.1.1 Versuchsprinzip

Beim LCPC-Abrasivitätsversuch werden 500 g gebrochenes und getrocknetes Probenmaterial (Körnung 4 - 6,3 mm) in einen zylindrischen Behälter eingefüllt. Ein rechteckiger Metallflügel mit genormter Metallhärte (Rockwell B 60-75) und den Abmessungen 5 x 25 x 50 mm dreht während 5 min mit 4500 Umdrehungen pro Minute innerhalb des Behälters im Probenmaterial (siehe Abb. 6). Für die Bestimmung der Abrasivität wird der Metallflügel vor und nach dem Prüfvorgang eingewogen. Die Gewichtsabnahme des Metallflügels ist ein Maß für die Abrasivitätseigenschaften des Probenmaterials. Gleichzeitig kann durch die Bestimmung des Probenanteils < 1,6 mm nach dem Versuch eine Aussage über die Brechbarkeit des Materials gewonnen werden.

Bei der hier eingeführten Modifikation wird eine Vorrichtung für das Auffangen des bei dem LCPC Versuch entstehenden Feinstaubes eingeführt (vgl. Kap. 2.1.2). Die abgesaugte staubbefrachtete Luft wird einem optischen Partikelgrößenmessgerät und einem Feinstaubfiltersystem zugeführt. Letzteres dient der Erfassung des alveolengängigen Staubanteils (A-Staub), welcher anschließend mittels Röntgendiffraktometrie (vgl. Kap. 2.2) hinsichtlich seiner mineralogischen Zusammensetzung (insb. des Quarzgehalts) untersucht wird.

2.1.2 Versuchseinrichtung

Der Modifizierte LCPC Versuch besteht aus einer Reihung bzw. Parallelschaltung verschiedener Prüf-, Mess- und Probenahmegeräte (vgl. Kap. 2.1.2, siehe Abb. 2). Im modifizierten LCPC-Gerät wird die Probe zerkleinert und der dabei freiwerdende Staub aufgefangen. Der so erfasste Staub wird dann über einen Probenteiler auf zwei verschiedene Probenstränge aufgeteilt: auf einen ersten, der mit Hilfe eines optischen Partikelgrößenmessgerätes hinsichtlich der Korngröße analysiert wird, und auf einen zweiten, der zur Gewinnung einer Probe des alveolengängigen Staubanteils mit Hilfe eines entsprechenden Feinstaubfiltersystems dient. Eine Reihenschaltung dieser Analysen ist aufgrund der für die Korngrößenanalyse notwendigen Grobabscheidung und Verdünnung (1:1000, siehe unten) nicht möglich.

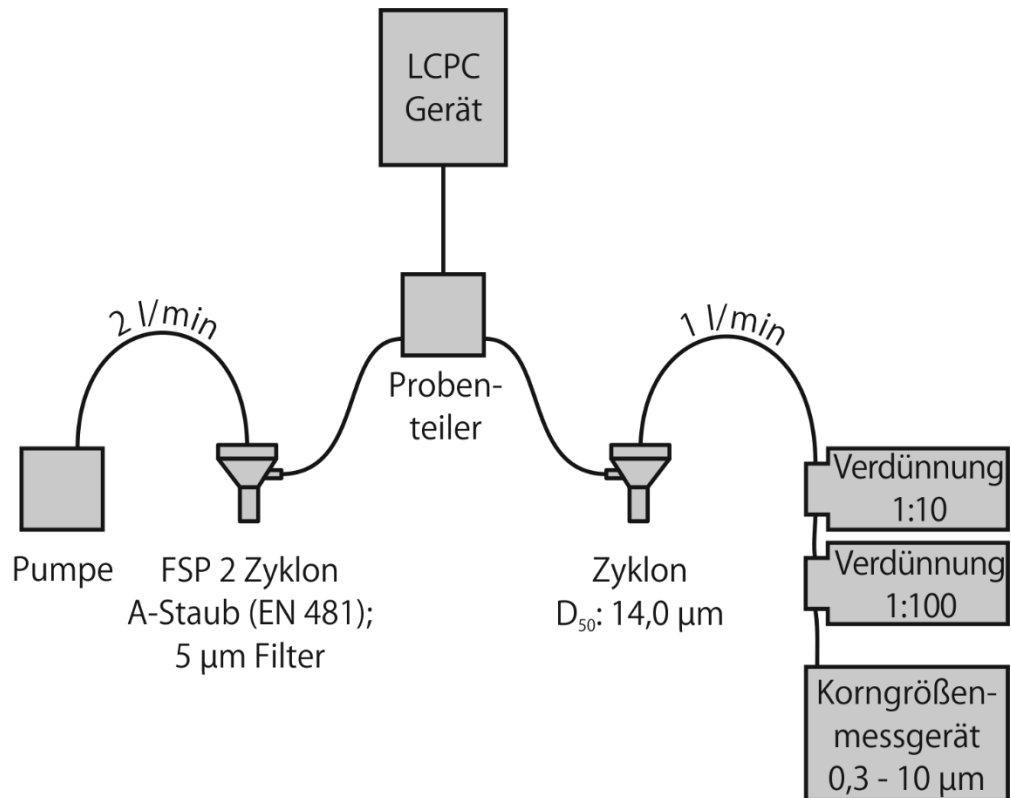


Abb. 2 Schemazeichnung der verschiedenen Elemente des modifizierten LCPC Versuchs und deren Reihenfolge hintereinander. Der staubbefrachtete Luftstrom wird in einem Probenteiler in zwei Stränge zur Korngrößenanalyse bzw. zur Probennahme für die mineralogische Untersuchung unterteilt. Eine Reihenschaltung der Elemente ist aufgrund der für die Korngrößenanalyse notwendigen Verdünnung nicht möglich.

Im Folgenden werden die einzelnen Elemente der Versuchseinrichtung beschrieben.

a, Modifiziertes LCPC-Gerät

Der detaillierte Aufbau des originalen Abrasivitäts-Prüfgeräts „Abroy-Gerät“ für den LCPC Versuch inklusive der genauen Maße und Materialien der einzelnen Komponenten des Versuchs, wie z.B. des Metallflügels und des -topfes finden sich in der französischen Norm P18-579 (AFNOR 1990 [1]) sowie in Anhang I.

Diese Versuchsanordnung wurde um ein System zur Erfassung des freiwerdenden A- und T-Staubes erweitert. Die dazu notwendigen Modifikationen wurden an einem Abroy-Gerät der Fa. Geotechnik Dunkel (München, Deutschland) vorgenommen. Dabei wird durch die Einführung einer hohlen Achse mit nach außen geführten Belüftungsöffnungen die Luftzufuhr und durch Absaugöffnungen im Deckel des Versuchstopfes die Luft- bzw. Staubabfuhr realisiert (siehe Abb. 3). Die Modifikationen wurden so vorgenommen, dass die Originalgeometrie der Versuchseinrichtung erhalten bleibt. Eine Beeinflussung der Ergebnisse des LCPC Versuchs durch die Modifikationen kann auf diese Weise weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Resultate der ersten Versuchsreihen mit dem modifizierten Aufbau unterstützen diese Annahme: der Verlust von Probenmaterial durch die Staubabfuhr ist so gering (< 0,1 g), dass dieser sich nicht nennenswert auf die Ergebnisse auswirkt. Um einen Luftstrom durch einen möglichst großen Teil des Topfes zu gewährleisten, wurden die Belüftungsöffnungen möglichst weit unten an der Achse des Drehflügels angebracht. Dabei ist zu beachten, dass während des Versuchs das Luft-Feststoffgemisch im Topf aufgrund der hohen Drehzahl des Flügels (4500 U/min) extrem turbulent durchgemischt wird, so dass der Einfluss der Position der Belüftungsöffnungen als vergleichbar gering eingeschätzt wird.

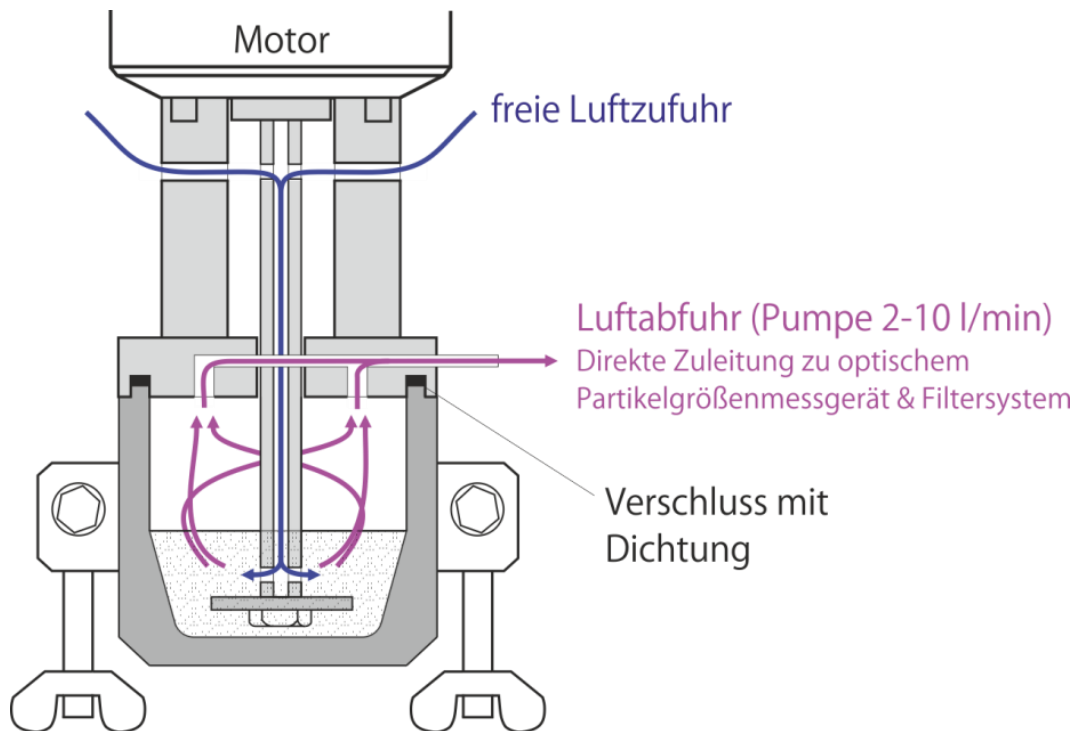


Abb. 3 Schemazeichnung des Belüftungssystems für den modifizierten LCPC Versuch. Die staubbefrachtete Luft wird über die Belüftungsöffnungen im Deckel des Topfes abgesaugt (Pumpleistung 3 l/min). Über die hohle Achse kann frische Luft nachströmen.

b, Probenteiler & Schlauchleitungen

Der Probenteiler und alle Schlauchleitungen sind so konzipiert, dass innerhalb des gesamten Systems eine konstante Luftgeschwindigkeit herrscht. Damit soll eine selektive Veränderung der Korngrößenverteilung des Feinstaubes beim Transport und der Probenteilung vermieden werden. Um dies zu erreichen, wurde die Querschnittsfläche der jeweiligen Stränge auf die jeweilige Pumpleistung der angeschlossenen Geräte angepasst. Da das Partikelgrößenmessgerät mit einer Pumpleistung von 1 l/min arbeitet, das Probenahmesystem jedoch mit 2 l/min wurden entsprechend unterschiedliche Schlauchdurchmesser verwendet (4,8 mm bzw. 6,8 mm). Die Geschwindigkeit des Luftstroms innerhalb des Systems beträgt damit ca. 55 m/min.

In wie weit es zu einer Sedimentation der Partikel in den Leitungen kommt hängt im Wesentlichen von der Transportkonzentration, der Korngrößenverteilung und der Strömungsgeschwindigkeit ab (Surek & Stempin, 2007 [15]). Während der Planung der Versuche war weder die zu erwartende Transportkonzentration noch die Korngrößenverteilung bekannt, weshalb eine Serie vorbereitender Versuche an einem herkömmlichen LCPC-Gerät (TU München) durchgeführt wurde. Dabei wurde die mittlere erfasste Feinstaubkonzentration im Laufe des LCPC-Versuchs an verschiedenen Gesteinen mittels eines Filtersystems mit bekanntem Luftstrom (zwischen 1 und 3,5 l/min) und anschließender Wägung des aufgefangenen Feinstaubes bestimmt. Die dabei ermittelte mittlere Feinstaubkonzentration lag dabei zwischen ca. 2000 und 7000 mg/m³. Auf dieser Grundlage wurde die oben genannte Spezifikation gewählt. Im Laufe der weiteren Versuche in diesem Projekt hat sich jedoch gezeigt, dass die auftretenden Feinstaubkonzentrationen z.T. deutlich höher liegen (bis zu ca. 50 g/m³). Dementsprechend kam es immer wieder zur Ablagerung von kleineren Mengen grobkörnigen Staubes in den Rohrleitungen (vgl. Kapitel 2.1.6). Dies sollte allerdings auf die hier durchgeführte Untersuchung des Feinstaubes < 10 µm keinen Einfluss haben.

c, Probenahmesystem

Als Probenahmesystem wurde die Probenahmepumpe SG5200 in Kombination mit dem Feinstaubprobenahmesystem FSP-2 nach BGIA⁴ verwendet (Hersteller: GSA Messgerätebau GmbH, Neuss-Norf, Deutschland). Dieses stellt ein tragbares System zur personenbezogenen Erfassung der alveolengängigen Staubfraktion dar und wird von der SUVA zur Beurteilung von staubförmigen Gefahrenstoffen im Untertagebau eingesetzt. Die Verwendung dieses Probenahmesystems soll eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den von der SUVA in tatsächlichen Projekten und den im Labor erfassten Staubkonzentrationsmessungen ermöglichen.

Das FSP-2 A-Staubprobenahmesystem (alveolengängiger Staub) ist mit einem Zyklonvorabscheider ausgestattet und wird mit einem konstanten Volumenstrom von 2 l/min betrieben. Die Staubprobe wird mit PVC Membranfiltern (Durchmesser 37 mm) mit einer Porenweite von 5 µm, welche in die Filterkassette eingesetzt werden, gewonnen.

Die Probenahmepumpe sorgt für einen gleichmäßigen Luftstrom von 2 l/min, unabhängig von dem Luftwiderstand des angeschlossenen Probenahmesystems, der maßgeblich auch von der Besetzung des Luftfilters abhängt. Für eine möglichst genaue Förderrate von 2 l/min wurde die Probenahmepumpe in regelmäßigen Abständen mittels eines Schwebekörper-Durchflussmessers kalibriert.

d, Partikelgrößensystem

Für Bestimmung der Korngrößenverteilung des entstehenden Staubes kam das tragbare optische Partikelgrößensystem OPS 3330 zum Einsatz (Hersteller: TSI Inc., Shoreview, MN, U.S.A.). Mit diesem Gerät kann die Korngröße des Staubes im Korngrößenbereich von 0,3 bis 10 µm auf bis zu 16 Kanälen kontinuierlich (im Sekundentakt) erfasst werden. Der Konzentrationsbereich liegt bei bis zu 3000 Partikel pro cm³, was eine Verdünnung der aus dem LCPC Gerät zugeführten Probe notwendig macht.

Dazu wurde zunächst – auf Grundlage der Ergebnisse einiger Vorversuche – eine Verdünnung von 1:100 gewählt, später wurde die Verdünnung auf 1:1000 erhöht, um z.T. auftretende Konzentrationsspitzen abzufangen.

Abb. 4 (rechts) Das FSP-2 Probenahmesystem in der Ansicht (Foto oben) und als Schemazeichnung inkl. der einzelnen Komponenten (unten) (GSA Messgerätebau).



⁴ Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

Im Laufe der Probeserie hat sich jedoch gezeigt, dass selbst diese Verdünnung in einigen Fällen nicht ausreicht und zumindest grenzwertige Konzentrationen erreicht werden (vgl. Kap. 2.1.6).

Die Verdünnung wird durch das Hintereinanderschalten zweier Verdünnungssysteme (1x 1:10 und 1x 1:100) erreicht. Es werden die vom Hersteller TSI empfohlenen Verdünnungssysteme 3332-10 bzw. 3332-100 verwendet. Um das Eindringen grober Partikel ($> \text{ca. } 15 \mu\text{m}$) in das Verdünnungssystem zu verhindern wurde ein Zyklon als Grobabscheider vorgeschaltet. Dies wurde aufgrund wiederholt auftretender Verstopfungen der Kapillare des Verdünnungssystems notwendig.

Bei dem vorgeschalteten Zyklon handelt es sich um den GK 2.69 Zyklon von BGI Inc. (Waltham, MA, U.S.A.), der bei dem verwendeten Luftstrom von 1 l/min eine mittlere Abscheidungsgrenze (d_{50}^5) von $15,3 \mu\text{m}$ besitzt. Eine geringe Beeinflussung des größten, mit dem Partikelzähler erfassten Korngrößenbereichs ($8 - 10 \mu\text{m}$) kann dabei nicht völlig ausgeschlossen werden.

2.1.3 Probenvorbereitung

Beim Modifizierten LCPC-Versuch kommt – wie beim originalen Versuch – gebrochenes Festgestein im Korngrößenbereich 4,0 bis 6,3 mm zum Einsatz. Dazu wird ca. 1,5 bis 2,0 kg einer Festgesteinsprobe zunächst mittels Hammerschlag und dann in einem Backenbrecher zerkleinert. Komponenten, die nach dem ersten Brechvorgang noch immer Korndurchmesser von über 6,3 mm aufwiesen, werden mittels einer Trockensiebung erneut abgetrennt und gebrochen. Bruchstücke $< 4,0 \text{ mm}$ werden verworfen. Dies wird so lange wiederholt bis die gesamte Probe auf Bruchstücke $< 6,3 \text{ mm}$ zerkleinert wurde. Dabei sollten am Ende mindestens 500 g Bruchstücke im Korngrößenbereich 4,0 bis 6,3 mm gewonnen werden.

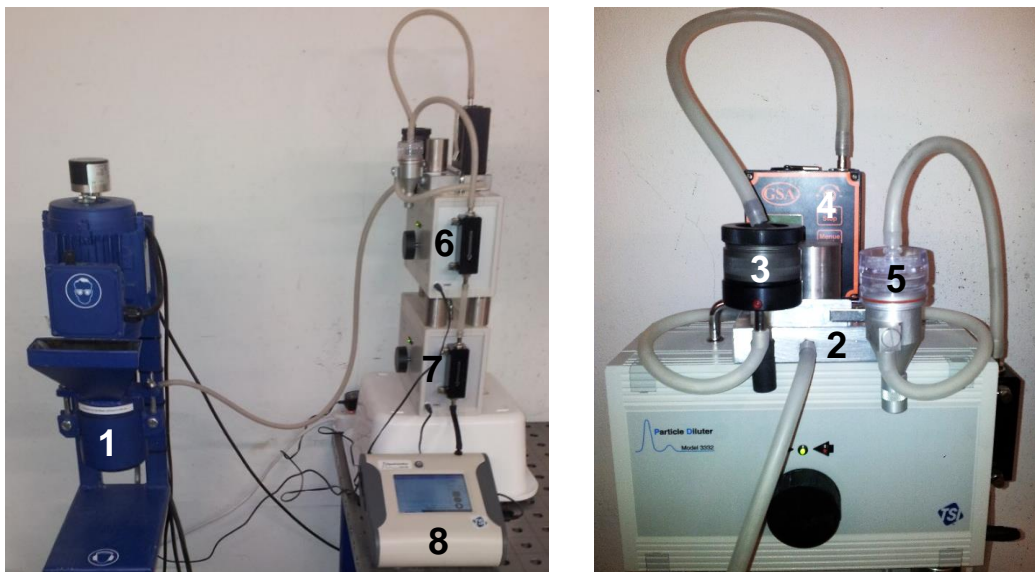


Abb. 5 Versuchsaufbau des modifizierten LCPC Versuchs links im Überblick, rechts im Detail die Anordnung der Zykclone (Probenahme: schwarz, Vorabscheider für Korngrößenbestimmung: silber). Zu sehen sind alle Elemente des Versuchssystems: das modifizierte Abroy-Gerät (1), der Probenteiler (2), das Probenahmesystem mit Probenahmekopf FSP-2 (3) und Pumpe (4), der Vorabscheider GK 2.69 (5), die Verdünnungssysteme 1:10 (6) und 1:100 (7) sowie das optische Partikelgrößenmesssystem (8).

⁵ Die Angabe der Abscheidungsgrenze erfolgt anhand der Korngröße bei der 50 % der Partikel aus der Probe entfernt werden. Kleinere Partikel bleiben vermehrt erhalten, größere werden verstärkt ausgefiltert.

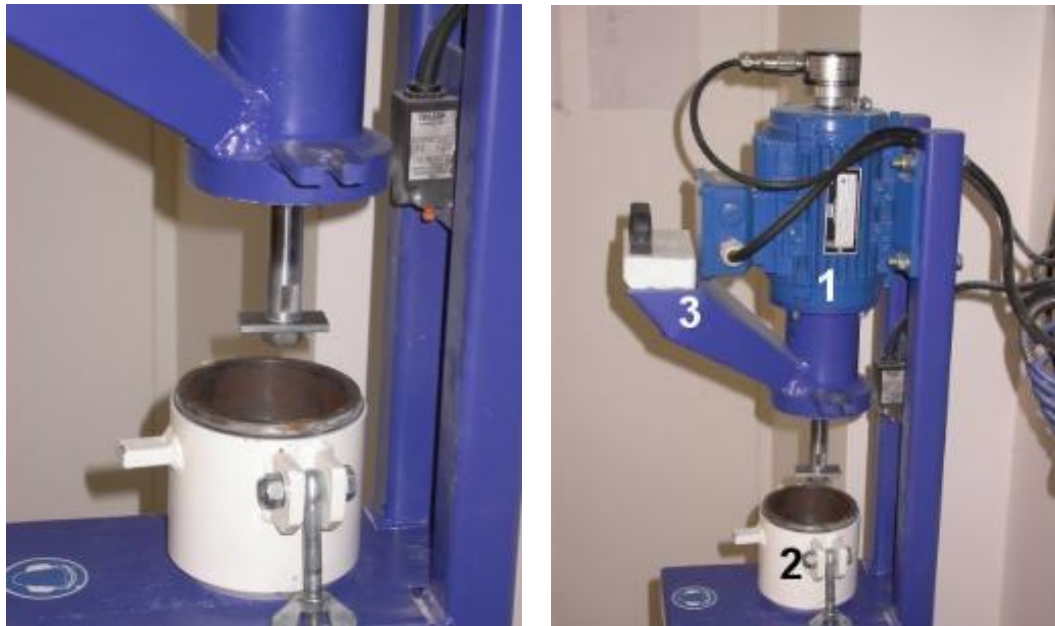


Abb. 6 Links: Abrasivitäts-Prüfgerät (1) Elektromotor mit 700 W Leistung; (2) Probenzylinder; (3) Trichter zum Befüllen des Probenzylinders (bei Betrieb des Gerätes verschlossen). Rechts: Am Prüfgerät montierter Metallflügel. Beim LCPC-Abrasivitätsversuch wird dieser 5 min lang mit 4500 U/min in der Probe gedreht.

2.1.4 Versuchsdurchführung

Der Ablauf der verschiedenen Versuche bzw. Versuchselemente ist in Abb. 7 dargestellt. Von den gebrochenen Proben wurden unter Zuhilfenahme eines Probenteilers und einer Präzisionswaage jeweils $500 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ für den Versuch in ein Becherglas gefüllt. Anschließend wurde die Masse des Metallflügels auf $0,01 \text{ g}$ genau und die Masse der Filterkassette inkl. Filterpapier auf $0,01 \text{ mg}$ genau ermittelt und notiert. Der Flügel und anschließend der Probenbehälter wurden in das Abrasivitäts-Prüfgerät eingebaut und die Probe über den Trichter in den Probenbehälter gegeben. Im Becherglas und im Trichter anhaftende Probenreste wurden mittels eines Pinsels in den Probenbehälter befördert. Die Filterkassette wurde in das Feinstaub-Probenahmesystem eingesetzt. Nach Verschließen der Befüllungsöffnung wurde nach ca. 5 min die Stauberfassung (d.h. die Pumpe des Probenahmesystems sowie die Pumpe des Partikelgrößenmessgerätes) aktiviert. Nach einer weiteren Minute wurde dann das Abrasivitäts-Prüfgerät aktiviert. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass der durch die Befüllung erzeugte Staub zum Zeitpunkt des Starts der eigentlichen Prüfung bereits aus dem Messsystem herausgezogen wurde.

Nach Beendigung des Prüfvorganges (5 min, automatische Deaktivierung) wurde die Stauberfassung eine weitere Minute aktiv gehalten. Nach Beendigung des Messvorganges wurde der Probenbehälter vom Abrasivitäts-Prüfgerät gelöst, wobei der Metallflügel vorsichtig aus dem Probenmaterial herausgezogen wird. Auf dem Metallflügel zu liegen gekommene Probenteile wurden mit Hilfe eines Pinsels in das Probengefäß befördert. Die Probe wurde dann möglichst vollständig, zur vorläufigen Aufbewahrung, in einen Probenbeutel gefüllt. Der Metallflügel wurde aus dem Abrasivitäts-Prüfgerät entfernt, mit Druckluft und Aceton von etwaig anhaftenden Probenresten befreit und anschließend erneut auf $0,01 \text{ g}$ genau gewogen. Die Filterkassette wurde aus dem Probenahmegerät entfernt und auf $0,01 \text{ mg}$ genau gewogen. Die mit dem Partikelgrößenmessgerät erfassten Daten wurden entsprechend der Proben- und Versuchsnummer benannt und gespeichert. Die in der Filterkassette gewonnene A-Staubprobe wurde der mineralogischen Untersuchung mittels Röntgendiffraktometrie zugeführt (vgl. Kap. 2.2). Zu einem späteren Zeitpunkt wurde von den im LCPC Abrasivitäts Test gebrochenen Proben der Massenanteil an Feinkorn $< 1,6 \text{ mm}$ mittels einer einfachen Trockensiebung bestimmt.

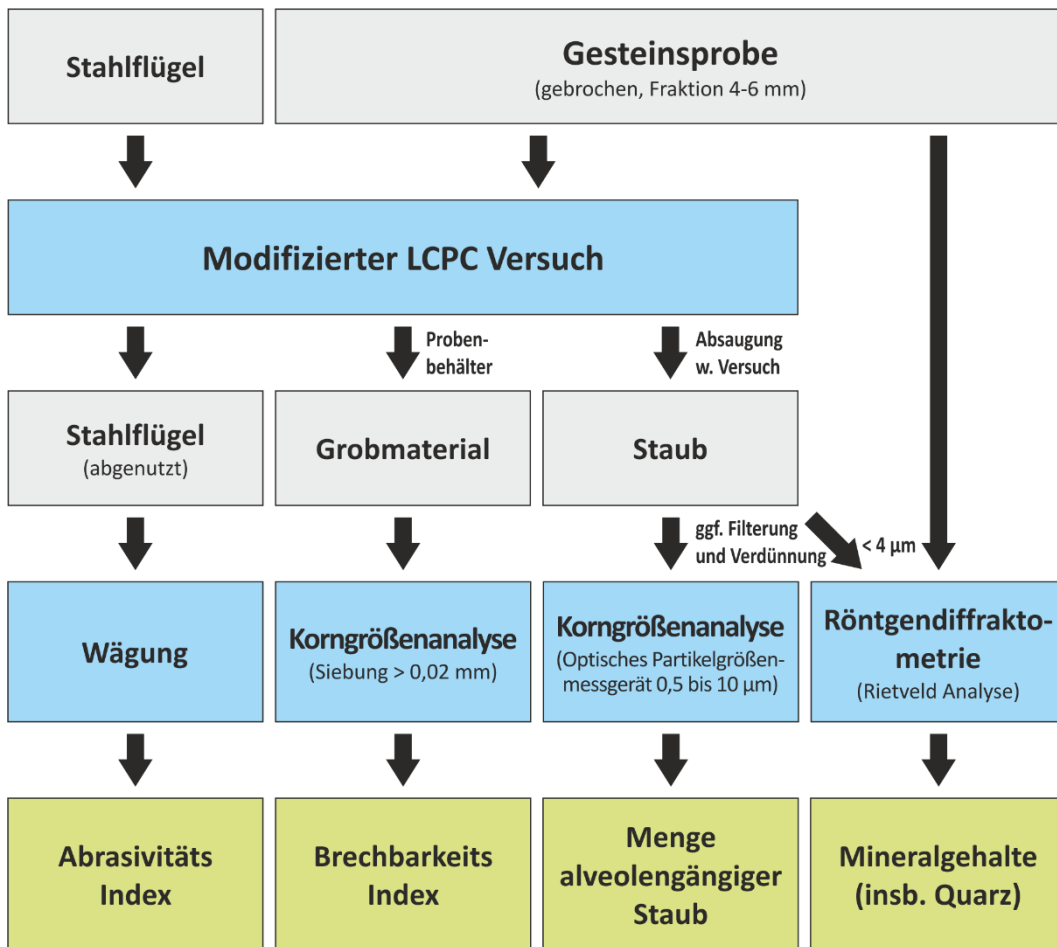


Abb. 7 Ablaufschema der Laborversuche (blau) mit den verwendeten Proben bzw. Zwischenprodukten (grau) und ermittelten Kennwerten (grün).

Die bei der Durchführung der Modifizierten LCPC-Abrasivitätsversuche gewonnenen Daten sind in der Anhang II zusammengefasst.

2.1.5 Auswertung

Die im Modifizierten LCPC Versuch gewonnenen Daten erlauben eine Auswertung entsprechend des Original-LCPC-Versuches zur Bestimmung des LCPC-Abrasivitäts-Koeffizienten (LAK) und der LCPC-Brechbarkeit (LBR). Zusätzlich kann nun mit Hilfe der erfassten A-Staubmenge der LCPC-Feinstaubkoeffizient (LFK) sowie unter Einbeziehung des Quarzanteils im Feinstaub (Bestimmung mittels Röntgendiffraktometrie) der LCPC-Quarzstaubkoeffizient (LQK) bestimmt werden. Diese Koeffizienten geben Aufschluss über das Feinstaub- bzw. Quarzfeinstaubpotential des untersuchten Gesteins. Weitere Informationen zum Staubungsverhalten können aus den Korngrößenanalysen des Feinstaubes während des Versuches gewonnen werden.

a, LCPC-Abrasivitäts-Koeffizient

Die im LCPC-Abrasivitätsversuch ermittelte Abrasivität wird in Form des *LCPC-Abrasivitäts-Koeffizienten* LAK in g/t angegeben. Dabei wird nach untenstehender Formel der während des Prüfvorganges entstandene Massenverlust des Metallflügels in g pro t Probenmaterial berechnet.

Berechnung des LCPC-Abrasivitäts-Koeffizienten (LAK):

$$\text{LAK (g/t)} = \frac{m_{F0} - m_F}{M}$$

mit:

 m_{F0} : Masse Metallflügel vor Versuch (g) m_F : Gewicht Metallflügel nach Versuch (g)

M: Gewicht Probe (t)

Tab. 1 Klassifikation des LCPC Abrasivitäts-Koeffizient nach Thuro et al. 2006 [16].

