

Dissertation

Verwendung von Tunnelausbruchmaterial – Geologische und Geotechnische Aspekte

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der montanistischen Wissenschaften



eingereicht an der Montanuniversität Leoben
Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik

von
Mag.rer.nat. Klaus LASSNIG

Betreuer
o.Univ.-Prof. Dr.phil. Fritz EBNER
Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert GALLER
Lehrstuhl für Subsurface Engineering

September 2012

Eidesstattliche Erklärung

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

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Mag. Klaus Lassnig

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei meinen Doktorvätern, Herrn o.Univ.-Prof. Dr.phil. Fritz Ebner und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert Galler, für Ihre ausgezeichnete Betreuung während meiner Dissertationsjahre danken. Sie standen mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite.

Außerdem möchte ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Geologie und Lagerstättenlehre sowie des Lehrstuhls für Subsurface Engineering für fruchtbare Diskussionen und ein tolles Arbeits- und auch Freundschaftsverhältnis danken.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen und Mitarbeitern im FFG-Forschungsprojekt „Recycling von Tunnelausbruchmaterial“ sowie bei der FFG selbst für das finanzielle Fundament.

Last but not least gebührt ein großer Dank meiner Familie, meinen Freunden und natürlich meiner Freundin Sonja, die mich immer wieder neu motivierten und mir den Rücken stärkten.

Kurzfassung

Im Sinne der Schonung mineralischer Ressourcen liegt der Fokus bei der Nutzung von Tunnelausbruchmaterial bei der maximalen Verwendung des anfallenden Gesteinsmaterials, bei minimaler Umweltbelastung und maximaler Wirtschaftlichkeit. Neben Verwendungen in der Industrie (z.B.: Metallurgie, Chemie, Glas, Farben und Lacke) sowie als Schotter im Verkehrswegebau liegt ein Schwerpunkt bei der Verwendung als Gesteinskörnung für Beton. Um bereits am Ausgangsgestein in der Planungsphase die Eignung der Lithologien als Gesteinskörnung bewerten zu können, werden in dieser Arbeit geologische, mineralogische und geotechnische Parameter alpiner Lithologien untersucht und mit Ergebnissen von Betonversuchen korreliert. Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass mit allen untersuchten Lithologien Innenschalen- und Tübbingbetone mit Standardrezeptur hergestellt werden können. Dabei wurden für uniaxiale Druckfestigkeit, E-Modul, Abrasivität, Kompressionswellengeschwindigkeit sowie Glimmergehalt an der Fraktion 125 – 250 µm versuchstechnisch abgedeckte Grenzwerte bestimmt.

Zusätzlich wird der Aspekt der Lösemethode im Tunnelbau näher betrachtet, da es bei NATM und TBM Vortrieben zu großen Unterschieden in der Korngröße und Kornform des anfallenden Materials kommt. An Linearschneidprüfständen, welche den Lösevorgang einer Tunnelbohrmaschine simulieren, wurden Diskenschneidversuche an alpinen Lithologien mit unterschiedlichen Schneidspurabständen und unterschiedlicher Penetrationstiefe durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen starken Einfluss des Schneidspurabstandes und einen geringen Einfluss der Penetrationstiefe auf die Korngrößenverteilung des Ausbruchmaterials. Ein größerer Schneidspurabstand liefert einen gröberen Materialanfall. Gesteine mit niedriger Druckfestigkeit und hohem Glimmergehalt liefern zusätzlich eine feinkörnigere Sieblinie als Lithologien mit höherer Druckfestigkeit. Außerdem konnte die Korngröße der Gesteine in Zusammenhang mit der anfallenden Sieblinie in Verbindung gebracht werden.

Durch das Eindringen der Diske in das Gestein werden Risse induziert. Die Ausbreitung der Risse wurde mittels Schmidhammer Tests sowie makro- und mikroskopisch untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass die Fortpflanzung der Risse im Wesentlichen von durchgehenden Glimmerhorizonten bestimmt wird. Unter dem Diskenschnitt bildet sich eine Zone aus, in der der gesamte Kornverband gelöst wird. Darunter kommt es zur Bildung von Mikrorissen in den einzelnen Mineralen, gefolgt von einer Rissfortpflanzung entlang der Glimmerhorizonte, der Spaltbarkeit von Mineralen sowie, in Abwesenheit von Glimmermineralen, der Korngrenzen.

Abstract

The focus in recycling of tunnel excavation material lies in the maximum usage of the excavation material at minimum environmental contamination and maximum economics. Beside industrial applications (i.e.: Chemistry, Metallurgy, Glass and Varnish coatings) and usage as gravel in infrastructure engineering, excavation materials are used as aggregates for concrete. Mineralogical, geological and geotechnical properties of different Austroalpine rocks were determined and correlated with results of concrete tests. The aim is the determination of the usability of lithologies as aggregates already in the design phase of a project. The investigations show that all lithologies are qualified for producing inner lining- and tubbingconcrete. Boundary values for uniaxial compressive strength, Young's modulus, Abrasiveness, longitudinal wave velocity and Mica content were obtained by practical experience.

Additionally, the excavation process was analyzed due to major differences in grain size distributions and geometry of excavated rocks from NATM or TBM tunneling. Linear cutting tests, which simulate the chipping process, were done on alpine lithologies to figure out the influence of cutter spacing and cutter penetration on the grain size distribution of the excavated rocks. The results show that there is a significant impact of cutter spacing and almost no influence of cutter penetration on the grain size distribution. Increased cutter spacing provides a coarse grain size distribution. Rocks with low uniaxial compressive strength and high mica content provide a finer grain size distribution. Additionally, a relationship between grain size and the grain size distribution of the excavation material could be observed.

The cutting process induces cracks in the rocks which were analyzed macro- and microscopically. Additionally, Schmidhammer test were done on the rock surface. The investigations show that micro crack growth is mainly controlled by the schistosity orientation. A zone of completely destroyed grain bonding is developing directly beneath the indenting disc cutter. This zone is followed by an area of micro-cracks which develop mainly in hard grains (i.e.: quartz, garnet). The lowest region shows cracks along mica-layers, along cleavage properties of minerals, or, if mica is absent, along the grain boundaries of the minerals.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Mineralische Rohstoffe in Österreich und ihr Verwendungspotential.....	2
1.2 Randbedingungen der Verwendung.....	6
2 Geologischer Rahmen der untersuchten Lithologien	8
2.1 Tauernfenster.....	8
2.1.1 Kalkglimmerschiefer.....	9
2.1.2 Augengneis.....	10
2.2 Oberostalpin	10
2.2.1 Biotit Plagioklas Gneis.....	12
2.2.2 Hornblendegneis	12
2.2.3 Granitgneis.....	13
2.2.4 Schiefergneis	13
2.2.5 Raibler Dolomit.....	14
3 Verwendung der Lithologien als Gesteinskörnung zur Betonherstellung	15
3.1 Methodik.....	16
3.1.1 Ermittlung der Gesteinsparameter	16
3.1.2 Ermittlung der Betonkennwerte.....	23
3.2 Ergebnisse.....	24
3.2.1 Dünnschliffuntersuchungen	24
3.2.2 Ergebnisse der geotechnischen Versuche.....	33
3.2.3 Ergebnisse Abrasivitäts Tests	34
3.2.4 Ergebnisse der Kompressionswellengeschwindigkeiten	35
3.2.5 Ergebnisse der geochemischen Analysen	35
3.2.6 Ergebnisse des Schichtsilikatgehaltes der Fraktion 125 – 250 µm.....	37
3.2.7 Frisch- und Festbetonergebnisse	37
3.3 Interpretation und Diskussion	39

4 Einfluss von Gesteinsgefüge, Schneidspurabstand und Penetration auf das Ausbruchmaterial im maschinellen Tunnelvortrieb.....	44
4.2 Der Schneidprozess	47
4.3 Methodik.....	49
4.3.1 LCM der SANDVIK Mining and Construction.....	49
4.3.2 LCM der Colorado School of Mines	56
4.3.3 Korngrößenanalyse.....	62
4.3.4 Kornformanalyse.....	63
4.4 Ergebnisse.....	63
4.4.1 Ergebnisse der Korngrößenanalysen	63
4.4.2 Ergebnisse der Kornformanalyse.....	92
4.5 Interpretation und Diskussion	93
5 Auswirkungen der Diskenschnitte im maschinellen Tunnelbau auf die Schmidhammer Härteverteilung sowie die Rissfortpflanzung im Gestein	96
5.1 Methodik.....	97
5.1.1 Schmidhammer Tests	98
5.1.2 Untersuchungen der Rissfortpflanzung im Dünnschliff und Anschliff	99
5.2 Ergebnisse.....	100
5.2.1 Ergebnisse der Schmidhammer Tests.....	100
5.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Rissfortpflanzung.....	106
5.3 Interpretation und Diskussion	120
6 Zusammenfassung und Ausblick	124
6.1 Zusammenfassung.....	124
6.2 Ausblick.....	126
7 Literaturverzeichnis.....	128

8 Anhang	140
Anhang A: Mineralogie und Gefüge	140
Anhang B: Geotechnik	142
Anhang C: Geochemische Analysen	143
Anhang D: Korngrößenverteilungen.....	149
Anhang E: Kornformen	152

1 Einleitung

Im ostalpinen Raum sind derzeit mehr als 200 km an Tunnel in Planung sowie zum Teil schon in Bau. An der Spitze stehen Megaprojekte wie Koralm-, Semmering- und Brenner Basistunnel. Bis dato werden die beim Tunnelbau anfallenden Gesteine hauptsächlich deponiert oder als Schüttmaterial im Wegebau verwendet. Durch die Verknappung der geogenen Ressourcen und im Sinne ihrer Schonung werden verschiedene österreichische Tunnel- und Kraftwerksprojekte im Zuge des FFG Forschungsprojektes - Verwertung von Tunnelausbruchmaterial - näher betrachtet und das Ausgangsmaterial für eine Weiternutzung untersucht [RESCH et al., 2009].

Ziele des Forschungsprojektes sind:

- die maximale Verwendung des anfallenden Gesteinsmaterials
- bei minimaler Umweltbelastung
- und optimaler Wirtschaftlichkeit

Um diese Ziele zu erreichen, wurden derzeit in Bau befindliche sowie zukünftige Untertagebauwerke in Österreich in Betracht gezogen und die anfallenden Lithologien auf eine mögliche Verwendung untersucht. Neben rechtlichen und wirtschaftlichen Überlegungen, welche in der Dissertation von RESCH (2012) behandelt werden, wurden geologische und technische Aspekte untersucht.

In Zukunft sollte bei jedem Bauprojekt bereits in der Frühphase der Planung eine Beurteilung der Nutzung des anfallenden Gesteinsmaterials im Vordergrund stehen um die Ressourceneffizienz nachhaltig zu verbessern.

Laut dem FORUM MINERALISCHE ROHSTOFFE (2012) liegt der aktuelle pro-Kopf Verbrauch an mineralischen Rohstoffen in Österreich bei 15 - 18 t pro Jahr. Um weiterhin gewährleisten zu können, dass Österreich den Eigenbedarf an mineralischen Rohstoffen decken kann, muss Ressourcenschonung oberste Priorität haben. Die Verwendung von Tunnelausbruchmaterial als Rohstoff kann dabei einen wertvollen Beitrag leisten, wenn man bedenkt, dass Baurohstoffe durchschnittlich nur bis zu 30 km transportiert werden können um maximale Wirtschaftlichkeit und minimale Umweltbelastung zu gewährleisten.

1.1 Mineralische Rohstoffe in Österreich und ihr Verwendungspotential

Alle österreichischen geologischen Einheiten beinhalten Gesteine die Baurohstoffe und Rohstoffe für bestimmte Verwendungen darstellen. Eine Übersicht über Abbauorte und geologische Zuordnung derzeit genutzter Baurohstoffe in Österreich zeigt Abb.1.1 basierend auf Erhebungen der Geologischen Bundesanstalt. Damit ist das Nutzungspotenzial von Gesteinen der einzelnen geologischen Zonen Österreichs als Baurohstoffe angedeutet. Dieses Nutzungspotenzial ist auch auf Ausbruchmaterialien von Tunnelprojekten übertragbar, die in diesen Gesteinseinheiten liegen.

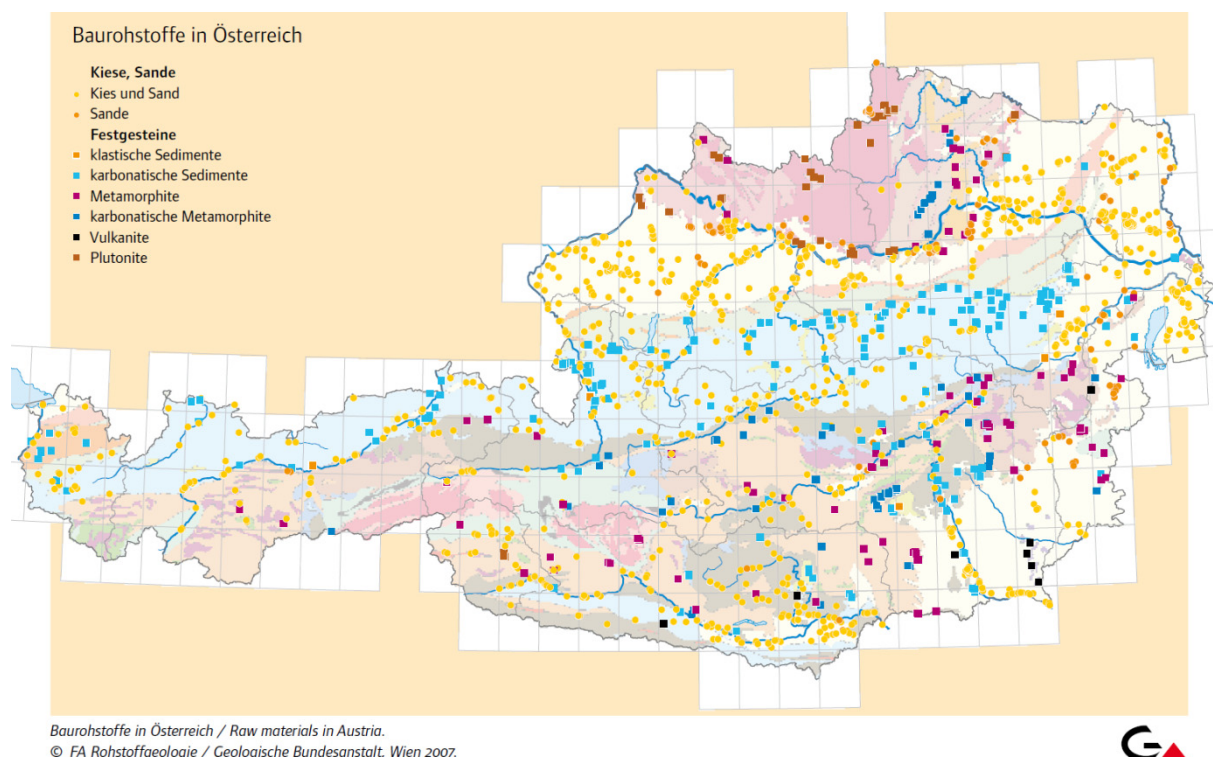


Abb.1.1: Übersichtskarte der Baurohstoffe in Österreich (GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, 2007)

Abbildung 1.1 zeigt, dass das Vorkommen von Baurohstoffen in Österreich großzügig über das ganze Bundesgebiet verteilt ist, wobei Lockergesteine wie Sande und Kiese vorwiegend in Tertiärbecken (Wiener- Grazer- und Klagenfurter Becken) und in der Molassezone vorkommen.

Grundsätzliche Verwendungspotentiale in Österreich vorkommender Festgesteine (ohne „großstückige“ Verwendung wie z.B. Wasserbausteine) sind in Tabelle 1.1 illustriert.

Festgesteinsgruppe	Verwendungspotential															
	Gesteinskörnung für karbonat. Splittbeton	Gesteinskörnung für silikat. Splittbeton	Zuschlagsstoff für metallurg. Prozesse	Gesteinsmehle für die Landwirtschaft	Schmalzbasalt, Mineralfasern	Flussmittel	Filterstoff	Wasseraufbereitung	Zementrohstoff	Glasherstellung	Futtermittelindustrie	Chemische Industrie	Nahrungsmittelindustrie	Füllstoffe	Feuerfestindustrie	Farben- und Lackindustrie
Karbonate	x		x	x		x			x	x	x	x	x	x	x	x
Karbonat. Metamorphite	x		x	x					x	x	x	x	x	x	x	x
Silikatische Metamorphite		x		x					x							
basische Vulkanite				x	x	x	x	x								
saure Vulkanite				x		x			x	x						
Plutonite (Granite)		x														

Tab.1.2: Verwendungspotentiale von Festgesteinen (Sedimentgesteine in Gelb, Metamorphite in Orange, Magmatite in Rot). (LASSNIG & EBNER, 2010)

Lockergesteine wie Sande, Kiese können als Gesteinskörnungen für Beton verwendet werden. Mergel finden in der Zementherstellung und Ton sowie Silt in der Ziegelindustrie Anwendung. Reife Sedimente, wie zum Beispiel reine Quarzsande, werden in der Glasindustrie sowie als Gießereisand, Magerungsmittel oder Füllstoffe verwendet.

In Österreich häufig vorkommende Karbonatgesteine, wie Kalk und Dolomit (Nördliche Kalkalpen), können neben einer potentiellen Anwendung als Gesteinskörnung für Splittbeton vor allem industriell (siehe Tab.1.3 und 1.4) weiterverwendet werden. Der wesentliche Faktor für eine Anwendung von Karbonaten ist die geochemische Zusammensetzung des Ausgangsgesteins. LORENZ & GWOSDZ (2003) fassten die Anforderungen an Rohdolomit und Rohkalk für spezielle Industriezweige zusammen (Tab. 1.3 und Abb.1.4).

Anforderungen an Rohdolomit [M.-%]		CaO	MgO	SiO2	Fe2O3	Al2O3	MnO	SO3
Roheisenerzeugung		>28	>19	<4	<1,5			<0,1
Stahlerzeugung		>29	>19	<3	<0,8	<0,8		
Füllstoff	Farbenindustrie	>29	>20		<0,1	<0,1	Sp.	
	Kunststoff- und Gummiindustrie		>21	>0,6	<0,1			
Glasindustrie	Flachglas	>29,5	>21,4	>0,3	>0,25	<0,4		<0,2
	Hohlglas	>29,5	<21,4	<0,5	<0,1	<0,5		<0,2
	Glas-/Mineralfaserherstellung			0	<0,2			
Bauindustrie	Schotter, Split, Brechsand		15-20	0,5-4,5	1-2,5			
	Gleisschotter	<40	>10	0,5-4,5	1-2,5			
	Gesteinsmehl als Bergwerks-"Kalk"			<5				
Landwirtschaft		<23	>10-15		<0,3			
Seewasser-Magnesia-Herstellung		>29	>19	<0,5	<1	<0,2		

Tab.1.3: Industrielle Anforderungen an Rohdolomit (LORENZ & GWOSDZ, 2003)

Anforderungen an Rohkalkstein [M.-%]		CaO	MgO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	Na2O	K2O	SO3	P2O5	MnO
Flussmittel	Roheisen, Stahl, NE-Metalle	>50,4	<5	<1,5	<1	<2		<0,5	<0,05	<0,01	
	Glasherstellung	>55,2		<2	0,3-1	0,01-0,3		<0,05	<0,5	<0,05	<0,1
	Mineralwolle	>47,6			nicht zu hoch						
Füllstoffe	Farben, Dichtungsmassen	>55	<3	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	<0,2	<0,15	
	Gummi	>55,2		niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig			<0,03
	Kunststoff	<55,2		<1	niedrig	niedrig	<0,5	<0,5		0,15	<0,02
	Nahrungsmittel, Kosmetik, Zahnpasta	>54,9			niedrig						
	Papier	>52,1	<2	<2		<0,01					niedrig
	Tierfutter	>53,2-54,9		<3							
	Düngemittel	>39,3-50,4		<1							
Brantkalk		>53,2	<2		<0,9						
Carbidherstellung		>54,4-55,2	<0,5-2	<1,2	<0,75						<0,015
Zuckerherstellung		>55,2	<4	<1	<1,5		<0,05		<0,05		
Sodaherstellung		>50,4	<1,5-3	<3	<1,5		<0,05		<0,05		
Bleichpulver		>53,2	<2	<1,5	<0,3						
Keramik		>53,8	<0,5	<2	<0,3						<0,02
Rauchgasentschwefelung/Neutralisation von Abwässern		47,6-53,2	<5	<2	<1	1-<3			<0,02		
Filterbetten		>53,2		<1							
Landwirtschaft		>50,2	vorteilhaft	niedrig	<1	<1	<0,05				
Bergwerkskalkstein		>50,4	stört nicht	<3					<0,05		
Kalkammonsalpeter		>47,6	stört nicht	<10	stört nicht						
Portlandzement Deutschland		>42	<3	<15	<5	<4	<1		<0,5	<0,5	
Naturzement		28-55	3-32	16-35	2-20	1-8	1-7		0,5-3		

Tab.1.4: Industrielle Anforderungen an Rohkalk (LORENZ & GWOSDZ, 2003)

Tonige Sedimente, wie z.B. in Österreich im Wiener Becken, eignen sich als Rohstoff für die Ziegelindustrie, wobei hier neben den mineralogischen und chemischen Parametern vor allem die Korngrößenverteilung des Ausgangsmaterials eine wesentliche Rolle spielt. Das Winkler-Diagramm (Abb.1.2) liefert dabei die Verwendungsgrenzen von Tonen für keramische Zwecke (WINKLER, 1954). Die Wienerberger Ziegelindustrie GmbH wurde im Zuge des FFG-Forschungsprojektes beauftragt tonige Proben, aus Kernbohrungen der geplanten U1 Verlängerung von Reumannplatz nach Rothneusiedl der Wiener Linien GmbH, auf ihre Eignung als Ziegelton zu untersuchen (WIENERBERGER, 2012). Das Ergebnis weist darauf hin, dass das übermittelte Bohrkernmaterial gut für die Produktion von Hintermauerware geeignet ist und mit Haldenton, der sich im Einsatz befindet, vergleichbar ist.

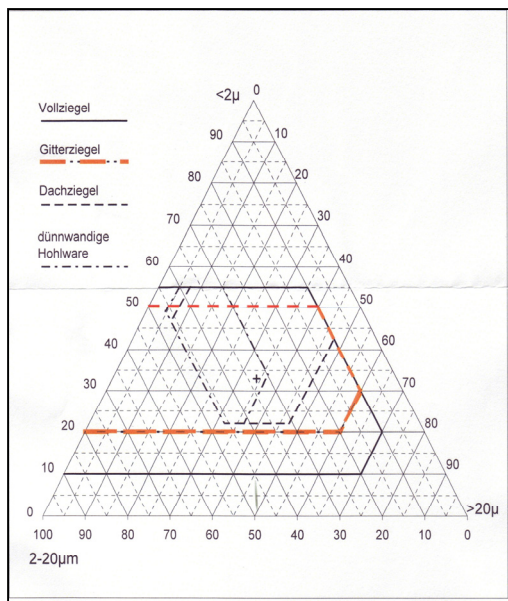


Abb.1.2: Winkler Korngrößendiagramm zur Eignung von Tonen für keramische Zwecke (nach WINKLER, 1954).

Anforderungen an Karbonatgesteine und Ziegeltone für eine mögliche Verwendung werden folglich von der Industrie vorgegeben. Anforderungen an Sande und Kiese für eine Verwendung als Gesteinskörnung für Beton (ÖNORM EN 12620:2008 09 01) sowie als Schüttmaterial im Verkehrswegebau (ÖNORM EN 13242:2008 03 01, RVS 08.15.01 2010) oder als Gleisschotter (ÖNORM EN 13450: 2004 11 01) sind in den staatlichen Normen vorgeschrieben.

Um jedoch eine Eignung des Gesteinsmaterials als Gesteinskörnung für Beton bereits in der Frühphase der Planung eines Untertageprojekts benennen zu können, sind geologische, chemische und geotechnische Untersuchungen an den Ausgangsgesteinen (z.B. an Bohrkernen aus der Planungsphase) nötig. Um die wichtigsten Lithologien der geologischen Großeinheiten in Österreich bestmöglich abzudecken, wurde versucht, aus diversen aktuellen und zukünftigen Baustellen, Material zu gewinnen und für diese Untersuchungen heranzuziehen. Tabelle 1.2 fasst die ausgewählten Lithologien und die ihnen zugeordneten geologischen Einheiten zusammen.

Lithologie	Geologische Einheit
Kalkglimmerschiefer	Tauernfenster
Augengneis	Tauernfenster
Biotit Plagioklas Gneis	Ötztal-Stubai-Kristallin
Hornblendegneis	Kristallin der Gleinalpe
Granitgneis	Kristallin der Gleinalpe
Raibler Dolomit	Raibler Schichten
Schiefergneis	Kristallin der Koralpe

Tab.1.2: Untersuchte Lithologien mit den zugeordneten geologischen Einheiten.

1.2 Randbedingungen der Verwendung

Eine detaillierte Beurteilung der Randbedingungen der Verwendung für Tunnelausbruchmaterial wird in der Dissertation meines Projektpartners Daniel Resch durchgeführt [RESCH, 2012].

Im Wesentlichen ist die Verwendung von vier Hauptfaktoren abhängig. Einerseits geologische und technische Bedingungen sowie andererseits von rechtlichen und wirtschaftlichen Überlegungen. Vorerst muss die Qualität, charakterisiert durch die geologischen und geotechnischen Eigenschaften, für die jeweilige Verwendung ausreichend sein. Anschließend spielen technische Faktoren wie die Lösemethode (NATM oder TBM Vortrieb) sowie die Aufbereitungsmethode eine große Rolle. Als wesentlicher Faktor fungiert der Bedarf im Umkreis der Baustelle bzw. auf der Baustelle selbst. JODL & RESCH (2011) fassen die Rahmenbedingungen in Abbildung 1.2 zusammen.

Während RESCH (2012) in seiner Dissertation rechtliche und baubetriebliche Rahmenbedingungen stark beleuchtet hat, fokussiert sich diese Dissertation auf die geologischen und geotechnischen Einflussparameter auf das anfallende Gesteinsmaterial. Zusätzlich nimmt der Aspekt der Lösemethode einen großen Teil dieser Arbeit ein.

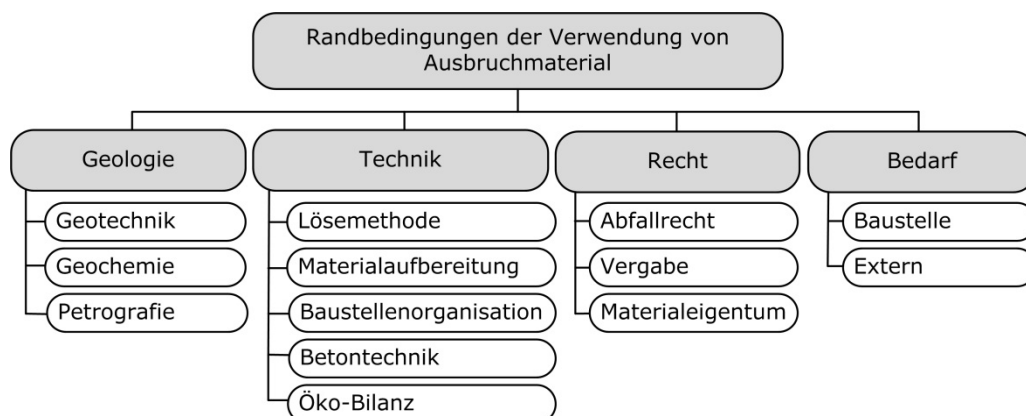


Abb.1.2: Randbedingungen der Verwendung von Tunnelausbruchmaterial (JODL & RESCH, 2012)

Die geologischen und technischen Einflussparameter auf anfallendes Ausbruchmaterial werden in dieser Arbeit näher betrachtet. Im speziellen werden mineralogische, geologische und geotechnische Parameter an Gesteinsproben, welche bereits in der Planungsphase eines Untertagebauwerks anfallen, in Bezug auf ihre Eignung als Gesteinskörnung für Beton untersucht. Mittels Dünnschliffmikroskopie, geotechnischen Druck- und Zugversuchen, Abrasivitätsversuchen, seismischen Untersuchungen und geochemischen Analysen wurden die ausgewählten alpinen Lithologien vollständig untersucht. Ferner wurden diese Gesteine großmaßstäblich aufbereitet (> 30 to/Lithologie bei Deisl Beton GmbH, Sulzau), klassiert und als

Gesteinskörnung für verschiedene Tunnelbaubetone verwendet. Die Erfahrungen bei der Betonherstellung und die Ergebnisse beim Prüfen der Betonkörper wurden den geologisch-geotechnischen Parametern gegenübergestellt um Einflussfaktoren der Geologie auf die Eignung der Lithologien als Gesteinskörnung für Beton bestimmen zu können.

Zusätzlich spielen die Korngrößenverteilung und die Kornform eine wesentliche Rolle für die Verwendung von Ausbruchmaterial. Hier ist zwischen den Lösemethoden im konventionellen und im maschinellen Tunnelbau zu unterscheiden. Während im zyklischen Vortrieb größtenteils grobblockiges Material anfällt, ist der Gesteinsanfall beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb, neben geologischen Faktoren, maßgeblich abhängig vom Design des Bohrkopfes und der Bestückung dieses mit Diskenmeißel.

An den Lithologien wurden Schneidversuche an Linearschneidprüfständen durchgeführt um die Einflüsse der Ausbildung des Gesteinsgefüges, der Penetrationstiefe und des Schneidspurabstands auf das Ausbruchmaterial verstehen zu können. Ein größerer Schneidspurabstand und tiefere Penetration sollten zu einer gröberen Sieblinie führen. Der Einfluss der Gefügeorientierung sollte maßgeblich für die Rissentwicklung und das Löseverhalten des Gesteins sein. Um diese Annahmen zu überprüfen bzw. zu verifizieren wurde ein detailliertes Schneidprogramm ausgearbeitet, bei dem die verschiedenen Einflussparameter variiert bzw. konstant gehalten wurden.

Um die Fortpflanzung der Risse im Gestein besser zu verstehen und in Zukunft das Bohrkopfdesign an Tunnelbohrmaschinen besser an die jeweilige Lithologie anpassen zu können, wurden zusätzlich Untersuchungen der Mikrorisse der am Linearschneidprüfstand geschnittenen Gesteine durchgeführt. Dazu wurden die Probekörper in fluoreszierendem Harz gebettet und makro- sowie mikroskopisch untersucht.

2 Geologischer Rahmen der untersuchten Lithologien

Mit der Auswahl der untersuchten Lithologien wurde versucht einige der wichtigsten Lithologien der geologischen Großeinheiten Österreichs zu erfassen. Durch die geplanten Tunnelbaustellen war die Anzahl der Lithologien limitiert. Alle Untersuchungen, die in dieser Dissertation durchgeführt wurden, erfolgten an Proben der in diesem Kapitel beschriebenen Lithologien. Die Auswahl der Gesteine konzentriert sich im Wesentlichen auf das Tauernfenster und Oberostalpine Einheiten. Während der Kalkglimmerschiefer dem Penninikum und der Augengneis dem Sub-Penninikum zuzuordnen ist, lassen sich der Biotit Plagioklas Gneis, der Hornblendegneis, der Granitgneis, der Schiefergneis und der Raibler Dolomit in den Oberostalpinen Deckenstapel eingliedern. Abbildung 1.3 zeigt die Lage der Probenahmepunkte in der geologischen Übersichtskarte von Österreich.

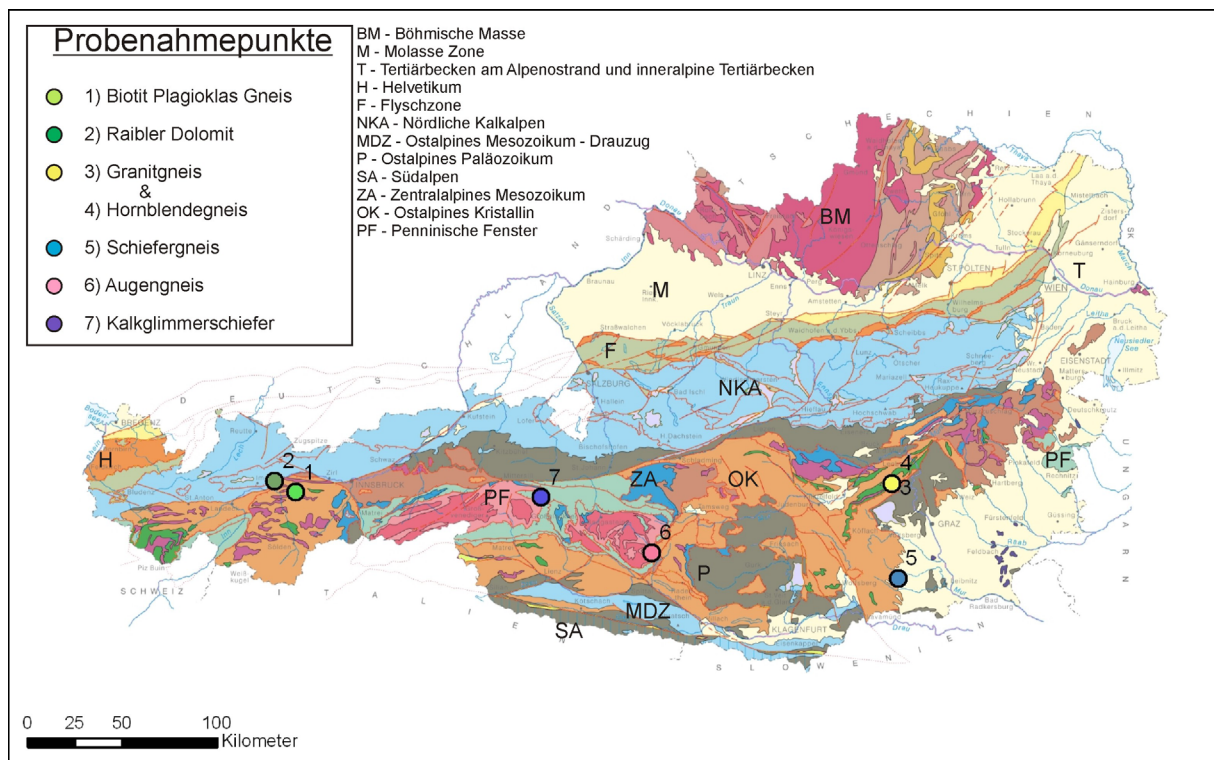


Abb.1.3: Lage der Probenahmepunkte in der Geologischen Übersichtskarte der Republik Österreich (modifiziert nach: GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, 1999)

2.1 Tauernfenster

Die Österreichischen penninischen Einheiten treten im Tauern-, im Engadiner und im Rechnitzer Fenster zu Tage. Das Tauernfenster lässt sich in tiefer liegende Subpenninische Decken (inkl. Venediger Deckensystem (STAUB, 1924; FRISCH, 1976 & 1977)) und in das penninische Deckensystem unterteilen (MILNES, 1974; SCHMID et al., 2004). Im Gegensatz zum ozeanischen Penninikum enthält das Sub-Penninikum auch Anteile an variszisch geprägter kontinentaler

Kruste. Der Ablagerungsraum des Penninikums bildete sich in der Jura- und Kreidezeit, in dem bis ins Eozän Sedimente abgelagert wurden. Die über dem Subpenninikum lagernden ozeanischen, penninischen Decken unterteilen sich im Tauernfenster in das liegende Glockner Deckensystem (STAUB, 1924) und das Deckensystem der Matreier Zone - Nordrahmenzone (SCHUSTER et al., 2006).

Im Venediger Deckensystem werden prävariszische Gesteinskomplexe, variszische Intrusivgesteine (Zentralgneis) und postvariszische Metasedimente unterschieden. Die prävariszischen Gesteinskomplexe liegen hochgradig metamorph vor. Die plutonischen Edukte der heutigen Zentralgneise intrudierten nach CLIFF (1981) vor rund 310 – 320 Millionen Jahren. Im Zuge der alpinen Orogenese wurden die genannten Gesteinseinheiten zu Deckensystemen umgeformt und über benachbarte Formationen geschoben.

Generell lässt sich das über dem Subpenninikum liegende penninische Deckensystem in untere-, mittlere und obere Decken unterteilen. Die unteren penninischen Decken umfassen Teile der Rhenodanubischen Flyschzone, geringe Teile des Engadiner Fensters, die Glockner Decke sowie einen großen Teil des Rechnitzer Fensters. Die mittleren penninischen Decken zeigen nach FROITZHEIM et al. (2008) keine druckbetonte Metamorphose und Enden in den Ostalpen im Schweizer Anteil des Unterengadiner Fensters. Die oberen penninischen Decken entstanden während der Schließung des Piemont-Ligurischen Ozeans in der mittleren Oberkreide bis ins Eozän. Dabei wurde der größte Teil der ozeanischen Kruste subduziert und die penninischen Einheiten von Ostalpinen Decken überschoben (FROITZHEIM et al., 2008). Die oberen penninischen Decken lassen sich in die Ybbsitzer und St. Veiter Klippenzone sowie in die Matreier Schuppenzone – Nordrahmenzone unterteilen.

2.1.1 Kalkglimmerschiefer

Die Probenahme des Kalkglimmerschiefers erfolgte im Tauernfenster nahe Kaprun/Zell am See. Dies liegt in der Glockner-Decke (in der älteren Literatur als Obere Schieferhülle zusammengefasst; nach TOLLMANN 1977) welche Metabasite und kretazische Metasedimente (sogenannte Bündnerschiefer) umfasst und das Subpenninische Venediger-Deckensystem überlagert. Das gesamte, von einer älteren Subduktionsmetamorphose geprägten, Deckensystem wird im Oligozän von einer grünschiefer- bis amphibolitfaziellen Metamorphose (Tauernkristallisation) überprägt (PESTAL & HELLERSCHMIDT-ALBER, 2011). Der dort auftretende Kalkglimmerschiefer ist hauptsächlich aus Calcitmineralen, Muskoviten und Quarz aufgebaut. Im Kalkglimmerschiefer sind dunkle Glimmerschiefer bis Phyllite sowie Marmore und Prasinite eingeschalten.

In SCHUSTER et al. (2006) sind die Kalkglimmerschiefer der Glockner-Decke als grauweiße-graublaue Gesteine mit einem Mineralbestand aus Calcit, Glimmer (Phengit, Paragonit und Margarit) und Quarz beschrieben, wobei der Quarzgehalt in stark variablen Prozentsätzen auftritt. KOLLER (1985) untersuchte die Geochemie die Kalkglimmerschiefer der penninischen Einheiten im Rechnitzer Fenster. Die SiO₂-Gehalte schwanken zwischen 7 und 15 Gew. %, die CaO-Gehalte liegen zwischen 44 und 48 Gew. %, Al₂O₃ bei 2 – 4,5 Gew. % und Fe_{Total} zwischen 1 und 2 Gew. %.

2.1.2 Augengneis

Die Probenahme erfolgte im Steinbruch Gigler GmbH im Maltatal. Der dort vorliegende Augengneis ist in das subpenninische Venediger-Deckensystem einzuordnen. Das Venediger-Deckensystem beinhaltet prävariszische Gesteinskomplexe, variszische Intrusiva und postvariszische Metasedimente. Der Augengneis (Zentralgneis) stammt aus dem Granitoid des Hochalmkerns (variszische Intrusion), welcher nach CLIFF (1981) vor rund 310 – 320 Ma in den Reißbeck-Komplex (prävariszisch) intrudierte. Dieser Intrusionskörper wurde durch die Tauernkristallisation im Oligozän Grünschiefer- Amphibolitfazial gekennzeichnet (PESTAL et al., 2009). Der Hauptmineralbestand des Augengneises ist Quarz, Feldspat als Augen und Biotit. Im Bereich des Hochalmkern-Granitoids kommen zusätzlich zum Augengneis noch Bändergneise und Granitgneise vor.