LAK [g/t]	CAI	Abrasivitätsbezeichnung	Beispiele für Festgesteine und Komponenten in Lockergesteinen
0 – 50	0 – 0,3	nicht abrasiv	Holz, Torf, organische Beimengungen
50 – 100	0,3 – 0,5	kaum abrasiv	Ton-Schluff-Stein, Mergelstein
100 – 250	0,5 – 1,0	schwach abrasiv	Tonschiefer, Sandstein (feinkörnig, schwach tonig gebunden), Kalkstein (rein), Marmor (rein)
250 – 500	1,0 – 2,0	abrasiv	Kalkstein (sandig), Marmor (quarzhaltig) Sandstein (fest, karbonatisch gebunden)
500 – 1250	2,0 – 4,0	stark abrasiv sehr abrasiv	Sandstein (kieselig gebunden), Quarzsandstein, Porphy, Andesit, Basalt, Phyllit, Glimmerschiefer, z.T. Amphibolit
1250 – 2000	4,0 – 6,0	extrem abrasiv	(Gang-)Quarz, Granit, Quarzit, Eklogit, Gneis, z.T. Amphibolit

Der so gewonnene *LCPC-Abrasivitäts-Koeffizient LAK* liegt in der Regel bei in der Natur auftretenden Gesteinen zwischen 0 und 2000 g/t. Dieser Bereich wird in die in Tab. 1 aufgeführten 6 Klassen unterteilt. Die Bezeichnungen in dieser Unterteilung sind analog zum Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI) gewählt worden, mit dem eine nahezu lineare Korrelation besteht.

b, LCPC-Brechbarkeit

Mit Hilfe des LCPC-Abrasivitäts-Tests kann auch eine Aussage über die Brechbarkeit des Probenmaterials gewonnen werden. Diese wird über den Gewichtsanteil des Feinkorns < 1,6 mm in der Probe nach dem LCPC Abrasivitäts Test bestimmt. Die *LCPC Brechbarkeit LBR* in % ist als das Gewicht des nach der Prüfung ausgesiebten Feinanteils < 1,6 mm in Prozenten des Gewichts des Ausgangsmaterials definiert.

Berechnung der LCPC-Brechbarkeit (LBR):

$$\text{LBR (\%)} = \frac{100 \cdot M_{1,6}}{M}$$

mit:

 $M_{1,6}$: Masse Feinanteil < 1,6 mm (nach LCPC Abrasivitäts Test) (g)

M: Gewicht Probe (i.d.R. 500 g)

Der so gewonnene Wert für die LCPC Brechbarkeit kann naturgemäß nur zwischen 0 und 100 liegen. Dieser Bereich wird in die in Tab. 2 aufgeführten 5 Klassen unterteilt.

Tab. 2 Klassifikation der LCPC Brechbarkeit LBR nach Büchi et al. 1995 [6].

LBR [%]	Brechbarkeits-Bezeichnung
0 – 25	sehr schwach
25 – 50	mittelschwach
50 – 75	mittel
75 – 100	mittelstark
> 100	sehr stark

c, Der LCPC-Feinstaubkoeffizient

Auf Grundlage der im Modifizierten LCPC Versuch eingeführten Feinstaubfassung kann eine Aussage zu der während des Versuchs freigesetzten Feinstaubmasse getroffen werden. Diese wird in Form des LCPC-Feinstaubkoeffizienten (LFK) ausgedrückt, der die pro Tonne Ausgangsgestein freigesetzte A-Feinstaubmenge in Gramm darstellt.

Berechnung des LCPC-Feinstaubkoeffizienten (LFK):

$$\text{LFK (g/t)} = \frac{m_{\text{FS}} - m_{\text{FS0}}}{M}$$

mit:

m_{FS0} : Masse Feinstaub-Filterkassette vor Versuch (g)

m_{FS} : Masse Feinstaub-Filterkassette nach Versuch (g)

M: Gewicht Probe (t)

d, Der LCPC-Quarzstaubkoeffizient

Analog zum LCPC-Feinstaubkoeffizienten stellt der LCPC- Quarzstaubkoeffizient (LQK) die Masse des Quarzfeinstaubes (im A-Staub) in Gramm dar, die pro Tonne Ausgangsgestein während des LCPC-Versuchs freigesetzt worden ist. Dieser wird aus dem LCPC-Feinstaubkoeffizienten und dem mittels Röntgendiffraktometrie bestimmten (vgl. Kap. 2.2) prozentualen Massenanteils des kristallinen Quarzes in der entsprechenden A-Staubprobe ermittelt.

Berechnung des LCPC- Quarzstaubkoeffizienten (LQK):

$$\text{LQK (g/t)} = \text{LFK} \cdot A_{\text{Q}} = \frac{(m_{\text{FS}} - m_{\text{FS0}}) \cdot A_{\text{Q}}}{M}$$

mit:

LFK: LCPC-Feinstaubkoeffizient (mg/t)

A_{Q} : Massenanteil kristallinen Quarzes im A-Staub (%)

m_{FS0} : Masse Feinstaub-Filterkassette vor Versuch (g)

m_{FS} : Masse Feinstaub-Filterkassette nach Versuch (g)

M: Gewicht Probe (t)

Der LQK stellt ein zentrales Ergebnis dieser Studie dar, da auf dessen Grundlage das Quarzstaubpotential der untersuchten Gesteine bestimmt und klassifiziert wird (vgl. Kap. 2.4.4 und 4.2.3).

e, Korngrößenverteilung im Laufe des Versuchs

Mit Hilfe des optischen Partikelgrößenmessgerätes wird die Korngrößenverteilung des im Laufe des LCPC-Versuchs auftretenden Feinstaubes bestimmt. Bestimmt wird dabei der aerodynamische Durchmesser der Partikel. Das erfasste Korngrößenspektrum wird zwischen 0,3 und 10 μm in die zwölf in Tab. 3 dargestellten Korngrößenbereiche unterteilt. Die Anzahl der in jedem Korngrößenbereich erfassten Partikel wird jede Sekunde ausgegeben, so dass sich Veränderungen in der Korngrößenverteilung im Laufe des Versuchs sehr gut erfassen lassen.

Tab. 3 Mit dem optischen Partikelgrößenmessgerät OPS 3330 erfassten Korngrößenbereiche.

Korngrößenbereiche in μm		
$\geq 0,3$ und $< 0,5$	$\geq 1,5$ und $< 2,0$	$\geq 4,0$ und $< 5,0$
$\geq 0,5$ und $< 0,7$	$\geq 2,0$ und $< 2,5$	$\geq 5,0$ und $< 6,0$
$\geq 0,7$ und $< 1,0$	$\geq 2,5$ und $< 3,0$	$\geq 6,0$ und $< 8,0$
$\geq 1,0$ und $< 1,5$	$\geq 3,0$ und $< 4,0$	$\geq 8,0$ und $\leq 10,0$

Um die dabei entstehende sehr große Datenmenge (720 Sekunden * 12 Werte = 8640 Einzelwerte pro Versuch) interpretieren zu können wurden folgende Auswertungen und Darstellungsweisen an den Daten durchgeführt:

- Darstellung der Rohdaten (Partikelanzahl aller Korngrößenbereiche) im Laufe des Versuchs als 3D-Diagramm (vgl. Abb. 13).
- Darstellung der aufsummierten Partikelzahlen für die Korngrößenbereiche 0,3 bis 4 µm, 4 bis 10 µm sowie die Gesamtpartikelkonzentration als Zeitreihe während des Versuchs (vgl. Anlage 3).
- Darstellung aller Kornsummenkurven aus den verschiedenen Zeitschritten. Dabei wird die Kornsumme als Prozent der Anzahl der Körner, nicht wie bei Siebanalysen als Massen-Prozent dargestellt. Diese Darstellung zeigt deutlich wie stark die Kornsummenkurve im Verlauf des Versuches variieren. Die einhüllenden Grenzkornsummenkurven können ebenfalls aus dieser Darstellung ermittelt werden (vgl. Anlage 3).
- Ermittlung der Parameter d_{10} , d_{30} , d_{40} , d_{50} , d_{60} , d_{70} und d_{90} (Korngröße bei der die Kornsummenkurve die 10%, 30% ... 70%, 90%-Linie schneidet) und Darstellung als Zeitreihen im Verlauf des Versuchs. Mit dieser Darstellung lassen sich Verschiebungen in den Korngrößenverteilungen gut visualisieren (vgl. Anlage 3).
- Ermittlung der Ungleichförmigkeitszahl ($C_U = d_{60}/d_{10}$) und Krümmungszahl ($C_c = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10})$) analog zu den bei Siebanalysen ermittelten Kennzahlen und Darstellung als Zeitreihen im Verlauf des Versuchs (vgl. Anlage 3).
- Ermittlung der mittleren Partikelanzahl in der ersten (0-60s), mittleren (120-180s) und letzten (240-300s) Minute des Versuchs für den Korngrößenbereich 0,3 bis 4 µm (alveolengängiger Feinstaub) (vgl. Abb. 23).

Die Ergebnisse / Diagramme für alle in dieser Studie durchgeführten Einzelproben sind im Anhang 0 zusammengefasst und werden in Kap. 3.5 diskutiert.

2.1.6 Fehlerquellen

Im Laufe der Versuchsdurchführung konnten einige Probleme und Fehlerquellen identifiziert werden. Insofern ein Fehler Einfluss auf das Ergebnis hatte, wurde dieser in den entsprechenden Ergebnistabellen aufgeführt und der entsprechende Ergebniswert von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

- Bei 2 Proben kam es zu einem Verklemmen des LCPC-Flügels in der Probe bzw. im Behälter. Die Versuche wurden abgebrochen und verworfen. Sofern ausreichend Probenmaterial zur Verfügung stand wurde der Versuch wiederholt.
- Bei 8 Proben wurde zumindest zeitweise die maximal zulässige Partikelkonzentration des Partikelkorngrößenmessgeräts überschritten. Das Partikelmessgerät hat in diesen Fällen eine entsprechende Warnmeldung ausgegeben. Die in den Diagrammen dargestellten Ergebnisse der Partikelzahlen während des Versuchs könnten die tatsächlich auftretenden Partikelzahlen unterschätzen. Die Kennwerte LFK und LQK sind von diesem Fehler nicht betroffen, da die Bestimmung der freiwerdenden Feinstaubmasse mittels des unabhängigen Probenahmesystems erfolgt.
- Bei 6 Proben kam es zu einer Verstopfung vmtl. der Luftzufuhr (ggf. auch des Luftabzugs) unmittelbar im Bereich des LCPC-Topfes durch in die Öffnungen eingetretenes Probenmaterial (siehe Abb. 8). Dies verhindert einen zuverlässigen Abtransport des Feinstaubes aus dem Probenkopf und äußert sich in einem wiederholten Einbrechen der ermittelten Partikelzahlen im Laufe des Versuchs (siehe Abb. 9). Die Versuche wurden verworfen.

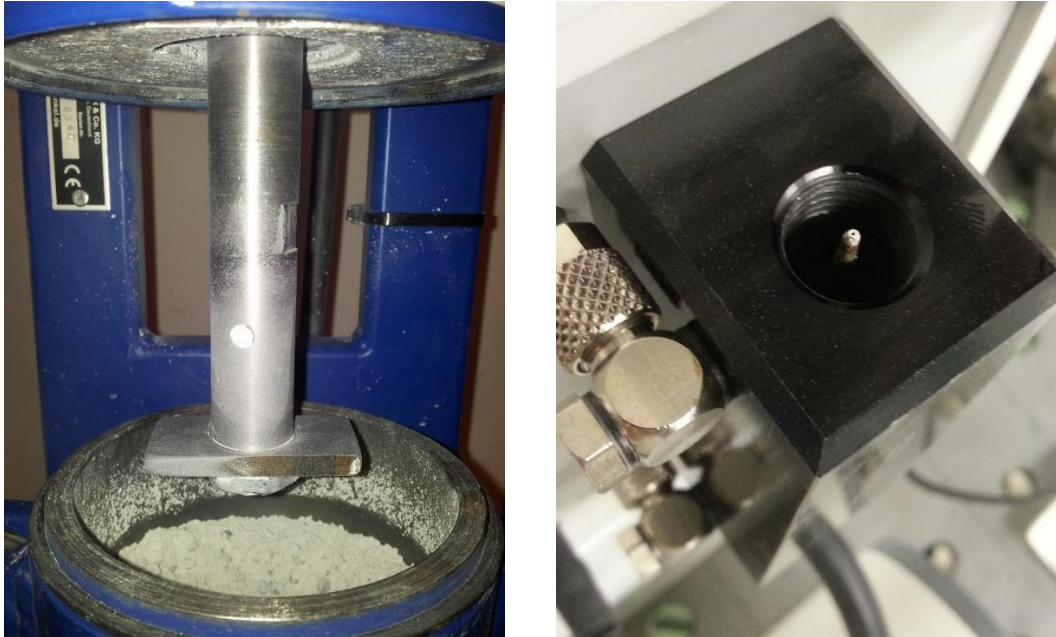


Abb. 8 Links: verstopfte Luftzufuhr nach Durchführung des LCPC-Versuchs. Die Verstopfung kann zu einem unregelmäßigen Luftstrom im Stauberfassungssystem führen, so dass der Versuch verworfen werden muss. Rechts: Staubablagerungen an der Kapillare des Verdünnungssystems (1:100). Die Ablagerungen konnten durch Einführung des vorgeschalteten Zyklons (Abscheidung von Staub > 15,3 μm) verringert, aber nicht gänzlich eliminiert werden. Die Größenordnung der Beeinflussung dieser Ablagerungen auf die Messergebnisse ist unbekannt.

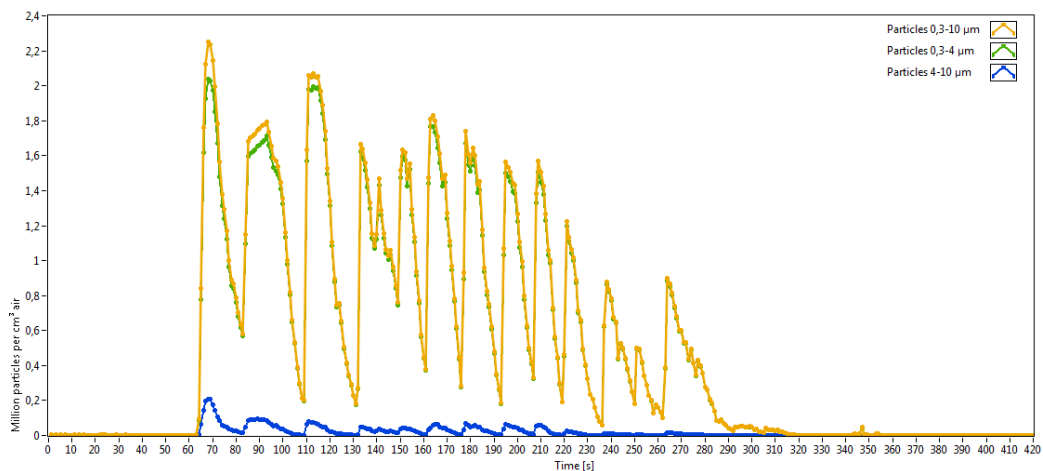


Abb. 9 Verlauf der Partikelzahlen des Feinstaubes während eines LCPC-Versuchs (Probe NDD-A-3). Dar-ge-stellt sind die Partikelzahlen pro Sekunde für die Korngrößenbereiche 0,3-4 μm , 4-10 μm und 0,3-10 μm . Die Wiederholten Einbrüche in der Staubkonzentration sind vermutlich auf eine Verstopfung der Luftzufuhr oder Luft-abfuhr unmittelbar am LCPC-Topf zurück zu führen.

- Bei einigen Proben wurden - auch nach Einführung des vorgeschalteten Zyklons zur Abscheidung des Grobstaubes - nach der Durchführung des Versuches Ablagerungen an den Rändern der Kapillaren der Verdünnungssysteme festgestellt (Abb. 8). In wie weit diese zu einer Beeinflussung der Versuchsergebnisse der Korngrößenanalysen führen, kann nicht bestimmt werden. Die Kennwerte LFK und LQK sind von diesem potentiellen Fehler nicht betroffen, da die Bestimmung der freiwerdenden Feinstaubmasse mittels des unabhängigen Probenahmesystems erfolgt.

2.2 Röntgendiffraktometrie

Die röntgendiffraktometrische Untersuchung (XRD) dient der Ermittlung des Mineralbestandes – insbesondere des Quarzgehaltes – der untersuchten Proben. Es wurden sowohl die jeweiligen Ausgangsgesteine als Festgesteinsproben, als auch die im den Modifizierten LCPC-Versuchen gewonnenen A-Staubproben untersucht.

2.2.1 Probenvorbereitung

a, Festgesteinsproben

Um eine repräsentative Probe für die Untersuchung zu erhalten, wurde je nach Inhomogenität der Probe eine Teilprobe mit ca. 20 bis 50 g für die röntgenographische Untersuchung verwendet. Die Proben wurden zunächst vorsichtig mit dem Hammer und anschließend schrittweise händisch im Achat-Mörser bis zu einer Korngröße $< 0,6$ mm vollständig aufgemahlen. Anschließend wurde die Probe mittels eines Probenteilers so lange aufgeteilt, bis die für die Analyse notwendige Probenmenge von ca. 2 g erreicht war. Diese Probe wurde dann für 6 Minuten mit 8 ml Isopropyl-Alkohol in einer McCrone-Mühle, welche mit Achatzylinder-Mahlwerk ausgestattet ist, gemahlen. Die Suspension wurde anschließend gefiltert, getrocknet und in einem Achat-Mörser von Hand homogenisiert. Die so erhaltenen Pulverproben wurden dann in die XRD-Probenträger oberseitig eingefüllt.

b, A-Staubproben

Die Aufbereitung der A-Staubproben für die XRD-Analyse erfolgte gemäß der SUVA Standardarbeitsanweisung Nr. 1.012.2 „Vorbereiten der a-Staubproben auf PVC-Filter zur röntgendiffraktometrischen Quarzbestimmung“.

Die während des LCPC-Versuchs mit dem FSP-2 Probenahmesystem gewonnenen A-Staubproben wurden auf PVC-Filtern gesammelt, die in den entsprechenden Filterkassetten in das XRD Labor des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich (Hönggerberg) transportiert wurden.

Für die röntgenographische Untersuchung muss der A-Staub auf Silbermembranfilter (Porenweite $0,45 \mu\text{m}$ und Durchmesser 25 mm) in einem Filtrationsverfahren übertragen werden. Dazu werden zunächst die leeren Silbermembranfilter auf einer Mikrowaage auf 0,001 mg genau gewogen.

Optimaler Weise sollte die A-Staub-Belegung der Filter für die röntgenographische Analyse zwischen 1 und 2 mg betragen. Da die Staubbelegung der PVC Filter aus den LCPC-Versuchen bis zu knapp 50 mg betrug, musste in den meisten Fällen eine Probenteilung erfolgen. Dazu wurde der PVC-Filter so zugeschnitten (halbieren, vierteln etc.), dass die optimale Staubbelegung des Silbermembranfilters erreicht wird.

Der entsprechende Anteil des PVC-Filters wird dann in einem Becherglas in 10 ml Tetrahydrofuran (THF) aufgelöst. Die Suspension wurde dann für ca. 5 Minuten in ein Ultraschallbad gestellt, um ein vollständiges Auflösen des Filters sicherzustellen.

Der bereits vorgewogene Silbermembranfilter wird in eine Nutsche eingespannt. Anschließend gießt man den gesamten Inhalt des Becherglases in die Nutsche, spült das Becherglas nochmals mit einigen Millilitern THF aus und gießt auch diese Spülflüssigkeit in die Nutsche. Anschließend wird unter Vakuum (Wasserstrahlpumpe) abfiltriert. Dabei wurde, um eine gleichmäßige Verteilung des Staubes auf dem Filter zu gewährleisten, möglichst erst nach der Zugabe der Spülflüssigkeit mit dem Evakuieren begonnen.

Das Vakuum wird aufgehoben, wenn der Silbermembranfilter trocken gesaugt wurde. Anschließend wird der nun mit der Feinstaubprobe belegten Silbermembranfilter aus der

Nutsche herausgenommen und anschließend im Trockenschrank bei 60°C während einer Stunde getrocknet.

Nach dem Abkühlen des Silbermembranfilters wird dieser erneut auf einer Mikrowaage auf 0,001 mg genau gewogen. Abschließend wird der Silbermembranfilter mit Vaseline auf einen Glasträger mit 25 mm Durchmesser aufgeklebt und in einen XRD-Probenträger eingespannt.

2.2.2 Versuchsdurchführung

Die Staubproben wurden am Institut für Geotechnik der ETH Zürich röntgen-diffraktometrisch (2-70° 2 θ) im Philips-Panalytical PW 1820 Röntgendiffraktometer bei einer Röhrenspannung von 40 kV analysiert. Aufgrund der sehr feinkörnigen Proben musste eine Aufnahmezeit von bis zu 5 Stunden angewandt werden, damit eine ausreichend hohe Signalqualität für die quantitative Auswertung gewährleistet ist.

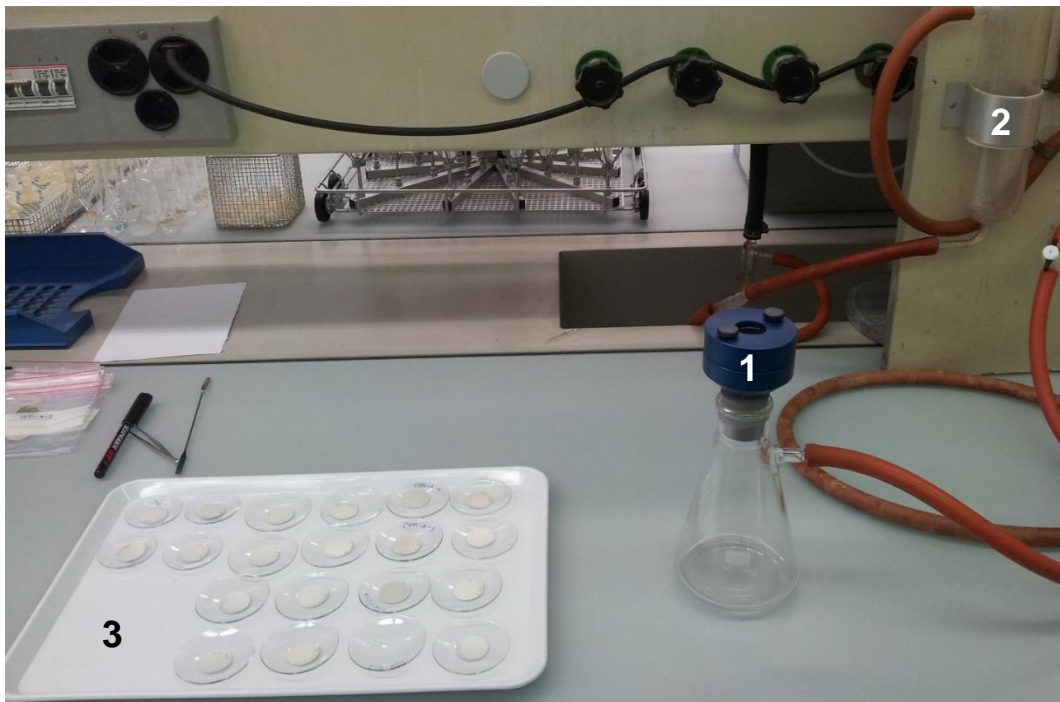


Abb. 10 Übertragung der A-Staubproben von den PVC Filtern auf Silbermembranfilter mittels Filtration in einer Nutsche. Die bei der Auflösung des PVC Filters in THF erzeugte Suspension wird in die Nutsche (1) oben eingefüllt und anschließend abfiltriert. Der Unterdruck in der Nutsche wird durch eine Wasserstrahlpumpe (2) erzeugt. In den Uhrgläsern (3) befinden sich bereits mit A-Staub belegte Silbermembranfilter.

2.2.3 Auswertung

Zunächst wurden alle Proben mittels Rietveld-Analyse untersucht. Die kristallinen Mineralphasen wurden dabei anhand ihrer charakteristischen Diffraktionslinien und der dazugehörigen d-Werte mit dem Rietveld-Programm AutoQuan und BGMN (Bergmann et al. 1998 [5]) quantitativ ermittelt.

Um eine möglichst genaue Quantifizierung der Quarzgehalte sicherzustellen, wurde zusätzlich bei allen Feinstaubproben eine quantitative Quarzgehaltbestimmung mittels eines selbst aus einem Quarzkristall hergestellten Quarzstandards und der Additionsmethode durchgeführt. Der Quarzstandard wurde mit Hilfe von Achatmörsern und der McGraw-Mühle auf einen Korngrößenbereich zermahlen, der dem der Feinstaubproben entspricht (ca. 5 μm).

Bei der Additionsmethode wird die Substanz (hier Quarz), die quantitativ erfasst werden soll, der Mischung nochmals in bekannter Menge zugesetzt. Prinzipiell muss keine Kalibrationsgerade erstellt werden, es kann auch eine einzelne Probe analysiert werden. Dazu sind insgesamt drei Messungen nötig: Messung der Probe vor und nach dem Zusatz der Substanz, sowie Messung der reinen Substanz. Als analytischer Peak wird dabei ein Reflex gewählt, der nicht überlappend ist.

Dementsprechend wurden jeweils zwei weitere Teilproben jeder Probe entsprechend der obigen Beschreibung aufbereitet, wobei jeder A-Staubprobe eine bestimmte Masse des Quarzstandards zugegeben wurde. Die zugegebene Masse wurde auf einer Mikrowaage auf 0,001 mg genau bestimmt. Die so aufbereiteten Proben wurden dann mit dem Röntgendiffraktometer untersucht und die Signalhöhen der typischen Quarz-Peaks bei ca. 20,9°, 26,6° und 50,2° 2θ ermittelt.

Der Quarzgehalt der Probe kann dann entweder graphisch oder anhand folgender Gleichung bestimmt werden:

$$A_Q = \frac{I_V \cdot (I_0 - I_N) \cdot M_N}{I_0 \cdot (I_N - I_V) \cdot M_V}$$

Mit:

A_Q : Quarzgehalt der Probe in %

I_V : Intensität des Quarzpeaks der Originalprobe

I_N : Intensität des Quarzpeaks nach der Zugabe des Quarzstandards

I_0 : Intensität des Quarzpeaks des reinen Quarzstandards

M_V : Masse der Probe vor Zugabe des Quarzstandards

M_N : Masse der Probe nach Zugabe des Quarzstandards

Die Ergebnisse der quantitativen Röntgendiffraktometrie sind in Anhang 0 zusammengestellt.

2.2.4 Fehlerquellen

Bei der Aufbereitung der Proben für die Röntgendiffraktometrie traten vereinzelt Probleme folgende Probleme/Fehler auf:

- Zum Teil wurde beim Herausnehmen des Silbermembranfilters aus der Nutsche beobachtet, dass geringe Mengen der Probe noch an den Dichtungsringen und an der Innenseite der Nutsche anhaften. Die Bestimmung des Quarzgehaltes im Additionsverfahren kann durch diesen Probenverlust beeinflusst werden, da damit die Probenmenge (M_V in obiger Gleichung) verfälscht wird.
- Zum Teil konnte nicht die gesamte Suspension plus Spünlösung vor Aufbringen des Unterdrucks in die Nutsche eingefüllt werden, so dass diese erst während des Filtrierens noch eingefüllt wurde. Dabei kam es vereinzelt zu einer inhomogenen Verteilung der Probe auf den Silbermembranfilter.
- Durch die Aufbereitungsmethode (Filtrieren) kommt es vermutlich zu einer Einregelung plattiger Minerale (insb. Tonminerale, Glimmer). Dies kann unter Umständen bei der Rietveldanalyse zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

2.3 Versuchsserie 1: Untersuchung des Einflusses wichtiger Versuchsparameter auf die Ergebnisse des Modifizierten LCPC Versuchs

Diese Versuchsserie hat zum Ziel, den Einfluss der wichtigsten Versuchsparameter des Modifizierten LCPC-Versuchs auf die Versuchsergebnisse zu untersuchen. Dabei wurde festgelegt, dass aus Vereinfachungsgründen insbesondere bei der späteren Anwendung

der grundsätzliche Versuchsaufbau (Geometrie, Materialien, Leistung des Motors etc.) nicht verändert werden soll. Die verbleibenden einfach zu variierenden Versuchsparameter sind die Drehgeschwindigkeit des Metallflügels sowie die Versuchsdauer.

2.3.1 Proben

Für diese Untersuchung wurden zwei möglichst homogene Probematerialien herangezogen, die im Bau-Fachhandel bezogen wurden:

- Nahezu reiner Quarz- bzw. Quarzitkies mit einer Korngröße zwischen 25 bis 45 mm
- Dunkler Kalk-Kies mit Korngrößen zwischen 25 und 45 mm

Die Proben wurden entsprechend Kap. 2.1.3 für den LCPC-Versuch aufbereitet und in einem Backenbrecher auf die Zielkorngröße von 4 bis 6,3 mm heruntergebrochen. Das so erhaltene Probenmaterial unterscheidet sich kaum von einer aus einem entsprechenden Festgestein gewonnenen Probe.

2.3.2 Durchgeführte Versuche

Die in dieser Versuchsserie durchgeführten Versuche und deren Versuchsparameter sind in Tab. 4 zusammengestellt. Die Umdrehungszahl des Metallflügels wurde dabei zwischen 500 und den maximal möglichen 4500 Umdrehungen pro Minute variiert. Die Versuchsdauer wurde auf 15 Minuten ausgedehnt.

Bei dieser Versuchsserie wurde auf eine Bestimmung des Quarzgehaltes des A-Staubes mittels Röntgendiffraktometrie verzichtet.

Tab. 4 Liste der Versuche zur Bestimmung des Einflusses wichtiger Versuchsparameter auf den Modifizierten LCPC-Versuch.

	Umdrehungsgeschwindigkeit des Metallflügels [1/min]	Versuchsdauer [min]
Quarzkies	4500	5
	4000	5
	3000	5
	2000	5
	1000	5
	4500	15
	2500	15
	500	15
	Dunkler Kalkkies	4500
4000		5
3000		5
2000		5
1000		5
4500		15
2500		15
500		15

2.3.3 Auswertung

Die Auswertung der Versuche erfolgte durch Gegenüberstellung der jeweils ermittelten Feinstaubkonzentrationen während des Versuchs mit den jeweils verwendeten Parameterkombinationen. Die Ergebnisse werden in Kap. 3.1 (Versuchsdauer) und 3.2 (Drehzahl des Flügels) vorgestellt und diskutiert. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde die Drehzahl und Versuchsdauer des Modifizierten LCPC-Versuchs festgelegt. Alle Versuche der 2. Versuchsserie wurden dann mit diesen Einstellungen durchgeführt.

2.4 Versuchsserie 2: Untersuchung des Quarzstaubpotentials einer breit gefächerten Auswahl verschiedener Gesteine

Die zweite Versuchsserie dient dem Nachweis der Tauglichkeit des Modifizierten LCPC Versuches zur Quantifizierung des Quarzstaubpotentials verschiedener Gesteine. Des Weiteren dienen die gewonnenen Ergebnisse der Erstellung eines möglichst breit gefächerten LQK-Wertekatalogs auf dessen Grundlage die nachfolgenden vergleichenden Untersuchungen mit anderen geotechnischen Parametern sowie eine erste Klassifizierung des Quarzstaubpotentials erfolgt.

2.4.1 Proben

Für diese Versuchsserie wurde eine möglichst breit gefächerte Auswahl an verschiedenen Gesteinen mit bekannter Weise unterschiedlichem Quarzstaubpotential ausgewählt. Dabei wurde nach Möglichkeit auf Gesteinsproben aus aktuellen Bauvorhaben und Steinbrüchen in der Schweiz zurückgegriffen, die bereits geologisch/geotechnisch untersucht und charakterisiert worden sind. Wenn möglich, wurde die Beprobung z.B. aus Erkundungsbohrungen in unmittelbarer Nachbarschaft zu Probeentnahmestellen bereits durchgeführter geotechnischer Versuche vorgenommen, so dass die entsprechenden Versuchsergebnisse direkt miteinander korreliert werden können (Abb. 11). Leider war dies nur in wenigen Fällen (Grimsel III, Nant de Drance) möglich.