Der Augengneis wird als stark tektonisch überprägter, mittel-grobkörniger Biotitgranitgneis mit Augentextur beschrieben (SCHUSTER et al., 2006). CLIFF et al. (1971) berichten über graduelle Übergänge der biotitreichen Augengneise in porphyrische Granitgneise. Die Hauptgemengteile des Augengneises nach SCHUSTER et al. (2006) sind Kalifeldspat, Quarz, Plagioklas (Albit), Biotit und seltener Muskovit. Zusätzlich kommen Titanit, Klinozoisit, Orthit mit Klinozoisitrand, Chlorit (sekundär aus Biotit), Apatit, Zirkon und Karbonat akzessorisch vor. MARSHALLINGER & HOLUB (1989) beschreiben die Zentralgneise als intermediäre bis saure Gesteine (SiO₂ ca. 61 - 76 %) mit hohen Gehalten an Al₂O₃ (14 – 18 %) und hohen Na₂O Werten (2 - 5 %).

2.2 Oberostalpin

Das in Österreich vorkommende Ostalpin lässt sich in ein Unterostalpin und in höhere Oberostalpine Deckeneinheiten untergliedern (SCHMID et al., 2004). Eine alternative Einteilung der ostalpinen Deckeneinheiten in Ober-, Mittel- und Unterostalpin geht auf TOLLMANN (1977) zurück. Die Unterteilung des Unterostalpins erfolgt in die tiefste ostalpine Einheit das Err-Bernina-Deckensystem (nicht in Österreich), dem nördlichen Rahmen des Tauernfensters das Radstadt-Deckensystem, das die Rechnitzer Fenstergruppe überlagernde Semmering-Wechsel-Deckensystem sowie in die Subsylvrettiden Schollen im Rahmen des Engadiner Fensters.

Das Oberostalpin besteht aus kristallinem Basement sowie teils aus paläozoischen und mesozoischen (Meta-)Sedimenten. Es wird grob in die Nördlichen Kalkalpen, die Grauwackenzone, das Silvretta-Seckau-Deckensystem, das Koralpe-Wölz-Deckensystem, das Ötztal-Bundschuh-Deckensystem und das Drauzug-Gurktal-Deckensystem (inkl. Grazer Paläozoikum) untergliedert.

Die Nördlichen Kalkalpen (NKA) gliedern sich in das Juvavische-, das Tirolische und in das Bajuvarische Deckensystem. Nach TOLLMANN (1977) wurden die Sedimentgesteine der NKA ab dem Perm auf kontinentaler Kruste des Großkontinentes Pangäa, im Randbereich des Tethys Ozeans, abgelagert und umfassen karbonatische und siliziklastische Gesteine. Zusätzlich zu den drei erwähnten Decken kam es in der Unterkreide zu einem eigenen Sedimentationszyklus, der Gosau Gruppe in den NKA (WAGREICH & FAUPL, 1994).

Die Oberostalpine Grauwackenzone wird nach NEUBAUER et al. (1994) von vier Decken aufgebaut. Vom Liegenden ins Hangende die Veitscher-, die Silbersberg-, die Kaintaleck- und die Norische Decke. Das tektonisch tiefste Glied im Oberostalpin bildet das Silvretta-Seckau-Deckensystem, das im Norden von der Grauwackenzone und im Süden vom Koralpe-Wölz-Deckensystem überlagert wird (SCHMID et al., 2004).

Das Silvretta-Seckau-Deckensystem weist, neben Ortho- und Paragneisen, Glimmerschiefern und Marmoren, Amphibolite sowie Bänderamphibolite in größeren zusammenhängenden Vorkommen auf. Dazu kommen Metagabbros und serpentinierte Ultrabasite (NEUBAUER, 1988; NEUBAUER & FRISCH, 1993). Die eoalpine Metamorphose führte zu Temperaturen von $< 300\text{ C}^\circ$ im Westen des Deckensystems und bis zu amphibolitfaziellen Bedingungen im Osten, im Bereich der Seckauer Tauern und der Gleinalpe (OBERHÄNSLI (Ed.), 2004).

Das Koralpe-Wölz-Deckensystem zeigt zum großen Teil ein permisches Metamorphoseereignis und intensive eoalpidische Strukturprägung. Nach HOINKES et al. (1999) ist das Zentrum des Deckensystems durch eklogitfazielle Metamorphosebedingungen gekennzeichnet. An Lithologien treten Plattengneise, Eklogite, Glimmerschiefer, Schiefergneise, Grob- und Feinkorngneise sowie Marmore auf.

Im Hangenden des Koralpe-Wölz-Deckensystems befindet sich das Ötztal-Bundschuh-Deckensystem. Dieses umfasst nach SCHMID et al. (2004) die Ötztal Decke im Westen und die Bundschuh Decke im Osten des Tauernfensters. Beide Decken bestehen aus kristallinem Basement und transgressiv darüberliegenden permomesozoischen Metasedimenten (TOLLMANN, 1977). An Lithologien treten verschiedenste Gneisvarietäten (Biotit Plagioklas Gneis, Augengneis, Granodioritgneis, Granitgneis) sowie Hell- und Dunkelglimmerschiefer und Migmatite auf.

Hangend des Ötztal-Bundschuh-Deckensystems liegt das Drauzug-Gurktal-Deckensystem. Diese Einheit stellt das tektonisch höchste Deckensystem dar und ist aus Kristallingesteinen und paläozoischen Metasedimenten aufgebaut. Die vorkommenden Gesteinsarten umfassen unter

anderem Quarzite, Glimmerschiefer, Granat-Amphibolite, Kalk- und Dolomitmarmore sowie Chloritphyllite und Grünschiefer.

2.2.1 Biotit Plagioklas Gneis

Die Proben wurden in der, östlich des Tauernfensters aufgeschlossenen, Ötztal-Decke entnommen. Die Ötztal-Decke befindet sich innerhalb des Ötztal-Bundschuh-Deckenkomplexes, welcher in kristallines Basement (Ötztal-Stubai-Komplex) und transgressiv auflagernde permomesozoische Metasedimente (Brenner-Mesozoikum) zu teilen ist (nach FROITZHEIM et al., 2008). Nach FRISCH et al. (1998) zeigen die Gesteine nur bereichsweise eine penetrative alpidische Deformation und beide Decken standen vor der Öffnung des Tauernfensters in Zusammenhang.

Der Biotit Plagioklas Gneis entstammt dem Ötztal-Stubai-Komplex und weist als Hauptmineralbestand Quarz, Feldspäte und Biotit auf. Durch retrograde Metamorphoseprozesse sind die Feldspäte bereichsweise stark serizitisiert und saussuritisiert.

Der Biotit Plagioklas Gneis wurde als fein- mittelkörniges Gestein mit hohem Plagioklasanteil sowie Quarz und Biotit charakterisiert (TIWAG AG, 2009). Das Gestein zeigt fließende Übergänge zu anderen Gneisvarietäten. Quarzgehalte zwischen 15 und 74 % (Arithm. Mittelwert 38 %), Feldspatgehalte zwischen 0 und 65 % (Arithm. Mittelwert 28 %) sowie Glimmergehalte zwischen 2 und 53 % (Arithm. Mittelwert 29 %) wurden im Rahmen der mineralogischen Untersuchungen an 79 Proben ermittelt.

Untersuchungen von SÖLLNER & HANSEN (1987) am Biotit Plagioklas Gneis verdeutlichen, dass der Anteil von Plagioklas den Anteil von Quarz deutlich übersteigt. Die Plagioklase sind stark saussuritisiert und serizitisiert sowie meist nach dem Albitgesetz verzwillingt. Biotit folgt meist streng der Schieferung.

2.2.2 Hornblendegneis

Der Hornblendegneis stammt aus dem Steinbruch Humpelgraben auf der Gleinalpe (DI Martin Lang ZT GmbH). Geologisch liegt der Hornblendegneis im Silvretta-Seckau-Deckensystem, der tektonisch tiefsten Einheit innerhalb des Oberostalpins (SCHMID et al., 2004). Innerhalb des Deckensystems kommt ein tieferer Anteil aus Para- und Orthogneisen (Amering Serie) und ein höherer Anteil aus Hornblendegneisen und Amphiboliten (Gleinalm Kernserie und Speik Serie) vor (GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, 2005). Der im Humpelgraben vorkommende Hornblendegneis ist dem Gneis Komplex der Amering Serie zuzuordnen und besteht im Wesentlichen aus Amphibolen, Feldspäten, Quarz, Chlorit sowie Zoisit/Epidot. FRANK et al. (1976) haben aus den Gesteinen der Gleinalm Kernserie eine Rb/Sr Gesamtgesteinsisochrone ermittelt, welche ein Alter von 500 +/- 45 Ma ergab und diesen Wert als Bildungsalter einer ehemaligen

vulkanogenen Wechsellagerung aus basaltisch-gabbroiden bzw. dazitisch-quarzandesitischen Material interpretiert.

Der Hornblendegneis wird von STANGL (2007) als feinkörniger Amphibolit mit fließenden Übergängen zu Hornblendegneis beschrieben. Als Mineralbestand wird Quarz, Feldspat, Amphibol, Glimmer und Chlorit angegeben. Ergebnisse von geochemischen Untersuchungen an Bänderamphiboliten im Rachaugraben der Gleinalpe (TEICH, 1986) ergeben einen SiO_2 -Gehalt von rund 67 Gew. %, einen Al_2O_3 -Gehalt von rund 13 Gew. % sowie CaO- und Na_2O -Gehalte von rund 4 Gew. %.

2.2.3 Granitgneis

Analog zum Hornblendegneis stammt der Granitgneis aus dem Steinbruch Humpelgraben. Dieser ist innerhalb des Silvretta-Seckau-Deckensystems der Amering Serie zuzuordnen. Die Amering Serie befindet sich liegend der Speik Serie und umfasst Ortho- und Paragneise. Nach NEUBAUER (2002) sind die Orthogesteine im Zuge von Kollisions-, Subduktions- und Riftingprozessen, welche vom späten Proterozoikum bis ins Ordovizium aktiv waren, hervorgegangen. Der vorliegende Granitgneis besteht im Wesentlichen aus Quarz, Feldspat und Biotit.

Geochemische Untersuchungen von PROSSNIGG (1969) am Granitgneis des Humpelgrabens ergeben einen SiO_2 -Gehalt von rund 73 Gew. %, einen Al_2O_3 -Gehalt von rund 14 Gew.%, einen Na_2O -Gehalt von rund 3,5 Gew. % und einen K_2O -Gehalt von rund 5 Gew. %. STANGL (2007) beschreibt den Granitgneis im Humpelgraben als biotitführenden, fein- bis grobkörnigen Orthogneis. Der Biotitanteil liegt bei 5 %, der Feldspatgehalt wird hoch eingeschätzt (rund 60 %) und der Quarzgehalt liegt bei circa 30 %.

2.2.4 Schiefergneis

Der Schiefergneis stammt aus der Saualpe-Koralpe-Decke innerhalb des Koralpe-Wölz-Deckensystems. Nach HOINKES et al. (1999) ist das Zentrum des Koralpe-Wölz Deckensystems durch ein eoalpines eklogitfazielles Metamorphoseereignis definiert. Nach THÖNI (2006) formte sich der Deckenstapel erst nach dem Metamorphosehöhepunkt im Turonium (ab 93 Ma), da sowohl gegen das Liegende als auch gegen das Hangende der Metamorphosegrad abnimmt. Da dieses Deckensystem Eklogite enthält, müssen die Einheiten bis zur Peakmetamorphose im Verband mit einer subduzierenden Platte gewesen sein (FROITZHEIM et al., 2008).

PACHER & RIEPL (1978) führten chemische Analysen an 22 Glimmerschiefer/Schiefergneisen der Koralpe durch und berechneten damit die Mineralbestände. Als Mittelwerte werden angegeben: SiO_2 : 63 Gew. %, Al_2O_3 17,1 Gew. %, Fe_{Total} 7 Gew. %, K_2O 3 Gew. % und Na_2O 2 Gew. %. daraus resultiert ein berechneter Mineralbestand von 34 % Quarz, 17 % Feldspat, 16 % Muskovit, 15 % Biotit und 12 % Granat. Akzessorisch treten Kyanit, Ilmenit, Magnetit und Apatit auf. HERITSCH

(1978) verweist auf Entstehungsbedingungen der Glimmerschiefer/Schiefergneise um mindestens 560 °C und mehr als 0,5 GPa.

2.2.5 Raibler Dolomit

Der Raibler Dolomit befindet sich innerhalb der Raibler Schichten der Nördlichen Kalkalpen. Die Proben wurden im Kieswerk Berta Nagele GmbH entnommen, welches sich innerhalb des Tirolisch-Norischen Deckensystems in der Inntal Decke befindet. Die im Karn (Obertrias) abgelagerten Raibler Schichten befinden sich zwischen den Karbonatplattformen des Wettersteinkalkes und des Hauptdolomits. Die nordalpinen Raibler Schichten der Kalkalpen zeichnen sich nach JERZ (1966) durch verschiedene Sedimente (Schiefertone, Sandsteine, Mergel, Kalke, Rauwacken, Dolomite und Evaporite) aus. Nach JERZ (1966) bilden Karbonatgesteine den Hauptteil der Raibler Schichten. Die Dolomite beschreibt er als hellgrau bis gelblichgrau, pelitisch und arm an Fossilien. Stark bituminöse Dolomite treten im Schichtverband mit salinaren Gesteinen auf. Der untersuchte Raibler Dolomit ist von feinen Calcitadern durchzogen und weist punktuell organische Anteile auf.

3 Verwendung der Lithologien als Gesteinskörnung zur Betonherstellung

Als mengenmäßig der größte Anwendungsbereich von Tunnelausbruchmaterial stellt sich die Verwendung der Gesteine als Gesteinskörnungen für verschiedene Betonsorten heraus. Um etwaige Einflussfaktoren von geochemischen, geotechnischen oder mineralogischen Parametern auf die Eignung der Lithologien bestimmen zu können, wurde ein umfassendes Prüfprogramm erstellt, damit alle Gesteinsarten detailliert charakterisiert sind. Anschließend wurden mit den Gesteinen drei verschiedene Betonsorten hergestellt und die Betonparameter mit den Gesteinsparametern korreliert. Als Referenzmaterial wurde der Raibler Dolomit herangezogen, als metamorphe Lithologien wurden der Kalkglimmerschiefer, der Biotit Plagioklas Gneis, der Augengneis, der Hornblendegneis sowie der Granitgneis verwendet. Der Raibler Dolomit stellt ein hervorragendes Referenzmaterial dar, da Karbonatgesteine schon seit jeher als Gesteinskörnungen für Betonsorten dienen. In der Vergangenheit wurden schon mehrmals metamorphe Lithologien als Körnungen für Splittbeton herangezogen (z.B. Kalkglimmerschiefer für den Bau der Talsperren des Kraftwerks in Kaprun), jedoch gibt es bis dato keine genauen Anforderungen an die Lithologien für eine Weiterverwendung. HUBER (1971) erwähnte in seiner Dissertation, dass der Glimmergehalt der aufbereiteten Fraktionen einen wesentlichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit sowie auf die Festigkeiten des Betons hat. Auch THALMANN (1996) erwähnte einen Glimmergehalt von 30 % als Grenzwert für eine Weiterverwendung des Ausbruchmaterials als Betonzuschlag. Zusätzlich wurden von THALMANN (1996) minimale Gesteinsfestigkeiten von Körnungen mit 60 MPa für eine Verwendung als Beton mit der Festigkeitsklasse C20/25 bzw. 75 MPa für Beton mit der Festigkeitsklasse C30/37 angeführt. Um jedoch eine Eignung des Gesteinsmaterials als Gesteinskörnung bereits in der Planungsphase eines Untertageprojekts benennen zu können, sind geologische, chemische und geotechnische Untersuchungen an den Ausgangsgesteinen (z.B. an Bohrkernen aus der Planungsphase) nötig. In diesem Kapitel wird versucht, eine große Anzahl lithologischer Daten, angefangen von Geochemie über geotechnische Parameter bis hin zu mineralogischen Daten, mit den Ergebnissen der Betonversuche in Verbindung zu bringen, um eine Verwertbarkeit des Ausbruchmaterials als Gesteinskörnung bereits in einem frühen Projektstadium abschätzen zu können.

Der Einfluss der freien Glimmerminerale ist der einzige Parameter, welcher an der aufbereiteten Fraktion bestimmt wurde, da das Ziel der Untersuchungen die Verwertbarkeit anhand der Gesteins- und nicht der Gesteinskörnungseigenschaften ist. Anforderungen an die Gesteinskörnungen für Beton sind unter anderem in der ÖNORM EN 12620:2008 09 01

(Gesteinskörnungen für Beton) sowie in der ÖNORM B 3131:2012 08 01 - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620 beschrieben.

Um zu aussagekräftigen Ergebnissen bei den Betonversuchen zu gelangen, wurden für die Untersuchungen pro Lithologie über 30.000 kg Probenmaterial entnommen. Für das Brechen und Klassieren der Körner wurde eine großmaßstäbliche Aufbereitungsanlage (Deisl-Beton GmbH, Sulzau-Salzburg) verwendet, um realitätsnahe Versuche durchführen zu können.

3.1 Methodik

3.1.1 Ermittlung der Gesteinsparameter

Die in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Gesteinsparameter charakterisieren die untersuchten Lithologien anhand mineralogischer, geologischer, geochemischer und geotechnischer Parameter. Die Auswahl der Parameter wurde so gestaltet, dass möglichst viele Versuche, die standardmäßig in der Planung von Untertagebauwerken durchgeführt werden, ausgewählt wurden um, im Falle eines Einflusses eines Parameters auf die Eignung als Gesteinskörnung für Beton, in Zukunft keine oder nur wenige zusätzliche Gesteinsprüfungen in die ohnehin schon aufwändigen Planungsphasen zu integrieren.

3.1.1.1 Dünnschliffuntersuchungen

3.1.1.1.1 Modaler Mineralbestand

Die Bestimmung des modalen Mineralbestandes erfolgte am Polarisationsmikroskop an Dünnschliffen im Durchlicht. Mit Hilfe eines am Okular des Mikroskops befindlichen Rasters wurden in jedem Dünnschliff (4 Schlitze pro Lithologie) mindestens 300 Mineralkörner ausgezählt und anschließend daraus der modale Mineralbestand in Vol. % berechnet. Die Bestimmung erfolgte an Dünnschliffen, welche normal zur Schieferung und parallel zur Streckungslineation (XZ-Schnitt) liegen. Zusätzlich wurde die durchschnittliche Korngröße der Minerale bestimmt.

3.1.1.1.2 Stressgrad von Quarz

Anhand des Erscheinungsbildes von Quarzmineralen im Dünnschliff lassen sich Schlüsse über die tektonische Beanspruchung respektive die interne Deformation der Quarze ziehen (STIPP et al. 2002). Gestresste Quarze zeigen im Polarisationsmikroskop bei Durchlicht undulöses auslösen. Ungestresste respektive rekristallisierte Quarze löschen gerade aus und zeigen keine interne Deformation.

Der Quarzgehalt wurde prozentuell in gerade auslöschende Körner sowie in undulös bzw. gerade auslöschende Quarze unterteilt. FREYBURG & SCHLIFFKOWITZ (2006) erwähnten, dass tektonisch beanspruchte Quarze ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Alkali Kieselsäure Reaktionen (AKR) im Beton sind. Ähnlich der Ettringit- und Thaumasit Problematik, führt die AK-Reaktion zu einer Volumenzunahme und auf längere Sicht zu einer Schädigung des Betons. Aus diesem Grund wurden beim Auszählen der Quarze zwischen tektonisch gestressten Quarzen (undulös auslöschend) und unbeanspruchten bzw. rekristallisierten Quarzen unterschieden.

3.1.1.1.3 Glimmer-Gefüge Index

Nach BÜCHI (1984) haben Glimmerminerale einen dominierenden Einfluss auf die Brucheigenschaften eines Gesteines und fungieren als Schwächezonen. Um das Gefüge eines metamorphen Gesteins objektiv in Zahlen beschreiben zu können, wurde von BÜCHI (1984) der Glimmer-Gefüge-Index (GGI) vorgestellt. Der Grund für die Bestimmung des Glimmer-Gefüge-Index liegt in der Annahme, dass das Gesteinsgefüge einen Einfluss auf die anfallenden Kornformen des Tunnelausbruchs haben kann. Dieser Wert ist sehr einfach im Gesteinsdünnschliff zu bestimmen und setzt sich aus zwei Parametern zusammen. Einerseits aus der Bestimmung des Ausbildungsgrades (Durchgängigkeit) von Diskontinuitätsflächen und andererseits aus der Bestimmung der Mineraleinregelung. Beide Parameter werden mit Zahlen von 1 – 4 beschrieben und addiert. Der minimale Wert, welcher gleichzeitig ein isotropes Gefüge beschreibt, ist somit ein GGI von 2 und der höchste Wert, also maximale Anisotropie, ist somit ein GGI von 8.

Abbildung 3.1 zeigt das Bewertungschema für den Glimmer-Gefüge-Index nach BÜCHI (1984). Der GGI wurde an jeweils 3 Gesteinsdünnschliffen pro Lithologie bestimmt.

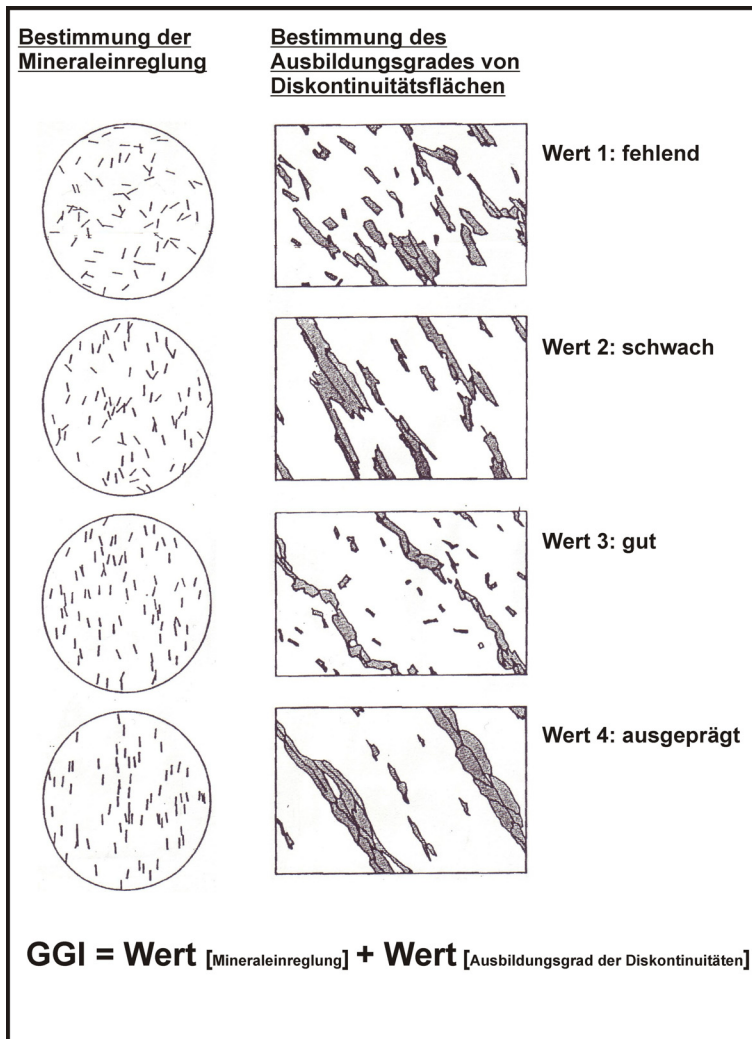


Abb.3.1: Bestimmungsschema des Glimmer-Gefüge-Index (modifiziert nach BÜCHI, 1984).

3.1.1.2 Geotechnische Parameter aus Druckversuchen

Die Festigkeit des Betons ist neben der Festigkeit des Bindemittels auch von der Festigkeit der Gesteinskörnung abhängig. Die Untersuchungen an Bohrkernen der alpinen Lithologien sollen erklären, ob die geotechnischen Parameter einen markanten Einfluss auf die Festigkeiten des Betons haben.

Es wurden uniaxiale Druckversuche (Elastizitätsmodul (E), Verformungsmodul (V), uniaxiale Druckfestigkeit (UCS) und Poisson Ratio (ν)), triaxiale Druckversuche (Reibungswinkel (φ) und Kohäsion (c)) sowie indirekte Spaltzugversuche (Spaltzugfestigkeit (SpZ)) an den alpinen Lithologien durchgeführt.

Zur Bestimmung des E- und V-Moduls wurden die Proben kraftgesteuert mit 1 kN/s belastet. Der Verformungsmodul (V) wurde zwischen Sigma_oben ~ 50 MPa und Sigma_unten ~ 5 MPa in der Erstbelastung bestimmt. Der Elastizitätsmodul (E) wurde zwischen Sigma_oben ~ 50 MPa

und $\sigma_{\text{unten}} \sim 5 \text{ MPa}$ an der Entlastung bestimmt. Anschließend wurde die Probe bis zum Bruch umfangsgesteuert mit $0,2 \text{ mm/min}$ belastet.

Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit erfolgte mit einer kraftgesteuerten Erstbelastung von $0,4 \text{ kN/s}$ und anschließender axial-weggesteuerten Belastung von $0,01 \text{ mm/s}$.

Beim Triaxialversuch wurde der Probekörper analog zum uniaxialen Versuch zuerst kraftgesteuert mit 1 kN/s belastet und anschließend umfangsgesteuert mit anfangs $0,01 \text{ mm/s}$ und darauffolgend mit $0,03 \text{ mm/s}$ bei verschiedenen Umschlingungsdrücken bis zum Versagen belastet. Die Umschlingungsdruckstufen zur Ermittlung der Mohr-Coulomb Parameter waren $1, 2, 4, 8, 16$ und 32 MPa .

Sowohl im uniaxialen- als auch im triaxialen Druckversuch wurde die umfangsgesteuerte Belastung gewählt, um eine deutlichere Brucherkenntnis gewährleisten zu können.

Pro Lithologie wurden zwei triaxiale, drei uniaxiale Druckversuche sowie drei Spaltzugversuche durchgeführt. Als Probekörper wurden zylindrische Bohrkern mit einem Längen/Durchmesser Verhältnis von $2:1$ verwendet ($\sim 10 \text{ cm}$ Länge; $\sim 5 \text{ cm}$ Durchmesser). Die Belastung erfolgte normal zur Gefügeorientierung.

Die Versuche wurden am Lehrstuhl für Subsurface Engineering an der servohydraulischen Gesteinsprüfanlage (MTS Modell 315) durchgeführt.

3.1.1.3 Abrasivität

Zusätzlich zu geotechnischen Druck- und Zugversuchen werden, in Rahmen der Planung eines Untertagebauwerks, Abrasivitätsuntersuchungen zur Bestimmung des Verschleißes von Vortriebswerkzeugen durchgeführt. Zusätzlich gibt die Abrasivität einen Rückschluss auf Quarzgehalt (WEST, 1989) bzw. äquivalenten Quarzgehalt und E-Modul eines Gesteins (PLINNINGER et al., 2009).

Die Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen erfolgt durch den Cerchar Abrasivitäts Indextest (CAI) nach den Vorgaben von CERCHAR (1986) bzw. einer französischen Norm (AFNOR, 2000). Bei diesem Versuch wird ein Stahlstift mit definierter Rockwellhärte ($54-56 \text{ HRC}$) bei konstanter Auflast von 70 N über eine Länge von 10 mm über den Gesteinsprüfkörper geritzt. Der Verschleiß der Stahlstiftspitze gibt Hinweis auf die Abrasivität des Gesteins. Das Klassifikationsschema nach CERCHAR (1986) ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Die Auswertung der Stahlstiftabnutzung wird unter dem Mikroskop vorgenommen. Aktuell werden für diese Analyse zwei verschiedene Geräte verwendet, zum einem das Cerchar-Gerät (CERCHAR, 1986) zum anderen das WEST-Gerät (WEST, 1989). Beim Cerchar-Gerät wird der Stahlstift über die Probe

geführt, beim Westgerät wird die Probe unter dem Stahlstift hinweg gezogen. Der Testapparat an der Montanuniversität entspricht einem West-Gerät.

Die Gesteinsoberfläche beim CAI Test soll laut den Prüfeempfehlungen „bruchrau“ sein. Aus diesem Grund wurden die Bruchhälften aus dem indirekten Spaltzugversuch (Brazilian Test) für die CAI Untersuchungen herangezogen. Von allen Lithologien wurden die drei Proben, an denen auch der Brazilian Test durchgeführt wurde, für die CAI Bestimmung verwendet. Die Prüfrichtungen waren normal und parallel zur Schieferung (RESCH, 2012).

CAI	Klassifikation
0,3-0,5	kaum abrasiv
0,5-1,0	schwach abrasiv
1,0-2,0	abrasiv
2,0-4,0	sehr abrasiv
4,0-6,0	extrem abrasiv

Tab.3.1: Cerchar Abrasivität Klassifikations Schema (CERCHAR, 1986)

3.1.1.4 Kompressionswellengeschwindigkeit

Die Primärwellengeschwindigkeit (p-Wellen) ist ein weiterer Parameter der im Zuge der geologisch-geotechnischen Planung eines Tunnelbauwerks verifiziert wird. SOMERTON et al. (1969) berichten, dass die Wellengeschwindigkeit als ein guter Indikator für die Bohrbarkeit eines Gesteins gilt. Zusätzlich erklärten HOWARTH et al. (1986) einen Trend zwischen der Kompressionswellengeschwindigkeit und der Penetrationsrate [mm/rev] im Tunnelvortrieb. Die Bestimmung der Kompressionswellengeschwindigkeit von Gesteinen gibt außerdem Rückschluss auf die elastischen Eigenschaften der gesteinsbildenden Minerale sowie deren Kontakt, Volumenanteil und Zementation.

Im Gegensatz zur geotechnischen Bestimmung elastischer Parameter im uniaxialen Druckversuch ist die Durchschallung ein zerstörungsfreies Prüfverfahren. Die Untersuchungen wurden im Petrophysiklabor des Lehrstuhls für Angewandte Geophysik der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Als Proben wurden Bohrkern mit einem Längen/Durchmesser Verhältnis von 2:1 verwendet, dieselben die anschließend für den Triaxialtest verwendet wurden. Pro Lithologie wurden zwei Ultraschallversuche durchgeführt.

Die Kompressionswellengeschwindigkeit (V_p) wird mit piezokeramischen Prüfköpfen der Karl Deutsch GmbH gemessen. Zwischen diesen Prüfköpfen wird die Probe mit einem Druck von 5 bar und Zugabe eines Kontaktgels eingespannt. Der mechanische Impuls (Frequenz 10 kHz, Amplitude 9 Volt) wird vom Sender in die Probe eingespeist und am Empfänger aufgenommen. Das ankommende Signal wird durch ein Speicheroszilloskop an den Rechner geleitet, an dem über Zeit und Länge der Probe die Kompressionswellengeschwindigkeit berechnet wird. Vor den

Einzelversuchen wird die Totzeit des Signals aufgenommen und anschließend V_p mit dieser korrigiert.

3.1.1.5 Geochemie

Grenzwerte für chemische Bestandteile in Beton sind in der ÖNORM EN 12620:2008 09 01 nur für Sulfat und Chlorid geregelt. Die Erfassung der vollständigen geochemischen Parameter ist kein definitiver Bestandteil in der Planung von Untertagebauwerken.

Zur Erfassung der Gesteinschemie wurden repräsentative Gesteinsproben gemahlen und mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) auf Haupt- und Spurenelemente untersucht. Die RFA liefert die Hauptelemente in Gew. % sowie die Spurenelemente in ppm. An jeder Lithologie wurden fünf Analysen bei ACTLABS – Activation Laboratories Ltd. in Ontario, Canada mit dem Analyseprogramm „4LITHO“ durchgeführt.

3.1.1.6 Schichtsilikatgehalt der Fraktion 125 – 250 μm

In der Dissertation von HUBER (1971) wurden die Auswirkungen von glimmerhältigen Gesteinskörnungen auf die Betoneigenschaften, im Zuge der Ausführung der Zerkraftwerke in Tirol, untersucht. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Hell- und Dunkelglimmer einen Einfluss auf die Druck- und Scherfestigkeiten, die Frostbeständigkeit sowie auf die Kernfeuchte der Gesteinskörnung haben und sich die Betoneigenschaften sowie die Verarbeitbarkeit des Betons mit steigendem Anteil negativ verändern.

Da jedoch gebundene Glimmer in Gesteinsbruchstücken nicht die gleiche Auswirkung auf den Beton haben wie freie Glimmer, wurde die Bestimmung des Schichtsilikatgehaltes nicht im Gesamtgestein sondern in der Fraktion 125-250 μm durchgeführt. In diesem Bereich erfolgt die Abtrennung plättchenförmiger Minerale von gedrunenen Körnern am Formtrenntisch am Besten und wurde in dieser Arbeit der Abtrennung durch Schwereflüssigkeit (giftig), Auszählen der Körner (zeitaufwändig) und Röntgendiffraktometrie (kostenintensiv) vorgezogen.

Zusätzlich ist diese Methode für eine permanente Qualitätskontrolle auf einer Baustelle leicht und schnell durchzuführen.

Der Formtrenntisch basiert auf der Funktion eines Rüttelherdes. Die stufenlos einstellbare Vibration des Tisches transportiert die plättchenförmigen Minerale (Schichtsilikate) über einen größeren Transportweg nach rechts, während die gedrunenen Körner durch die Schwingungen nicht so weit gefördert werden und in einem alternativen Behälter aufgefangen werden. Abbildung 3.2 illustriert die Funktionsweise und den Aufbau des Formtrenntisches am Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre.

Für die Untersuchungen wurden pro Lithologie vier Versuche durchgeführt. Tests mit unterschiedlichen Probenmassen (10 - 40 g) lieferten äquivalente und wiederholbare Ergebnisse. Als Probenmasse reichen demnach 10 g einer repräsentativen Probe aus.

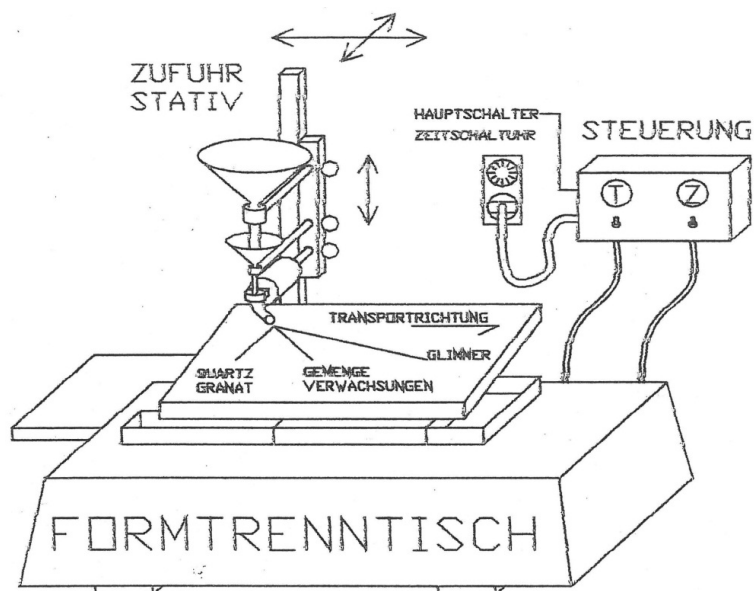


Abb.3.2: Aufbau und Funktionsweise des Formtrenntisches zur Bestimmung von Schichtsilikaten in Gew. %.
(Formtrenntisch - Hinweise zum Gebrauch, Fa. FARGON)

3.1.2 Ermittlung der Betonkennwerte

Im Rahmen des FFG Forschungsprojektes „Recycling von Tunnelausbruchmaterial“ wurden Betonproben mit den alpinen Lithologien hergestellt. Partner für die Herstellung der Betonproben waren die Materialversuchsanstalt Strass der Pöyry Infra GmbH, die Bautechnische Prüf- und Versuchsanstalt GmbH in Himberg, das Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie sowie die Arbeitsgemeinschaft Baustofftechnologie Entwicklung und Prüfung in Wien.

Um eine breitere Palette der im Untertagebau verwendeten Betonsorten abzudecken, wurden drei unterschiedliche Betonsorten (Innenschalenbeton, Tübbingbeton, Weiße Wanne Beton) hergestellt.

Die Betonsorten wurden, angelehnt an die Richtlinien der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (Richtlinie Innenschalenbeton (2003), Richtlinie Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen (2009), Richtlinie Tübbingsysteme aus Beton (2009)), hergestellt und nach ÖNORM B 4710-1:2007 10 01 respektive ONR 23303:2010 09 01 auf ihre Frisch- und Festbetoneigenschaften geprüft.

Untersuchte Parameter nach ÖNORM B 4710-1:2007 10 01 und ONR 23303:2010 09 01:

- Rohdichte Frischbeton
- Druckfestigkeit nach 28 und nach 56 Tagen
- Ausschalfestigkeit nach 12 Stunden
- Temperaturanstieg
- Angriff gegen Frost XF3
- Biegezugfestigkeit nach 56 Tagen
- Luftporenkennwerte L300 und AF
- Längenänderung
- Wassereindringtiefe
- Konsistenz

Zusätzlich wurden Schnelltests zur Bestimmung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität nach (ÖNORM B 3100: 2008 08 01) durchgeführt. Dabei werden drei prismatische (16 x 4 x 4 cm) Proben für 14 Tage in 1 molarer NaOH Lösung gelagert und anschließend die Längenänderung zwischen Tag 2 und Tag 14 der Proben dokumentiert. Bei einer Längenänderung > 1 ‰ ist die Gesteinskörnung als potentiell AK-Reaktiv einzustufen. Laut ÖNORM B 3100 ist in diesem Fall eine Langzeitprüfung (1 Jahr) durchzuführen. Die Ergebnisse der Langzeitprüfung liegen zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht vor.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Dünnschliffuntersuchungen

3.2.1.1 Modaler Mineralbestand

Die Abkürzungen der Mineralphasen beim Bestimmen des modalen Mineralbestands sowie in den Dünnschliffphotos sind im Folgenden erläutert:

- Qz: Quarz
- Fsp: Feldspat
- Cc: Calcit
- Ms: Muskovit
- Bt: Biotit
- Chl: Chlorit
- Zoi/Epi: Zoisit/Epidot
- Tit: Titanit
- Apa: Apatit
- Amph: Amphibol/Hornblende
- Grt: Granat
- Opak: opake Phasen (Sulfide und Oxide)

3.2.1.1.1 Kalkglimmerschiefer

Der Kalkglimmerschiefer weist eine ausgeprägte Schieferung anhand der Hellglimmerminerale auf. Der Hauptmineralbestand ist Calcit, Quarz, Muskovit und Chlorit. An Akzessorien treten Zoisit, Biotit, Titanit und opake Phasen (Pyrit und Pyrrhotin) auf. Die Calcite überwiegen prozentuell und weisen außerdem die größten Körner auf. Die Korngrößen der Calcite schwanken zwischen 0,5 und 1 mm, die Korngrößen der Quarze reichen von 0,1 bis 0,5 mm. Abbildung 3.3 zeigt den Kalkglimmerschiefer als Handstück sowie, an zwei Beispielen, unter gekreuzten Nicols im Polarisationsmikroskop.