Tab. 5 führt alle 14 in dieser Versuchsserie verwendeten Gesteinsarten sowie die Art und Anzahl der jeweils daran an Teilproben durchgeführten Untersuchungen auf.

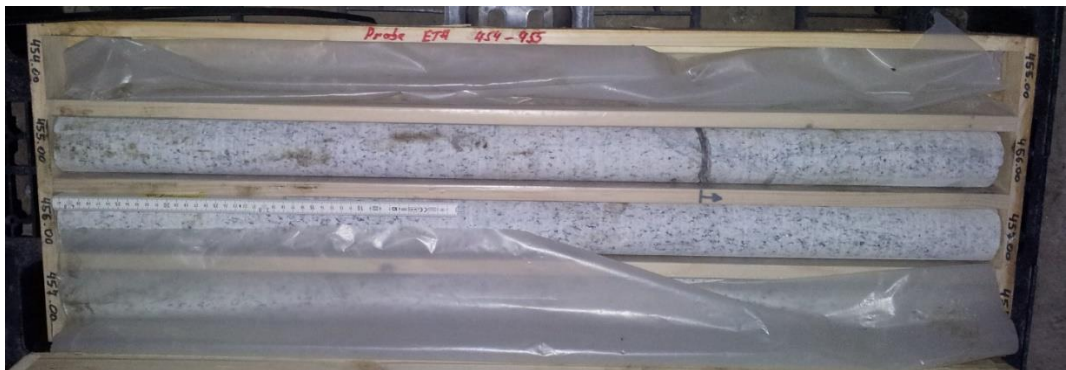


Abb. 11 Kernkiste der Sondierbohrung Kessiturm (Pumpspeicherwerk Grimsel III). Für dieses Projekt wurde der Bohrmeter 455-456 verwendet (Probe GRI-B). Dieser liegt direkt benachbart zum Bohrmeter 454-455, der bereits für Laboruntersuchungen zur geotechnischen Charakterisierung des Gesteins (u.a. UCS) verwendet worden ist. Auf diese Weise können die Ergebnisse beider Untersuchungen direkt miteinander korreliert werden.

2.4.2 Durchgeführte Versuche

Zu den in Tab. 5 aufgelisteten Gesteinsarten wurden an jeweils 4 bis 6 Teilproben modifizierte LCPC-Versuche inklusive der XRD-Quarzgehaltsbestimmung durchgeführt. Des Weiteren wurde die Ausgangs-Mineralogie jeder Gesteinsart an einer Teilprobe mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt.

Tab. 5 Aufstellung der Proben und der daran vorgenommenen Untersuchungen.

Nummer	Probe			Anzahl durchgeführter Versuche		
	Gestein	Herkunft, Bauvorhaben	Art	Mod. LCPC Versuch	XRD Feinstaub	XRD Gestein
BÄR-A	Rorschacher Sandstein	Steinbruch Bärlocher	Bohrkern	6	5	1
CHM-A	Gipskeuper	Chiemberg Tunnel	Handstück	5	5	1
CHM-B	Beton (fein)	Chiemberg Tunnel	Handstück	5	5	1
CHM-C	Beton (grob)	Chiemberg Tunnel	Handstück	5	5	1
GRI-A	Granit	Grimsel III	Bohrkern (Kessitum)	4	4	1
GRI-B	Aplitischer Granit	Grimsel III	Bohrkern (Kessitum)	4	4	1
MIT-A	Opalinuston	Mont Terri	Handstück	5	5	1
NDD-A	Orthogneis (grob)	Nant de Drance	Bohrkern (TM3600)	4	4	1
NDD-B	Orthogneis (fein)	Nant de Drance	Bohrkern (TM2410)	5	5	1
NDD-C	Meta-grauwacke	Nant de Drance	Bohrkern (TM5370)	5	5	1
NDD-D	Glimmerschiefer	Nant de Drance	Bohrkern (TM5080)	5	5	1
ROM-A	Molasse-Sandstein	Rosshäusern-Mauss	Handstück	5	5	1
TCH-A	Malmkalk (Jura)	Tunnel de Choindez	Handstück	5	5	1
ZIN-A	Kiesalkalk (Helvetikum)	Steinbruch Zingel	Grober Kies (gebrochen)	5	5	1

2.4.3 Erhebung geotechnischer Kennwerte

Für die hier durchgeführte Untersuchung wurden vor allem diejenigen geotechnischen Parameter als relevant betrachtet, die sensitiv auf die in Kap. 1.1 genannten Faktoren für die Quarzstaubbildung (insb. Quarzgehalt des Gesteins und Bindung der Quarzpartikel im Gestein) sein könnten. Insbesondere der LCPC Versuch (AFNOR 1990 [1]), in dem mit dem LCPC-Abrasivitäts-Koeffizient (LAK) ein stark von dem Quarzgehalt der Probe abhängiger Parameter (vgl. Thuro et al. 2006 [16]) und mit LCPC Brechbarkeits Koeffizient (LBR) ein stark von der Gefügefestigkeit beeinflusster Wert ermittelt wird, scheint für die vorliegende Untersuchung geeignet zu sein. Des Weiteren werden aber auch der Cerchar Abrasivitäts Index und die einaxiale Druckfestigkeit in Betracht gezogen. Der LAK und LBR wurde für die in dieser Studie untersuchten Gesteine jeweils neu bestimmt (siehe oben). Die weiteren Parameter (UCS und CAI) wurden – wo möglich – anhand Ergebnisse bereits bestehender geotechnischer Untersuchungen ermittelt. In einigen Fällen war dabei über eine gezielte Probennahme eine direkte Verknüpfung der Proben und damit der Versuchsergebnisse möglich (vgl. z.B. Abb. 11). Meist konnten die Kennwerte jedoch nur allgemein als typischer Wertebereich (Minimum, Maximum und Mittelwert) für die jeweilige Gesteinsart bestimmt werden. In den meisten Fällen mussten die CAI-Versuche noch zusätzlich ermittelt werden. Tab. 6 führt die ermittelten geotechnischen Parameter, sowie deren Herkunft auf. Die Ergebnisse der Modifizierten LCPC-Versuche (LAK und LBR) sind im Anhang II zu finden.

Tab. 6 Liste der CAI und UCS Werte der untersuchten Gesteine.

Nummer	Gestein	Herkunft, Bauvorhaben	CAI	UCS [MPa]			Quelle
				Min.	MW.	Max.	
BÄR-A	Rorschacher Sandstein	Steinbruch Bärlocher	1,8	58,3	75,3	82,9	-
CHM-A	Gipskeuper	Chiemberg Tunnel	0,7	8,7	20,3	32,6	Unveröffentlichte Projektunterlagen
CHM-B	Beton (fein)	Chiemberg Tunnel	1,7	-	-	-	-
CHM-C	Beton (grob)	Chiemberg Tunnel	1,8	-	-	-	-
GRI-A	Granit	Grimsel III	5,1	133,2	155,6	185,0	Unveröffentlichter Laborbericht ETH Zürich (Ziegler & Amann 2012)
GRI-B	Aplitischer Granit	Grimsel III	5,3	179,8	187,6	194,6	
MIT-A	Opalinuston	Mont Terri	0,4	4,0	17,6	28,1	Unveröffentlichte Projektunterlagen
NDD-A	Orthogneis (grob)	Nant de Drance	5,0	99,7	137,4	164,3	Unveröffentlichte Projektunterlagen
NDD-B	Orthogneis (fein)	Nant de Drance	5,3	70,5	121,3	166,9	
NDD-C	Metagrauwacke	Nant de Drance	3,7	40,3	60,4	84,0	
NDD-D	Glimmerschiefer	Nant de Drance	2,8	31,2	59,1	80,9	
ROM-A	Molasse Sandstein	Rosshäusern-Mauss	1,3	3,5	14,3	18,6	Unveröffentlichte Projektunterlagen
TCH-A	Malmkalk (Jura)	Tunnel de Choindéz	0,8	60,5	75,5	92,0	Unveröffentlichte Projektunterlagen
ZIN-A	Kieselkalk (Helvetikum)	Steinbruch Zingel	1,6	82,4	95,3	109,5	Bärtschi (2011) [4]

2.4.4 Auswertung

Die erhobenen Daten wurden im Wesentlichen bezüglich zweier Aspekte ausgewertet: 1. dem Staubungsverhalten der unterschiedlichen Gesteinsarten während des LCPC Versuchs mit dem Ziel der Erstellung eines Prozessmodells der relevanten Prozesse während des Versuchs; 2. der Ermittlung einer Korrelation zwischen dem LCPC-Quarzstaubkoeffizient (LQK) und anderen geotechnischen Kennwerten.

a, Staubungsverhalten

Die während des LCPC Versuchs freigesetzte Feinstaubmenge wurde mit Hilfe des Partikelkorngößenmessgerätes kontinuierlich (jede Sekunde) erfasst und jeweils deren Korngrößenzusammensetzung bestimmt. Die dadurch resultierende sehr große Datenmenge wurde folgendermaßen ausgewertet, um anhand der ermittelten Parameter Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede im Staubungsverhalten der verschiedenen untersuchten Gesteinsarten im Laufe des LCPC-Versuchs zu erhalten:

- Visualisierung der Rohdaten in 3D-Plots (Korngrößenverteilung des Feinstaubes im Verlaufe des Versuchs);
- Bestimmung der durchschnittlichen Feinstaubkonzentration im Verlauf des gesamten LCPC Versuchs;

- Ermittlung der durchschnittlichen Feinstaubkonzentration im Verlauf der ersten, mittleren und letzten Versuchsminute des LCPC Versuchs und Ermittlung der sich im Trend ergebenden Veränderungen;
- Darstellung und Vergleich der einhüllenden Kornsummenkurven (jeweils feinste und grösste Feinstaubzusammensetzung während eines Versuchs)

Des Weiteren wurden die röntgenographisch ermittelten Mineralgehalte des Ausgangsgesteins und der entsprechenden LCPC-Feinstaubproben miteinander verglichen, um Aussagen über die Fraktionierung (Anreicherung bzw. Abreicherung) einzelner Minerale im Feinstaub zu erhalten.

Auf Grundlage dieser Daten wurden sich im Staubungsverhalten ähnlich verhaltende Proben jeweils gruppiert und für jede Gruppe ein hypothetisches Prozessmodell entwickelt, welches versucht die jeweiligen Emissionsmuster zu erklären (Kap. 4.1).

b, Korrelation zwischen LQK und anderen geotechnischen Kennwerten

Die Versuchsergebnisse der LCPC Versuche (LAK und LBR) sowie andere felsmechanische Parameter wie die einaxiale Druckfestigkeit (UCS) und der Cerchar Abrasivitäts Index (CAI) werden den bei den LCPC Versuchen erzeugten Quarz-Feinstaubmengen (LQK) als Maß für das Quarzstaubpotential gegenübergestellt. Ziel ist hier die Identifizierung einer möglichst statistisch aussagekräftigen Korrelation zwischen einem einzelnen geotechnischen Parameter oder aber auch einer Parameterkombination (z.B. LAK & LBR oder LAK & UCS) und dem Quarzstaubpotential des Gesteins.

Dabei werden nur Parameterkombinationen in Form einer Geradengleichung untersucht:

$$PK = P1 + A \cdot P2$$

Wobei PK der Wert der jeweiligen Parameterkombination ist und P1 und P2 jeweils einen der zuvor genannten geotechnischen Parameter repräsentiert, wobei $P1 \neq P2$ ist. A ist ein beliebig wählbarer Koeffizient, wobei dieser für jede Parameterkombination so optimiert werden muss, dass der mittlere quadratische Fehler zwischen den tatsächlich ermittelten Datenpunkten und der ermittelten Geradengleichung minimal wird. Um dies zu erreichen wurde der Parameter A jeweils zwischen -1000 und 1000 in Schritten 0,001 variiert und der A Wert mit dem geringsten Fehler ermittelt.

Abb. 12 stellt das Ergebnis einer solchen Untersuchung für die Parameterkombination $P1 = LAK$ und $P2 = LBR$ dar. Dabei zeigt sich, dass der mittlere Fehler (rote Kurve) bei einem A-Wert von 7,464 minimal und der Korrelationskoeffizient (blaue Kurve) gleichzeitig maximal wird. Da sich der mittlere Fehler und der Korrelationskoeffizient sowohl bei größeren, als auch bei niedrigeren A-Werten asymptotisch ungünstigeren Werten annähert, kann davon ausgegangen werden, dass das hier untersuchte lokale Minimum bzw. Maximum auch das globale Minimum bzw. Maximum darstellt.

Die Ergebnisse aller Parameterkombinationen sind in Tab. 8 aufgeführt. Auf eine Untersuchung komplexerer Beziehungen (z.B. Polynomfunktionen höheren Grades) wurde aufgrund der geringen Datenbasis, die eine Ableitung komplexerer Zusammenhänge nicht erlaubt, bewusst verzichtet.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde eine erste Klassifizierung des Quarzstaubpotentials in drei Kategorien (gering / mittel / hoch) vorgenommen (Kap. 4.2.3).

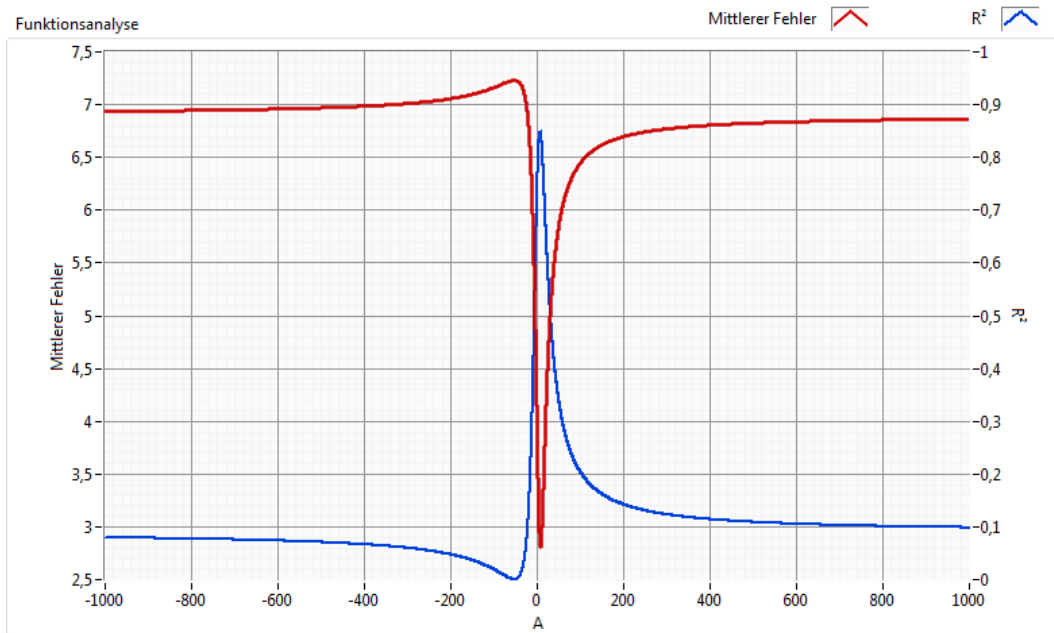


Abb. 12 Darstellung des mittleren Fehlers und des Korrelationskoeffizienten für die Geradengleichung mit den Parametern $P1 = LAK$ und $P2 = LBR$ bei variierendem A-Wert zwischen -1000 und +1000.

3 Ergebnisse und Interpretation

3.1 Versuchsdauer des Modifizierten LCPC-Versuchs

Die Versuchsdauer des Original-LCPC-Versuchs beträgt 5 Minuten. Um festzustellen, in wie weit diese geeignet ist, um auch der Feinstaubuntersuchung gerecht zu werden, wurde die Versuchsdauer probeweise auf 15 Minuten verdreifacht.

Abb. 13 zeigt die Korngrößenabhängigen Partikelkonzentrationen des Feinstaubes während des 15-minütigen Modifizierten LCPC-Versuchs für die beiden untersuchten Proben Quarzkies und dunkler Kalkkies. Dabei zeigt sich ein sehr ähnliches Muster: Zunächst steigen die Partikelkonzentrationen – insbesondere des alveolengängigen Materials $< 4 \mu\text{m}$ – in den ersten ca. 90 Sekunden des Versuchs auf Werte um ca. 0,05 Mio. Partikel/cm³ Luft stark an, um dann allmählich auf ein niedrigeres, mehr oder weniger konstantes (dunkler Kalkkies: 0,017 Mio. Partikel/cm³ Luft) bis kontinuierlich leicht fallendes (Quarzkies: 0,025 bis 0,02 Mio. Partikel/cm³ Luft) Niveau abzusinken. Die meisten Festgesteine mit hoher Festigkeit zeigen ein solches Verhalten (vgl. Kap. 3.5).

Es ist davon auszugehen, dass die anfänglich hohen Partikelkonzentrationen maßgeblich durch Bruchprozesse innerhalb der anfangs 4 bis 6,3 mm großen Gesteinskomponenten in der Anfangsphase des LCPC-Versuchs entstehen. Mit zunehmender Versuchsdauer und abnehmenden mittleren Korngrößen im Versuchstopf geht die Anzahl der Bruchvorgänge vermutlich zurück und es wird weniger Feinstaub freigesetzt. Die weiterhin stattfindenden Schlagprozesse zwischen den Komponenten sowie das ständige Aufwirbeln des im Topf befindlichen Feinstaubes sind vermutlich die Ursache für die mehr oder weniger konstante Abgabe von Feinstaub im weiteren Verlauf des Versuchs.

Je nach Gesteinsart variiert dabei die Höhe des anfänglichen Maximalwertes sowie des späteren konstanten Niveaus. Auch wie schnell der Übergang auf ein konstantes Niveau geschieht, hängt vom Material ab (vgl. Kap. 3.5).

Bei den hier untersuchten Proben zeigen die Partikelkonzentrationen spätestens nach 150 bis 200 Sekunden ein mehr oder weniger konstantes Niveau bzw. kontinuierliches Absinken. Mit der vom Original-LCPC-Versuch vorgegebenen Versuchsdauer von 300 Sekunden ist es also möglich beide Zustände zu erfassen. Eine Verlängerung der Versuchsdauer macht dann Sinn, wenn besonderes Augenmerk auf schlagende Prozesse (z.B. beim Schütten von Gesteinsbruchstücken) gelegt werden soll. Da der in dieser Studie gesuchte Kennwert für das Quarzstaubpotential unabhängig vom späteren Bauprozess sein soll, erscheint es sinnvoll die beiden unterschiedlichen Phasen in etwa gleichgewichtet eingehen zu lassen. Dies ist bei einer Versuchsdauer von 300 Sekunden in etwa gegeben. Die Versuchsdauer des Modifizierten LCPC-Versuchs wurde deshalb bei 5 Minuten belassen (vgl. Kap. 2.1.4).

3.2 Drehzahl des Modifizierten LCPC-Versuchs

Die Drehzahl des Metallflügels ist im originalen LCPC-Versuch auf 4500 Umdrehungen die Minute festgelegt. Es wurde untersucht in wie weit die Bildung alveolengängigen Feinstaubes von der Drehzahl des Flügels abhängt, um die Drehzahl für den Modifizierten LCPC-Versuch festlegen zu können.

Abb. 14 zeigt die bei verschiedenen Flügeldrehzahlen ermittelten Konzentrationen alveolengängigen Feinstaubes ($< 4 \mu\text{m}$) im Laufe des LCPC-Versuchs an Quarzkies. Alle Versuche mit Drehzahlen von über 2000 U/min zeigen mehr oder weniger dieselben Ergebnisse. Lediglich die Drehzahlen 500 U/min und 1000 U/min erzeugen deutlich niedrigere Feinstaubkonzentrationen. Bei der Drehzahl von 4500 U/min ist die zuvor beobachtete anfängliche Maximalkonzentration am deutlichsten ausgeprägt.

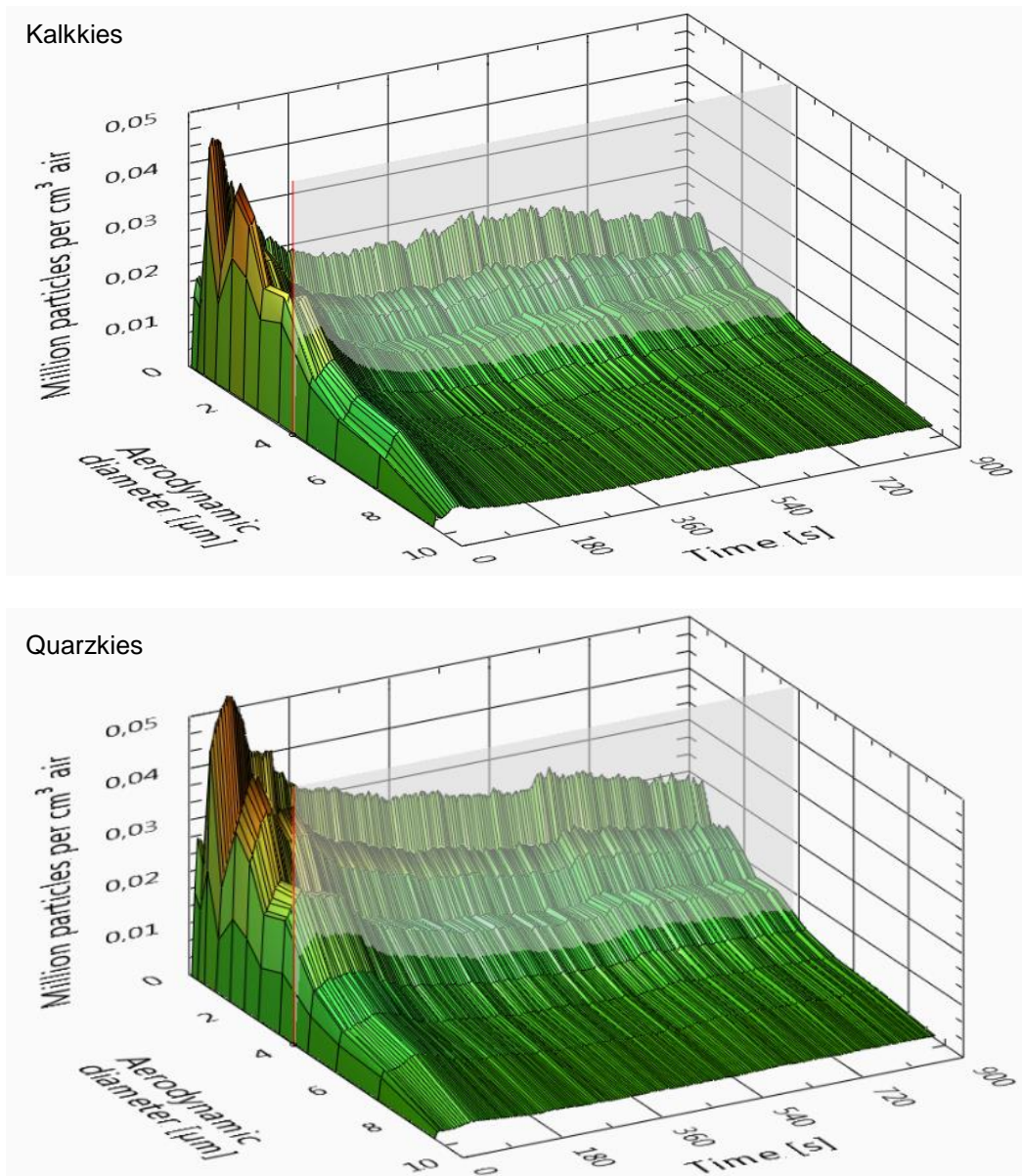


Abb. 13 Korngrößenabhängige Partikelkonzentrationen des Feinstaubes im Bereich 0,3 bis 10 µm im Verlauf eines Modifizierten LCPC-Versuchs mit 15 min Länge. Oben: Dunkler Kalkkies, unten: Quarzkies. Die Grenze zum alveolengängigen Staub bei 4 µm ist gekennzeichnet. Beide Proben zeigen anfänglich (erste ca. 90 Sekunden) vergleichbar hohe Konzentrationen, die dann im Laufe des Versuches auf ein reduziertes, mehr oder weniger konstantes Niveau absinken.

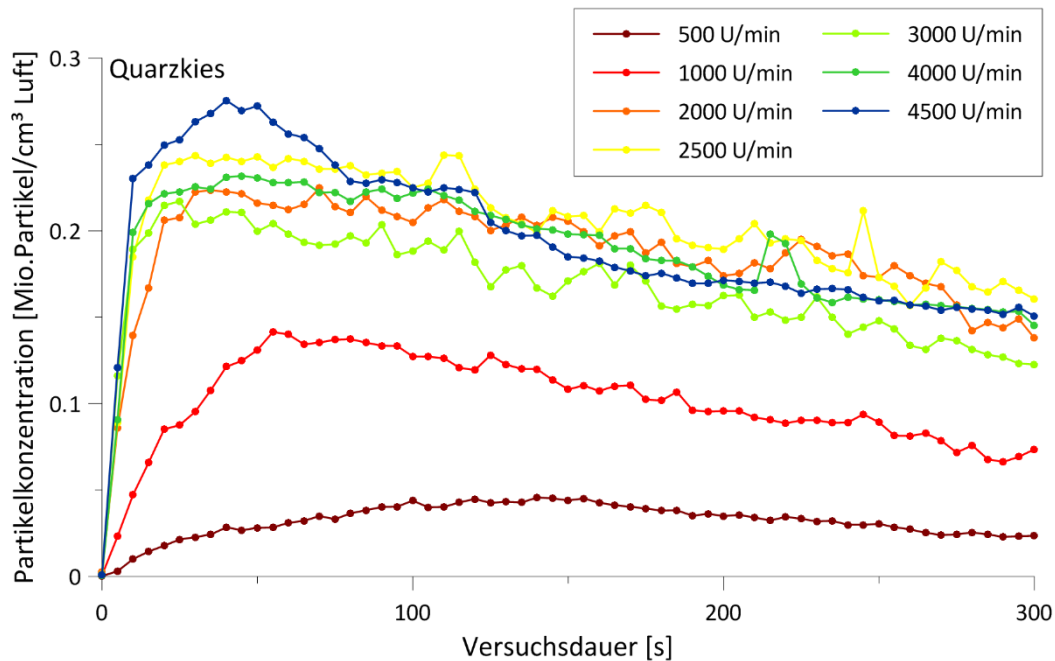


Abb. 14 Konzentrationen alveolengängigen Staubes während LCPC-Versuche mit unterschiedlicher Drehzahl. Probe: Quarzkies.

In Abb. 15 werden die bei verschiedenen Drehzahlen auftretenden Feinstaubkonzentrationen der beiden untersuchten Proben 60 und 240 Sekunden nach Versuchsbeginn miteinander verglichen. Hier ist zu sehen, dass 60 Sekunden nach Versuchsbeginn die Unterschiede in den Feinstaubkonzentrationen noch vergleichbar gering ausfallen. Erst bei Drehzahlen über 3000 U/min zeigt sich ein Unterschied in den Partikelkonzentrationen der beiden Proben.

Im weiteren Verlauf des Versuches (hier exemplarisch bei 240 Sekunden) stellen sich bereits bei Drehzahlen über 2000 U/min deutliche Unterschiede in den Partikelkonzentrationen ein. Dies zeigt deutlich, dass zumindest bei den hier untersuchten Proben Drehzahlen über 2000 U/min nötig sind, um unterschiedliches Staubungsverhalten mit dem Modifizierten LCPC-Versuch darzustellen. Nachdem höhere Drehzahlen keinen erkennbar negativen, sondern scheinbar eher einen positiven Effekt auf die Differenzierbarkeit der Ergebnisse haben, kann die Drehzahl von 4500 U/min aus der originalen LCPC-Versuchsempfehlung übernommen werden.

Insgesamt scheint es somit günstig zu sein die Versuchsparameter des originalen LCPC-Versuchs für den Modifizierten LCPC-Versuch zu übernehmen. Ein weiteres wichtiges Argument für die Beibehaltung der originalen Versuchsparameter ist selbstverständlich auch, dass auf diese Weise im Modifizierten LCPC-Versuch sowohl die Kennwerte für die Abrasivität (LAK) und Brechbarkeit (LBR), als auch die neu definierten Kennwerte für das Feinstaub- bzw. Quarzfeinstaubpotential (LFK und LQK) ermittelt werden können.

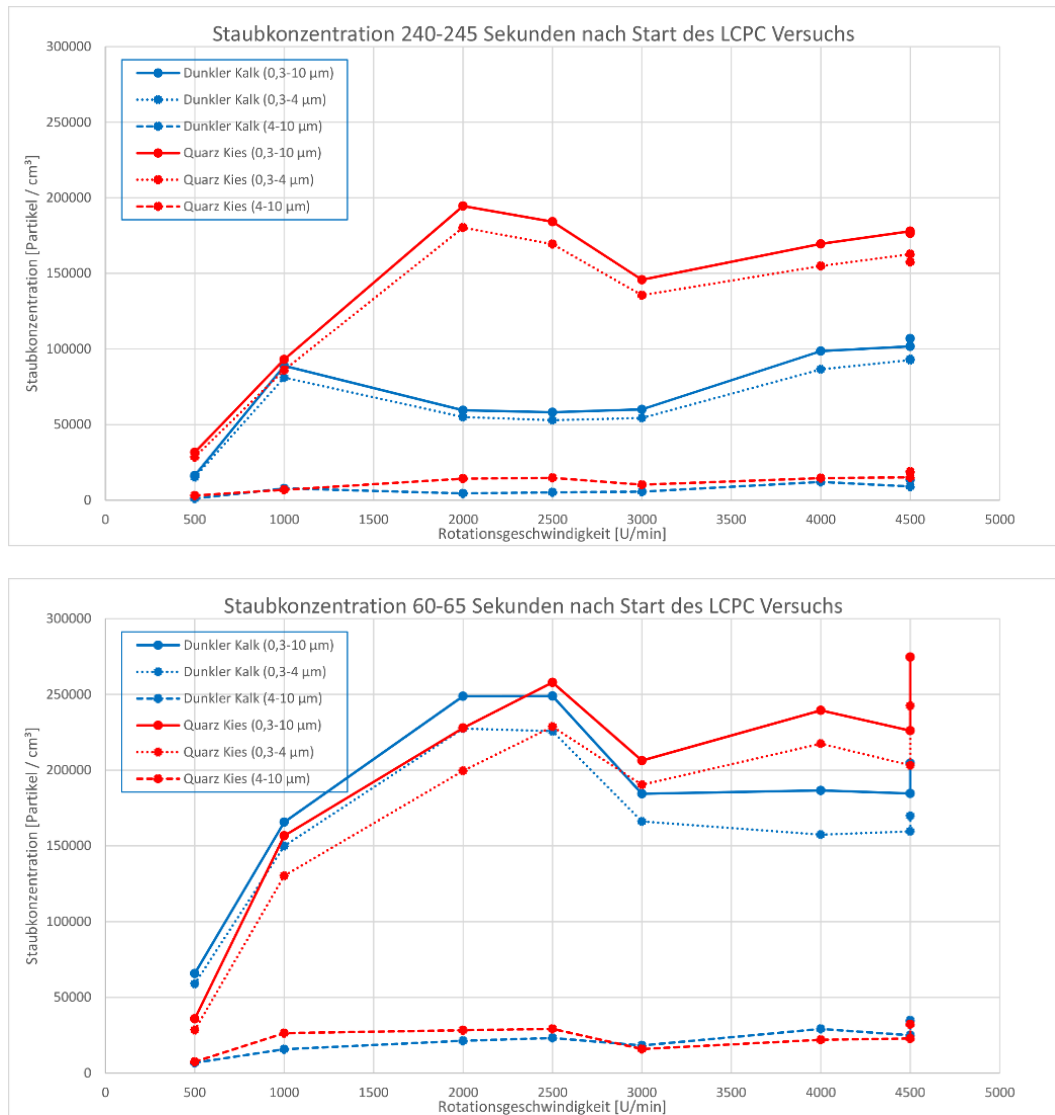


Abb. 15 Feinstaubkonzentrationen des Kalkkieses (blau) und Quarzkieses (rot) bei LCPC-Versuchen mit verschiedener Drehzahl 60 Sekunden (oben) und 240 Sekunden (unten) nach Beginn des Versuches. 60 Sekunden nach Versuchsbeginn sind Unterschiede in der Partikelkonzentration der beiden untersuchten Proben erst bei Drehzahlen von über 3000 U/min erkennbar. Nach 240 Sekunden treten bereits bei Drehzahlen über 1000 U/min deutliche Unterschiede auf.

3.3 LCPC Abrasivitäts-Koeffizient (LAK)

Der LCPC Abrasivitäts-Koeffizient wurde für jede der 14 untersuchten Gesteinsarten an 4 bis 6 Teilproben ermittelt. Die Ergebnisse der einzelnen Teilproben sind in tabellarischer Form in Anhang II zusammengestellt. Die Abb. 16 stellt die Ergebnisse in aufsteigender Sortierung für die verschiedenen Gesteinsarten dar.

Der geringste LAK-Wert wurde mit einem Mittelwert von 108 g/t für den Opalinuston (Mont Terri) bestimmt. Die höchste Abrasivität weist im Mittel 1408 g/t der feine Orthogneis (Nant de Drance) auf. Wie beabsichtigt war, decken die 14 untersuchten Gesteinsarten nahezu das gesamte Spektrum an LAK Werten von „kaum abrasiv“ bis „stark abrasiv“ ab. Es fehlen lediglich Proben mit LAK Werten von unter 50 g/t („nicht abrasiv“).

Die Schwankungsbreite (Unterschied Min.-Max.) der LAK Werte der Einzelproben einer Gesteinsart liegt maximal bei 120 g/t (NDD-A), meist jedoch bei ca. 60 g/t, und ist damit verhältnismäßig gering.

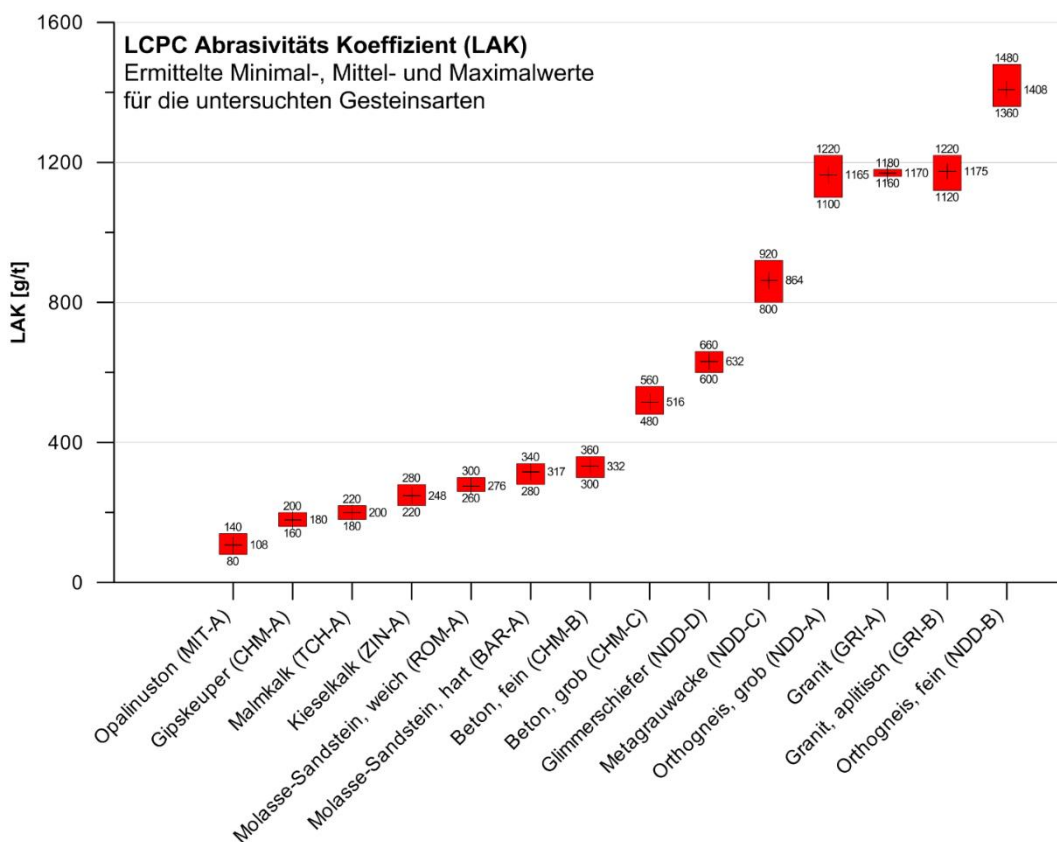


Abb. 16 Zusammenstellung der ermittelten LCPC-Abrasivitäts-Koeffizienten (LAK) für die 14 untersuchten Gesteinsarten. Die Gesteine wurden in Reihenfolge aufsteigender LAK-Werte sortiert.

3.4 LCPC Brechbarkeit (LBR)

Die LCPC Brechbarkeit wurde für jede der 14 untersuchten Gesteinsarten an 4 bis 6 Teilproben ermittelt. Die Ergebnisse der einzelnen Teilproben sind in tabellarischer Form in Anhang 2 zusammengestellt. Die Abb. 17 stellt die Ergebnisse in aufsteigender Sortierung für die verschiedenen Gesteinsarten dar.

Die LCPC-Brechbarkeiten von 9 der 14 untersuchten Gesteinsarten liegen in einem relativ engen Wertebereich zwischen ca. 25 und 45 %. Hierzu gehören unterschiedliche Gesteins-

typen wie z.B. Gneis, Malmkalk und Opalinuston. Die untersuchten Sandsteine (Molasse-sandstein hart/weich) weisen mit Werten zwischen 95 und 100 % mit Abstand die höchsten LCPC Brechbarkeiten auf. Die zweithöchsten Brechbarkeiten werden von den Graniten (Grimsel) mit Werten um 60 % erreicht. Die niedrigste LCPC-Brechbarkeit weist der Kieselkalk mit im Mittel 21 % auf.

Die beobachteten Schwankungsbreiten der Einzelproben jeweils einer Gesteinsart liegen in der Regel unter 5 %. Lediglich der feine Beton und der Gipskeuper weisen eine höhere Variabilität mit max. 8 % auf.

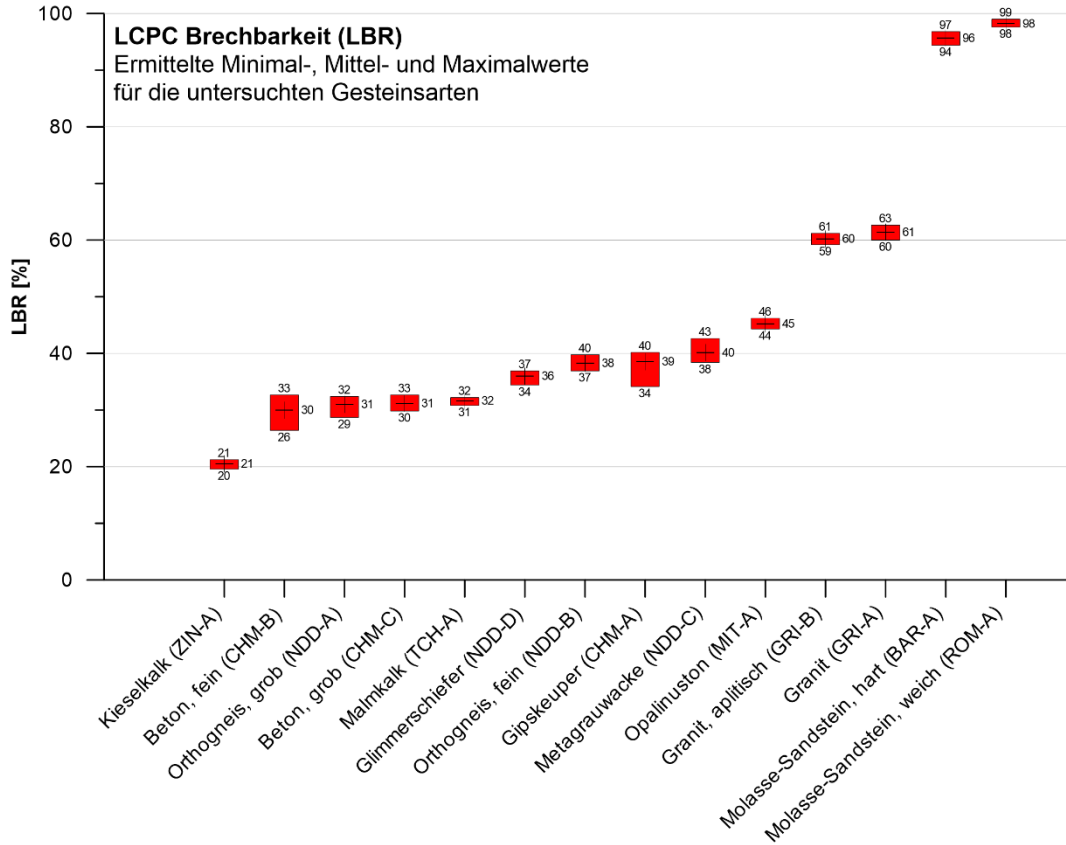


Abb. 17 Zusammenstellung der ermittelten LCPC-Brechbarkeits Werte (LBR) für die 14 untersuchten Gesteinsarten. Die Gesteine wurden in Reihenfolge aufsteigender LBR-Werte sortiert.

3.5 LCPC Partikelkonzentrationen

Die Feinstaub-Partikelkonzentrationen wurden im Korngrößenbereich 0,3 bis 10 μm (Aerodynamischer Durchmesser) während der Modifizierten LCPC-Versuche kontinuierlich erfasst. Damit können Unterschiede im Korngrößenspektrum des Feinstaubes verschiedener Gesteinstypen ermittelt werden. Des Weiteren kann die zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung während des Versuchs bestimmt werden.

3.5.1 Durchschnittliche Partikelkonzentrationen

Bei den durchgeführten Modifizierten LCPC-Versuchen wurden durchschnittliche Feinstaub-Partikelkonzentrationen zwischen ca. 0,8 und 3,0 Mio. Partikel pro cm^3 Luft gemessen. Dabei können die Partikelkonzentrationen im Verlaufe des Versuchs z.T. deutlich über oder unter diesen Mittelwerten gelegen haben. Es muss angemerkt werden, dass bei den Gesteinen mit den höchsten durchschnittlichen Partikelkonzentrationen (um

ca. 3 Mio. P/cm³) die maximal zulässige Partikelkonzentration des optischen Partikelzählers z.T. überschritten wurde, so dass diese Werte ggf. zu niedrig ausfallen (vgl. Kap. 2.1.6).

Grundsätzlich zeigen die untersuchten Kristallingesteine die im Vergleich höchsten mittleren Partikelemissionen im Bereich von ca. 1,75 bis 3,0 Mio. Partikel pro cm³ Luft. Die Tonsteine (Gipskeuper und Opalinuston) liegen mit Werten von ca. 1,25 bis 1,75 Mio. Partikel pro cm³ Luft im Mittelfeld. Die niedrigsten Emissionen werden bei den übrigen Sedimenten (Kalke und Sandsteine) im Bereich von ca. 0,75 bis 1,5 Mio. Partikel pro cm³ Luft registriert. Die untersuchten Betonsteine liegen mit ca. 1,25 bis 2,0 Mio. Partikel pro cm³ Luft ebenfalls im Mittelfeld.

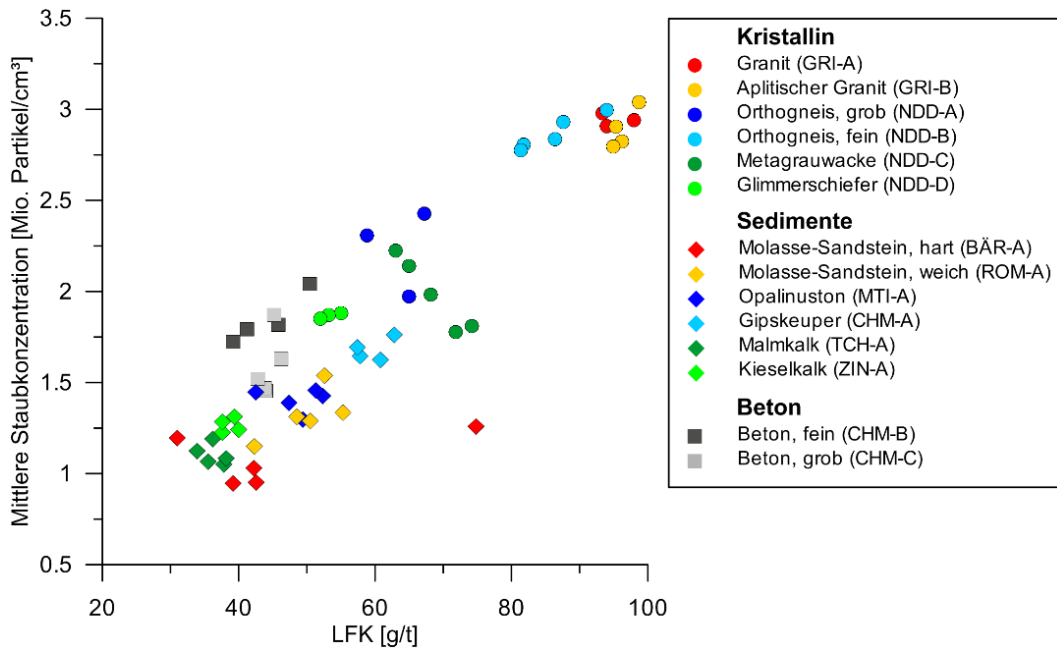


Abb. 18 Beziehung zwischen der mit dem optischen Partikelzähler ermittelten mittleren Partikelkonzentration und der mit dem gravimetrischen Probenahmesystem erfassten Feinstaubmasse für alle durchgeführten Modifizierten-LCPC Versuche.

Neben der Ermittlung der durchschnittlichen Feinstaub-Partikelkonzentration (0,3 – 10 µm) mit dem optischen Partikelzähler wird beim Modifizierten LCPC-Versuch auch die freiwerdende A-Staub-Masse (< ca. 4 µm) mit dem Probenahmesystem FSP-2 erfasst. Naturgemäß sollten diese miteinander korrelieren, auch wenn die beiden Systeme jeweils einen unterschiedlichen Korngrößenbereich erfassen. In der Abb. 18 wird die aufgefangene Feinstaubmasse (in Form des Koeffizienten „LFK“ in Gramm Feinstaub pro Tonne Ausgangsgestein, vgl. Kap. 2.1.5) der durchschnittlichen Feinstaub-Partikelkonzentration des jeweiligen Versuches gegenübergestellt. Es zeigt sich die erwartete klare Korrelation, wobei die Beziehung der beiden Werte durch die unterschiedliche Dichte der verschiedenen Gesteinsarten und unterschiedliche Korngrößenverteilung des Staubes beeinflusst wird.

Dies belegt, dass der Versuchsaufbau mit den zwei verschiedenen Probensträngen grundsätzlich plausible und nachvollziehbare Ergebnisse produziert und in der Lage ist gesteinsabhängige Unterschiede in den Feinstaub-Emissionen zu erfassen.

3.5.2 Veränderung der Partikelkonzentrationen im Verlaufe des LCPC-Versuchs

Wie bereits die erste Versuchsserie gezeigt hat, kann es während eines LCPC-Versuchs zu stark unterschiedlichen Feinstaub-Emissionsmengen kommen (Abb. 13). Diese Beobachtung wurde auch in der zweiten Versuchsserie bestätigt und soll im Folgenden näher betrachtet werden.

Die Darstellung der korngößenabhängigen Partikelkonzentrationen im Laufe des LCPC-Versuchs in einem 3D-Diagramm (z.B. Abb. 19 und Anhang 0) zeigt deutliche Unterschiede bei verschiedenen Gesteinstypen. Dies bezieht sich nicht nur auf die Menge der freigesetzten Partikel, sondern insbesondere auch auf den zeitlichen Verlauf der Emissionen.

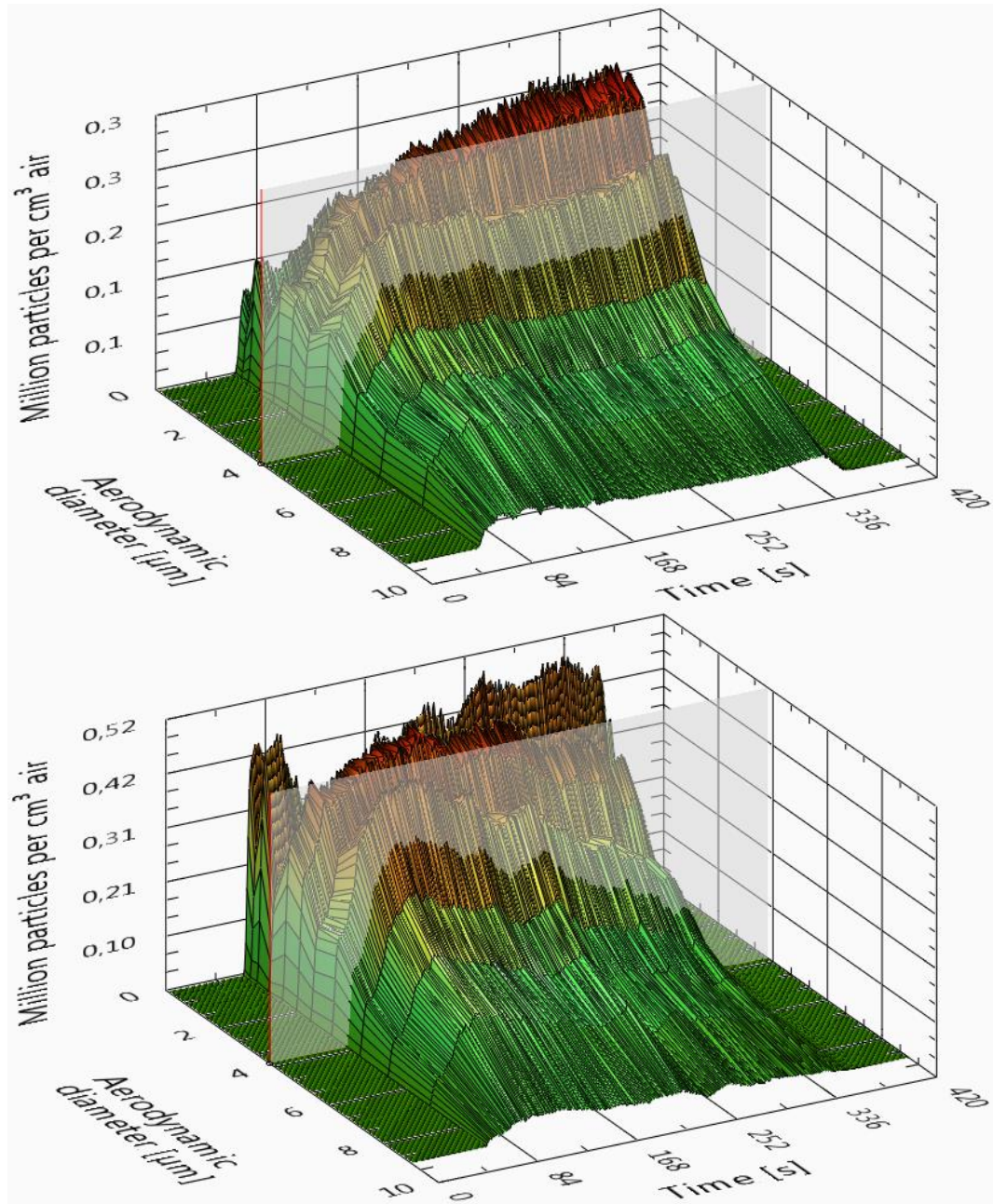


Abb. 19 Korngrößenabhängige Partikelkonzentrationen des Feinstaubes im Bereich 0,3 bis 10 µm im Verlaufe des Modifizierten LCPC-Versuchs. Unten: Aplitischer Granit (GRI-B-1), oben: Gipskeuper (CHM-A-1). Die Grenze zum alveolengängigen Staub bei 4 µm ist gekennzeichnet.

Die Emissionsverläufe der Teilproben einer Gesteinsart variieren dabei z.T. deutlich. Desweiteren sind vereinzelt, kurz andauernde lokale Maxima in den Partikelemissionen zu beobachten (z.B. MIT-A-1 und ZIN-A-2). Dennoch lassen sich klar gewisse gesteinsabhängige Trends in den Verläufen den Partikelemissionen erkennen:

So zeigen die Kristallingesteine (Abb. 19 unten) häufig zu Beginn des LCPC-Versuchs ein relatives Maximum insbesondere im feinkörnigen Bereich des erfassten Korngrößenspektrums (A-Staub). Anschließend steigen die Partikelkonzentrationen über das gesamte Korngrößenspektrum hinweg, so dass das Maximum der Emissionen erreicht wird. Dies ist häufig im Zeitraum zwischen 60 und 150 Sekunden nach dem Beginn des Versuchs der Fall. In der zweiten Versuchshälfte nehmen dann die Partikelkonzentrationen im Allgemeinen wieder ab, wobei die größeren Partikel stärker zurück gehen, als die feinen.

Bei den klastischen Sedimentgesteinen (Sand- und Tonsteinen) zeigt sich dagegen ein deutlich anderer Emissionsverlauf (Abb. 19 oben). Hier nehmen die Emissionen im Verlauf des Versuchs häufig über das gesamte Korngrößenspektrum, z.T. verstärkt im Bereich des A-Staubes, kontinuierlich zu, so dass das Maximum der Emissionen eher zum Ende des Versuchs erreicht wird. Bei den festeren Sandsteinen (BÄR-A) treten z.T. zu Beginn des Versuchs kurze (max. ca. 30 Sek.) lokale Maxima im feinkörnigen Bereich des Korngrößenspektrums auf.

Die Kalke zeigen insgesamt ein Verhalten ähnlich dem der Kristallingesteine (Maximale Feinstaubkonzentration eher zur Mitte des Versuchs), allerdings fehlt in der Regel das A-Staub-Maximum zu Beginn des Versuchs und die Abnahme der Partikelkonzentration zum Ende des Versuchs hin ist häufig vergleichsweise stark.

Diese Beobachtungen werden auch deutlich, wenn man bei den einzelnen Versuchen jeweils die mittlere Partikelkonzentration der ersten, dritten (mittleren) und fünften (letzten) Versuchsminute bestimmt und gegenüberstellt (Abb. 20). So liegen die Emissionen bei den klastischen Sedimenten in der ersten Versuchsminute (grün) am niedrigsten und in der letzten Versuchsminute in der Regel am höchsten (rot). Bei den Kristallingesteinen werden die höchsten Gesamtemissionen tendenziell in der Mitte des Versuchs (gelb) erreicht.

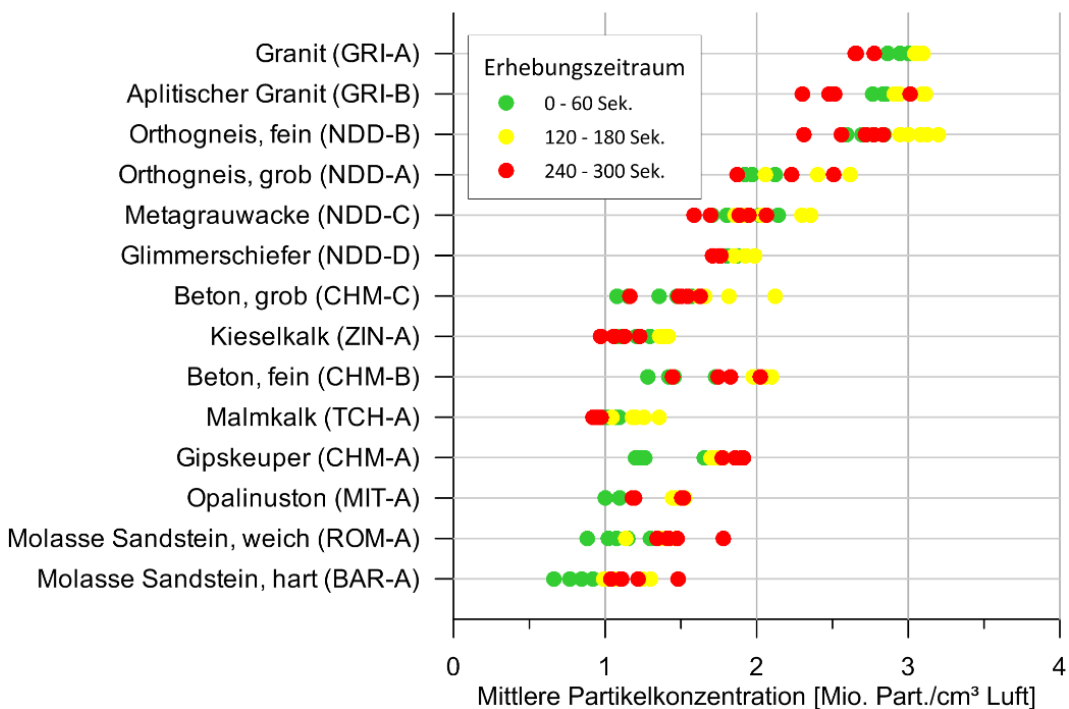


Abb. 20 Entwicklung der mittleren Partikelkonzentration des gesamten erfassten Feinstaubes (0,3-10 µm) im Laufe des LCPC-Versuchs. Es sind jeweils die durchschnittliche Partikelkonzentration während der ersten (grün), dritten (gelb) und letzten (rot) Minute des LCPC-Versuchs dargestellt.

3.5.3 Korngrößenverteilung des Feinstaubes

Um einen Überblick über die während des Modifizierten LCPC-Versuchs freigesetzten Feinstaub-Korngrößenverteilungen zu erhalten, wurden einhüllende Korngrößen-Summenkurven für jede Gesteinsart ermittelt (Abb. 21 und Abb. 22). Alle Kornsummenkurven, die im Laufe der Durchführung aller LCPC-Versuche einer Gesteinsart ermittelt worden sind, liegen zwischen den dargestellten Minimal- und Maximal-Summenkurven.

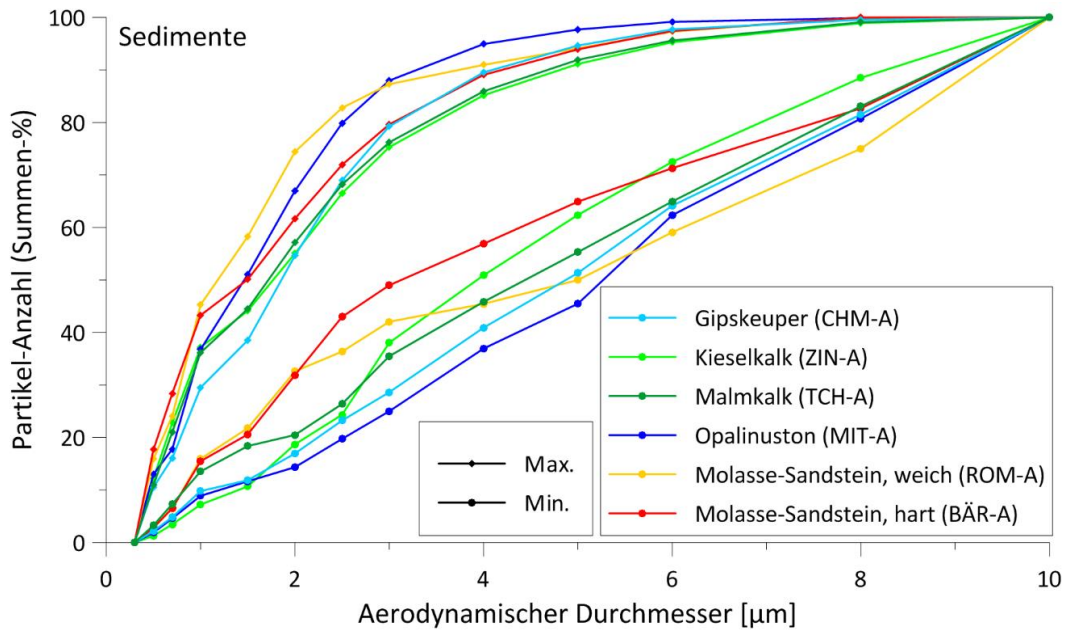


Abb. 21 Einhüllende Kornsummenkurven des Feinstaubes der untersuchten Sedimentgesteine.

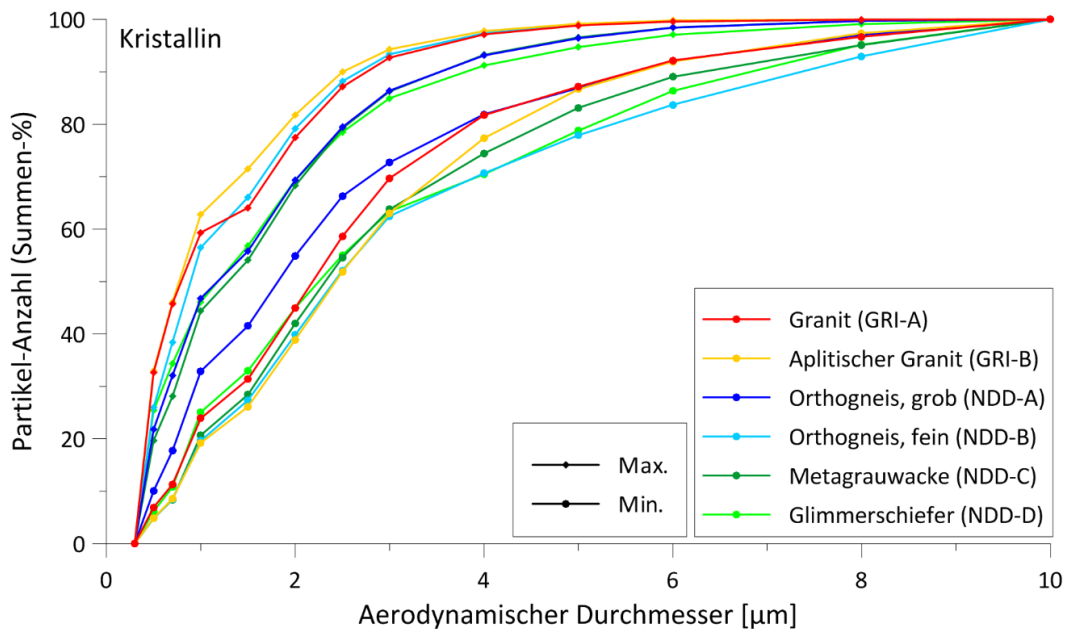


Abb. 22 Einhüllende Kornsummenkurven des Feinstaubes der untersuchten Kristallingesteine.