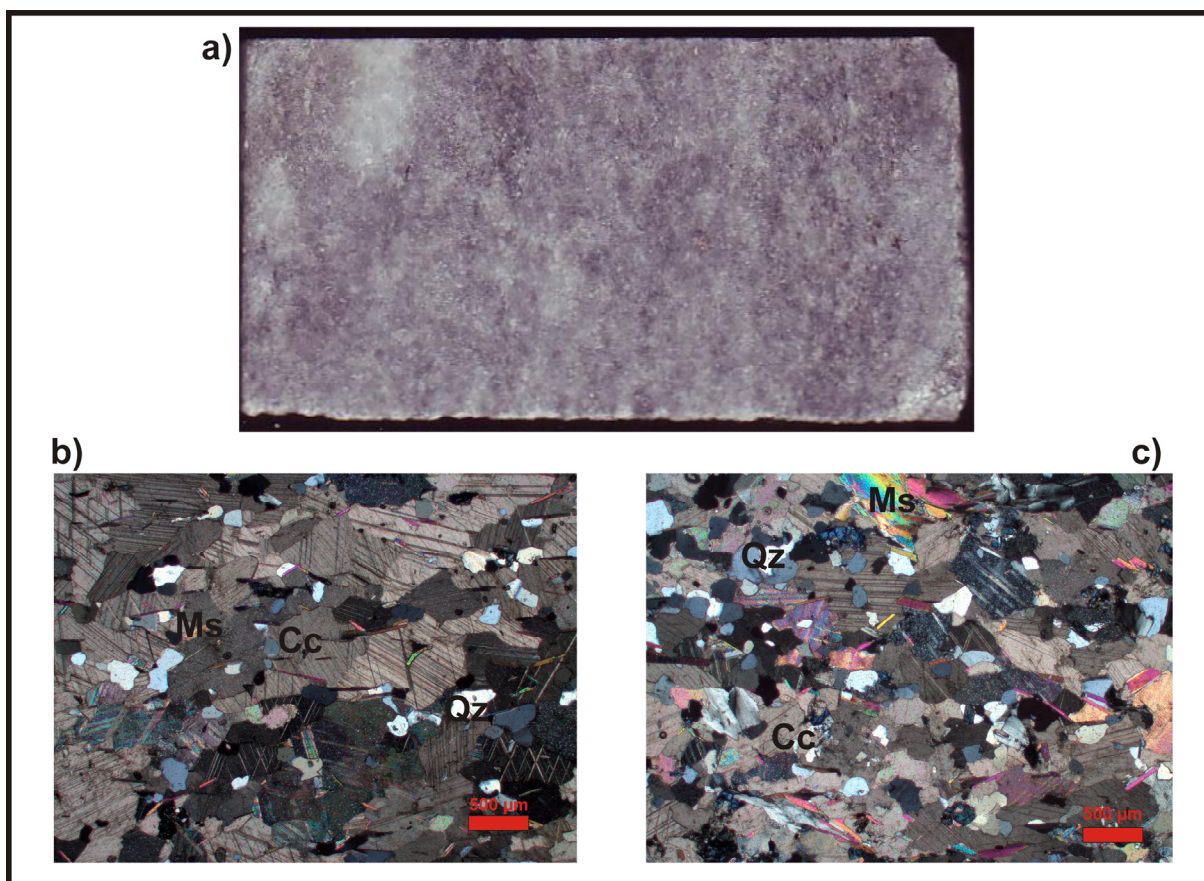


Abbildung 3.3: Kalkglimmerschiefer a) Handstück 5 cm Länge. b + c) Dünnschliffphoto unter gekreuzten Nicols.

Der modale Mineralbestand ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Den größten modalen Anteil mit über 70 Vol. % weist der Calcit auf. Minerale mit einem modalen Mineralbestand < 1 % sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

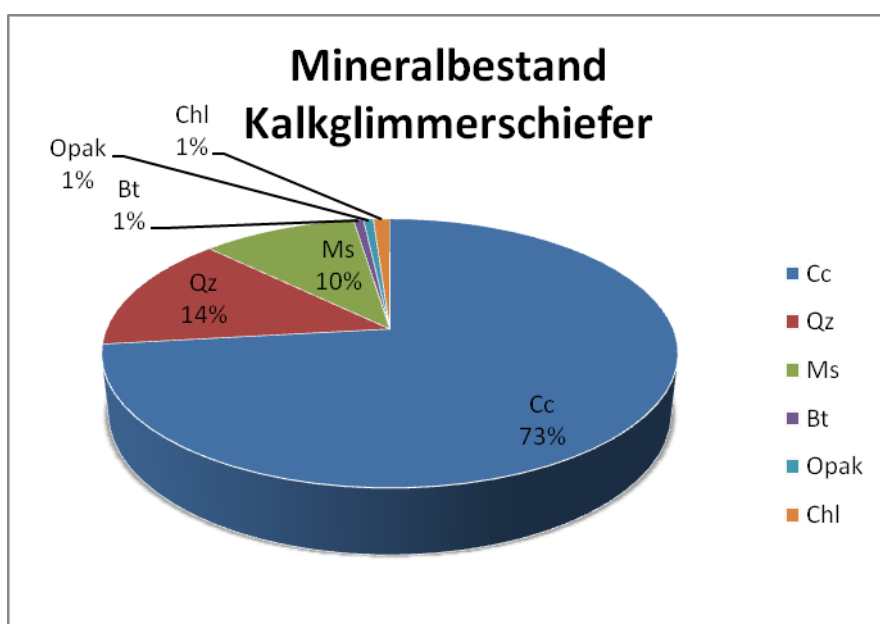


Abb. 3.4: Modaler Mineralbestand Kalkglimmerschiefer.

3.2.1.1.2 Augengneis

Der Augengneis ist ein geschiefertes Gestein mit einem hohen Anteil an Quarz und großen Feldspatkristallen (Augen). Der Hauptmineralbestand ist Quarz, Feldspat und Biotit. Zusätzlich kommen Chlorit, Epidot/Zoisit, Apatit, und Titanit akzessorisch vor. Myrmekitische Verwachsungen von Quarz und Feldspat sowie Feldspatverzwillingung sind präsent. Die Mineralkörner zeigen suturierte Korngrenzen und sind, infolge dessen, deutlich miteinander verzahnt. Feldspat bildet die größten Körner mit bis zu mehreren Millimetern Durchmesser. Einzelne Quarze und Biotite schwanken in der Korngröße zwischen 0,2 und 1 mm. Abbildung 3.5 zeigt den Augengneis als Handstück sowie, anhand von zwei Beispielen, unter gekreuzten Nicols im Polarisationsmikroskop.

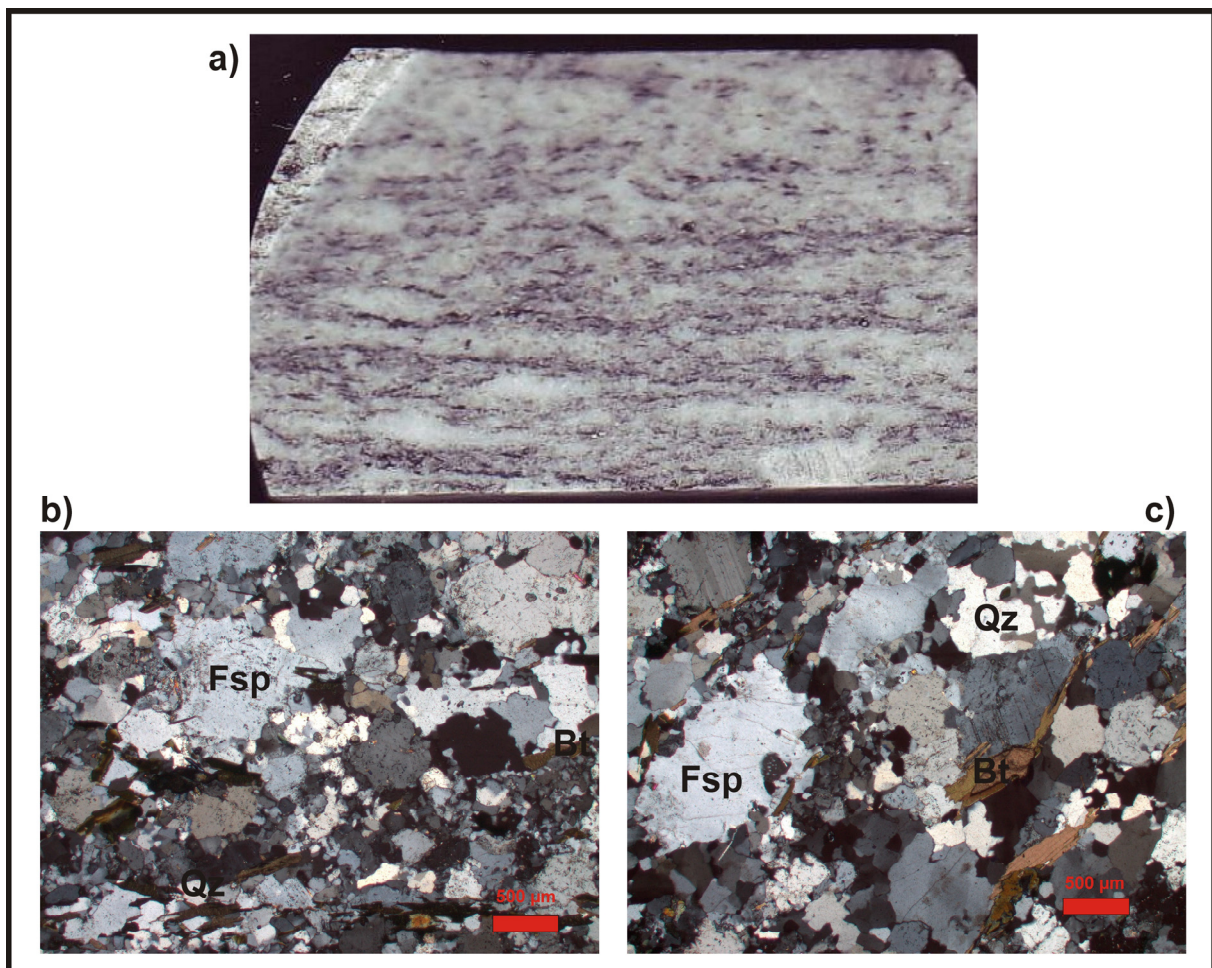


Abbildung 3.5: Augengneis a) Handstück 5cm Länge. b + c) Dünnschliffphoto unter gekreuzten Nicols

Der modale Mineralbestand des Augengneises ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Minerale mit einem modalen Mineralbestand < 1 % sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

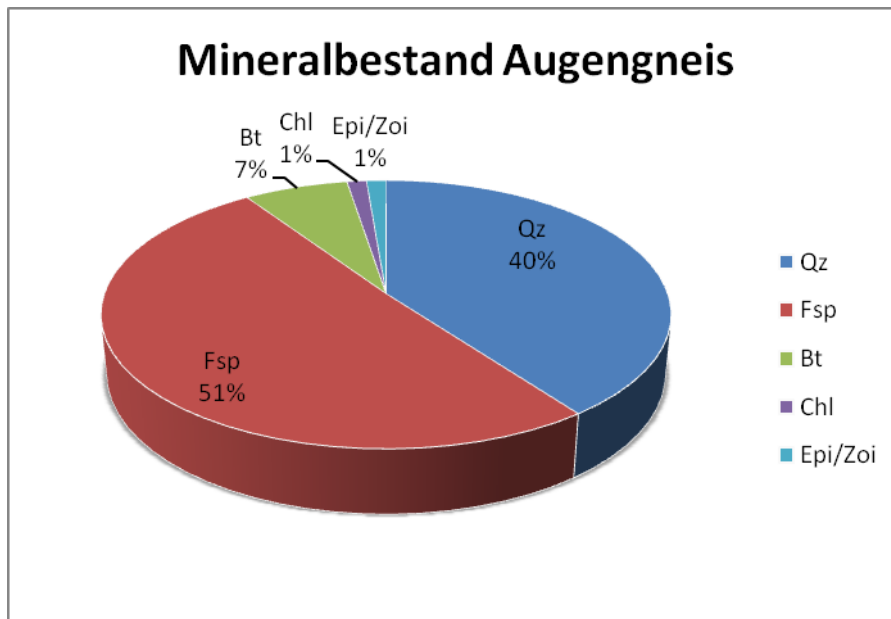


Abb. 3.6: Modaler Mineralbestand Augengneis.

3.2.1.1.3 Hornblendegneis

Der Hornblendegneis aus dem Humpelgraben ist ein feinkörniges, stark geschiefertes Gestein. Die grünen Amphibolminerale zeigen sich für die Ausprägung der Schieferung verantwortlich. Der Hauptmineralbestand ist Quarz, Amphibol, und Feldspat. Bereichsweise kommen Zoisit/Epidot, Chlorit und Granat häufig vor. Akzessorisch treten außerdem Biotit, Hämatit und opake Phasen (vermutlich Magnetit und Ilmenit) auf. Dieses Gestein wurde von STANGL (2007) als Amphibolit beschrieben. Aufgrund des Quarzgehaltes ist das Gestein korrekterweise als Hornblende- bzw. Amphibolgneis anzusprechen. Selten tritt eine Serizitisierung der Feldspäte auf. Die Korngrößen der einzelnen Minerale schwanken zwischen $< 0,1$ bis ca. $0,7$ mm. Die meisten Mineralkörner (Quarz und Amphibol) sind in Schieferungsrichtung stark gelängt. Der Quarz zeigt zusätzlich häufig eine bevorzugte kristallographische Orientierung in Schieferungsrichtung (Bestimmung mit Gipsplättchen). Abbildung 3.7 zeigt den Hornblendegneis als Handstück sowie, anhand von drei Beispielen, unter dem Polarisationsmikroskop mit parallelen und gekreuzten Nicols.

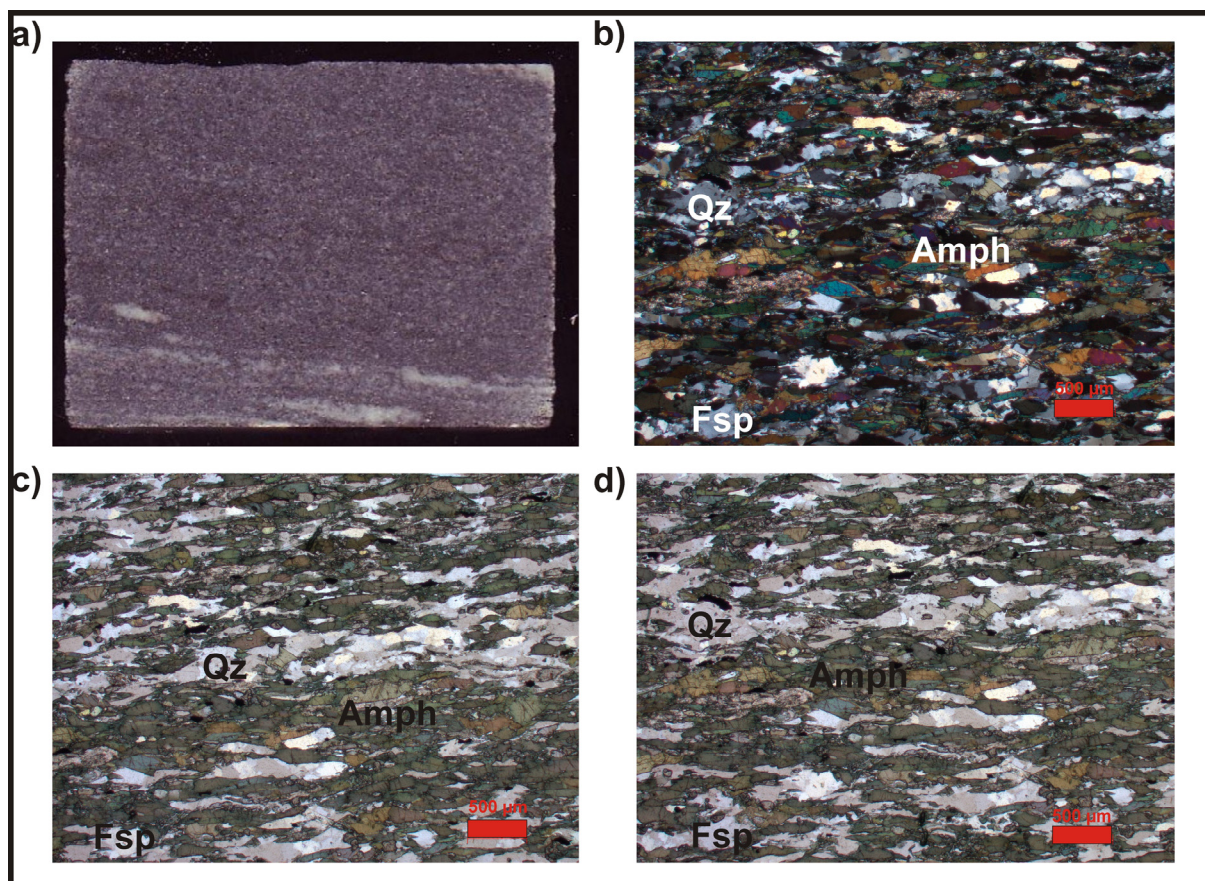


Abbildung 3.7: Hornblendegneis a) Handstück 5cm Länge. b) Dünnschliffphoto unter gekreuzten Nicols. c + d) Dünnschliffphoto unter parallelen Nicols.

Der modale Mineralbestand des Hornblendegneises ist in Abbildung 3.8 illustriert. Minerale mit einem modalen Mineralbestand < 1 % sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

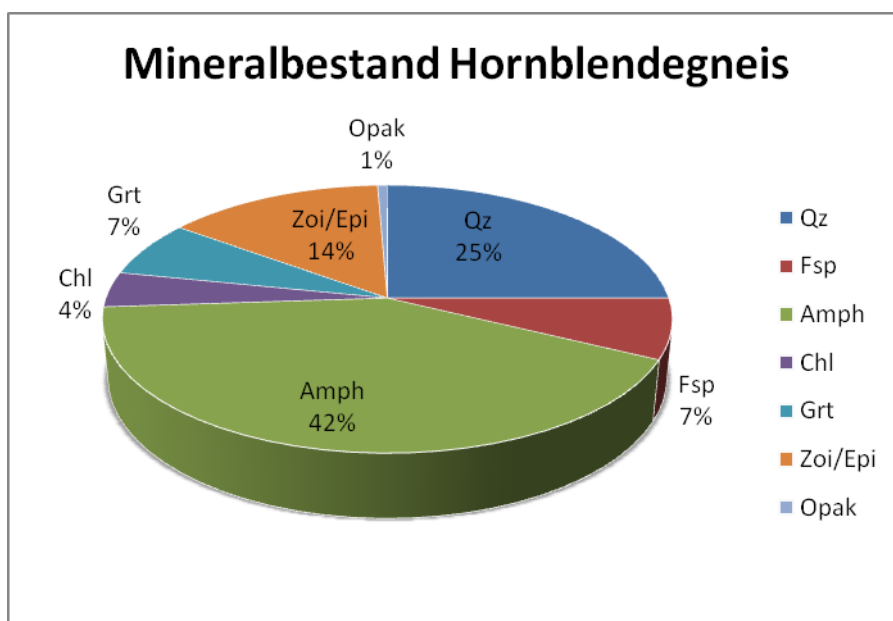


Abb. 3.8 Modaler Mineralbestand Hornblendegneis.