Dabei zeigen die untersuchten Sedimentgesteine insgesamt ein deutlich weiteres Korngrößenspektrum als die untersuchten Kristallingesteine. Tendenziell tritt bei den Kristallingesteinen zudem feinerer Feinstaub auf als bei den Sedimenten. So liegt der Anteil an A-Staub (< 4 µm) beim Kristallin immer über ca. 60 %. Bei den Sedimenten treten zumindest zeitweise Staubzusammensetzungen auf, die je nach Gesteinsart lediglich ca. 35 bis 55 % A-Staub enthalten.

Innerhalb der Sedimente zeigen die festeren Gesteine (harter Molassesandstein, Kieselkalk, Malmkalk) tendenziell feinere Staubzusammensetzungen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Feinkörnigkeit des Staubes u.a. von der Gefügefestigkeit des Gesteins abhängt. Die tonreichen Gesteine Opalinuston und Gipskeuper können die größten Staubzusammensetzungen im betrachteten Korngrößenbereich zwischen 0,3 und 10 µm freisetzen, zeigen aber zugleich das weiteste Korngrößenspektrum.

Dies zeigt sich auch, wenn man den Verlauf des prozentualen Anteils an A-Staub während des LCPC-Versuchs betrachtet (Abb. 23). Die klastischen Sedimente (Ton- und Sandsteine) zeigen die größten Veränderungen in der Staubzusammensetzung: Der Anteil an A-Staub steigt im Laufe des Versuches meist kontinuierlich um mindestens 10 bis 15 % an. Auch bei den anderen Gesteinen steigt der Anteil an A-Staub im Verlauf des Versuches meist an, wenn auch nicht so stark.

Die Krümmungszahl der Korngrößenverteilungen sinkt im Laufe des Versuches bei nahezu allen Proben von Werten im Bereich von ca. 4,0 bis 5,3 auf Werte im Bereich 3,2 bis 4,5 (Abb. 24). Dies bedeutet, dass die Kurven im Verlauf des Versuches tendenziell einen gleichmäßigeren Verlauf nehmen.

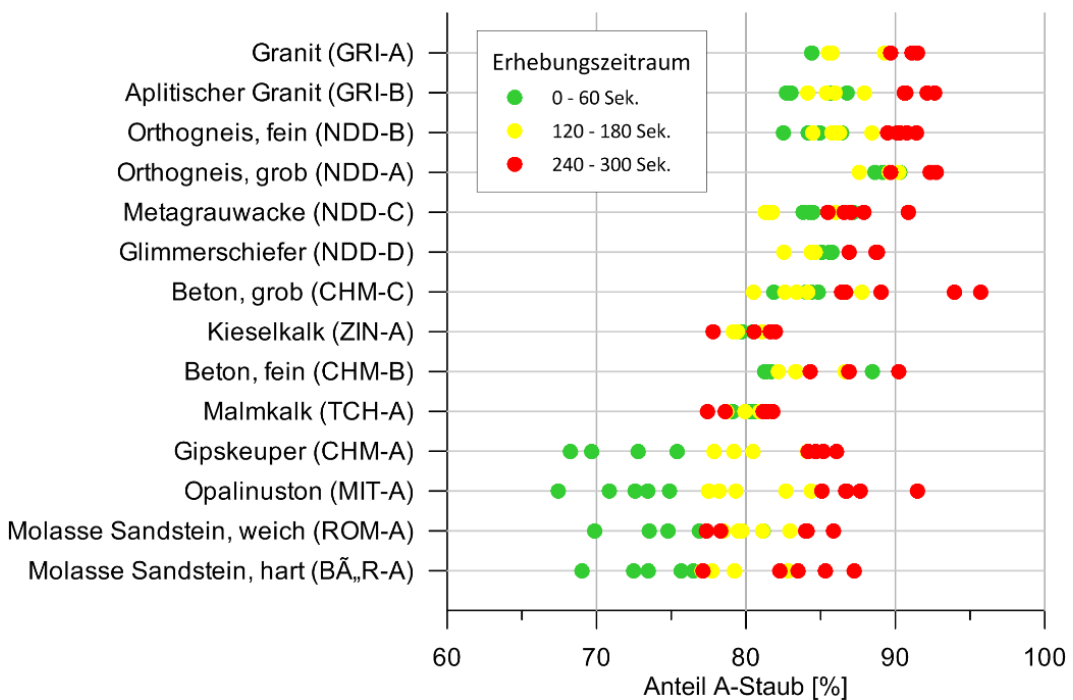


Abb. 23 Veränderung des Anteils an A-Staub im Verlauf des LCPC-Versuchs bei den verschiedenen Gesteinsarten. Es sind jeweils der durchschnittliche Anteil an A-Staub während der ersten (grün), dritten (gelb) und letzten (rot) Minute des LCPC-Versuchs dargestellt.

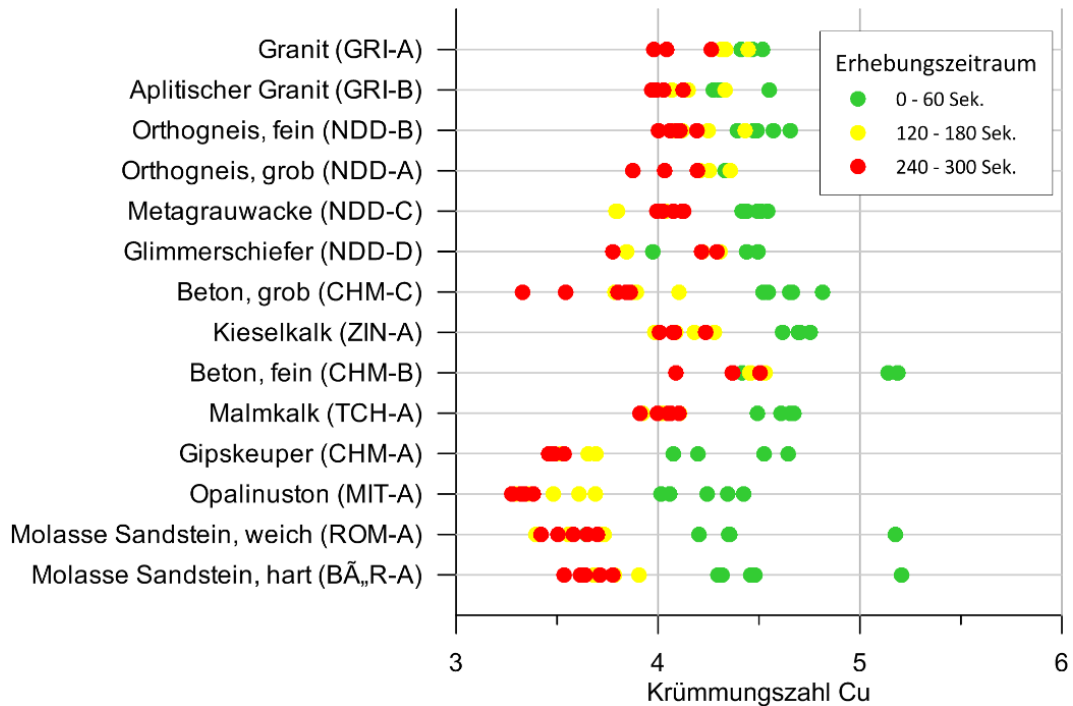


Abb. 24 Veränderung der Krümmungszahl der erfassten Korngrößensummenkurven im Verlauf des LCPC-Versuchs. Es sind jeweils die Krümmungszahlen der durchschnittlichen Korngrößenverteilung während der ersten (grün), dritten (gelb) und letzten (rot) Minute des LCPC-Versuchs dargestellt.

3.6 Mineralogie

Tab. 7 zeigt die mittels Röntgendiffraktometrie ermittelten Mineralgehalte der untersuchten Gesteine sowie die mittlere Zusammensetzung des bei den entsprechenden LCPC-Versuchen emittierten Feinstaubes. Die Aufstellung aller Einzelwerte befindet sich in Anhang 0.

3.6.1 Ausgangsgesteine

Die Mineralogie der hier untersuchten Gesteine ist entsprechend ihres Ursprungs aus verschiedensten geologischen Einheiten der Schweiz sehr vielfältig. Dennoch machen die typischen gesteinsbildenden Minerale Quarz, verschiedene Feldspäte und Glimmer sowie Calcit und diverse Tonminerale einen Großteil der Materie aus. Die Kristallingesteine sind größtenteils aus SiO₂-reichen Mineralen aufgebaut - typische mafische Minerale, wie z.B. Hornblenden oder Pyroxene, fehlen in dieser Versuchsserie. Da pro Gesteinsart nur eine Mineralbestimmung durchgeführt wurde ist eine quantitative Aussage bzgl. der Homogenität des Gesteins nicht möglich. Im Handstück zeigen jedoch insbesondere der Rorschacher Sandstein (Molassesandstein, hart – BÄR-A) sowie die Metagrauwacke (NDD-C) eine deutliche Schichtung bzw. Bänderung im cm-Bereich, die auf eine bestimmte Variabilität der mineralogischen Zusammensetzung im Versuchsmaßstab schließen lässt.

Die Quarzgehalte der Ausgangsgesteine reichen von knapp 2 % (Malmkalk) bis 42,9 % (fester Molassesandstein) und decken damit – wie beabsichtigt – ein breites Spektrum verschiedener Quarzgehalte ab.

Tab. 7 Gemittelte Mineralgehalte der untersuchten Ausgangsgesteine und Feinstaubproben (FS) (in Massen %).

Probe Nr.	Qu.- geh.	Weitere Mineralgehalte bestimmt im Rietveld-Verfahren, absteigend sortiert												Weit ere
		%	M. 1	%	M. 2	%	M. 3	%	M. 4	%	M. 5	%	M. 6	
BÄR-A	42,9		19,4		14,2		7,5		6,2		5,9		3,8	
BÄR-A FS	25,0	Cal	23,7	Pl	16,0	Dol	3,6	Mic	4,9	Mus	14,6	Chl	12,2	
CHM-A	21,3		30,4		22,3		9,2		7,7		5,2		3,9	
CHM-A FS	4,6	Gyp	41,2	Anh	28,0	Mag	12,6	Bas	6,3	Smc	4,2	Ill	3,2	
CHM-B	27,7		40,5		21,4		4,1		3,1		2,8		0,5	Gyp,
CHM-B FS	11,1	Cal	51,1	Chl	5,5	Alb	5,6	Mic	5,0	Mus	9,2	Dol	1,7	Mgs
CHM-C	38,6		53,2		3,9		1,5		1,3		1,0		0,5	
CHM-C FS	11,6	Cal	69,2	Alb	4,7	Chl	3,0	Dol	1,3	Mus	5,3	Mic	4,9	
GRI-A	25,2		30,4		31,1		3,9		2,9		2,6		0,8	Ocl,
GRI-A FS	17,1	Mic	26,0	Alb	22,9	Mus	7,0	Ep	0,8	Bt	2,8	Chl	16,6	Cal
GRI-B	37,8		28,1		27,9		2,8		3,0		0,2		0,1	Ocl,
GRI-B FS	28,0	Mic	29,5	Alb	33,1	Mus	5,3	Ep	0,7	Bt	0,8	Chl	1,5	Cal
MTI-A	13,6		32,3		19,7		12,2		8,2		7,2		3,0	Al, Py
MTI-A FS	6,3	Kao	34,3	Ill	23,8	Cal	13,3	Smc	8,5	Chl	9,0	Sid	2,6	
NDD-A	35,0		31,1		10,1		9,0		7,8		6,9			
NDD-A FS	21,3	Pl	26,2	Mus	27,1	Ocl	11,0	Chl	7,9	Mic	6,5			
NDD-B	35,0		28,2		25,6		7,0		2,4		1,7		0,1	
NDD-B FS	23,7	Mic	25,8	Pl	25,0	Mus	14,3	Chl	3,8	Ill	7,2	Py	0,1	
NDD-C	31,8		33,1		16,0		13,2		5,6		0,4			
NDD-C FS	19,5	Pl	9,4	Chl	46,0	Mus	19,9	Ocl	5,0	Py	0,1			
NDD-D	40,1		20,8		16,0		12,8		10,3					
NDD-D FS	16,9	Mus	35,6	Chl	11,1	Pl	12,3	Ill	24,0					
ROM-A	40,1		23,2		15,2		6,4		5,4		4,3		3,1	
ROM-A FS	20,8	Cal	25,3	Ill	25,8	Chl	10,2	Pl	7,1	Dol	4,8	Mus	5,4	Mic
TCH-A	1,8		86,3		5,2		3,7		2,6		0,3			
TCH-A FS	1,0	Cal	86,8	Dol	4,5	Kao	4,7	Ill	2,9	Py	0,1			
ZIN-A	26,3		65,7		3,8		1,9		1,3		1,1			
ZIN-A FS	16,3	Cal	70,7	Ank	3,2	Mus	6,4	Py	1,1	Chl	2,3			

3.6.2 Feinstaub

Die im Modifizierten LCPC-Versuch aufgefangenen Feinstäube weisen naturgemäß eine mit dem Ausgangsgestein vergleichbare Mineralogie auf. Allerdings sind deutliche Fraktionierungsprozesse zu beobachten, dh. die Mineralgehalte verschieben sich gegenüber der Zusammensetzung des Ausgangsgesteins z.T. deutlich (s. Kap. 3.7).

In der Regel sind die Mineralzusammensetzungen der Feinstäube eines Gesteins relativ homogen. Ausnahmen stellen hier der harte Molassesandstein und die Metagrauwacke dar. Hier schwanken die einzelnen Mineralgehalte z.T. beträchtlich (z.B. Chloritgehalt im Molassesandstein: ca. 2 bis 40 %; Muskovit- und Chloritgehalte in der Metagrauwacke: bis zu 60 % Schwankung). Es ist davon auszugehen, dass die oben bereits erwähnte makroskopisch sichtbare Inhomogenität des Ausgangsgesteins maßgeblich hierfür verantwortlich ist.

Eine Feinstaubprobe des Grimsel-Granits enthält über 50 % Chlorit, während die übrigen Feinstaubproben < 5 % und das Ausgangsgestein nur ca. 1 % Chlorit enthält. Obwohl dies äußerlich nicht festgestellt wurde, scheint eine partielle Vergrünung des Gesteins und eine damit wechselnde Zusammensetzung des Ausgangsgesteins die plausibelste Erklärung für diesen Ausreißer. Dabei muss das Ausgangsgestein bei weitem nicht 50 % Chlorit enthalten haben, da sich Chlorit tendenziell während des Brechvorgangs im Feinstaub anreichert (vgl. Kap. 3.7).

Zentrales Element dieser Untersuchung ist die Bestimmung des Quarzgehaltes der in den LCPC-Versuchen freigesetzten A-Feinstäube verschiedener Gesteine. In Abb. 25 sind die Quarzgehalte der untersuchten A-Staubproben zusammen mit den Quarzgehalten der jeweiligen Ausgangsgesteine dargestellt.

Die Quarzgehalte der Feinstäube betragen zwischen 0,9 und 29,5 % und liegen stets niedriger als die Gehalte der entsprechenden Ausgangsgesteine.

3.7 Fraktionierung

Wie bereits in der Abb. 25 zu sehen ist kommt es bei den LCPC-Versuchen zu einer Fraktionierung der Minerale, d.h. bestimmte Minerale reichern sich im Feinstaub auf Kosten anderer Mineralgehalte an. Quarz wird bei allen untersuchten Gesteinen im Feinstaub abgereichert, dh. die Feinstäube weisen z.T. deutlich niedrigere Quarzgehalte auf, als ihre Ausgangsgesteine. Abb. 26 zeigt wie stark die Verminderung des Quarzgehaltes bei den verschiedenen Gesteinen ausfällt. Beim Gipskeuper (CHM-A) bleibt am wenigsten vom ursprünglich im Gestein enthaltenen Quarz im Feinstaub erhalten. Der Quarzgehalt reduziert sich hier im Schnitt um fast 80 %. Dagegen findet beim aplitischen Granit (GRI-B) mit nur 25 % die geringste Abreicherung statt.

Je nach Zusammensetzung der Gesteine werden unterschiedliche Minerale An- bzw. Abgereichert. So kommt es z.B. beim harten Molassesandstein im Mittel vor allem zu einer Anreicherung von Muskovit und Chlorit, während Quarz, Dolomit und Mikroklin im Feinstaub abgereichert werden. Dagegen wird beim Glimmerschiefer (NDD-C) vor allem Quarz und Chlorit im Feinstaub abgereichert, während die Gehalte an Muskovit und Illit stark zunehmen (Abb. 27).

In Summe kann klar festgestellt werden, dass sich die Glimmer- und Tonminerale im Feinstaub tendenziell anreichern, während die Gehalte an Quarz und Feldspäten bei den hier untersuchten Gesteinen in der Regel immer zurück gehen.

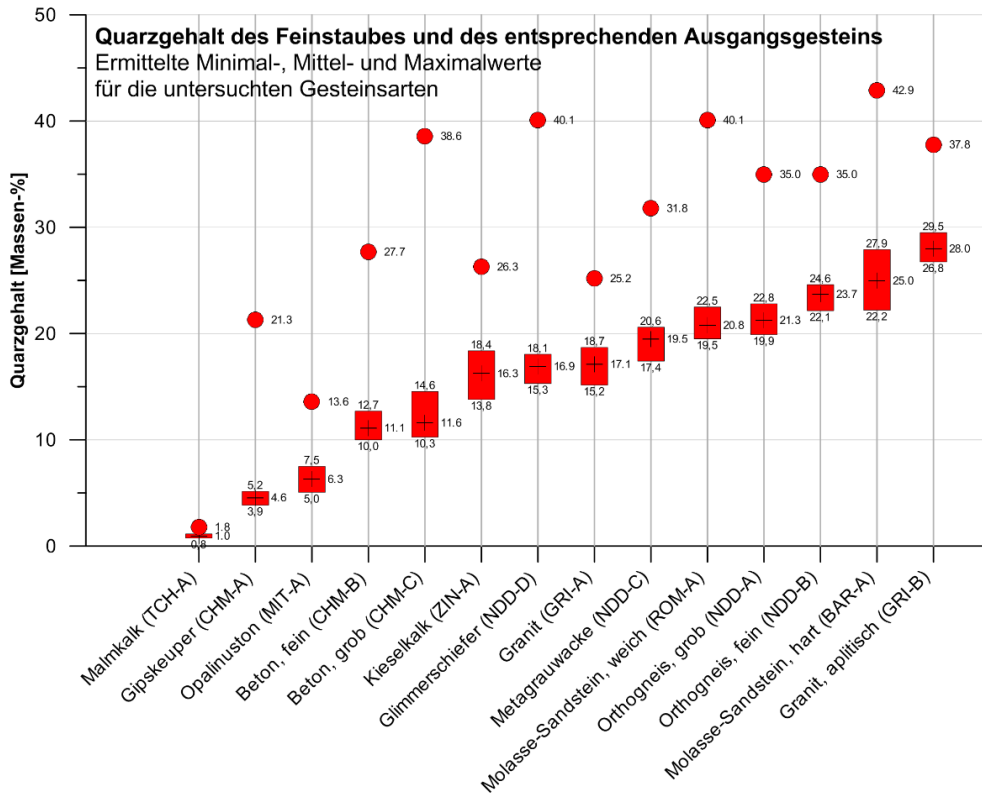


Abb. 25 Quarzgehalte des während des Modifizierten LCPC-Versuchs freigesetzten Feinstaubes (A-Staub) verschiedener Gesteine (Balken). Zusätzlich ist der Quarzgehalt des Ausgangsgesteins angegeben (Punkte).

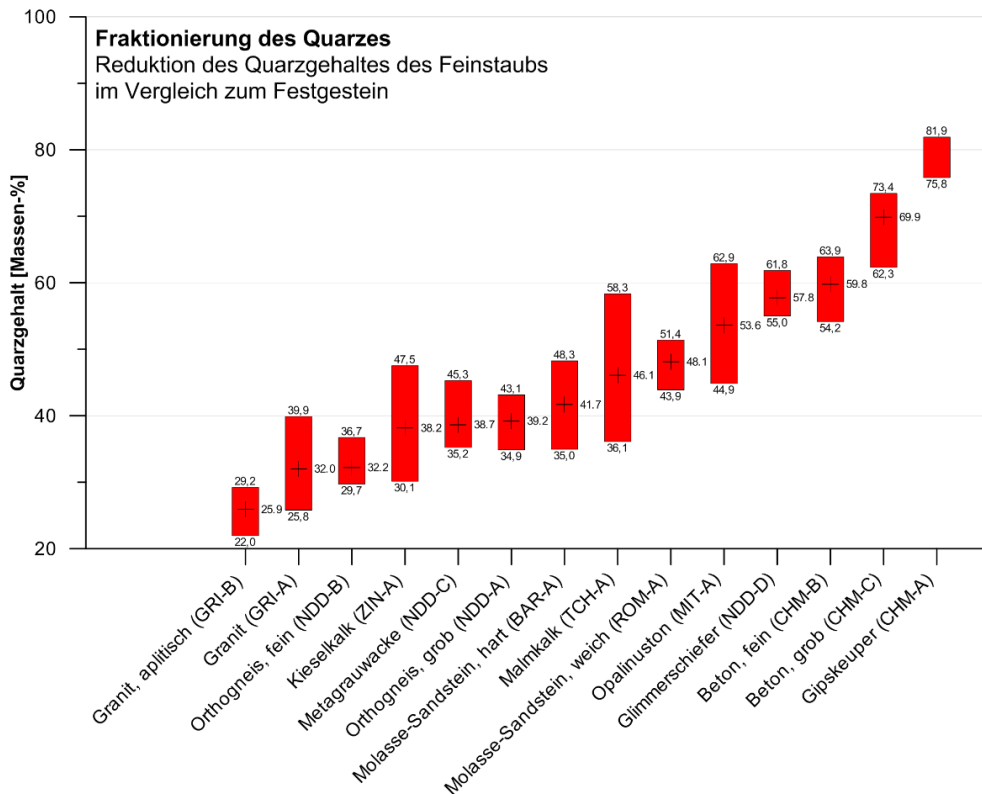


Abb. 26 Reduktion des Quarzgehaltes im Feinstaub gegenüber dem Quarzgehalt des Ausgangsgesteins.

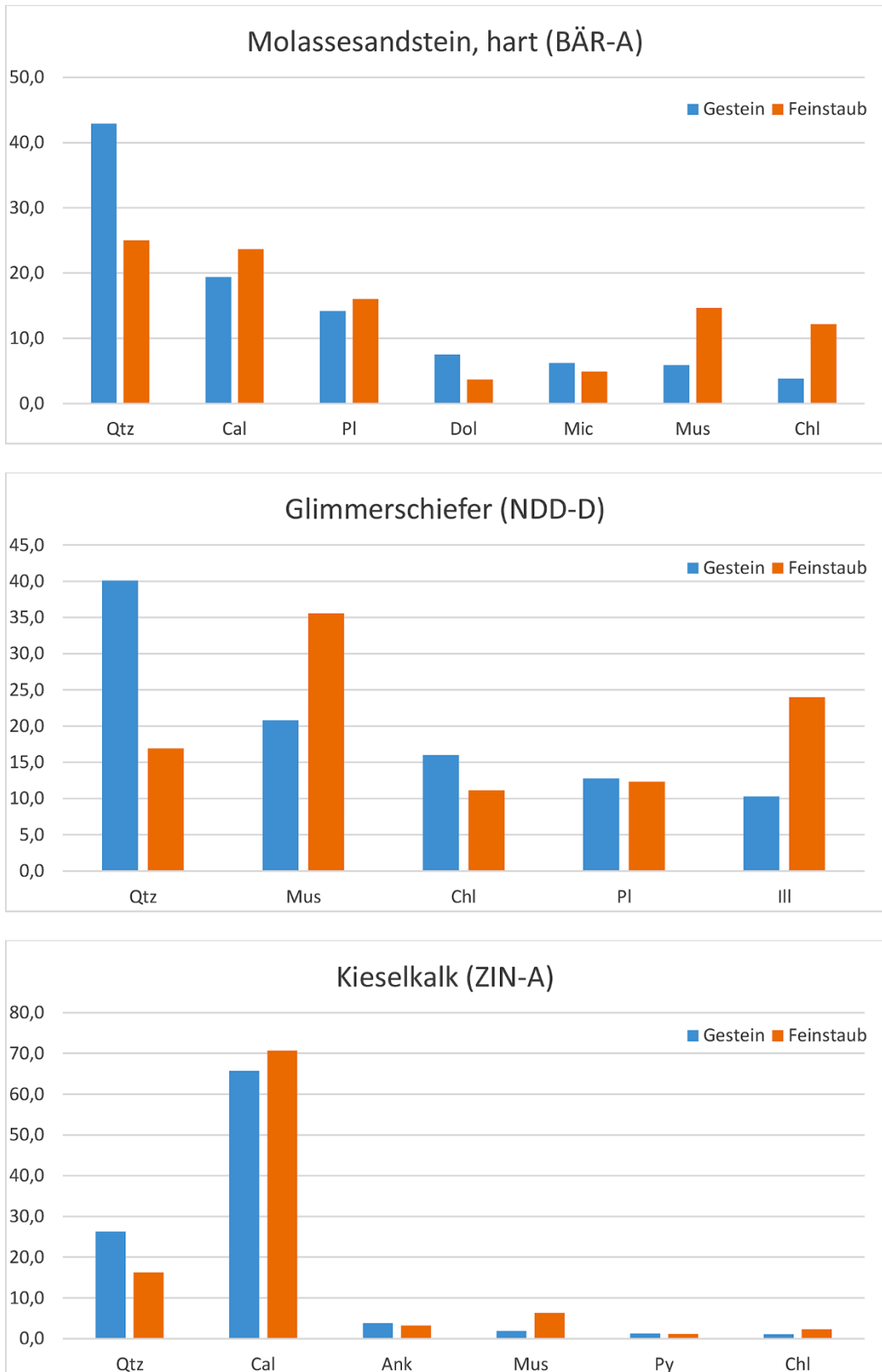


Abb. 27 Vergleich der mittleren Mineralgehalte des Feinstaubes mit den Mineralgehalten des entsprechenden Ausgangsgesteins für den harten Molassesandstein (oben), den Glimmerschiefer (mitte) und den Kieselkalk (unten). Dabei zeigen sich im Feinstaub z.T. deutliche Verschiebungen in der Zusammensetzung in der Regel zu Gunsten der Glimmer- und Tonminerale und zu Ungunsten von Quarz und Feldspäten.

3.8 LCPC-Feinstaubkoeffizient

Der LCPC-Feinstaubkoeffizient (LFK) drückt aus, welche Masse (in Milligramm) alveolen-gängigen Feinstaubes im modifizierten LCPC-Versuch aus einer Tonne Ausgangsgestein freigesetzt wird. Die untersuchten Gesteinsarten zeigen LFK-Werte im Bereich von 36,3 bis 96,3 g/t (Abb. 28). Dabei liegen die Schwankungsbreiten in der Regel deutlich unter ± 10 g/t. Eine Ausnahme stellt hier die Probe BÄR-A (fester Molassesandstein) dar, die insbesondere aufgrund eines Ausreißer-Wertes (BÄR-A-5) eine deutlich höhere Streuung aufweist. Die Feinstaub-Mineralogie dieses Versuchs weicht auch deutlich von den übrigen Teilproben dieser Gesteinsart ab, so dass hier vermutlich die Heterogenität des Ausgangsgesteins (Lagen mit unterschiedlichem Chloritgehalt) zum Ausdruck kommt.

Wie aufgrund der Korrelation des LFK mit den mittleren Partikelkonzentrationen (vgl. Kap. 3.5.1) zu erwarten ist, zeigen die Kristallinen Gesteine die höchsten LFK-Werte. Die klastischen Sedimente liegen im Mittelfeld und die Kalke besitzen mit unter 40 g/t die geringsten LFK-Werte.

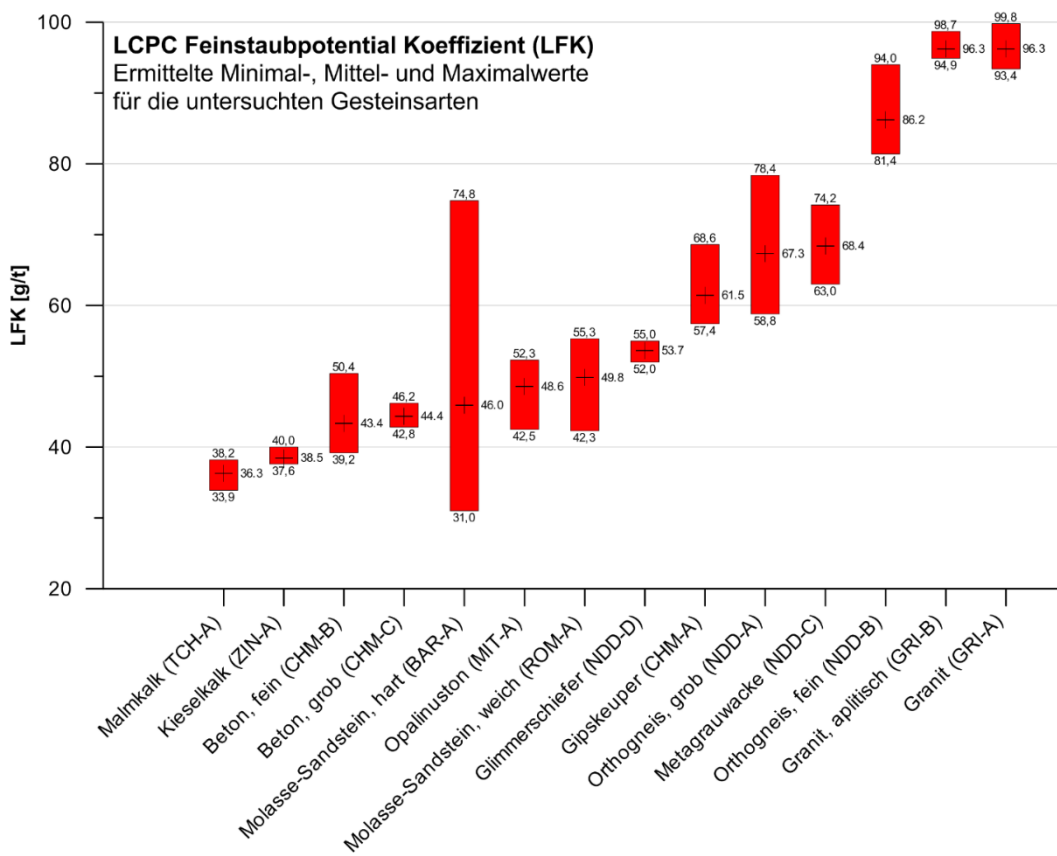


Abb. 28 Zusammenstellung der Mittel-, Minimal- und Maximalwerte des LCPC-Feinstaubkoeffizienten (LFK) für alle untersuchten Gesteinsarten.

3.9 LCPC Quarzstaubkoeffizient

Der hier erstmals eingeführte LCPC Quarzstaubkoeffizient (LQK) stellt ein zentrales Ergebnis dieser Studie dar. Er quantifiziert die Masse des Quarzfeinstaubes, die bei den Bruchvorgängen im LCPC-Versuch aus dem Gestein freigesetzt wird und sollte damit ein Element zur Beurteilung der Quarzstaubgefährdung im Untertagebau darstellen können. Die Ermittlung des LQK wurde bereits in Kap. 2.1.5 vorgestellt.

Die LQK-Werte der in dieser Studie untersuchten Gesteine liegen zwischen grob zwischen 0 und 30 g/t, wobei sich die Ergebnisse über das gesamte Spektrum verteilen. Die höchsten LQK-Werte wurden mit bis 28,0 g/t bei den Proben des aplitischen Granits beobachtet. Die niedrigsten Werte wurden vom Malmkalk mit im Mittel 0,4 g/t erreicht. Im Allgemeinen zeigen die untersuchten Kristallingesteine die höchsten LQK-Werte (> ca. 10 g/t), die Molassesandsteine und der Kieselkalk liegen im Mittelfeld ca. 5-10 g/t und die untersuchten Tonsteine und reinen Kalke liegen im niedrigsten Wertebereich (< 5 g/t).

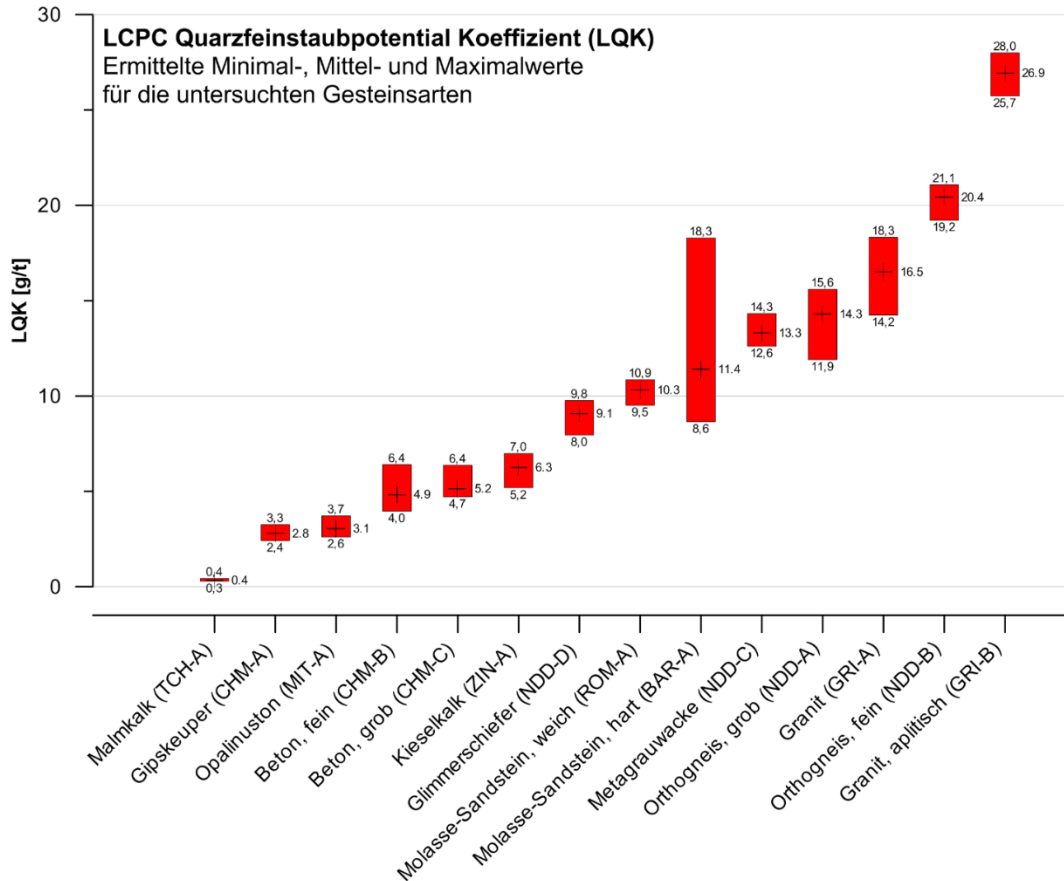


Abb. 29 Zusammenstellung der Mittel-, Minimal- und Maximalwerte des LCPC-Quarzstaubkoeffizienten (LQK) für alle untersuchten Gesteinsarten.

Die Streubreiten der Werte einzelner Gesteine liegen in der Regel unter ± 3 g/t, oft sogar deutlich darunter. Diesbezüglich stellt der feste Molasse-Sandstein aufgrund des in Kapitel 3.8 bereits diskutierten Ausreißers im LFK-Wert wieder eine Ausnahme dar. Auch wenn der beobachtete Wertebereich mit insgesamt 30 g/t relativ klein ausfällt, lässt sich das unterschiedliche Quarz-Staubungsverhalten der Gesteine gut differenzieren.

3.10 Korrelation des LQK mit anderen geotechnischen Kennwerten

In diesem Abschnitt werden die ermittelten LQK-Werten anderen geotechnischen Kennwerten gegenübergestellt. Dies geschieht zum einen direkt und zum anderen in Form von parametrisierten Geradengleichungen und Polynomfunktionen, die eine Kombination von 2 Kennwerten für die Gegenüberstellung zulässt.

Vier verschiedene geotechnische Kennwerte wurden betrachtet: LCPC Abrasivitäts Koeffizient (LAK), LCPC Brechbarkeit (LBR), einaxiale Druckfestigkeit (UCS) und Cerchar Abrasivität Index (CAI). Dabei ist nur für den LAK und den LBR jeweils ein individueller Wert für

jeden Versuch bzw. Teilprobe vorhanden (67 Wertepaare). Für den CAI liegt lediglich jeweils ein Wert pro Gesteinsart und für die einaxiale Druckfestigkeit liegen z.T. Angaben für das gesamte beprobte Schichtglied (Schwankungsbereich Min / Max / Mittelwert), z.T. den einzelnen Proben individuell zuweisbare Werte vor. Zur Vereinheitlichung der Darstellung bzw. Berechnung wird jedoch beim CAI und UCS immer der gesamte für das Gestein ermittelte Wertebereich angezeigt bzw. der jeweilige Mittelwert für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten bzw. der Parameterkombination verwendet (14 Wertepaare).

3.10.1 Direkte Abhängigkeiten

In den Abb. 30 bis 33 werden die ermittelten LQK-Werte den oben genannten geotechnischen Kennwerten direkt gegenübergestellt und jeweils der Korrelationskoeffizient ermittelt, der den Grad einer linearen Abhängigkeit zwischen den beiden Werten quantifiziert.

Die größte Korrelation konnte zwischen dem CAI und LQK mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,80 festgestellt werden (Abb. 30). Die mittlere quadratische Abweichung beträgt dabei 11,89 und liegt damit im Vergleich am niedrigsten. Dies entspricht einer mittleren Abweichung der Regressionsgeraden von den tatsächlichen Datenpunkten von 3,45 g/t LQK. Dabei zeigen die Datenpunkte für die Molasse-Sandsteine sowie der aplitische Granit die höchsten Abweichungen von der Regressionsgerade.

Eine ähnlich hohe Korrelation ergibt sich aus der Regressionsgerade zwischen dem LAK und dem LQK (Abb. 31). Der Korrelationskoeffizient beträgt hier 0,72 und die mittlere quadratische Abweichung liegt bei 14,38, was eine mittlere Abweichung der Regressionsgerade von den Datenpunkten von 3,79 g/t LQK bedeutet. Dabei zeigen auch hier die Molasse-Sandsteine sowie der aplitische Granit die höchsten Abweichungen. Insbesondere der zuvor bereits diskutierte Ausreißer-Wert BÄR-A-5 (harter Molassesandstein) differiert nahezu 15 g/t LQK von der Regressionsgerade und verschlechtert damit das Ergebnis der Korrelation.

Insgesamt sind die Ergebnisse der Korrelation zwischen LAK und LQK sehr ähnlich den Ergebnissen der Korrelation zwischen CAI und LQK. Dies ist aufgrund der guten Korrelation der Werte CAI und LAK (vgl. Thuro et al. 2006 [16]) auch zu erwarten.

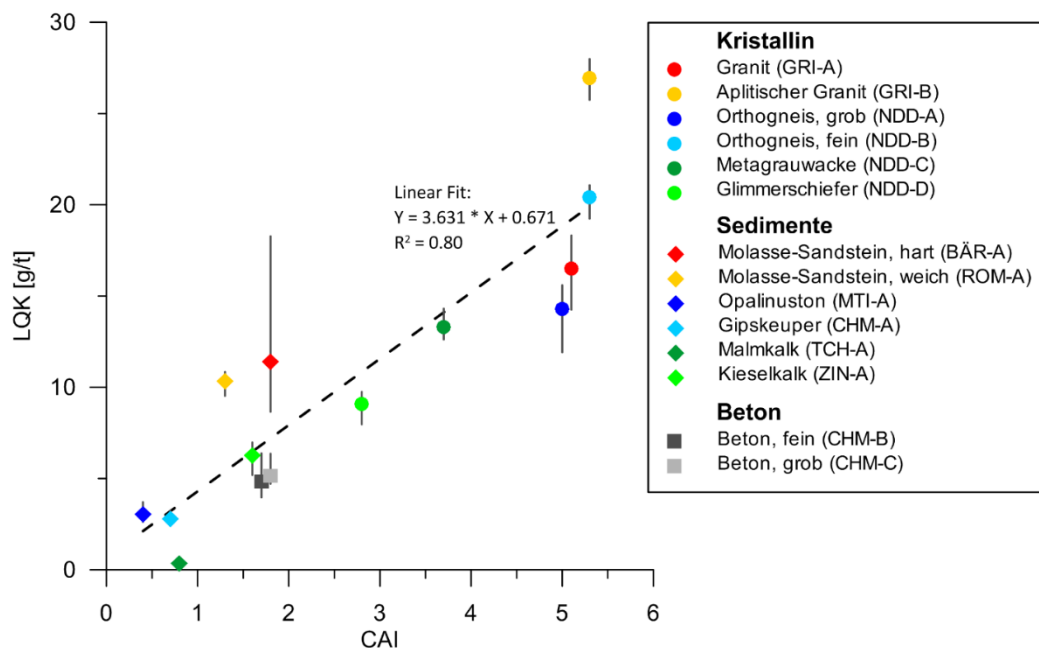


Abb. 30 Gegenüberstellung von CAI und LQK der untersuchten Gesteinsarten ($n = 14$). Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit zwischen den beiden Werten.

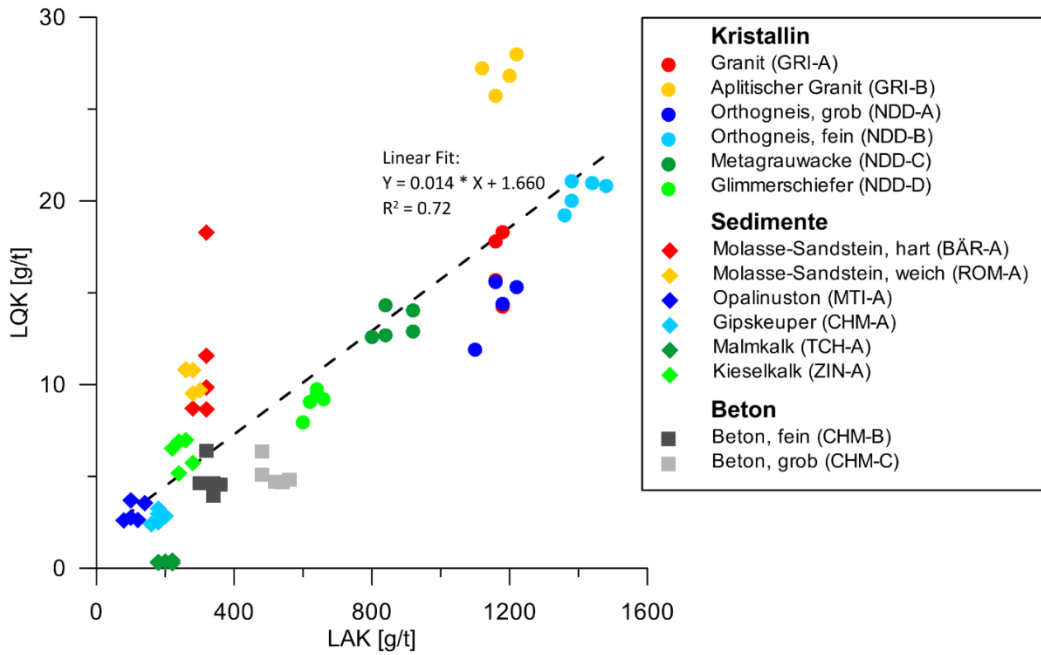


Abb. 31 Gegenüberstellung von LAK und LQK aller untersuchten Proben ($n = 67$). Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit zwischen den beiden Werten.

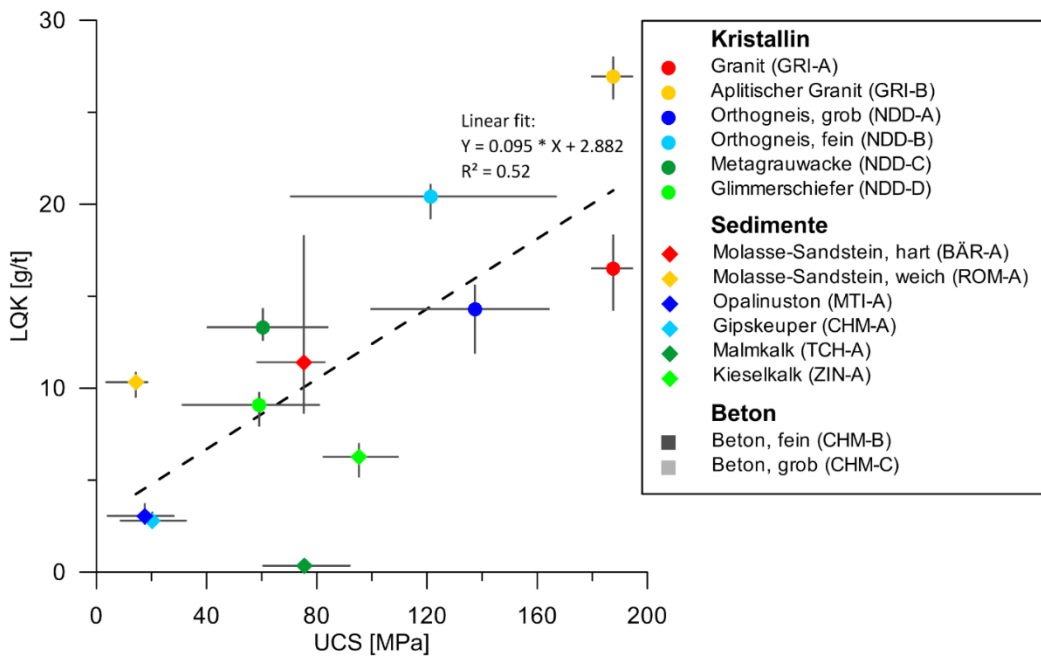


Abb. 32 Gegenüberstellung von UCS und LQK aller untersuchten Gesteinsarten ($n = 14$). Tendenziell nimmt der LQK mit zunehmender Gesteinsfestigkeit zu.

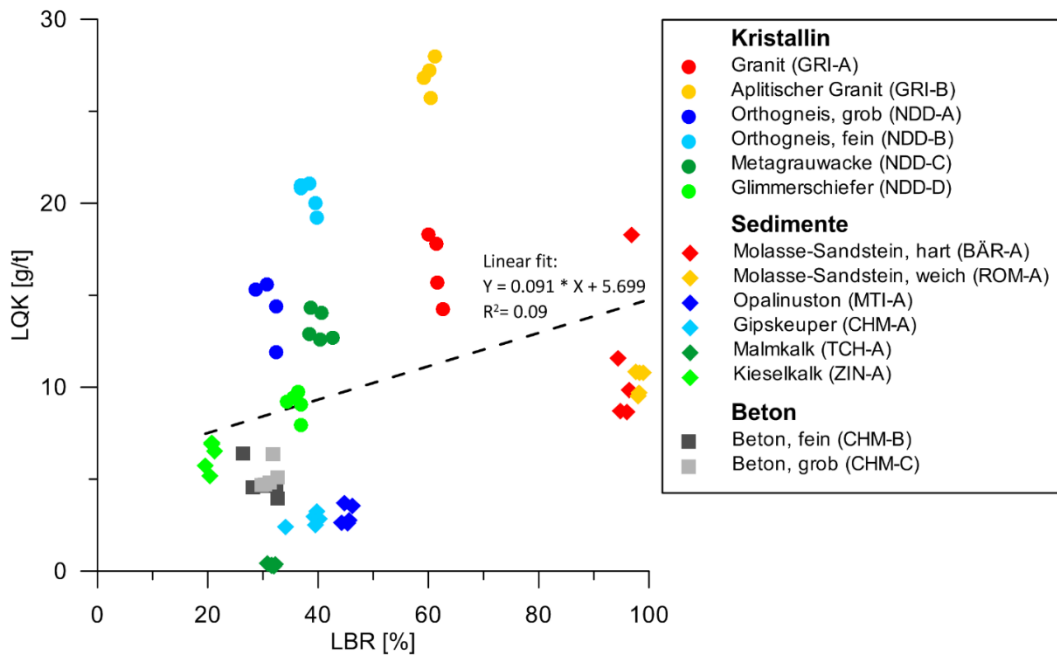


Abb. 33 Gegenüberstellung von LBR und LQK aller untersuchten Proben ($n = 67$). Eine klare lineare Abhängigkeit zwischen den Werten ist nicht erkennbar.

Bei der Beurteilung der genannten Zusammenhänge zwischen den Abrasivitätskennzahlen CAI bzw. LAK und dem LQK ist zu beachten, dass bei den hier untersuchten Gesteinen jeweils Quarz das dominierende abrasive Mineral darstellt. Die in dieser Studie gewählte Gesteinsserie umfasst nicht alle möglichen Gesteinsarten. Es fehlen z.B. mafische Kristallingesteine (z.B. Gabbro, Basalt), die vermutlich eine hohe Abrasivität (hohe LAK, CAI Werte) und Druckfestigkeit (hoher UCS) mit vergleichbar geringem Quarzstaubpotential kombinieren. Diese Gesteine würden damit die sich hier andeutende Korrelationen durchbrechen.

Auch die einaxiale Druckfestigkeit korreliert im Trend mit der dem LQK (Abb. 32). Höhere Gesteinsfestigkeiten sind in der Regel mit höheren LQK-Werten verknüpft. Es gibt aber auch Gesteine, die nicht diesem Trend folgen, wie z.B. der Malmkalk, der aufgrund seines geringen Quarzgehaltes trotz einer einaxialen Druckfestigkeit von ca. 80 MPa nur einen sehr niedrigen LQK aufweist. Der Korrelationskoeffizient liegt hier bei 0,52 und der mittlere quadratische Fehler bei 27,03.

Der LBR zeigt keine lineare Korrelation mit dem LQK (Abb. 33). Der Korrelationskoeffizient liegt dementsprechend bei 0,09 und die mittlere quadratische Abweichung bei 47,62, was einem mittleren Fehler von 6,90 g/t LQK entspricht. Dies entspricht in etwa 23 % der gesamten ermittelten Wertespanne des LQK von 0 bis 30 g/t.

3.10.2 Parameterkombinationen

Neben direkten Abhängigkeiten wurden auch einfache Kombinationen zweier Parameter in Form einer Geradengleichung untersucht (vgl. Kap. 2.4.4.b). Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tab. 8 zusammengestellt.

Tab. 8 Ergebnisse der Bestimmung des optimalen A-Wertes der Geradengleichung für verschiedene Parameterkombinationen (P1 / P2). Die günstigste Kombination (CAI/LBR) ist markiert.

		P2				
		LAK	LBR	UCS	CAI	QTZ-A
LAK	A		0,134	0,367	-0,001	0,075
	R ²	-	0,85	0,75	0,79	0,78
	RSME		2,80	3,59	3,32	3,37
LBR	A	7,464		0,909	0,026	0,074
	R ²	0,85	-	0,62	0,88	0,31
	RSME	2,80		4,46	2,50	5,98
UCS	A	2,723	1,100		0,004	0,269
	R ²	0,75	0,62	-	0,79	0,80
	RSME	3,59	4,46		3,35	3,27
CAI	A	-634,832	38,123	273,748		23,751
	R ²	0,79	0,88	0,79	-	0,82
	RSME	3,30	2,50	3,35		3,07
QTZ-A	A	13,317	13,590	3,716	0,042	
	R ²	0,78	0,31	0,80	0,82	-
	RSME	3,37	5,98	3,27	3,07	

Die günstigste Parameterkombination mit einem mittleren Fehler von 2,5 g/t LQK und einem Korrelationskoeffizient von 0,88 ist die Kombination von CAI und LBR nach folgender Gleichung:

$$\text{LBR} + 38,123 \cdot \text{CAI}$$

Die Ergebnisse dieser Geradengleichung anhand der hier ermittelten Versuchsdaten ist in Abb. 34 dargestellt.

Die Kombination aus LAK und LBR weist einen nicht relevant größeren mittleren Fehler als die Kombination aus CAI und LBR auf und besitzt gleichzeitig den Vorteil, dass diese Parameter in einem Versuch, dem LCPC Abrasivitätsversuch, ermittelt werden können. Das Ergebnis dieser Kombination mit der Geradengleichung „LBR + 0,134 · LAK“ ist in Abb. 35 dargestellt.

Der Nachteil von Parameterkombinationen, die einen Abrasivitätskennwert (CAI, LAK) enthalten, ist die oben bereits angesprochene Beschränkung auf Gesteine deren Abrasivität maßgeblich auf deren Quarzgehalt zurückzuführen ist. Auch wenn diese Beschränkung im Rahmen dieser Studie aufgrund der Probenauswahl nicht sicher belegt werden konnte, sollten die gezeigten Korrelationen nicht auf Gesteine angewandt werden, die neben Quarz andere abrasive Minerale wie z.B. Amphibole, Pyroxene oder Granat in nennenswertem Umfang enthalten.

In diesen Fällen ist es besser die Parameterkombination einaxiale Druckfestigkeit und Quarzgehalt des Ausgangsgesteins (A-QTZ) zu verwenden. Diese Kombination hat ebenfalls einen vergleichsweise geringen mittleren Fehler von 3,716 g/t LQK und sollte nicht von anderen abrasiven Mineralen beeinflusst sein. Der Zusammenhang zwischen der für diese Kombination optimalen Geradengleichung „UCS + 3,716 · A-QTZ“ und dem LQK ist in Abb. 36 dargestellt.

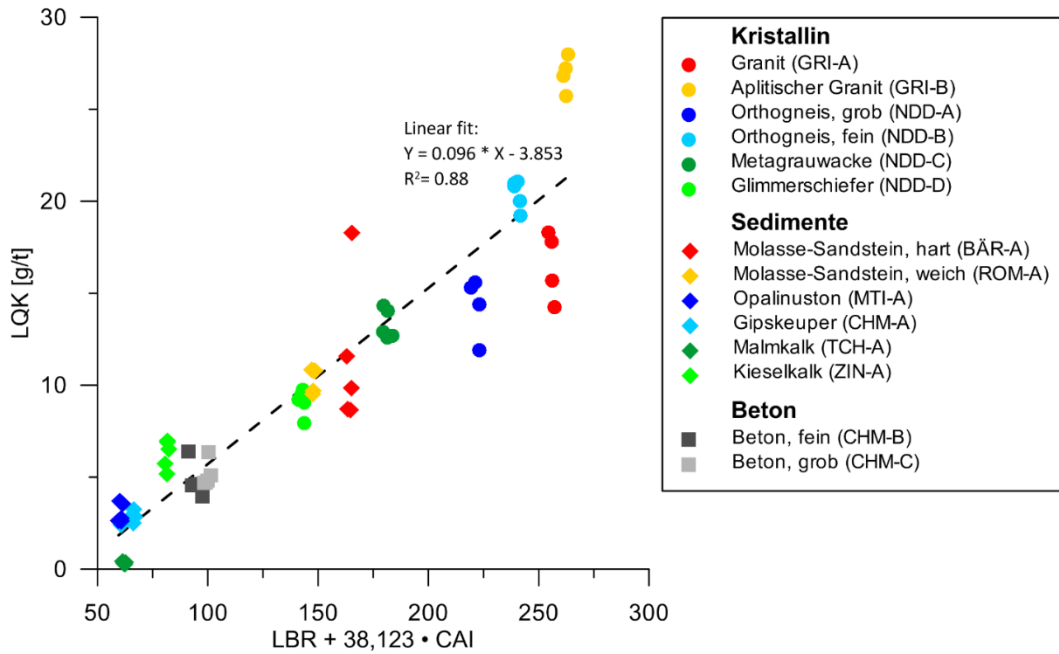


Abb. 34 Gegenüberstellung der Parameterkombination „LBR + 38,123 · CAI“ mit dem LCPC-Quarzstaubkoeffizient LQK. Diese weist den höchsten Korrelationskoeffizienten aller untersuchten Parameterkombinationen auf.

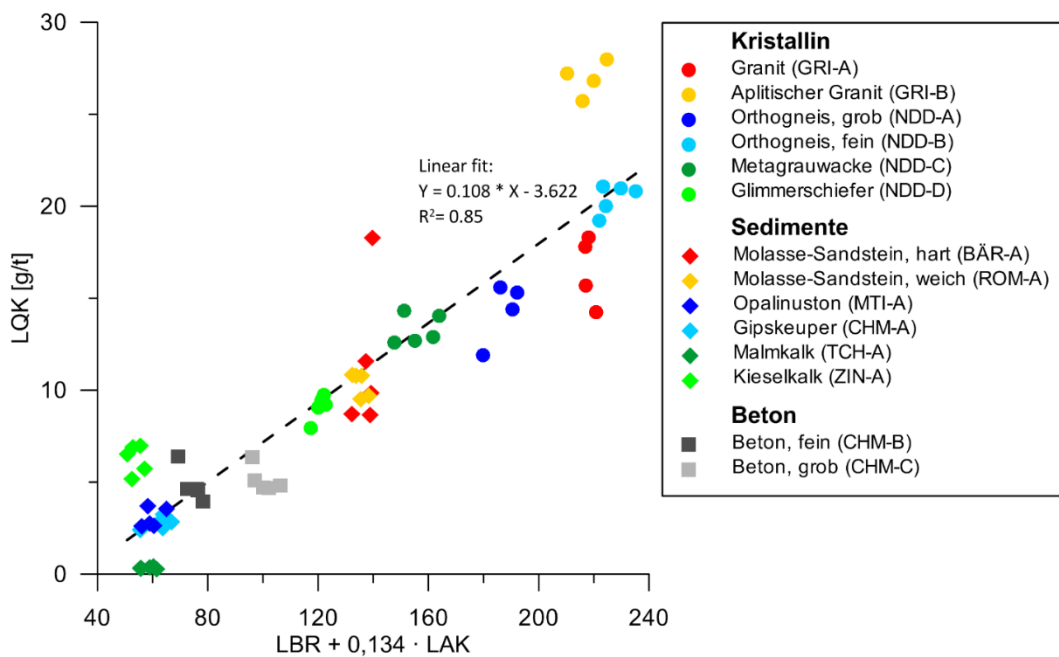


Abb. 35 Gegenüberstellung der Parameterkombination „LBR + 0,134 · LAK“ mit dem LCPC-Quarzstaubkoeffizient LQK.

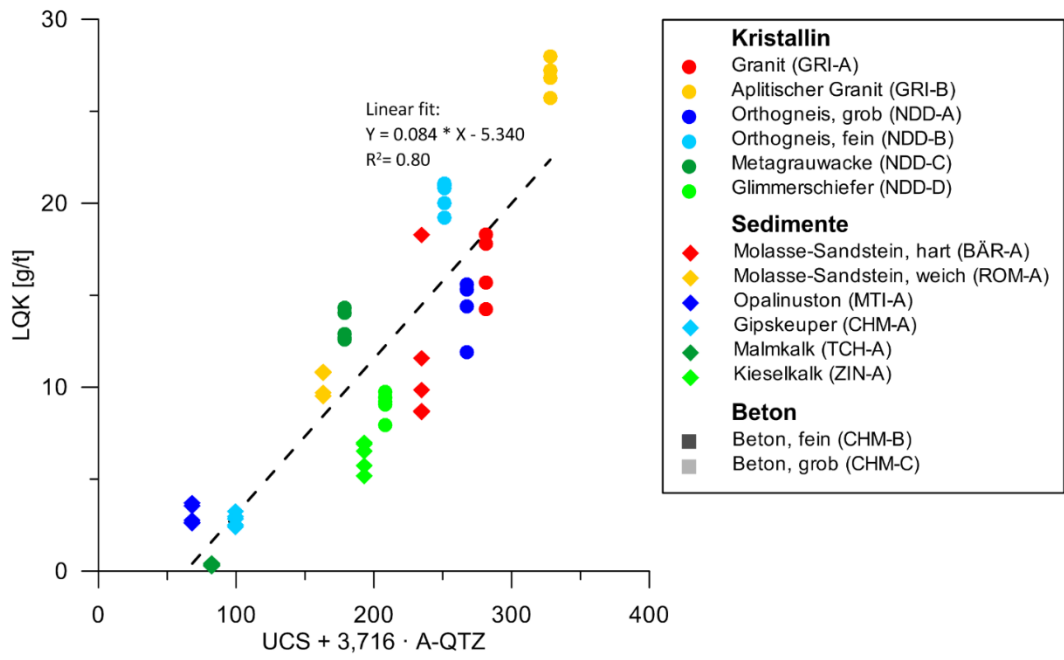


Abb. 36 Gegenüberstellung der Parameterkombination „UCS + 3,716 · A-QTZ“ mit dem LCPC-Quarzstaubkoeffizient LQK.

4 Diskussion

Anhand der vorgestellten Ergebnisse kann das Feinstaub-Emissionsverhalten während des LCPC Versuchs gut beschrieben werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse hinsichtlich der während des LCPC Versuchs ablaufenden Prozesse interpretiert und ein erstes sehr einfaches und in vielen Punkten noch hypothetisches Prozessmodell aufgestellt. Dies dient der Interpretation der erhaltenen Emissionsdaten und verbessert das Verständnis für die neu definierten Kennwerte LCPC-Feinstaubkoeffizient (LFK) und LCPC-Quarzstaubkoeffizient (LQK).

Schließlich soll auf Grundlage der hier durchgeführten Untersuchungen eine Empfehlung für die Verwendung der Kennwerte im SIA Merkblatt 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“ zur Beurteilung des Quarzstaubpotentials im Tunnelbau gegeben werden.

4.1 LCPC Prozessmodell

Die beobachteten Emissionsmuster werden durch die hochenergetischen Schläge des LCPC-Metallflügels auf die Gesteinsfragmente und die dadurch ausgelösten Stoß-, Abplatzungs- und Bruchvorgänge innerhalb des Probenmaterials erzeugt. Dabei finden im Laufe des Versuchs einige grundlegende Prozesse statt, die je nach Materialzusammensetzung unterschiedlich stark zum Tragen kommen. Im folgenden wird zunächst ein einfaches allgemeines Prozessmodell vorgestellt, bevor auf das materialabhängige Verhalten näher eingegangen wird.

4.1.1 Grundlegende Prozesse

Der LCPC Versuch ist so dimensioniert, dass zu Beginn des Versuchs der Metallflügel allseitig von gebrochenem Probenmaterial mit der Körnung 4 bis 6,3 mm umgeben ist. Mit der Aktivierung des Motors wird der Metallflügel binnen weniger Sekunden auf 4500 U/min beschleunigt. In dieser Anfangsphase des LCPC Versuchs wird das Probenmaterial durch Kollisionen mit dem Flügel stark beschleunigt und ein sich schnell rotierendes Luft – Feststoff – Gemisch im LCPC-Topf erzeugt. Innerhalb dieses Gemisches kommt es zu Kollisionen der Partikel mit dem Metallflügel, der Außenwand und der Partikel untereinander. Durch diese Stöße kommt es zu Bruchprozessen in den Probekörnern, die maßgeblich zu den gemessenen Feinstaubemissionen führen dürften.