3.2.1.1.4 Granitgneis

Der Granitgneis ist ein mäßig geschiefertes Gestein. Der Hauptmineralbestand ist Quarz, Feldspat und Biotit. An Akzessorien kommen Chlorit, Zoisit/Epidot, Titanit, Muskovit, Apatit und Granat vor. Die Feldspäte zeigen oft typische Verzwillingungslamellen und bilden die größten Körner mit bis zu mehreren Millimetern Durchmesser. Die Korngröße der Quarze schwankt zwischen <0,1 und 0,5 mm. Die Mineralkörner zeigen suturierte Korngrenzen und sind, infolge dessen, gut miteinander verzahnt. Abbildung 3.9 zeigt den Granitgneis als Handstück sowie, anhand von drei Beispielen, unter dem Polarisationsmikroskop mit gekreuzten Nicols.

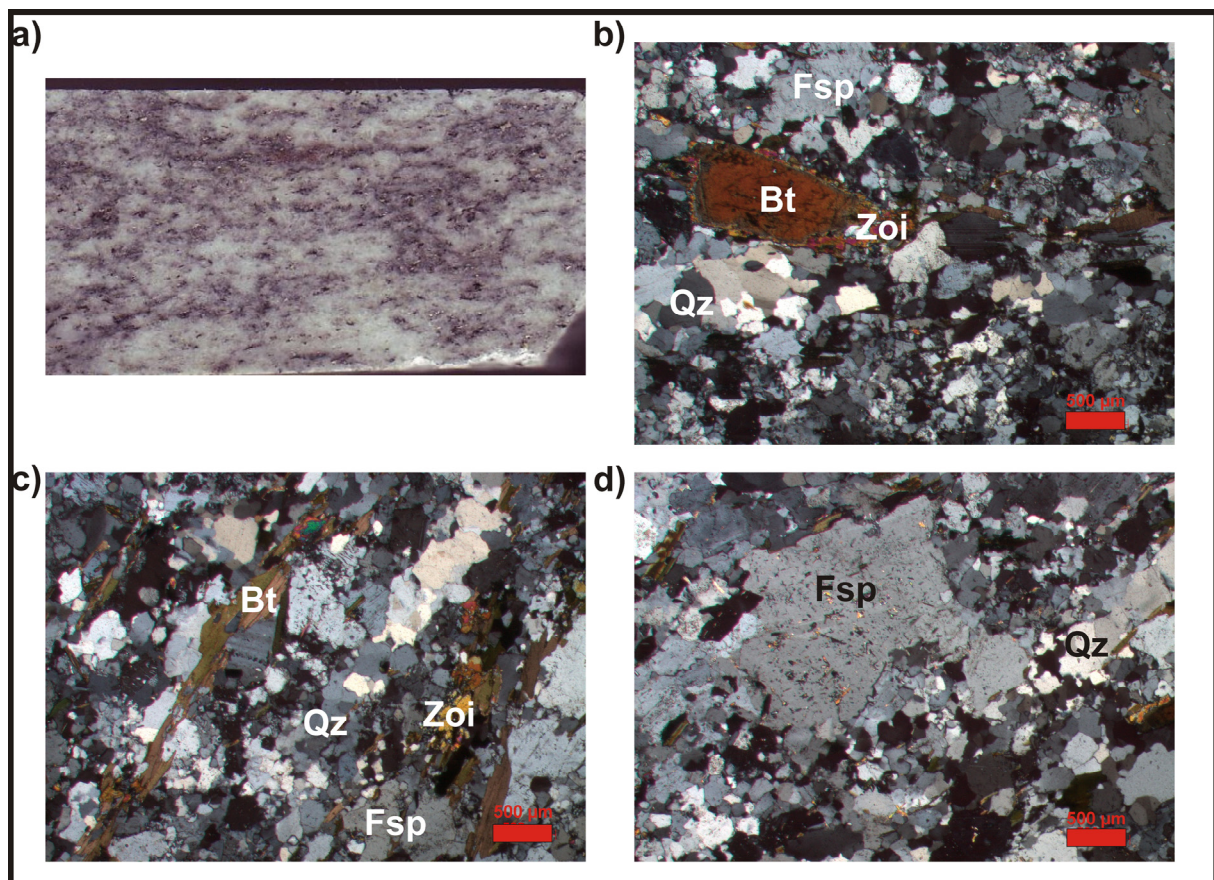


Abb. 3.9: Granitgneis a) Handstück 5cm Länge. b + c) Dünnschliffphoto unter gekreuzten Nicols. Mit Zoisit. d) Dünnschliffphoto unter gekreuzten Nicols. Mit leicht serizitisierendem Feldspat.

Der modale Mineralbestand des Granitgneises ist in Abbildung 3.10 illustriert. Minerale mit einem modalen Mineralbestand < 1 % sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

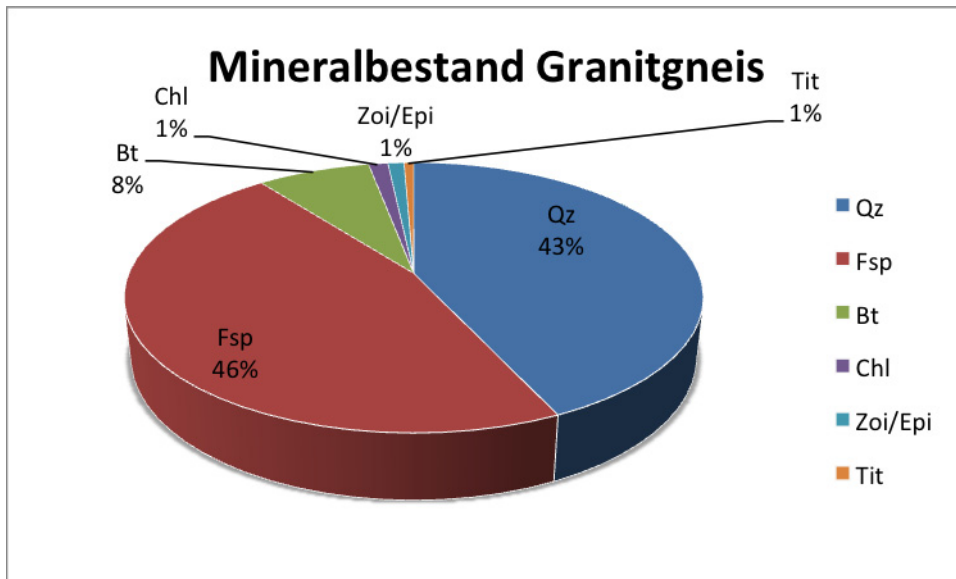


Abb. 3.10: Modaler Mineralbestand Granitgneis.

3.2.1.1.5 Biotit Plagioklas Gneis

Der Biotit Plagioklas Gneis des Ötztal Kristallins zeigt eine deutliche Anisotropie durch die Einregelung der meist großen Biotite. Der Hauptmineralbestand ist Feldspat, Quarz und Biotit, wobei der Feldspat zum größten Teil serizitisiert sowie saussuritisiert ist. Zusätzlich kommen Muskovit, Chlorit, Apatit sowie gering opake Phasen (vermutlich Pyrrhotin und Chalkopyrit) vor. Teilweise sind die Biotite retrograd in Chlorite umgewandelt und stark aufgearbeitet. Die Quarze und die Biotite zeigen die größten Körner mit Durchmessern von bis zu 1 mm, während die serizitisierten Feldspäte feinstkörnig vorliegen. Die suturierten Korngrenzen der Minerale weisen auf eine gute Verzahnung hin. Abbildung 3.11 zeigt den Biotit Plagioklas Gneis als Handstück sowie, an drei Beispielen, unter dem Polarisationsmikroskop mit gekreuzten und parallelen Nicols.

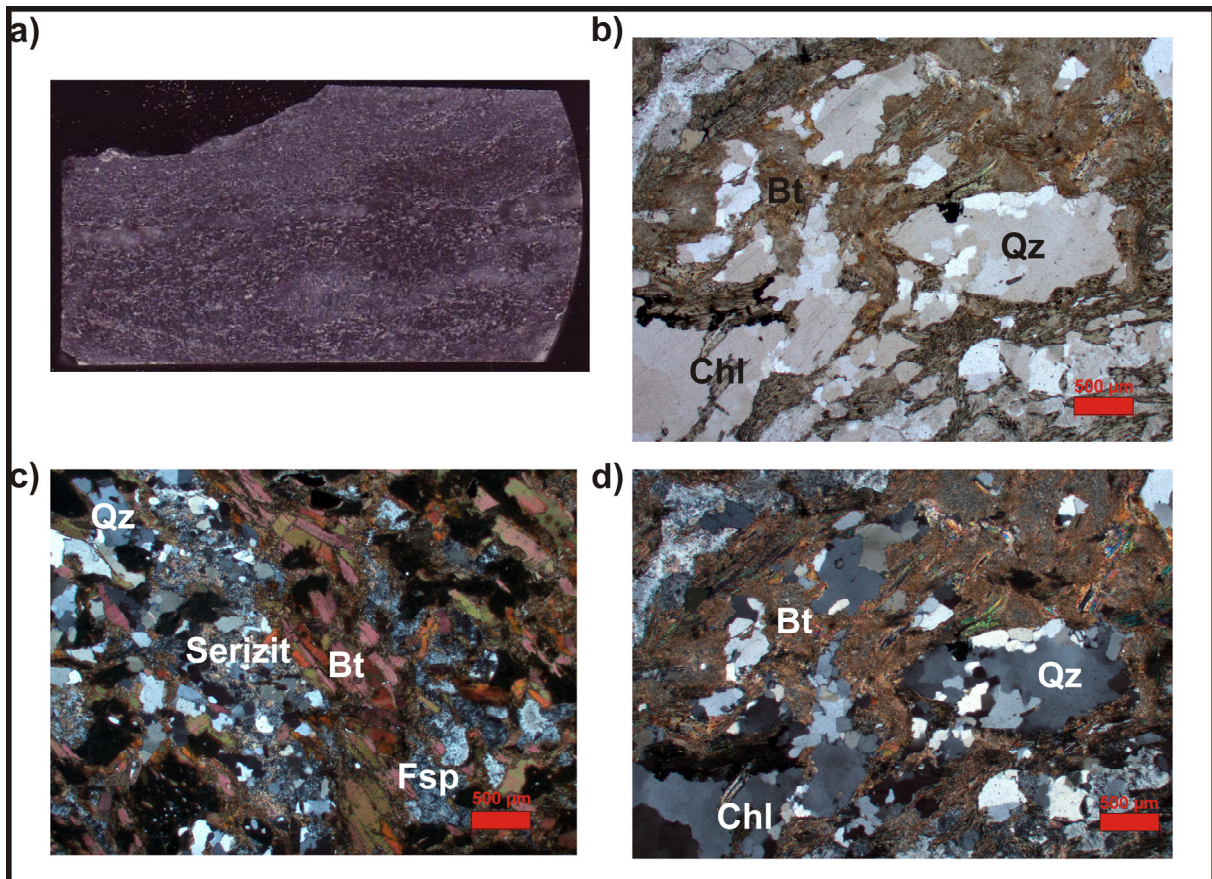


Abb.3.11: Biotit Plagioklas Gneis a) Handstück 5cm Länge. b) Dünnschliffphoto unter parallelen Nicols. Retrograde Umwandlung von Biotit in Chlorit. c) Dünnschliffphoto unter gekreuzten Nicols. Serizitisierung der Feldspäte. d) Dünnschliffphoto unter gekreuzten Nicols. Retrograde Umwandlung von Biotit in Chlorit.

Der modale Mineralbestand der Biotit Plagioklas Gneises ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Minerale mit einem modalen Mineralbestand < 1 % sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

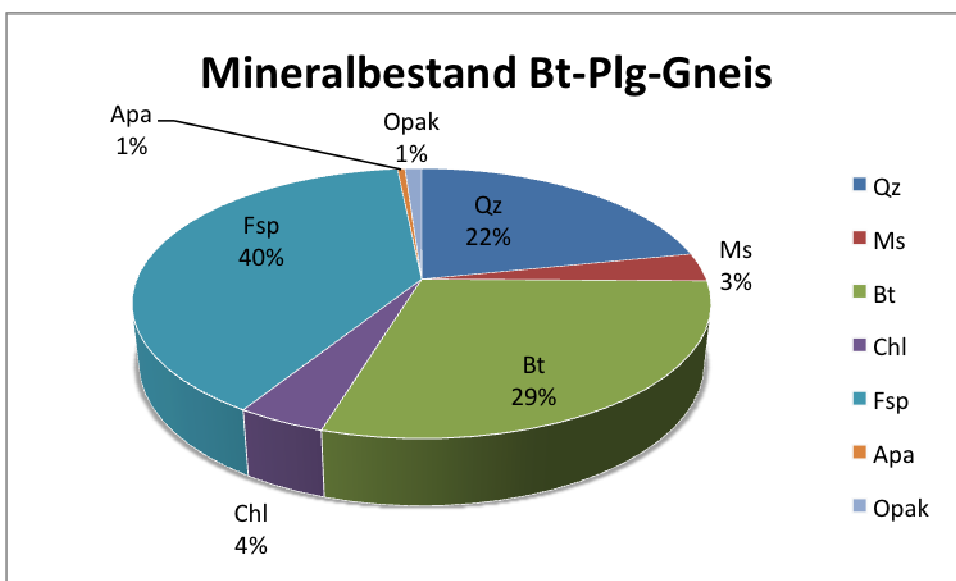


Abb.3.12 Modaler Mineralbestand Biotit Plagioklas Gneis.

3.2.1.1.6 Raibler Dolomit

Der als Referenzmaterial untersuchte Raibler Dolomit ist ein Sedimentgestein ohne anisotrope Eigenschaften. Der Dolomit (min. 90%) ist meist von kleinen Calcitadern (max. 10 %) ohne bevorzugte Orientierung durchzogen. Da das Gestein hauptsächlich aus Dolomit besteht, ist keine zusätzliche Grafik zum modalen Mineralbestand illustriert. Im Dünnschliff lassen sich, entlang eines verheilten Kluftnetzwerks, organische Pigmentierungen feststellen. Aufgrund dieses verheilten Netzwerkes erscheint der Dolomit, in diesen Bereichen, stärker zerlegt. Die Korngrößen der einzelnen Minerale bewegen sich im Bereich von $< 0,1$ bis $0,2$ mm. Abbildung 3.13 zeigt den Raibler Dolomit im Handstück sowie, an drei Beispielen, unter dem Polarisationsmikroskop mit parallelen und gekreuzten Nicols.

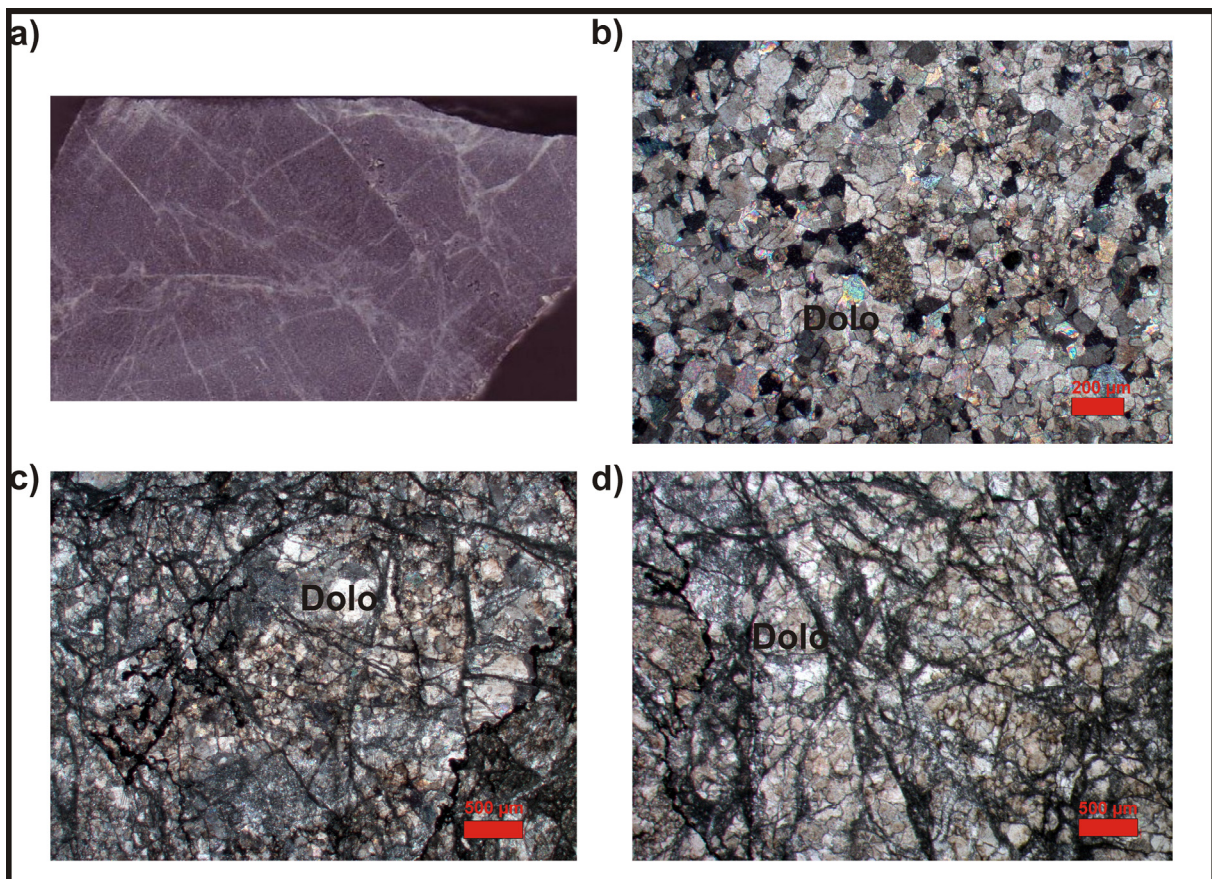


Abb.3.13 Raibler Dolomit a) Handstück 5 cm Länge. b) Dünnschlifffoto unter gekreuzten. Feinkörniger Abschnitt. c + d) Dünnschlifffoto unter parallelen Nicols. Mit organischer Pigmentierung entlang eines verheilten Kluftnetzwerks.

3.2.1.2 Ergebnisse der Stressquarzbestimmung

Um den Einfluss gestresster Quarze auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität, wie von FREYBURG & SCHLIFFKOWITZ (2006) angemerkt, zu bestimmen, wurde der Anteil von undulös auslöschenden Quarze in den einzelnen Lithologien bestimmt. Der Kalkglimmerschiefer weist 53 % undulös

auslöschende Quarze auf, der Augengneis 95 %, der Hornblendegneis 86 %, der Granitgneis 69 % und der Biotit Plagioklas Gneis 89 %.

3.2.1.3 Ergebnisse Glimmer-Gefüge-Index

Die Ermittlung der Glimmer Gefüge Indices (GGI) nach BÜCHI (1984) gibt den Grad des anisotropen Gefüges in Zahlen von 2 bis 8 an, wobei zwei quasi Isotropie und acht extreme Anisotropie bzw. Einregelung der Glimmerminerale bedeutet. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Glimmer Gefüge Index sind in Tabelle 3.2 illustriert und verstehen sich als Durchschnittswerte aller untersuchten Dünnschliffe. Für die Untersuchungen wurde der Raibler Dolomit, aufgrund des fehlenden Glimmergehalts, nicht herangezogen. Als Lithologie mit der ausgeprägtesten Anisotropie stellt sich der Biotit Plagioklas Gneis mit einem Wert zwischen 4 und 6 heraus. Der etwas höhere Wert im Gegensatz zu den anderen Lithologien lässt sich mit der Durchgängigkeit der Biotite erklären. Während die Einregelung der Minerale beim Kalkglimmerschiefer, beim Augengneis und beim Granitgneis der wesentliche Parameter für Anisotropie ist, kann der Biotit Plagioklas Gneis zusätzlich eine Durchgängigkeit der Glimmerhorizonte vorweisen. Beim Hornblendegneis wurden für die Bestimmung des GGI die Chlorite herangezogen, da die Glimmer (Biotite) nur akzessorisch vorkommen.

Lithologie	Glimmer Gefüge Index
Kalkglimmerschiefer	3 bis 4
Augengneis	3 bis 4
Biotit Plagioklas Gneis	4 bis 6
Granitgneis	3 bis 5
Hornblendegneis	3 bis 4

Tab.3.2: Ergebnis der Gefüge Bestimmung nach BÜCHI (1984)

3.2.2 Ergebnisse der geotechnischen Versuche

Die arithmetischen Mittelwerte der geotechnischen Versuche sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Lithologie	UCS	E-Modul	V-Modul	Poisson Zahl	SPZ	Reibungswinkel	Kohäsion
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[°]	[MPa]
Kalkglimmerschiefer	83,2	54517	41047	0,21	8,7	33,3	24,3
Augengneis	228,4	36717	31123	0,11	12,4	53,6	44,4
Biotit Plagioklas Gneis	152,2	77863	72300	0,17	15,5	51,7	25,0
Granitgneis	132,3	41717	33463	0,15	10,3	51,5	17,5
Hornblendegneis	119,8	60927	45430	0,13	16,9	54,9	45,6
Raibler Dolomit	140,9	86627	78250	0,20	15,3	58,2	26,8

Tab.3.3: Ergebnisse der geotechnischen Versuche.

An den geotechnischen Parametern lässt sich erkennen, dass alle Lithologien hohe Druckfestigkeiten aufweisen können. Als Lithologie mit dem größten Wert stellt sich der Augengneis mit knapp 230 MPa uniaxialer Druckfestigkeit heraus. Der Kalkglimmerschiefer weist mit einer durchschnittlichen Druckfestigkeit von über 80 MPa den geringsten Wert auf. Dies ist vermutlich auf den geringeren Metamorphosegrad des Kalkglimmerschiefers, gegenüber den verschiedenen Gneisvarietäten, zurückzuführen.

3.2.3 Ergebnisse Abrasivitäts Tests

Die Abrasivitätsuntersuchungen wurden am Lehrstuhl für Subsurface Engineering an Bruchhälften der aus dem Spaltzugversuch zerstörten Proben von RESCH (2012) durchgeführt. Die arithmetischen Mittelwerte der Cerchar Abrasivitäts Index Tests sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Lithologie	CAI-Wert
Kalkglimmerschiefer	1.93
Augengneis	4.92
Hornblendegneis	4.65
Biotit Plagioklas Gneis	3.37
Granitgneis	4.30
Dolomit	2.55

Tab. 3.4 Cerchar Abrasivitäts Index Werte (CAI) der untersuchten Lithologien (RESCH, 2012).

Die angegebenen Mittelwerte beziehen sich auf eine kombinierte Untersuchung parallel und normal zur Schieferung. Es ist dabei anzumerken dass alle Lithologien normal zur Schieferung einen höheren CAI Wert aufweisen als parallel zur Foliation. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass alle Lithologien zumindest als abrasiv gelten. Augengneis, Hornblendegneis und Granitgneis plotten im Cerchar-Klassifikations-Schema (siehe Unterkapitel 3.1.1.3; CERCHAR, 1986) im Bereich extrem abrasiv.

3.2.4 Ergebnisse der Kompressionswellengeschwindigkeiten

Die Ergebnisse der Kompressionswellengeschwindigkeiten der einzelnen Lithologien sind in Tabelle 3.5 angeführt. Die Durchschallung wurde normal zur Orientierung der Schieferung durchgeführt.

Lithologie	Kompressionswellengeschwindigkeit [m/s]
Kalkglimmerschiefer	3801
Augengneis	3140
Hornblendegneis	4911
Biotit Plagioklas Gneis	5528
Granitgneis	3884
Dolomit	4863

Tab. 3.5 Kompressionswellengeschwindigkeiten der untersuchten Lithologien.

Die schnellsten Laufzeiten weist der Biotit Plagioklas Gneis mit über 5,5 km/s auf. Auffallend ist, dass der Augengneis, als Lithologie mit der höchsten uniaxialen Druckfestigkeit und geringstem Elastizitätsmodul, die geringste Wellengeschwindigkeit aufweist. Der Zusammenhang zwischen dem geringen E-Modul und der geringen Kompressionswellengeschwindigkeit deckt sich mit Untersuchungen von STAN-KLECZEK & IDZIAK (2008) an Sedimentgesteinen und Magmatiten. Sie zeigen einen positiven quadratischen Zusammenhang zwischen E-Modul und Kompressionswellengeschwindigkeit.

3.2.5 Ergebnisse der geochemischen Analysen

Die arithmetischen Mittelwerte der geochemischen Haupt- und Spurenelementanalyse sind in Tabelle 3.6. illustriert. Pro Lithologie wurden fünf Analysen durchgeführt. Die geochemischen Einzelanalysen befinden sich im Anhang.

Analyse	Kalkglimmerschiefer	Augengneis	Hornblendegneis	Biotit Plagioklas Gneis	Granitgneis	Dolomit
SiO ₂ [%]	25,6	72,0	58,6	66,2	70,3	0,3
Al ₂ O ₃ [%]	5,8	14,4	15,4	15,5	14,6	0,1
Fe ₂ O ₃ (T) [%]	2,0	1,5	10,0	5,8	2,3	0,1
MnO [%]	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0
MgO [%]	1,3	0,5	3,0	2,4	0,9	21,4
CaO [%]	35,3	1,9	7,8	0,8	2,2	30,6
Na ₂ O [%]	0,4	4,4	2,7	2,1	3,3	0,0
K ₂ O [%]	0,9	3,5	0,5	3,6	4,4	< 0.01
TiO ₂ [%]	0,3	0,2	0,7	0,6	0,4	0,0
P ₂ O ₅ [%]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	< 0.01
LOI [%]	28,2	0,5	0,6	2,2	0,7	47,1
Total [%]	100,0	99,0	99,5	99,4	99,2	99,5
Sc [ppm]	5,6	3,6	33,4	13,4	5,4	< 1
Be [ppm]	< 1	2,6	< 1	3,0	5,6	< 1
V [ppm]	41,8	17,0	197,8	103,2	31,8	7,4
Ba [ppm]	105,8	748,2	131,0	609,4	317,2	6,2
Sr [ppm]	604,2	446,8	233,4	118,4	149,2	107,8
Y [ppm]	15,0	8,2	17,2	26,4	13,6	< 2
Zr [ppm]	59,4	108,0	66,8	143,2	127,2	7,2
Cr [ppm]	34,0	< 20	22,0	60,0	< 20	< 20
Co [ppm]	12,6	130,0	81,6	88,0	52,6	< 1
Ni [ppm]	28,0	< 20	< 20	42,0	< 20	< 20
Cu [ppm]	26,0	< 10	18,0	40,0	12,0	< 10
Zn [ppm]	46,0	< 30	90,0	86,0	52,0	< 30
Ga [ppm]	8,4	19,8	18,4	23,2	20,2	< 1
Ge [ppm]	< 1	1,0	2,0	1,8	2,0	< 1
As [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb [ppm]	50,4	114,2	14,4	148,0	246,2	< 2
Nb [ppm]	6,4	10,2	2,6	12,0	12,4	< 1
Mo [ppm]	10,6	2,6	< 2	13,2	< 2	5,4
Ag [ppm]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0,5	< 0.5
In [ppm]	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Sn [ppm]	1,4	1,6	< 1	7,2	13,2	< 1
Sb [ppm]	< 0.5	< 0.5	0,7	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cs [ppm]	4,1	2,3	1,0	8,3	22,3	< 0.5
La [ppm]	18,5	24,6	7,4	31,6	27,6	0,3
Ce [ppm]	30,1	43,1	15,6	63,1	53,4	0,5
Pr [ppm]	3,9	4,4	2,0	7,4	6,1	0,1
Nd [ppm]	15,2	15,1	9,2	28,9	22,6	0,2
Sm [ppm]	3,0	2,6	2,4	6,0	4,7	< 0.1
Eu [ppm]	0,6	0,6	0,9	1,2	0,8	< 0.05
Gd [ppm]	2,8	2,0	3,1	5,6	3,9	< 0.1
Tb [ppm]	0,5	0,3	0,6	0,9	0,6	< 0.1
Dy [ppm]	2,5	1,6	3,3	5,2	2,9	< 0.1
Ho [ppm]	0,5	0,3	0,7	1,0	0,5	< 0.1
Er [ppm]	1,4	0,9	2,1	3,0	1,4	< 0.1
Tm [ppm]	0,2	0,1	0,3	0,5	0,2	< 0.05
Yb [ppm]	1,3	0,9	2,3	3,0	1,4	< 0.05
Lu [ppm]	0,2	0,2	0,4	0,5	0,2	< 0.04
Hf [ppm]	1,6	3,3	1,7	4,0	3,3	< 0.2
Ta [ppm]	0,8	10,5	0,9	2,0	2,6	< 0.1
W [ppm]	115,8	2380,0	553,4	714,0	491,8	25,2
Tl [ppm]	0,2	0,6	< 0.1	0,7	1,4	0,1
Pb [ppm]	9,2	33,0	6,4	18,0	33,2	< 5
Bi [ppm]	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	0,8	< 0.4
Th [ppm]	5,1	14,2	1,4	11,5	13,6	< 0.1
U [ppm]	1,2	5,9	1,1	3,6	4,8	6,5

Tab. 3.6 Geochemische Haupt- und Spurenelementanalyse der untersuchten Lithologien.

3.2.6 Ergebnisse des Schichtsilikatgehaltes der Fraktion 125 – 250 µm

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Formtrenntisch sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst. Die Angabe der Spannweite der Untersuchungswerte erfolgt in Gew. %. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass diese Methode zur Glimmerbestimmung einfach durchzuführen ist und die Wiederholbarkeit der Ergebnisse auch bei sehr geringen Probenmengen (10 g) sehr gut gegeben ist.

Lithologie	Glimmergehalt am Formtrenntisch (125 - 250 µm)
Kalkglimmerschiefer	23 bis 25
Augengneis	7 bis 11
Hornblendegneis	9 bis 13
Biotit Plagioklas Gneis	9 bis 11
Granitgneis	18 bis 21

Tab. 3.7 Ergebnisse der Schichtsilikatbestimmungen am Formtrenntisch

Kalkglimmerschiefer (23 – 25 Gew. %) und Granitgneis (18 – 21 Gew. %) zeigen die höchsten Schichtsilikatgehalte der Metamorphite. Den geringsten Wert liefert der Augengneis mit 7 – 11 Gew. %. Der niedrige Glimmergehalt des Biotit Plagioklas Gneises in dieser Kornfraktion, im Gegensatz zum Gesamtgesteinsglimmergehalt, lässt sich mit einer Anreicherung der feinen Serizite sowie der zersetzten Biotite in der Fraktion < 125 µm erklären.

3.2.7 Frisch- und Festbetonergebnisse

Die Frisch- und Festbetoneigenschaften, geprüft nach ÖNORM 4710-1:2007 10 01 respektive ONR 23303:2010 09 01, sind in den folgenden Tabellen 3.8 – 3.10 zusammengefasst und illustriert. Zusätzlich zu den Normprüfverfahren an Betonen wurden Schnelltests zur Bestimmung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität nach ÖNORM B 3100: 2008 08 01 durchgeführt. Die Ergebnisse der AKR – Untersuchungen werden in Abbildung 3.13 vermittelt.

Tabelle 3.8 zeigt die Ergebnisse der Frisch- und Festbetoneigenschaften des Innenschalenbetons.

Lithologie	Innenschalenbeton														
	Zement	AHWZ	Wasser	Luft	Frischbeton Rohdichte	Druckfestigkeit		Ausschal-festigkeit (12 h)	Temperatur-anstieg	E - Modul	XF3	L300	AF	Laengen-aenderung 56d	Wasser-eindringtiefe
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[K]	[GPa]	[-]	[%]	[mm]	[mm/m]	[mm]
Kalkglimmerschiefer	260	60	185	3,5	2370	39	40	2,0	19,0	-	bestanden	2,3	0,27	0,42	18
Augengneis	260	60	180	4,3	2230	33	38	2,4	20,0	21,9	bestanden	2,1	0,26	0,63	11
Biotit Plagioklas Gneis	260	60	182	3,4	2381	35	42	2,3	18,0	26,9	bestanden	0,8	0,49	0,60	15
Hornblendegneis	260	60	185	3,0	2432	38	40	1	18,4	-	bestanden	1,4	0,29	0,34	13
Granitgneis	260	60	185	4,5	2237	33	39	1,5	20,0	-	bestanden	1,6	0,29	0,41	11
Raibler Dolomit	260	60	185	4,2	2414	40	46	1	16,1	-	bestanden	1,2	0,40	0,30	8

Tab.3.8: Ergebnisse Innenschalenbeton (FFG-Projekt RECYCLING VON TUNNELAUSBRUCHMATERIAL – Ergebnisse Betongruppe, 2012)

Tabelle 3.9 zeigt die Frisch- und Festbetonergebnisse des Tübbingbetons.

Lithologie	Tuebbingbeton														
	Zement	AHWZ	Wasser	Luft	Frischbeton Rohdichte	Druckfestigkeit		Abhebefestigkeit 1d	Temperaturanstieg	E - Modul	XF3	L300	AF	Biegezugfestigkeit 56d	Wassereindringtiefe
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[K]	[GPa]	[-]	[%]	[mm]	[mm/m]	[mm]
Kalkglimmerschiefer	380	-	165	3,4	2378	52	55	-	28,2	-	bestanden	2,3	0,27	5,3	20
Augengneis	380	-	170	3,8	2300	61	70	25	29,9	24,3	bestanden	3,1	0,20	-	14
Biotit Plagioklas Gneis	380	-	168	3,6	2383	59	61	26	28,5	30,0	bestanden	1,6	0,27	-	12
Hornblendegneis	380	-	165	3,8	2473	75	76	-	28,0	-	bestanden	0,9	0,39	8,3	7
Granitgneis	380	-	165	3,5	2341	61	69	-	30,0	-	bestanden	3,2	2,0	6,8	10
Raibler Dolomit	380	-	165	4,7	2416	63	71	-	26,4	-	bestanden	0,8	0,54	8,9	5

Tab.3.9: Ergebnisse Tübbingbeton (FFG-Projekt Recycling von Tunnelausbruchmaterial – Ergebnisse Betongruppe, 2012)

In Tabelle 3.10 sind die Frisch- und Festbetonergebnisse des Weiße Wanne Beton dargestellt.

Lithologie	Weisse Wanne Beton														
	Zement	AHWZ	Wasser	Luft	Frischbeton Rohdichte	Druckfestigkeit		Temperaturanstieg	E - Modul	XF4	L300	AF	Laengenänderung	Wassereindringtiefe	
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[K]	[GPa]	[-]	[%]	[mm]	[mm/m]	[mm]	
Kalkglimmerschiefer	270	70	170	3,9	2313	32	39	18,0	-	bestanden	2,1	0,26	0,69	14	
Augengneis	270	70	169	6,8	2202	29	37	16,1	24,6	bestanden	3,2	0,19	0,62	13	
Biotit Plagioklas Gneis	280	70	181	7,0	2260	27	31	16,2	25,4	bestanden	2,7	0,20	0,63	10	
Hornblendegneis	270	70	170	5,6	2410	41	46	15,9	-	bestanden	3,2	0,11	0,36	8	
Granitgneis	270	70	170	6,6	2269	23	28	17,5	-	bestanden	3,1	0,20	0,41	18	
Raibler Dolomit	270	70	170	6,2	2273	38	42	15,0	-	bestanden	2,6	0,19	0,36	13	

Tab.3.10: Ergebnisse Weiße Wanne Beton (FFG-Projekt Recycling von Tunnelausbruchmaterial - Ergebnisse Betongruppe, 2012)

Die Untersuchungen zeigen, dass die geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften wie Rohdichte, Festigkeiten, Temperaturanstieg sowie die Frostbeständigkeit und Luftporenkennwerte für Innenschalen- und Tübbingbeton von allen Lithologien erreicht werden können. Das Karbonatgestein Raibler Dolomit gilt hierbei als das Referenzmaterial mit dem bereits Beton hergestellt wird. Alle weiteren Gesteinskörnungen der untersuchten Lithologien kommen an die Kennwerte des Raibler Dolomits heran und bleiben in den Grenzen der Anforderungen nach ÖNORM B 4710-1:2007 10 01. Hochwertige Betone, wie wasserundurchlässiger Weiße Wannen Beton, lassen sich hingegen mit den Gesteinskörnungen der metamorphen Lithologien, aufgrund diverser Parameter wie z.B. Kornform, Glimmergehalt oder Kernfeuchte, nur mit erhöhten Zementmengen herstellen. Dazu müssten für diese Gesteinskörnungen, eigene Betonrezepturen entwickelt werden.

Für die Dauerhaftigkeit des Betons, vor allem in Bereichen die der Witterung ausgesetzt sind, spielt die Alkali-Kieselsäure Reaktivität eine große Rolle. Die Ergebnisse der Schnelltests werden in Abbildung 3.14 gezeigt.

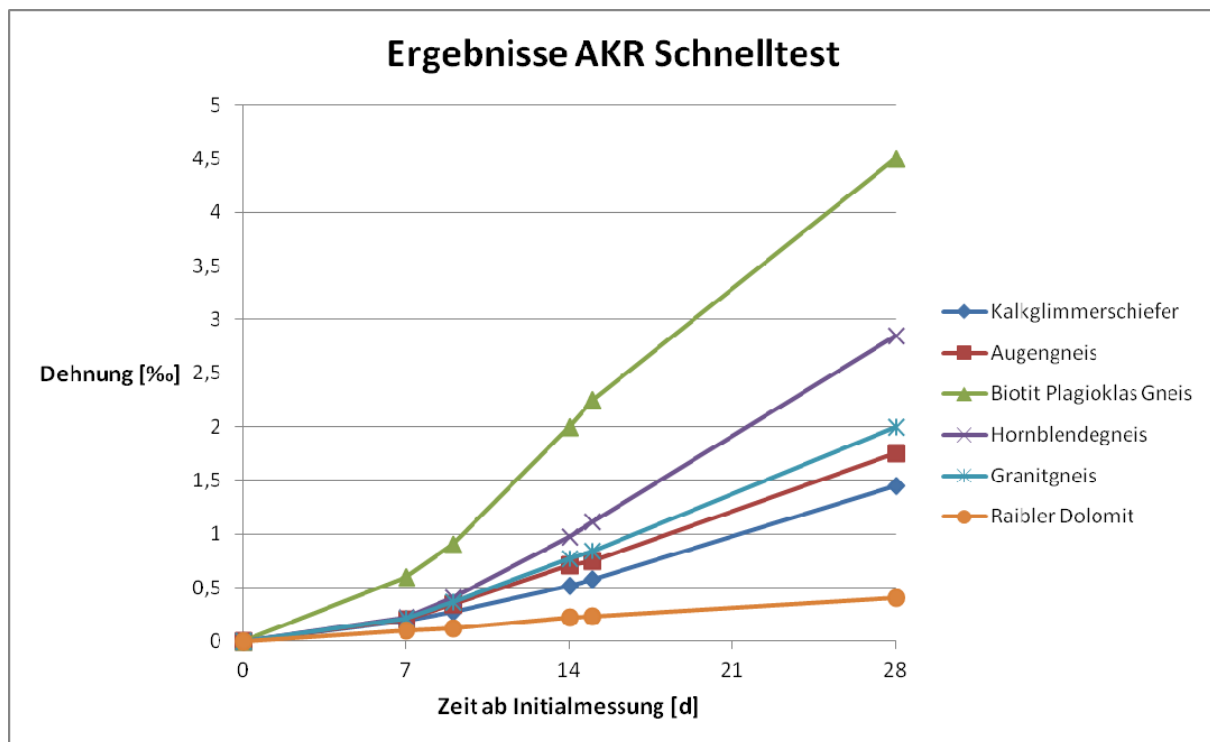


Abb.3.14: Ergebnisse der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität Schnelltests (modifiziert nach FFG-Projekt RECYCLING VON TUNNELAUSBRUCHMATERIAL – Ergebnisse Vözfi, 2012).