Während der initialen Beschleunigung des grobkörnigen Probenmaterials in den ersten Sekunden des Versuchs werden vergleichbar viele hochenergetische Schläge auftreten. Mit zunehmender Rotationsbewegung des Luft – Feststoff – Gemisches verringert sich der Geschwindigkeitsunterschied zu dem Metallflügel und die Schlagenergie nimmt tendenziell etwas ab. Gleichzeitig führt die zu Beginn des Versuchs vorliegende unregelmäßige Geometrie der Probekörner (gebrochene Körner) zu Schlagvorgängen an Kanten und Spitzen im Probenmaterial und damit zu geometriebedingt hohen Spannungen innerhalb des Probenmaterials bei den Schlägen. Insgesamt treten so gerade in den ersten Sekunden des LCPC Versuchs hohe Bruchenergien auf.

Mit fortlaufendem Versuch werden die Körner durch die fortlaufend auftretenden Brüche und Abplatzungen mehr und mehr gerundet und gleichzeitig nimmt der Anteil an Feinkorn (abgesprengte Bruchstücke) in dem Luft – Feststoff – Gemisch zu. Die Veränderung der Korngeometrie führt zu einer Abnahme der bei Kollisionen auftretenden Spannungen in den Körnern und die allgemeine Verringerung der Korngrößen führt zu einer Reduzierung des Impulses und damit der bei einer Kollision verfügbaren Schlagenergie. Insgesamt nimmt die für Brüche zur Verfügung stehende Energie damit im Laufe des LCPC-Versuchs ab. Wenn ein hoher Feinkornanteil erreicht wird, kann dieser zusätzlich dämpfend wirken, da dieser direkte Kollisionen größerer Körner verhindert. Das Feinkorn kann jedoch auch

soweit zerkleinert werden, dass dieses selbst mehr und mehr als Feinstaub freigesetzt wird.

Je nach Gesteinsgefüge und -zusammensetzung wirken sich diese Effekte der Zerkleinerung unterschiedlich schnell und stark aus, so dass es zu den beobachteten materialabhängigen Unterschieden in den Feinstaubemissionen kommt.

4.1.2 Materialabhängiges Verhalten

In den vorangegangenen Kapiteln konnten zum Teil klare Unterschiede im Feinstaub-Emissionsverhalten der hier untersuchten Gesteine beobachtet werden. Diese sollen in diesem Kapitel kurz zusammengefasst und diskutiert werden.

a, Kristallingesteine

Die Kristallingesteine zeigen häufig in den ersten Sekunden des LCPC Versuchs hohe A-Staub Partikelemissionen. Dies ist vermutlich auf die initialen hochenergetischen Bruchvorgänge in dem groben unregelmäßig geformten Material zurück zu führen. Dabei kommt es vor allem an den Kanten zu Bruchvorgängen, die aufgrund der Zusammensetzung und der hohen Gefügefestigkeit der Kristallingesteine häufig auch durch einzelne feste, spröde Mineralkörner (insb. Quarz, Feldspat) verlaufen. Dabei werden die beobachteten großen Mengen A-Staub am Anfang des Versuches freigesetzt. Es ist zu vermuten, dass in dieser Phase vergleichbar hohe Quarzfeinstaubmengen entstehen.

Mit zunehmender Versuchsdauer werden die Gesteinsfragmente abgerundet und der Feinkorn-Anteil im Topf nimmt ständig zu. Beides dürfte eine dämpfende Wirkung besitzen und die Anzahl der Bruchvorgänge dadurch verringert werden. Im Feinkorn, das zunehmend aus mehr oder weniger monomineralischen Komponenten bestehen dürfte, werden nun verstärkt die schwächeren Minerale (insb. Glimmer) weiter zerkleinert, wodurch es zur beobachteten Fraktionierung (Anreicherung der Glimmer im Feinstaub) kommt. Während zunächst dadurch insgesamt die Feinstaubemissionen zunehmen, kehrt sich dieser Trend vmtl. aufgrund der bereits genannten Dämpfungseffekte durch die zunehmende Abrundung der Komponenten und der Abnahme der mittleren Korngröße um, so dass es zu der beobachteten langsamen Abnahme der Partikelemissionen kommt.

b, klastische Sedimente

Bei den klastischen Sedimenten verlaufen die Brüche in der Anfangsphase des Versuchs anders als bei den Kristallingesteinen vermutlich größtenteils nicht durch einzelne Mineralkörner sondern entlang deren Korngrenzen (geringere Festigkeit des Bindemittels, weniger „verzahntes“ Gefüge), so dass der initiale Ausstoss von A-Staub nicht oder nur in sehr geringem Umfang entsteht. Durch die geringere Gefügefestigkeit zerfällt das Material sehr schnell in kleine Komponenten und wiederum werden selektiv die enthaltenen Tonminerale und Glimmer stärker zerkleinert und verstärkt als Feinstaub freigesetzt, was im Versuchszeitraum zu den steigenden und gleichzeitig immer feiner werdenden Feinstaubkonzentrationen führt. Der bei den festen Sandsteinen z.T. auftretende initiale Ausstoss von A-Staub kann durch Brüche durch das vermutlich z.T. kieselige Bindemittel des Sandsteins erklärt werden.

c, Kalke

Die Kalke besitzen eine vergleichsweise hohe Gefügefestigkeit, weshalb das Material - ähnlich wie beim Kristallin - nicht schnell zerfällt, sondern nach und nach abgerundet und langsam zerkleinert wird. Dies führt zunächst zu einer steigenden Feinstaubemission, wobei wiederum bevorzugt die ggf. enthaltenen Ton- und Glimmerminerale freigesetzt werden. Durch den zunehmenden Feinanteil und Rundungsgrad der Komponenten wird der Trend jedoch umgekehrt und mit zunehmender Versuchsdauer nimmt die Feinstaubemission schließlich z.T. deutlich ab.

4.2 Empfehlungen für eine Richtlinie zur Beurteilung der Quarzstaubgefährdung im Tunnelbau

Das Quarzstaubpotential als Gesteinskennwert ist ein wichtiges Element zur Beurteilung der Quarzstaubgefährdung im Tunnelbau. Der hier eingeführte modifizierte LCPC Versuch erlaubt erstmals eine objektive Quantifizierung des Quarzstaubpotentials in einem Laborversuch. Momentan existieren allerdings noch keine Erfahrungswerte oder systematischen Untersuchungen, die eine relevante Verbindung zwischen dem LQK und den im Tunnelbau tatsächlich auftretenden Quarzstaubmengen belegen. Dies wird erst möglich sein, wenn die Methodik in der Praxis wiederholt zum Einsatz gekommen ist.

Dennoch lassen sich auf Grundlage der Versuchsergebnisse bereits einige Empfehlungen zur Verwendung des LQK in der Praxis geben – insbesondere für die Verwendung in dem geplanten SIA Merkblatt 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“ zur Beurteilung der Quarzstaubgefährdung im Tunnelbau.

4.2.1 Anwendung des LCPC-Quarzstaubkoeffizienten

Im Tunnelbau kann eine Vielzahl verschiedener Prozesse zur Entstehung von Quarzstaub führen. Beispiele hierfür sind Löseprozesse wie z.B. Sprengen, Fräsen oder Bohren und Transportprozesse wie z.B. das Beladen, Transportieren (z.B. im Muldenkipper oder Förderband) und Entladen des gelösten Materials. Schon deshalb kann kein Laborversuch die Prozesse, die zur Quarzstaubbildung im Tunnelbau führen, umfassend abbilden. Der hier vorgestellte modifizierte LCPC Versuch erzeugt - insbesondere am Anfang des Versuchs - hochenergetische Bruchprozesse (vgl. Kap. 4.1.1), die am ehesten mit denjenigen zu vergleichen sind, die beim Lösen des Gesteins auftreten. Trotzdem können die im Versuch ermittelten Staubemissionen (LQK-Werte) aufgrund des im Vergleich zur Anwendung unterschiedlichen Mechanismus auf keinen Fall zur quantitativen Ermittlung der im Tunnelvortrieb freiwerdenden Staubmengen verwendet werden.

Der LQK-Wert kann jedoch als Anzeiger (Index) für das Quarzstaubpotential des untersuchten Gesteins herangezogen werden, der durch den Vergleich mit Erfahrungswerten (z.B. den Ergebnissen dieser Studie) eine grobe Abschätzung des Staubungsverhaltens zulässt (vgl. Klassifikation in Kap. 4.2.3). Eine solche vergleichbar einfache Beschreibung des Quarzstaubpotentials kann insbesondere in der Planungsphase des Tunnels von großem Nutzen sein, um das Quarzstaub-Risiko besser abzuschätzen und ggf. entsprechende Gegenmaßnahmen frühzeitig in die Planung mit einbeziehen zu können.

Um von dem Quarzstaubpotential eines Gesteins auf die Quarzstaubgefährdung zu schließen, müssen weitere Faktoren wie der Durchtrennungsgrad des Gebirges und die Wasserführung des Gebirges und deren Einfluss auf den jeweilig zu beurteilenden Arbeitsprozess berücksichtigt werden.

4.2.2 Bestimmung des Quarzstaubpotentials anhand üblicher geotechnischer Parameter

Häufig werden gerade in der Frühphase der Planung von Tunnelbauprojekten noch keine systematischen Untersuchungsergebnisse bezüglich des Quarzstaubpotentials vorliegen, so dass in dieser Studie versucht wurde, einen Zusammenhang zwischen weit verbreiteten geotechnischen Parametern und dem LCPC-Quarzstaubkoeffizient (LQK) herzustellen (vgl. Kap. 3.10). Diese Korrelationen können dazu verwendet werden, einen LQK Wert aus anderen geotechnischen Parametern abzuleiten. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Korrelationen bislang auf einen relativ kleinen Datensatz basieren und sich durch die Ergänzung weiterer Untersuchungsergebnisse in Zukunft noch verändern können.

Die beste Korrelation zum LQK mit einem mittleren Fehler von 2,5 g/t lässt sich nach den bisherigen Ergebnissen mit der Parameterkombination aus CAI und LBR ($LQK = LBR +$

38,123 · CAI) bzw. nahezu gleichwertig aus LQK und LBR ($LBR + 0,134 \cdot LAK$) herstellen. Diese haben jedoch den klaren Nachteil, dass insbesondere die LCPC Brechbarkeit (LBR) nicht sehr weit verbreitet ist und häufig nicht bekannt sein dürfte.

Als gut anwendbare Alternative mit nur geringfügig größerem Fehler (ca. 1 g/t LQK) bietet sich der CAI an, der auf Grundlage der hier durchgeführten Untersuchungen folgende Korrelation zum LQK aufweist (vgl. Kap. 3.10.2):

$$LQK = 3,631 \cdot CAI + 0,671$$

Dabei muss beachtet werden, dass diese Korrelation nur anwendbar ist, wenn Quarz das dominierend abrasive Mineral des Gesteins darstellt. Ist diese Grundbedingung erfüllt, kann der CAI für eine erste Abschätzung des Quarzstaubpotentials herangezogen werden.

Eine weitere Alternative stellt die Parameterkombination aus einaxialer Druckfestigkeit und dem Quarzgehalt des Ausgangsgesteins dar. Diese korreliert in etwa gleich gut wie der CAI mit dem LQK und ist nach bisheriger Erkenntnis unabhängig vom Mineralbestand, dh. kann auf alle Gesteine angewandt werden. Nachteilig ist ggf. die schlechte Verfügbarkeit des Quarzgehalts des Ausgangsgesteins.

Welche der genannten Korrelationen verwendet wird, kann anhand der Verfügbarkeit der notwendigen Daten entschieden werden. Auf jeden Fall sollte diese lediglich für eine erste Abschätzung des LQK bzw. des Quarzstaubpotentials verwendet werden. Sollte so ein relevantes Quarzstaubpotential angezeigt werden, sollte eine nähere Untersuchung der Quarzstaubgefährdung – z.B. durch die Bestimmung des LQK im modifizierten LCPC Versuch und weiterer relevanter Faktoren (siehe Kap. 4.2.1) – erfolgen.

4.2.3 Klassifizierung des Quarzstaubpotentials

Eine praxisrelevante Einteilung des Quarzstaubpotentials in Gefährdungsstufen (z.B. geringe/mittlere/hohe Quarzstaubgefährdung) anhand des LQK (oder damit korrelierenden geotechnischen Parametern) ist nur anhand von Daten aus realen Fallbeispielen im Untertagebau möglich. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit, die auf Laboruntersuchungen basiert, ist dementsprechend der Ansatz einer solchen Klassifizierung nicht möglich. Die Verbindung der hier erarbeiteten Grundlagen mit der Praxis erfolgt im Rahmen der Erarbeitung des SIA Merkblattes 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“.

Dabei werden die Grenzwerte für die Abtrennung der einzelnen Gefährdungsstufen unter Berücksichtigung der Schadstoffmessungen der Suva auf Untertagebaustellen zwischen 2004 und 2013 folgendermassen festgelegt werden:

- a. Auswahl aller Ereignisse mit Messungen mit Überschreitung des MAK-Wertes.
- b. Eruiierung der getroffenen Massnahmen zur künftigen Einhaltung des MAK-Wertes.
- c. Zuordnung dieser Massnahmen zu den Gefährdungsstufen in der Risikobeurteilung der Branchenlösung BHG.
- d. Zuordnung des vorliegenden Gesteinstyps zu den mit dem LQK korrelierenden geotechnischen Parametern (insb. CAI).
- e. Analyse der Verteilung der geotechnischen Parameter je Gefährdungsstufe nach Branchenlösung.

Die mit dieser Methodik festgelegten Grenzwerte der Gefährdungsstufen sollten in Zukunft mit zunehmender Praxiserfahrung und einer größeren Datenbasis wiederholt überprüft und ggf. angepasst werden.

Im Rahmen dieser Studie – ohne die Verknüpfung mit der Praxis – kann lediglich eine rein deskriptive Klassifizierung des Quarzstaubpotentials anhand der hier ermittelten Spannweite möglicher Werte für den LCPC-Quarzstaubkoeffizienten von 0 g/t bis ca. 30 g/t erfolgen. Dieser Wertebereich kann anhand lithologischer Merkmale grob in drei Klassen (Abb. 37) geteilt werden: niedriges, mittleres und hohes Quarzstaubpotential.

Die Klasse mit niedrigem Quarzstaubpotential (0 bis 4 g/t LQK) beinhaltet demnach den sehr quarzarmen Malmkalk und die tonreichen Gesteine des Gipskeupers und Opalinustons. In der mittleren Klasse (4 bis 12 g/t LQK) kommen die untersuchten Betone, der Kieselkalk, der Glimmerschiefer, der weiche Molasse-Sandstein sowie einige Proben des harten Molasse-Sandsteins zu liegen. Die Klasse mit hohem Quarzstaubpotential (> 12 g/t) umfasst alle festen Kristallingesteine (Grauwacke, Gneise, Granite), sowie einige Proben des harten Molassesandsteins.

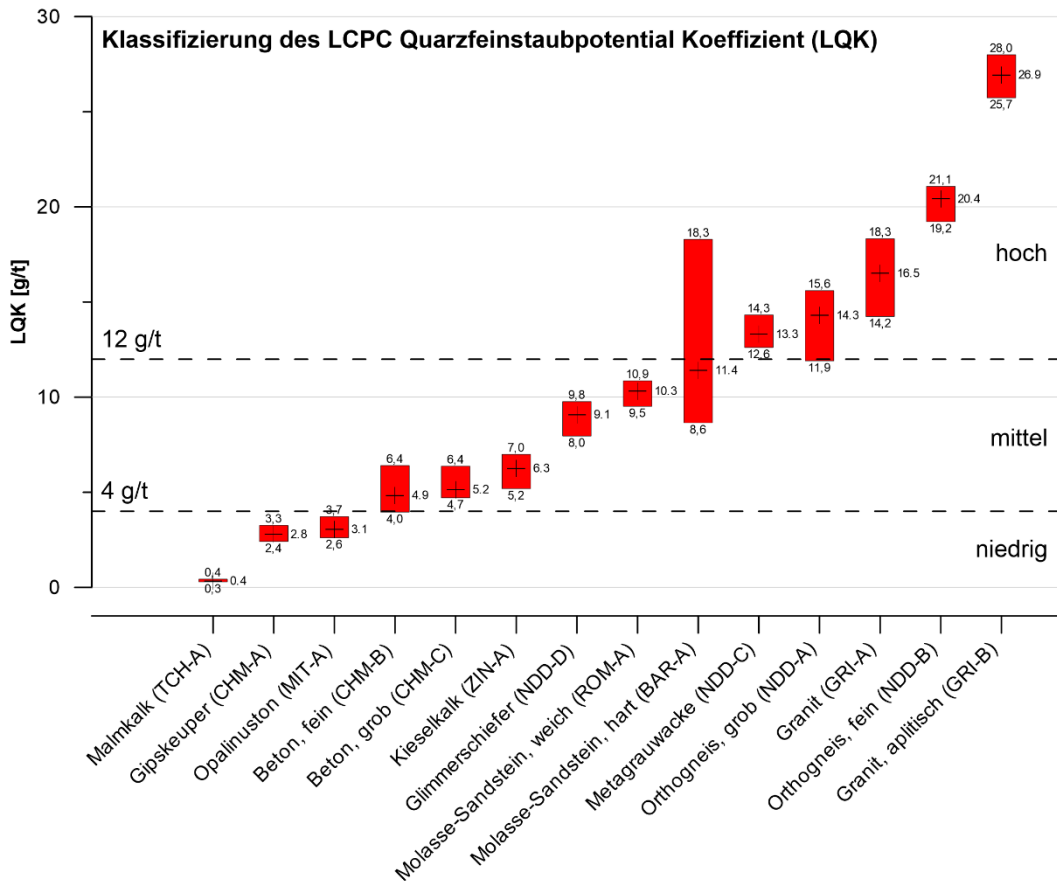


Abb. 37 Klassifikation des LCPC-Quarzstaubkoeffizienten (LQK) in drei Klassen (niedrig, mittel, hoch). Diese Klassifikation basiert allein auf den hier durchgeführten Laboruntersuchungen und ist rein deskriptiver Natur.

Die hier vorgestellte Klassifizierung der LQK-Werte dient lediglich einer deskriptiven Einteilung des LCPC-Quarzstaubkoeffizienten. Eine direkte Ableitung von Gefährdungsstufen ist ohne Praxisbezug nicht möglich.

5 Ausblick

Durch die bereits geplante Erstellung des SIA Merkblattes 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“ (vgl. Kap. 4.2) ist eine sehr schnelle Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis gegeben. Mit den Ergebnissen dieser Studie kann ein einfach einzusetzendes Planungsinstrument für die frühzeitige Erkennung der Quarzstaubgefährdung entwickelt werden, welches aufgrund seiner Einfachheit (Verwendung bereits vorhandener geotechnischer Kennwerte) in Zukunft weit verbreitet zum Einsatz kommen kann.

Mittelfristig ist die Erstellung eines „Atlas der Quarzstaubgefährdung“ für die Schweiz geplant, in dem die in der Schweiz vorkommenden Hauptgesteinsarten systematisch mit der in diesem Projekt entwickelten Methodik hinsichtlich ihres Quarzstaubpotentials untersucht werden. Dieser „Atlas“ kann als Referenz für eine frühzeitige Abschätzung der Quarzstaubgefährdung bei der Planung von entsprechenden untertägigen Bau-massnahmen dienen.

Durch die frühzeitige Erkennung einer potentiellen Quarzstaubgefährdung können die entsprechenden Bauprozesse angepasst und ggf. Gegenmassnahmen vorgesehen werden. Dies dient nicht nur einer zuverlässigeren Kostenplanung, sondern insbesondere auch dem Schutz der an der Baustelle tätigen Menschen, da so eine Einhaltung der maximalen Arbeitsplatzkonzentration von Quarzstaub besser gewährleistet werden kann.

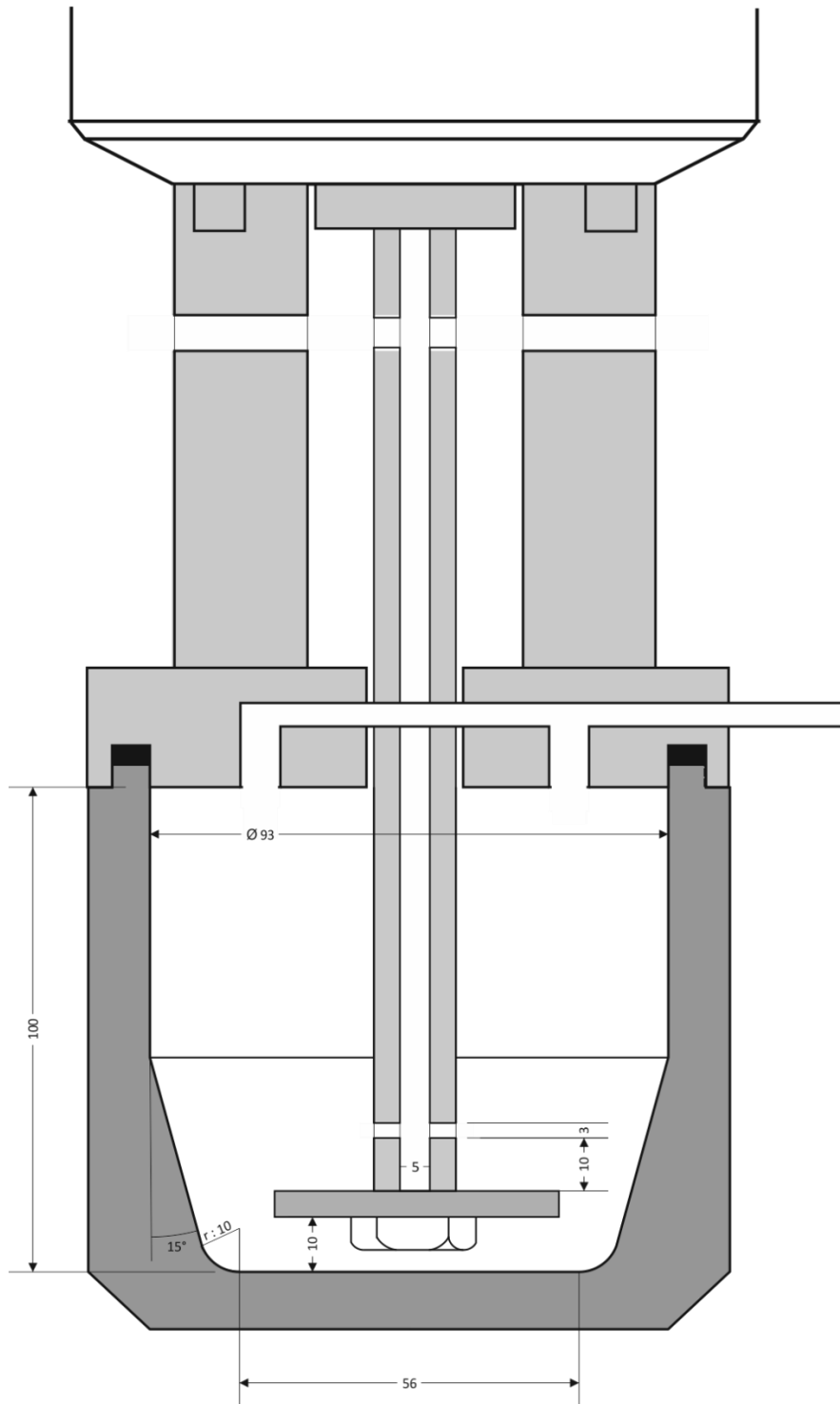
Die Mitglieder der Fachgruppe für Untertagebau werden im Nachgang zu diesem Projekt die in diesem Projekt erarbeiteten Grundlagen wiederholt in der Praxis anwenden und die Ergebnisse kritisch überprüfen. Es ist möglich, dass die in diesem Projekt erarbeiteten Gefährdungs-Klassen in Zukunft weiter differenziert (z.B. für verschiedenen Löse-mechanismen) und ggf. mit einer wachsenden Anzahl von Versuchsreihen weiter konkretisiert werden.

Anhänge

I	Bemaßte Skizze des Versuchsaufbaus des Modifizierten LCPC Versuchs	71
II	Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Modifizierten LCPC Versuche	73
III	Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der röntgendiffrakto- metrischen Untersuchung der A-Staub- und Gesteinsproben.....	75
IV	CD-Beilage: Ergebnisse der kontinuierlichen Korngrößenanalysen des Fein- staubes während des Modifizierten LCPC Versuchs	77

I Bemaßte Skizze des Versuchsaufbaus des Modifizierten LCPC Versuchs

Alle Maße in mm



II Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der Modifizierten LCPC Versuche

Gestein; Herkunft	Proben Nr.	LCPC Versuch		A-Staub-Messungen			Weitere geotechnische Parameter								
		LAK	LBr	LFK	LQK	K-Verlauf*	Quarzgehalt	UCS			CAI				
		[g/t]	[%]	[g/t]	[g/t]	[]	[%]	min. [MPa]	MW. [MPa]	max. [MPa]	[]				
Rorschacher Sandstein; Steinbr. Bärflöcher	BÄR-A-1	320	96,0	31,0	8,6	0,86	27,9	58,3	75,3	82,9	1,8				
	BÄR-A-2	320	94,4	42,6	11,6	0,67	27,2								
	BÄR-A-4	320	96,4	42,2	9,9	0,79	23,4								
	BÄR-A-5	320	96,8	74,8	18,3	0,75	24,5								
	BÄR-A-6	280	94,8	39,2	8,7	0,81	22,2								
	CHM-A-1	180	39,3	57,8	3,0	0,76	5,2								
Gipskeuper; Chiemberg-tunnel	CHM-A-2	180	39,8	68,6	3,3	-	4,8	8,7	20,3	32,6	0,7				
	CHM-A-3	160	34,1	62,8	2,4	0,82	3,9								
	CHM-A-4	200	40,2	57,4	2,8	0,79	5,0								
	CHM-A-5	180	39,5	60,8	2,5	0,92	4,2								
	CHM-B-1	320	26,4	50,4	6,4	0,92	12,7								
	CHM-B-2	340	32,7	39,2	4,0	1,18	10,1								
Beton (fein); Chiemberg-tunnel	CHM-B-3	300	32,4	41,2	4,7	0,91	11,3	-	-	-	1,7				
	CHM-B-4	360	28,2	45,8	4,6	1,00	10,0								
	CHM-B-5	340	30,4	40,3	4,7	-	11,6								
	CHM-C-1	520	30,4	46,2	4,7	1,28	10,3								
	CHM-C-2	480	32,7	44,0	5,1	0,82	11,6								
	CHM-C-3	480	31,8	43,8	6,4	0,88	14,6								
Beton (grob); Chiemberg-tunnel	CHM-C-4	560	31,3	45,2	4,8	0,94	10,7	-	-	-	1,8				
	CHM-C-5	540	29,8	42,8	4,7	1,08	11,0								
	GRI-A-1	1180	62,7	94,0	14,2	1,13	15,2					179,8	187,6	194,6	5,1
	GRI-A-2	1160	61,6	93,4	15,7	1,09	16,8								
	GRI-A-3	1180	60,0	98,0	18,3	1,11	18,7								
	GRI-A-4	1160	61,4	99,8	17,8	-	17,9								
GRI-B-1	1200	59,2	95,3	26,8	1,15	28,2									
GRI-B-2	1160	60,4	96,2	25,7	1,20	26,8									
Aplittischer Granit; Grimsel	GRI-B-3	1220	61,2	94,9	28,0	1,16	29,5	179,8	187,6	194,6	5,3				
	GRI-B-4	1120	60,2	98,7	27,2	1,13	27,6								
	MTI-A-1	100	45,6	49,4	2,8	0,62	5,6					4,0	17,6	28,1	0,4
	MTI-A-2	120	44,3	52,3	2,6	0,74	5,1								
	MTI-A-3	100	44,8	51,3	3,7	0,74	7,3								
	MTI-A-4	140	46,2	47,4	3,6	0,85	7,5								
MTI-A-5	80	45,4	42,5	2,6	0,66	6,2									
Orthogneis (grob); Nant de Drance	NDD-A-1	1100	32,4	58,8	11,9	1,31	20,3	99,7	137,4	164,3	5				
	NDD-A-2	1180	32,4	65,0	14,4	1,10	22,2								
	NDD-A-3	1160	30,7	78,4	15,6	-	19,9								
	NDD-A-4	1220	28,7	67,2	15,3	0,91	22,8								
	NDD-B-1	1380	38,4	86,4	21,1	1,07	24,4								
	NDD-B-2	1360	39,8	81,8	19,2	1,30	23,5								
Orthogneis (fein); Nant de Drance	NDD-B-3	1380	39,5	81,4	20,0	1,24	24,6	70,5	121,3	166,9	5,3				
	NDD-B-4	1480	36,9	94,0	20,8	1,06	22,2								
	NDD-B-5	1440	36,9	87,6	21,0	1,06	24,0								
	NDD-C-1	840	42,6	63,0	12,7	1,05	20,2								
	NDD-C-2	800	40,4	65,0	12,6	1,08	19,4								
	NDD-C-3	920	40,6	68,2	14,0	1,06	20,6								
Metagrauwacke; Nant de Drance	NDD-C-4	840	38,6	71,8	14,3	1,08	20,0	40,3	60,4	84	3,7				
	NDD-C-5	920	38,4	74,2	12,9	1,23	17,4								
	NDD-D-1	620	36,9	55,0	9,1	1,10	16,5								
	NDD-D-2	640	35,5	53,2	9,4	1,09	17,8								
	NDD-D-3	660	34,4	54,1	9,2	-	17,1								
	NDD-D-4	600	36,9	52,0	8,0	1,12	15,3								
Glimmerschiefer; Nant de Drance	NDD-D-5	640	36,4	54,1	9,8	-	18,1	31,2	59,1	80,9	2,8				
	ROM-A-1	280	98,0	42,3	9,5	0,75	22,5								
	ROM-A-2	260	97,6	50,5	10,9	0,68	21,5								
	ROM-A-3	300	98,2	48,5	9,7	0,71	20,0								
	ROM-A-4	280	98,3	52,6	10,8	0,73	20,5								
	ROM-A-5	260	99,0	55,3	10,8	0,74	19,5								
Malmkalk; Tunnel de Choindez	TCH-A-1	200	32,2	35,5	0,4	1,13	1,1	60,5	75,5	92	0,8				
	TCH-A-2	220	30,8	37,8	0,4	1,07	1,2								
	TCH-A-3	180	31,6	33,9	0,4	1,08	1,1								
	TCH-A-4	220	32,0	38,2	0,3	1,11	0,8								
	TCH-A-5	180	31,6	36,2	0,3	1,10	0,9								
	ZIN-A-1	260	20,7	40,0	7,0	1,28	17,5					82,4	95,3	109,5	1,6
ZIN-A-2	220	21,2	39,4	6,5	1,18	16,6									
ZIN-A-3	240	20,7	37,6	6,9	1,10	18,4									
ZIN-A-4	280	19,6	38,0	5,7	-	15,1									
ZIN-A-5	240	20,4	37,6	5,2	1,21	13,8									

* Verlauf der Staubkonzentration während des Versuchs, ausgedrückt als Verhältnis der mittleren Staubkonzentration während der ersten Versuchsminute und der letzten (fünften) Versuchsminute.

III Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse der röntgendiffraktometrischen Untersuchung der A-Staub- und Gesteinsproben

Gestein; Herkunft	Proben Nr.	Quarzgehalt		Weitere Mineralgehalte in Massen %												
		AV	Rietveld	bestimmt im Rietveld-Verfahren, sortiert in aufsteigender Ordnung (Ausgangsgestein)												
		%	%	Min. 1	%	Min. 2	%	Min. 3	%	Min. 4	%	Min. 5	%	Min. 6	%	Weitere
Rorschacher Sandstein; Steinbr. Bärlöcher	BÄR-A-0	-	42,9	Cal	19,4	Pl	14,2	Dol	7,5	Mic	6,2	Mus	5,9	Chl	3,8	
	BÄR-A-1		27,9	Cal	27,8	Pl	17,4	Dol	4,6	Mic	5,2	Mus	15,6	Chl	1,5	
	BÄR-A-2		27,2	Cal	28,2	Pl	18,1	Dol	4,2	Mic	5,1	Mus	15,7	Chl	1,6	
	BÄR-A-4	25,4	23,4	Cal	25,4	Pl	16,3	Dol	3,8	Mic	4,7	Mus	16,2	Chl	10,2	
	BÄR-A-5		24,5	Cal	12,7	Pl	10,4	Dol	2,3	Mic	4,5	Mus	7,3	Chl	38,3	
	BÄR-A-6		22,2	Cal	24,3	Pl	17,8	Dol	3,3	Mic	4,9	Mus	18,3	Chl	9,2	
Gipskeuper; Chiemburg-tunnel	CHM-A-0	-	21,3	Gyp	30,4	Anh	22,3	Mag	9,2	Bas	7,7	Smc	5,2	Ill	3,9	
	CHM-A-1		5,2	Gyp	38,6	Anh	29,0	Mag	13,0	Bas	6,5	Smc	4,2	Ill	3,5	
	CHM-A-2		4,8	Gyp	40,5	Anh	28,7	Mag	11,8	Bas	6,6	Smc	4,4	Ill	3,3	
	CHM-A-3	4,8	3,9	Gyp	39,9	Anh	28,6	Mag	13,6	Bas	6,5	Smc	4,4	Ill	3,3	
	CHM-A-4		5,0	Gyp	42,3	Anh	27,8	Mag	11,4	Bas	6,2	Smc	4,2	Ill	3,2	
Beton (fein); Chiemburg-tunnel	CHM-B-0	-	27,7	Cal	40,5	Chl	21,4	Alb	4,1	Mic	3,1	Mus	2,8	Dol	0,5	
	CHM-B-1		12,7	Cal	48,2	Chl	5,9	Alb	6,0	Mic	5,0	Mus	12,3	Dol	3,9	Gyp, Mgs
	CHM-B-2		10,1	Cal	66,4	Chl	2,2	Alb	6,5	Mic	4,3	Mus	4,8	Dol	1,6	Prt
	CHM-B-3	10,9	11,3	Cal	47,0	Chl	4,8	Alb	5,4	Mic	5,6	Mus	10,1	Dol	1,2	Gyp, Mgs
	CHM-B-4		10,0	Cal	46,1	Chl	4,4	Alb	6,1	Mic	5,1	Mus	9,9	Dol	1,0	Gyp, Mgs
Beton (grob); Chiemburg-tunnel	CHM-C-0	-	11,6	Cal	48,0	Chl	10,3	Alb	4,3	Mic	4,8	Mus	8,7	Dol	1,0	Gyp, Mgs
	CHM-C-1		38,6	Cal	53,2	Alb	3,9	Chl	1,5	Dol	1,3	Mus	1,0	Mic	0,5	
	CHM-C-2		10,3	Cal	64,2	Alb	6,6	Chl	3,2	Dol	2,8	Mus	7,0	Mic	6,0	
	CHM-C-3	11,2	11,6	Cal	71,0	Alb	4,5	Chl	2,7	Dol	1,3	Mus	5,4	Mic	3,5	
	CHM-C-4		14,6	Cal	71,0	Alb	3,2	Chl	3,1	Dol	0,6	Mus	4,5	Mic	3,2	
Granit; Grimsel	GRI-A-0	-	25,2	Mic	30,4	Alb	31,1	Mus	3,9	Ep	2,9	Bt	2,6	Chl	0,8	Ocl, Cal
	GRI-A-1		15,2	Mic	32,2	Alb	26,7	Mus	7,8	Ep	1,1	Bt	3,7	Chl	4,5	Ocl, Cal
	GRI-A-2	17,6	16,8	Mic	31,6	Alb	29,7	Mus	8,9	Ep	0,8	Bt	3,5	Chl	0,9	Ocl, Cal
	GRI-A-3		18,7	Mic	31,6	Alb	27,8	Mus	9,3	Ep	0,9	Bt	3,2	Chl	4,8	Ocl, Cal
	GRI-A-4		17,9	Mic	8,4	Alb	7,5	Mus	1,9	Ep	0,4	Bt	0,8	Chl	56,1	Ocl, Cal
Apflichter Granit; Grimsel	GRI-B-0	-	37,8	Mic	28,1	Alb	27,9	Mus	2,8	Ep	3,0	Bt	0,2	Chl	0,1	Ocl, Cal
	GRI-B-1		28,2	Mic	30,4	Alb	33,4	Mus	5,0	Ep	1,0	Bt	0,0	Chl	1,0	Ocl, Cal
	GRI-B-2	28,6	26,8	Mic	29,2	Alb	34,6	Mus	5,5	Ep	0,9	Bt	1,3	Chl	1,3	Ocl, Cal
	GRI-B-3		29,5	Mic	28,4	Alb	32,8	Mus	6,0	Ep	0,4	Bt	0,5	Chl	0,4	Ocl, Cal
	GRI-B-4		27,6	Mic	29,9	Alb	31,7	Mus	4,6	Ep	0,3	Bt	1,4	Chl	3,3	Ocl, Cal
Opalinuston; Mont Terri	MTI-A-0	-	13,6	Kao	32,3	Ill	19,7	Cal	12,2	Smc	8,2	Chl	7,2	Sid	3,0	Al, Py
	MTI-A-1		5,6	Kao	34,5	Ill	22,4	Cal	13,3	Smc	9,0	Chl	9,2	Sid	2,3	Al, Py
	MTI-A-2	6,8	5,1	Kao	33,7	Ill	24,5	Cal	13,7	Smc	7,8	Chl	10,2	Sid	3,1	Al, Py
	MTI-A-3		7,3	Kao	35,6	Ill	23,6	Cal	13,0	Smc	8,0	Chl	8,0	Sid	2,9	Al, Py
	MTI-A-4		7,5	Kao	32,9	Ill	24,1	Cal	12,9	Smc	8,8	Chl	8,4	Sid	2,4	Al, Py
Orthogneis (grob); Nant de Drance	NDD-A-0	-	35,0	Pl	31,1	Mus	10,1	Ocl	9,0	Chl	7,8	Mic	6,9			
	NDD-A-1		20,3	Pl	26,5	Mus	25,3	Ocl	12,3	Chl	7,7	Mic	7,9			
	NDD-A-2	22,0	22,2	Pl	23,0	Mus	31,5	Ocl	9,4	Chl	7,2	Mic	6,7			
	NDD-A-3		19,9	Pl	28,3	Mus	27,9	Ocl	10,1	Chl	8,0	Mic	5,8			
	NDD-A-4		22,8	Pl	27,1	Mus	23,6	Ocl	12,1	Chl	8,7	Mic	5,7			
Orthogneis (fein); Nant de Drance	NDD-B-0	-	35,0	Mic	28,2	Pl	25,6	Mus	7,0	Chl	2,4	Ill	1,7	Py	0,1	
	NDD-B-1		24,4	Mic	25,2	Pl	23,5	Mus	16,5	Chl	3,3	Ill	7,1	Py	0,0	
	NDD-B-2		23,5	Mic	26,0	Pl	24,7	Mus	12,3	Chl	4,5	Ill	8,8	Py	0,2	
	NDD-B-3	24,2	24,6	Mic	23,4	Pl	26,7	Mus	13,4	Chl	4,2	Ill	7,6	Py	0,1	
	NDD-B-4		22,2	Mic	27,8	Pl	24,7	Mus	15,6	Chl	3,8	Ill	5,8	Py	0,1	
Metagrau-wacke; Nant de Drance	NDD-C-0	-	24,0	Mic	26,7	Pl	25,5	Mus	13,5	Chl	3,4	Ill	6,9	Py	0,0	
	NDD-C-1		31,8	Pl	33,1	Chl	16,0	Mus	13,2	Ocl	5,6	Py	0,4			
	NDD-C-2		20,2	Pl	13,2	Chl	7,1	Mus	54,3	Ocl	5,0	Py	0,3			
	NDD-C-3	20,1	19,4	Pl	14,0	Chl	41,2	Mus	17,3	Ocl	7,8	Py	0,2			
	NDD-C-4		20,6	Pl	3,8	Chl	66,9	Mus	6,1	Ocl	2,6	Py	0,1			
Glimmerschiefer; Nant de Drance	NDD-D-0	-	20,0	Pl	4,2	Chl	66,1	Mus	6,9	Ocl	2,8	Py	0,1			
	NDD-D-1		17,4	Pl	11,9	Chl	48,8	Mus	15,1	Ocl	6,7	Py	0,1			
	NDD-D-2		40,1	Mus	20,8	Chl	16,0	Pl	12,8	Ill	10,3					
	NDD-D-3	17,1	16,5	Mus	33,7	Chl	10,2	Pl	12,6	Ill	27,0					
	NDD-D-4		17,8	Mus	35,0	Chl	12,7	Pl	12,4	Ill	22,1					
Molasse-Sandstein; Rosshaus	ROM-A-0	-	40,1	Cal	23,2	Ill	15,2	Chl	6,4	Pl	5,4	Dol	4,3	Mus	3,1	Mic
	ROM-A-1		22,5	Cal	27,5	Ill	22,2	Chl	10,0	Pl	7,6	Dol	5,0	Mus	5,0	Mic
	ROM-A-2		21,5	Cal	25,8	Ill	25,7	Chl	9,8	Pl	6,8	Dol	5,1	Mus	5,1	Mic
	ROM-A-3	21,4	20,0	Cal	23,9	Ill	26,9	Chl	10,2	Pl	7,4	Dol	4,7	Mus	5,8	Mic
	ROM-A-4		20,5	Cal	24,8	Ill	25,6	Chl	11,3	Pl	6,6	Dol	4,5	Mus	5,6	Mic
Malmkalk; Tunnel de Choindex	TCH-A-0	-	19,5	Cal	24,4	Ill	28,4	Chl	9,6	Pl	7,3	Dol	4,5	Mus	5,6	Mic
	TCH-A-1		1,8	Cal	86,3	Dol	5,2	Kao	3,7	Ill	2,6	Py	0,3			
	TCH-A-2		1,1	Cal	87,2	Dol	4,3	Kao	4,2	Ill	3,0	Py	0,2			
	TCH-A-3	0,9	1,2	Cal	86,2	Dol	4,5	Kao	4,6	Ill	3,3	Py	0,2			
	TCH-A-4		1,1	Cal	86,1	Dol	4,5	Kao	5,0	Ill	3,1	Py	0,2			
Kieselkalk; Steinbr. Zingel, Kehrstein	TCH-A-5		0,8	Cal	87,1	Dol	4,7	Kao	4,8	Ill	2,6	Py	0,1			
	ZIN-A-0	-	0,9	Cal	87,3	Dol	4,4	Kao	4,7	Ill	2,7	Py	0,0			
	ZIN-A-1		26,3	Cal	65,7	Ank	3,8	Mus	1,9	Py	1,3	Chl	1,1			
	ZIN-A-2		17,5	Cal	69,6	Ank	3,1	Mus	6,5	Py	1,2	Chl	2,1			
	ZIN-A-3	11,6	16,6	Cal	68,9	Ank	2,8	Mus	6,7	Py	1,0	Chl	4,0			
ZIN-A-4		18,4	Cal	68,9	Ank	3,5	Mus	6,3	Py	1,2	Chl	1,8				
ZIN-A-5		15,1	Cal	72,3	Ank	3,8	Mus	5,9	Py	1,2	Chl	1,8				
			13,8	Cal	73,6	Ank	3,1	Mus	6,5	Py	1,1	Chl	1,8			

IV CD-Beilage: Ergebnisse der kontinuierlichen Korngrößenanalysen des Feinstaubes während des Modifizierten LCPC Versuchs

In dieser PDF-Anlage auf CD sind die Ergebnisse der kontinuierlichen Korngrößenanalysen des Feinstaubes während des Modifizierten LCPC Versuchs in Form von jeweils 5 Diagrammen pro Versuch zusammengestellt. Insgesamt beinhaltet dieser Anhang 134 Seiten.

Die folgenden 5 Diagramme sind aus den Rohdaten jedes Versuchs erstellt worden:

- **Diagramm 1:** Darstellung der Rohdaten (Partikelanzahl aller Korngrößenbereiche) im Laufe des Versuchs als 3D-Diagramm.
- **Diagramm 2:** Darstellung der aufsummierten Partikelzahlen für die Korngrößenbereiche 0,3 bis 4 μm , 4 bis 10 μm sowie die Gesamtpartikelkonzentration als Zeitreihe während des Versuchs.
- **Diagramm 3:** Darstellung aller Kornsummenkurven aus den verschiedenen Zeitschritten. Dabei wird die Kornsumme als Prozent der Anzahl der Körner, nicht wie bei Siebanalysen als Massen-Prozent dargestellt. Diese Darstellung zeigt deutlich wie stark die Kornsummenkurve im Verlauf des Versuches variieren. Die einhüllenden Grenzkornsummenkurven können ebenfalls aus dieser Darstellung ermittelt werden.
- **Diagramm 4:** Darstellung der Parameter d_{10} , d_{30} , d_{40} , d_{50} , d_{60} , d_{70} und d_{90} (Korngröße bei der die Kornsummenkurve die 10%, 30% ... 70%, 90%-Linie schneidet) als Zeitreihen im Verlauf des Versuchs. Mit dieser Darstellung lassen sich Verschiebungen in den Korngrößenverteilungen gut visualisieren.
- **Diagramm 5:** Darstellung der Ungleichförmigkeitszahl ($C_U = d_{60}/d_{10}$) und Krümmungszahl ($C_C = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10})$) als Zeitreihen im Verlauf des Versuchs.

Glossar

Begriff	Bedeutung
a-Staub	Alveolengängiger Staub. Unter alveolengängigem Staub (früher: Feinstaub F) versteht man die Gesamtheit der Partikel in der Atemluft, welche bis in die Lungenalveolen gelangen können (EN 481).
Branchenlösung BHG	Branchenlösungen sind Organisationsmodelle. Sie stellen den Bauunternehmen ein branchenspezifisches Sicherheitssystem (Handbuch) und Checklisten zur Verfügung und bieten Schulungen und andere Dienstleistungen an. Branchenlösungen werden von den Sozialpartnern einer Branche getragen und in Zusammenarbeit mit Spezialisten der Arbeitssicherheit entwickelt. Die Branchenlösung für das Bauhauptgewerbe (BHG) beinhaltet die Massnahmen gegen Quarzstaub in der Gefahren- und Massnahmenliste der Risikobeurteilung und Risikominderung im Untertagebau. Sie ist bei der Beratungsstelle für Arbeitssicherheit des SBV (Schweizerischer Baumeisterverband, Zürich) zu beziehen.
CAI	Der Cerchar-Abrasivitätsindex (CAI) dient der Beschreibung der Abrasivität eines Festgesteins und wird zur Evaluation des Werkzeugverschleißes in Bezug auf die Gesteinsmineralogie und Petrographie verwendet. Ermittelt wird der CAI aus dem Abrieb eines zugespitzten Metallstiftes mit definierter Härte und Form nach einem Kratzversuch über eine frisch gebrochene Gesteinsoberfläche.
LAK	Der LCPC-Abrasivitätskoeffizient (LAK) dient der Bestimmung der Abrasivität eines Festgesteins und wird zur Evaluation des Werkzeugverschleißes in Bezug auf die Gesteinsmineralogie und Petrographie verwendet. Der Anwendungsbereich des LAK kann auch auf Lockergesteine ausgedehnt werden. Ermittelt wird der LAK im sog. LCPC-Test (s.u.).
LCPC-Test	Im LCPC-Test (LCPC: Laboratoire central des ponts et chaussées) wird ein in Härte und Form definierter Metallflügel in einer gebrochenen Gesteinsprobe (Korngröße 4 bis 6,3 mm) mit hoher Geschwindigkeit 5 Minuten lang gedreht. Aus dem Massenverlust des Flügels während des Versuchs wird der LCPC-Abrasivitätskoeffizient ermittelt. Zusätzlich kann über die Untersuchung der Korngrößenzusammensetzung nach dem Versuch eine Aussage zur Brechbarkeit des Gesteins getroffen werden. Der LCPC-Test sowie der LAK wurden 1990 eingeführt und sind in der französischen Norm NF/P18-579 (AFNOR 1990) definiert.
LQK	Der LCPC-Quarzstaubkoeffizient (LQK) dient der relativen Einstufung des Quarzstaubpotentials von Gesteinen. Er kann dazu verwendet werden das Quarzstaubungsverhalten von Gesteinen mit mineralogischen oder petrographischen Faktoren in Bezug zu setzen. Bestimmt wird der LQK aus der Quarzstaubmenge (a-Staub), die während des modifizierten LCPC-Tests freigesetzt wird. Der LQK wurde erstmals im Rahmen der Erarbeitung dieser Richtlinie eingeführt (vgl. ASTRA-Forschungsbericht Nr. FGU 2012/007).
MAK-Wert	Der MAK-Wert ist die höchstzulässige Durchschnittskonzentration eines gas-, dampf- oder staubförmigen Arbeitsstoffes in der Luft, die nach derzeitiger Kenntnis in der Regel bei Einwirkung während einer Arbeitszeit von 8 Stunden täglich und bis 42 Stunden pro Wo-che auch über längere Perioden bei der ganz stark überwiegenden Zahl der gesunden, am Arbeitsplatz Beschäftigten die Gesundheit nicht gefährdet. (Suva, Grenzwerte am Arbeitsplatz).
Modifizierter LCPC-Test	Im modifizierten LCPC-Test wurde dem originalen LCPC-Test eine Versuchsanordnung zur quantitativen Erfassung und Beprobung des freiwerdenden a-Staubs hinzugefügt. Dabei wird die freiwerdende a-Staubmenge während des LCPC-Tests kontinuierlich mit Hilfe eines Laser-Partikelgrössenmessgeräts gemessen und der Quarzgehalt des gesammelten a-Staubs mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt.
Quarz	Quarz ist eine kristalline Form von Siliziumdioxid SiO ₂ mit trigonaler Symmetrie. Er ist das zweithäufigste Mineral der Erdkruste und tritt in verschiedenen Gesteinen auf.
Quarzgehalt	Massenanteil des Quarzes an der Gesamtmasse des Gesteins oder des Staubes.
Quarzstaubexposition	Schadstoffbelastung durch Quarzstaub am Arbeitsplatz.
Quarzstaubgefährdung	Gesundheitsgefährdung durch Quarzstaub.
Staub	Staub ist die Sammelbezeichnung für feinste feste Teilchen, die aufgewirbelt in der Luft lange Zeit schweben können.
UCS	Die einaxiale Druckfestigkeit (UCS: Unconfined Compressive Strength) quantifiziert die maximale Druckspannung, die ein in der Form definierter Gesteinsprüfkörper bei einer axialen Belastung aufnehmen kann.

Literaturverzeichnis

Normen

-
- [1] AFNOR (1990), „**Granulats: Essai d’abrasivité et de broyabilité**“, *Normalisation Française P18-579 (12/1990)*.
-
- [2] DIN (1993), „**Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel**“, Deutsche Fassung, *DIN EN 481:1993-09*.
-
- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (1998), „**Baulüftung im Untertagbau: Verständigung, Grundlagen und Hinweise, Planung, Berechnungen, Ventilationsmaterial, Ausführung, Leistung, Kontrolle und Unterhalt**“, SN 531196, Ausgabe November 1998, 64 S., *Norm SIA 196*.
-

Weitere Literatur

-
- [4] Bärtschi, Ch. J. (2011), „**Kieselkalke der Schweiz: Charakterisierung eines Rohstoffes aus geologischer, petrographischer, wirtschaftlicher und umweltrelevanter Sicht**.“, Dissertation, ETH Zürich.
-
- [5] Bergmann, J., Friedel, P., Kleeberg, R., (1998), „**BGMN - a new fundamental parameters based Rietveld program for laboratory X-ray sources, its use in quantitative analysis and structure investigations**“, CPD Newsletter, 20, p. 5-8.
-
- [6] Büchi, E., Mathier J.-F. & Wyss, Ch. (1995), „**Gesteinsabrasivität – ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein**“, Tunnel, 5, 95, S. 38-44.
-
- [7] CENTRE D’ETUDES DE CHARBONNAGES DE FRANCE (1986), „**The Cerchar Abrasiveness Index**“, 8 S., 4 Taf., Verneuil.
-
- [8] DGUV (2014), „**Was ist Staub – A-Staub**“, Internetseite der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Fachbereich Rohstoffe und chemische Industrie, URL: <http://www.dguv.de/staub-info/Was-ist-Staub/A-Staub/index.jsp>, Abgerufen am 14.11.2014.
-
- [9] Holland, L.M. (1990), „**Crystalline silica and lung cancer: A review of recent experimental evidence**“, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 12, 3: 224–237. DOI 10.1016/S0273-2300(05)80060-1.
-
- [10] Listak, J. (2003), „**Method to determine the effects of rotary drilling parameters and overburden rock on silica-dust generation**“, *Transactions of Society for Mining Metallurgy and Exploration*, 314: 102–106.
-
- [11] Oliver, L.C. & Miracle-McMahill, H. (2006), „**Airway disease in highway and tunnel construction workers exposed to silica**“, *American Journal of Industrial Medicine*, 49, 12: 983–996. DOI 10.1002/ajim.20406.
-
- [12] Pelucchi, C. (2006), „**Occupational silica exposure and lung cancer risk: a review of epidemiological studies 1996-2005**“, *Annals of Oncology*, 17, 7: 1039–1050. DOI 10.1093/annonc/mdj125.
-
- [13] Schatzel, S. (2009), „**Identifying sources of respirable quartz and silica dust in underground coal mines in southern West Virginia, western Virginia, and eastern Kentucky**“, *International Journal of Coal Geology*, 78, 2: 110–118. DOI 10.1016/j.coal.2009.01.003.
-
- [14] SUVA (2012), „**Grenzwerte am Arbeitsplatz 2012**“, SUVA, 157 S.
-
- [15] Surek, D. & Stempin, S. (2007): „**Angewandte Strömungsmechanik: für Praxis und Studium**“, 1. Auflage, 438 S., Wiesbaden (Vieweg+Teubner).
-
- [16] Thuro, K., Singer, J. Käsling & H. Bauer, M. (2006): „**Abrasivitätsuntersuchungen an Locker-gesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung**“, In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Beiträge zur 29. Baugrundtagung, 27. - 29. Sept. 2006 in Bremen, 283-290.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 23.10.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2012/007

Projekttitle: Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbelastung

Enddatum: 30.10.2015

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In der Vergangenheit kam es bei Untertagebauten in der Schweiz wiederholt zu unvorhergesehenen Überschreitungen der zulässigen Arbeitsplatzkonzentration von Quarzfeinstaub in der Luft. Dies führte zum Teil zu Unterbrechungen im Baubetrieb und damit zu erheblichen Verzögerungen im Bauablauf. Der Zeitverlust und die notwendigen technischen Gegenmaßnahmen führten zu erheblichen Mehrkosten. Um in Zukunft die Arbeitssicherheit im Untertagebau gewährleisten zu können und um Planungssicherheit zu schaffen, müssen potentiell Quarzstaub produzierende Gesteine möglichst früh bei der Projektierung entsprechender Baumaßnahmen erkannt und durch das Vorsehen entsprechender Gegenmaßnahmen berücksichtigt werden. Bislang fehlt jedoch ein einfaches, objektives planerisches Instrument, um die potentielle Quarzstaubbelastung in der Frühphase der Planung eines Projektes abschätzen zu können.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Definition eines geotechnischen Indexwertes für die Beurteilung des Potentials von Gesteinen zur Quarzstaubbelastung. Dazu wurde ein neuer Laborversuch entwickelt, mit dem das Quarzstaubpotential von Gesteinen quantifiziert werden kann: der modifizierte LCPC-Versuch. In diesem wird der während des LCPC-Abrasivitäts-Versuchs erzeugte Gesteinsstaub aufgefangen und hinsichtlich Menge, Korngrößenverteilung und Mineralzusammensetzung (Quarzgehalt) untersucht. Dies ermöglicht eine Quantifizierung der freiwerdenden Quarzstaubmenge der untersuchten Gesteine. Das Quarzstaubpotential wird dabei in Form des neu definierten LCPC-Quarzstaubkoeffizienten (LQK) als Gramm Quarzfeinstaub pro Tonne Ausgangsgestein ausgedrückt.

Insgesamt wurden 14 verschiedene, in der Schweiz vorkommende, Gesteinsarten untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass der LQK das unterschiedliche Quarzstaubpotential der Gesteine gut abbilden kann. Außerdem war es über eine genaue Untersuchung der Korngrößenzusammensetzung und Mineralogie des im modifizierten LCPC-Versuch freiwerdenden Staubes möglich, grundsätzliche Unterschiede im Staubungsverhalten verschiedener Gesteine zu identifizieren. So konnten z.B. eine wechselnde Fraktionierung der Mineralgehalte im freigesetzten Staub und deutliche Veränderungen in den Korngrößenzusammensetzungen des Staubes im Laufe des Versuches beobachtet und quantifiziert werden. Anhand dieser Ergebnisse konnten erste Hypothesen zu den bei verschiedenen Gesteinen im LCPC-Versuch ablaufenden Bruchprozessen angestellt werden.

Auf Grundlage der ermittelten LQK Werte wurde zudem untersucht, wie typische geotechnische Parameter bzw. Parameterkombinationen mit dem Quarzstaubpotential korrelieren. Damit kann eine Aussage über die potentielle Quarzstaubgefährdung anhand bereits existierender geotechnischer Parameter realisiert werden. So ergab sich z.B. für den CAI (Cerchar Abrasivitäts Index) eine gute Korrelation mit dem LQK, wobei diese auf Gesteine, in denen Quarz das dominierend abrasive Mineral ist, beschränkt ist.

Abschließend wurde für den LQK eine erste deskriptive Klassifizierung mit den Klassen niedrig (0-4 g/t), mittel (4-12 g/t) und hoch (> 12 g/t) definiert.

Die Ergebnisse dieser Studie sind die wissenschaftliche Basis für eine praxisrelevante Einteilung des Quarzstaubpotentials in Gefährdungsstufen (z.B. geringe/mittlere/hohe Quarzstaubgefährdung) im Rahmen der Erarbeitung des SIA Merkblattes 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“. Dabei werden die hier ermittelten Laboruntersuchungen mit realen Fallbeispielen / Schadensfällen korreliert.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die wesentlichen im Projektantrag formulierten Ziele wurden erreicht. Es wurde mit dem modifizierten LCPC Versuch ein neuer Laborversuch entwickelt mit dem das Quarzstaubpotential verschiedener Gesteine quantifiziert werden kann. Die Funktionalität des Versuchs wurde anhand einer Versuchsreihe von 14 verschiedenen Gesteinsarten verifiziert. Anhand der ermittelten Versuchsergebnisse wurden ggf. vorhandene Korrelationen mit anderen geotechnischen Kennwerten bestimmt und ihre Tauglichkeit zur Nutzung als Indikator des Quarzstaubpotentials der Gesteine evaluiert. Für den im modifizierten LCPC Versuch ermittelten LCPC Quarzstaubpotential Koeffizienten wurde eine erste Klassifizierung in drei Klassen (niedrig/mittel/hoch) definiert. Die Ergebnisse dieser Studie bilden die Grundlage für das SIA Merkblatt 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“, welches als Entwurf vorliegt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Mit dem modifizierten LCPC Versuch wurde ein geeignetes Instrument geschaffen, um das Quarzstaubpotential von Gesteinen zu beurteilen. Der Versuch sollte jedoch noch mit weiteren Gesteinsarten erprobt werden, um die hier gemachten Beobachtungen zu bestätigen. Insbesondere die Hypothesen bezüglich der während des LCPC Versuchs ablaufenden Bruchvorgänge müssen noch verifiziert werden. Auch die ermittelten Korrelationen mit anderen geotechnischen Parametern (insb. Cerchar Abrasivity Index, CAI) sollten durch weitere Versuche an anderen Gesteinsarten ergänzt und aktualisiert werden. Auf Grundlage der hier erarbeiteten Laborergebnisse sowie Feldmessungen von Schadensfällen bei verschiedenen Untertagebauprojekten hat die Arbeitsgruppe Quarzstaub der Fachgruppe für Untertagebau (FGU) den CAI als Grundlage für eine Gefährdungseinstufung der Gesteine bzgl. Quarzstaub definiert. Diese Klassifikation sollte bei Verfügbarkeit von neuen Daten (aus der Praxis wie im Labor) wiederholt überprüft werden.

Publikationen:

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2015), „Quarzstaub im Untertagebau“, Merkblatt 2054, 64 S.
Eine Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in einem internationalen Journal ist geplant.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Singer

Vorname: John

Amt, Firma, Institut: Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, ETH Zürich

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die im Antrag formulierten Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht. Auch wenn bezüglich einiger Detailfragen (s.u.) noch weiterer Forschungsbedarf besteht, existiert mit dem hier entwickelten modifizierten LCPC Versuch jetzt ein Instrument, um das Quarzstaubpotential von Gesteinen zu ermitteln und diesbezüglich eine erste Klassifizierung und relative Einordnung verschiedener Gesteinstypen vorzunehmen. Das vorgesehene Ziel - die Erarbeitung eines SIA Merkblattes „Quarzstaub im Untertagebau“ - konnte auf Grundlage dieser Forschungsarbeit ebenso erreicht werden.

Umsetzung:

Das Forschungsvorhaben wurde entsprechend des Antrags umgesetzt. Zunächst wurden wichtige Einflussgrößen auf den neu entwickelten modifizierten LCPC Versuch untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen führten neben einigen Modifikationen am ursprünglichen Versuchsaufbau zu einer Definition der wichtigsten Versuchsparameter. Anschließend wurden mit dem modifizierten LCPC Versuch 14 Gesteinsarten systematisch untersucht. Anhand der Ergebnisse konnten wichtige Erkenntnisse zum Bruchverhalten der Gesteine während des Versuchs gewonnen werden. Des Weiteren wurde untersucht in wie weit sich die Ergebnisse der Versuche (LCPC Quarzstaub Koeffizient) mit anderen geotechnischen Kennwerten korrelieren lassen. Der Cerchar Abrasivitäts-Index CAI wurde als schneller überschlägiger Indextest in das Merkblatt aufgenommen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Hypothesen bezüglich der Bruchvorgänge während des modifizierten LCPC Versuchs sollten mittels geeigneter Versuche noch überprüft werden. Die ermittelten Korrelationen zwischen dem LCPC Quarzstaubpotential Koeffizient und anderen geotechnischen Kennwerten müssen in Zukunft - mit dem Verfügbarwerden weiterer Versuchsergebnisse - verifiziert bzw. konkretisiert werden. Insbesondere sollten weitere Versuchsserien mit anderen Gesteinsarten (insbesondere z.B. mafischen Vulkaniten/Plutoniten) durchgeführt werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Der hier vorliegende Forschungsbericht stellt die Grundlage für das SIA Merkblatt 2054 „Quarzstaub im Untertagebau“ dar.

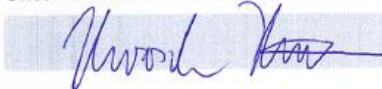
Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Prof. Dr. Thuro

Vorname: Kurosch

Amt, Firma, Institut: Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 01.04.2015

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbauasphalt	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflästerungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Fundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbaus asphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisell	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeurückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009