Aus den erzielten Ergebnissen geht hervor, dass bis auf den Biotit Plagioklas Gneis alle Lithologien den AKR Schnelltest bestanden haben. Der Biotit Plagioklas Gneis zeigt eine Überschreitung des Maximalwertes der Betondehnung von 1‰ nach 14 Tagen. Der Hornblendegneis kommt knapp unter dem Grenzwert zu liegen. Die anderen Lithologien liegen deutlich innerhalb der Grenzen. Vor allem die karbonatischen Gesteine, wie der Raibler Dolomit und der stark calcithältige Kalkglimmerschiefer, zeigen die geringsten Dehnungswerte.

Die Überschreitung des Grenzwertes durch den Biotit Plagioklas Gneis schließt die Verwendung der Lithologie als Gesteinskörnung für Beton nicht zwingend aus. Für diese Lithologie muss jedoch ein einjähriger Langzeitversuch durchgeführt werden um die Ergebnisse zu überprüfen. Der Schnelltest ist ein toleranzfreier Test und disqualifiziert Lithologien bereits bei geringen Anzeichen einer AK-Reaktion. Die Ergebnisse des Langzeittests liegen derzeit noch nicht vor.

3.3 Interpretation und Diskussion

Grundsätzlich lassen sich mit den sechs untersuchten Lithologien als Gesteinskörnung alle drei angestrebten Betonsorten verwirklichen. Innenschalen- sowie Tübbingbeton bedürfen dabei keinerlei aufwändigen Rezepturen. Wasserundurchlässiger Weiße Wannen Beton lässt sich nur mit auf die Lithologie abgestimmter Betonrezeptur zufriedenstellend realisieren. Dafür ist eine erhöhte Zementmenge notwendig. Es ist fraglich ob eine abgestimmte Rezeptur mit erhöhtem

Zementgehalt dabei zielführend ist, da im Mittelpunkt der Forschungsthematik „Verwendung von Tunnelausbruchmaterial“ die Schonung geogener Ressourcen bei minimaler Umweltbelastung steht. Das bedeutet, dass ein zusätzlicher Anfall von CO₂ durch die Zementindustrie als nicht positiv zu beurteilen ist. Die Verwendung der Gesteinsarten für die Standardbetone, welche ohne große Aufwände herzustellen sind, ist klar zu befürworten. Durch die Verwendung solcher Alternativrohstoffe direkt auf der Baustelle ist eine enorme Menge an CO₂, durch Verringerung der Transportwege von Gesteinskörnungen zur Baustelle und Ausbruchmaterial zur Deponie, einzusparen.

Die Anforderungen an Gesteinskörnungen für die Betonherstellung werden in ÖNORM EN 12620:2008 09 01 beschrieben und sind klar definiert. Um jedoch bereits in der Planungsphase einer Tunnelbaustelle Abschätzungen über die mögliche Verwendung des anfallenden Ausbruchmaterials machen zu können, ist es nötig, aus Gesteinsproben der Oberfläche bzw. aus Erkundungsbohrkampagnen über Gesteinsparameter (chemisch, strukturgeologisch, mineralogisch, geotechnisch) diesbezügliche Aussagen zu treffen.

Innerhalb der geologisch-geotechnischen Parameter konnten keine definitiven Rückschlüsse auf Einflussparameter untereinander gezogen werden. Wie erwartet zeigen die Lithologien mit den höchsten Quarzgehalten auch die höchsten CAI-Werte. Daneben zeigte sich, dass der Quarzgehalt keinen Einfluss auf die erzielten Druck- und Zugfestigkeitsparameter hat. Innerhalb der karbonatfreien Lithologien (Hornblendegneis, Biotit Plagioklas Gneis, Granitgneis und Augengneis) zeigt ein zunehmender Glimmergehalt einen abnehmenden Abrasivitäts Indexwert. Zusätzlich zeigt auch der Glimmer-Gefüge-Index innerhalb dieser vier Lithologien einen Zusammenhang zu den Abrasivitätswerten (höherer GGI = geringerer CAI). Die fein- und mittelkörnigen Lithologien (Raibler Dolomit, Hornblendegneis und Biotit Plagioklas Gneis) weisen die höheren Wellengeschwindigkeiten, höhere Spaltzugfestigkeiten sowie die höheren E-Moduln auf als die mittel- und grobkörnigen Lithologien (Kalkglimmerschiefer, Granitgneis und Augengneis). Ein Einfluss der Korngröße auf die Druckfestigkeiten und die Abrasivität konnte nicht festgestellt werden.

Die geotechnischen Parameter wie die uniaxiale Druckfestigkeit sowie die Spaltzugfestigkeiten schwanken bei den geprüften Lithologien stark. Mit rund 83 MPa uniaxialer Druckfestigkeit ist der Kalkglimmerschiefer das Gestein mit der geringsten Festigkeit. Mit 228 MPa uniaxialer Druckfestigkeit ist der Augengneis die Lithologie mit der höchsten Festigkeit. Ähnlich wie die Druckfestigkeiten schwanken auch die Zugfestigkeiten von knapp 9 MPa beim Kalkglimmerschiefer bis hin zu knapp 17 MPa beim Hornblendegneis der Gleinalm. Vergleicht man diese Festigkeitswerte mit den erzielten 28 Tage Festigkeiten der Betone (Innenschalenbeton 33 – 40 MPa, Tübbingbeton 52 – 75 MPa und Weiße Wannen Beton 29 – 41

MPa) lassen sich keine Rückschlüsse der Gesteinsfestigkeiten auf die Betonfestigkeit ziehen. Bei allen Betonsorten erreichen die Festigkeiten das Soll. Es ist anzumerken, dass die 83 MPa Druckfestigkeit, welche der Kalkglimmerschiefer aufweist, für eine Lithologie als Gesteinskörnung ausreicht. Im Zuge der Forschungsmeetings „Recycling von Tunnelausbruchmaterial“ wurde von Seiten der Betongruppe angemerkt, dass uniaxiale Gesteinsdruckfestigkeiten von 50 MPa ausreichen um qualitativ ausreichenden Innenschalenbeton herstellen zu können. Die Festigkeiten des Betons sind demnach maßgeblich von der Festigkeit des Bindemittels beziehungsweise dem Wasser-Bindemittel Verhältnis abhängig. Zudem zeigt sich ein Elastizitätsmodul von 36 GPa (Augengneis) am Ausgangsgestein als ausreichend.

Analog zu den geotechnischen Druck- und Zugversuchen schwanken auch bei den petrophysikalischen Untersuchungen die Ergebnisse der alpinen Lithologien stark. Kompressionswellengeschwindigkeiten von 3140 m/s im Augengneis bis zu 5528 m/s im Biotit Plagioklas Gneis treten auf. Auch hier lässt sich kein direkter Schluss zu den Frisch- und Festbetonergebnissen ziehen. Eine Wellengeschwindigkeit von 3140 m/s (wie im Augengneis) ist demnach, für die Verwendung dieser Lithologien als Gesteinskörnung zur Betonherstellung, ausreichend.

Die nach Cerchar Abrasivität Index Test als abrasiv bis extrem abrasiv klassifizierten Lithologien zeigen ebenfalls keinen Zusammenhang mit den Ergebnissen der Betonuntersuchungen. Der geringste CAI Wert von 1,93 (Kalkglimmerschiefer - abrasiv) ist als ausreichend zu erwähnen.

Die geochemischen Gesamtgesteinsanalysen zeigen keinen Zusammenhang mit erreichten Betonparametern. Betonschädlichen Substanzen nach ÖNORM EN 12620:2008 09 01 (Sulfat und Chlorid) liegen innerhalb normativ festgelegter Grenzen. Die, akzessorisch vorkommenden, sulfidischen Vererzungen (Pyrit, Pyrrhotin, Chalkopyrit) haben, in diesen Mengen, keinen Einfluss auf die Verwendbarkeit der Lithologien als Gesteinskörnung.

Der nicht bestandene AKR Schnelltest des Biotit Plagioklas Gneis (Betondehnung > 1‰ nach 14 Tagen) lässt sich nicht mit den geochemischen Ergebnissen in Verbindung bringen. Sowohl Kieselsäure- als auch Alkalienghalte liegen im Mittelfeld der untersuchten Lithologien und weisen keinerlei Ausreißer auf (Kieselsäure: 66,2 %, Na₂O: 2,1 %, K₂O: 3,6 %).

FREYBURG & SCHLIFFKOWITZ (2006) erwähnten, dass tektonisch beanspruchte Quarze ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Alkali Kieselsäure Reaktionen (AKR) im Beton sind. Die Unterscheidung von tektonisch gestressten, also undulös auslöschenden Quarzen, und ungestressten respektive rekristallisierten Quarzen, also gerade auslöschenden Quarzen wurde im Zuge der Dünnschliffuntersuchungen durchgeführt. Den größten Anteile an undulös

auslöschenden Quarzmineralen weisen der Augengneis (95 % der Quarze), der Biotit Plagioklas Gneis (89 % der Quarze) sowie der Hornblendegneis (86 % der Quarze) auf. Der hohe Gehalt tektonisch beanspruchter Quarze wäre eine Erklärung für die Überschreitung des Grenzwertes der AKR Dehnung für den Biotit Plagioklas Gneis und für den hohen Dehnungswert des Hornblendegneises. Der Augengneis mit 40 % Quarzanteil und davon 95 % undulös auslöschenden Quarzen passt hingegen nicht in diese Überlegungen. Vielmehr scheint die sehr starke Serizitisierung des Biotit Plagioklas Gneises Auswirkungen auf eine Alkali Kieselsäure Reaktivität zu haben. Neben dem Biotit Plagioklas Gneis weist nur der Hornblendegneis noch geringe Anteile an Serizit auf. Der Hornblendegneis liegt zudem nur knapp unter der Unbedenklichkeitsgrenze im ARK Schnelltest. Es wird angenommen, dass die Alkalien der feinkörnigen, freien Serizite aufgrund ihrer großen Oberfläche schneller mit der Kieselsäure reagieren können.

Für die Bestimmung des Gesteinsgefüges wurde der von BÜCHI (1984) vorgeschlagene Glimmer-Gefüge Index verwendet. Den höchsten Wert mit 6 erreichte der Biotit Plagioklas Gneis und ist demnach als stark anisotrop mit durchgängigen Glimmerhorizonten zu bezeichnen. Auswirkungen auf die Betoneigenschaften konnten jedoch nicht nachvollzogen werden. Vielmehr scheint der von HUBER (1971) erwähnte Einfluss des Gehaltes an freiem Glimmer (einzelne Glimmerminerale welche nicht in ein Aggregat eingebunden sind) als relevant für die Herstellung und vor allem für die Verarbeitbarkeit des Betons.

Zur Ermittlung des freien Schichtsilikatgehaltes wurden Analysen am Formtrenntisch durchgeführt. Für die Untersuchungen soll die Kornfraktion 125 – 250 µm herangezogen werden. Sind die Körner kleiner als 125 µm werden zu viele Mineralkörner als plattig klassifiziert. Bei zu großer Kornfraktion werden zu viele Minerale als gedrunge klassifiziert. Zusätzlich kommen bei den untersuchten alpinen Lithologien ab rund 400 µm Mineralaggregate vor die das Ergebnis verfälschen.

Der Kalkglimmerschiefer zeigt bei den Analysen am Formtrenntisch die höchsten Glimmergehalte mit bis zu 25 %. Daraus wird deutlich, dass es in den feinen Kornklassen zu einer Anreicherung des Glimmergehaltes kommt (der Glimmergehalt im Gesamtgestein aus Dünnschliffuntersuchungen beträgt rund 12%). Diese Anreicherung an Schichtsilikaten in der Fraktion 125 – 250 µm kann bis auf den Biotit Plagioklas Gneis in allen Lithologien beobachtet werden. Der Biotit Plagioklas Gneis zeigt einen extrem niedrigen Glimmergehalt am Formtrenntisch (9 – 11 %) im Vergleich zu den Dünnschliffuntersuchungen (rund 36 %). Der große Unterschied lässt sich mit der sehr starken Serizitisierung sowie Saussuritisierung der Feldspäte in dieser Gesteinsart erklären. Durch diese Umwandlung der Feldspäte entstehen feinstkörnige Glimmer (Serizit) welche in die Fraktion <125 µm angereichert sind. Der

Formtrenntisch kann diese Serizite nicht mehr detektieren und ist für Gesteine mit stark ausgeprägter Umwandlung der Feldspäte in Serizit nicht gut geeignet.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Lithologien mit einem Glimmergehalt bis zu 25 % in der Feinfraktion als Gesteinskörnung für Beton verwendet werden können. Dieses Limit konnte versuchstechnisch abgedeckt werden. THALMANN (1996) erwähnt, dass in der Schweiz Gesteine bis 30 % Glimmergehalt für eine Weiterverwendung akzeptiert werden. Erfahrungen in der Schweiz beim AlpTransit-Projekt verweisen auf eine Verringerung des freien Glimmergehalts um 5 % bei Nassaufbereitung des Materials in der Fraktion 0,25 – 0,5 mm.

Zusammenfassend soll Tabelle 3.11 versuchstechnisch abgedeckte Grenzwerte wahrscheinlicher Einflussparameter für die Herstellung von Standardbetonen darstellen. Diese Grenzwerte stützen sich auf die sechs untersuchten Lithologien und sind sicher nicht am Limit angelangt. Ein sogenanntes „Idealgestein“ für die Verwendung als Gesteinskörnung für Beton sollte, auf Basis der Untersuchungen, diese Grenzwerte nicht über- bzw. unterschreiten.

Parameter	Grenzwert
Uniaxiale Druckfestigkeit [MPa]	> 83
E-Modul [GPa]	> 36
Cerchar Index Wert CAI [-]	> 1,93
Kompressionswellengeschwindigkeit [m/s]	> 3140
Glimmergehalt (125 – 250 µm) [Gew.%]	< 25

Tab.3.11: Versuchstechnisch abgedeckte Grenzwerte wahrscheinlicher Einflussparameter von Gesteinen auf die Verwendbarkeit als Gesteinskörnung für Beton.

4 Einfluss von Gesteinsgefüge, Schneidspurabstand und Penetration auf das Ausbruchmaterial im maschinellen Tunnelvortrieb

Die Vorhersage und Bestimmung der Penetration ist im maschinellen Tunnelbau ein zentrales Thema und wird mit unterschiedlichsten Modellen berechnet (siehe Kapitel 4.1). Die Vorhersage der Ausbruchcharakteristik des Gesteinsmaterials wurde hingegen noch wenig untersucht. THALMANN (1996) beurteilt in seiner Dissertation die Möglichkeiten einer Verwendung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb als Betonzuschlagstoff. Dabei wertete er Siebkurven des anfallenden Materials verschiedenster Schweizer Vortriebe aus. Auffallend dabei war der kontinuierliche Verlauf dieser und somit das Fehlen von Ausfallkörnungen.

Der Schneidprozess an einer Tunnelvortriebsmaschine basiert auf dem Chippen von Gesteinsmaterial zwischen zwei benachbarten am Bohrkopf angebrachten Diskenmeißel. An Linearschneidprüfständen kann dieser Prozess im kleinen Maßstab simuliert und analysiert werden. Im Zuge der Dissertation wurden an unterschiedlichen Lithologien Schneidversuche an Linearschneidprüfständen durchgeführt um die Einflüsse von Gesteinsgefüge, Penetrationstiefe und Schneidspurabstand auf das Ausbruchmaterial verstehen zu können. Ein größerer Schneidspurabstand und tiefere Penetration sollten zu einer gröberen Sieblinie führen. Der Einfluss der Gefügeorientierung sollte maßgeblich für die Rissentwicklung im Gestein sein. Um diese Annahmen zu überprüfen bzw. zu verifizieren wurde ein detailliertes Schneidprogramm ausgearbeitet, bei dem die verschiedenen Einflussparameter variiert bzw. konstant gehalten wurden. Die getesteten Lithologien betreffen einerseits vier Lithologien an denen auch Betonversuche durchgeführt wurden (Kalkglimmerschiefer, Augengneis, Hornblendegneis und Granitgneis) und andererseits den Schiefergneis sowie mit dem Imberg Sandstein, ein Vergleichsmaterial mit homogenem, richtungslosem Gefüge. Die Versuche wurden an den Linearschneidprüfständen der Sandvik Mining and Construction GmbH in Zeltweg, sowie des Earth Mechanics Institutes der Colorado School of Mines in Golden durchgeführt. Als Hilfe für die Arbeiten vor Ort am Prüfstand konnten BIERMEIER (2011) und MORI (2012) als Masterstudenten und WACHTER (2012), LÖSCH (2012) und DREITLER (2012) als Bachelorstudenten gewonnen werden. Es ist anzumerken, dass einige der Abbildungen in diesem Kapitel von mir entworfen und von den Studenten rein gezeichnet wurden und deshalb mit ihren Namen zitiert sind.

Als Ergebnis der Schneidversuche soll sich das unterschiedliche Ausbruchverhalten der alpinen, geschieferten Lithologien herausstellen. Die Kornsummenkurven des anfallenden Materials der Schneidversuche geben Rückschluss auf die weiteren Verwendungsmöglichkeiten des Gesteins. Prinzipiell sind für eine Weiterverarbeitung des Materials grobkörnige Materialien von Vorteil.

Deshalb wurde ein Schneidprogramm entwickelt, bei dem Gesteinsgefügeorientierung, Schneidspurabstand sowie Penetration verändert wurden um das unterschiedliche Ausbruchsverhalten der Lithologien zu analysieren. Im Zuge der Analysen wurden zusätzlich die anfallenden Gesteinschips auf ihr Längen/Breiten Verhältnis vermessen um die Kornform zu bestimmen. Stärker anisotrope Gesteine sollten einen höheren Anteil an plattigen Ausbruchskörnern haben als isotrope oder schwächer anisotrope Lithologien.

BIERMEIER (2011) untersuchte das Ausbruchsverhalten am isotropen Referenzmaterial Imberg Sandstein. Der Imberg Sandstein wird von SANDVIK Mining and Construction GmbH bereits seit Jahren als Referenzmaterial für Schneidversuche verwendet, jedoch wurde dabei bislang der Fokus auf die auftretenden Kräfte und nicht auf die Gesteinslösungscharakteristik gelegt.

4.1 Modelle für die Penetrationsprognose

Im maschinellen Tunnelbau wird für jeden geologisch-geotechnischen Homogenbereich eine Penetrationsprognose erstellt. Diese verschiedenen Modelle wurden von FRENZEL (2010) zusammengefasst, diskutiert und in drei Gruppen unterteilt. Die unterschiedlichen Modelle werden in dieser Arbeit nicht näher erläutert und sind in der zitierten Literatur dargestellt.

- 1 Penetrationsmodelle auf Basis von Laborschneidversuchen:
 - **CSM Modell** (OZDEMIR et al., 1977; ROSTAMI et. al 1996, ROSTAMI 1997)
 - **Modell Sanio** (SANIO, 1983)
 - **Modell Büchi** (BÜCHI, 1984)
 - **Modell Ramezanzadeh** (RAMEZANZADEH et. al 2004; RAMEZANZADEH et. al 2005; RAMEZANZADEH, 2005)
 - **Modell Wijk** (WIJK, 1992)

- 2 Empirische Modelle auf Basis von Tunnelvortriebsdaten:
 - **Modell NTNU** (LISLERUD, 1988; BRULAND, 2000a)
 - **Modell Rutschmann** (RUTSCHMANN, 1974)
 - **Modell Mikura** (MIKURA, 1980)
 - **Modell Gehring** (GEHRING, 1995)
 - **Modell Stevenson** (STEVENSON, 1999)

- 3 Modelle auf Basis von Gebirgsklassifikationssystemen:
 - **Modell Alber** (ALBER, 1999)
 - **Modell Barton** (BARTON, 2000)

- Modell Bethaz, Peila, Innaurato (BETHAZ et. al 2001)

Alle diese Prognosemodelle wurden in der Vergangenheit mehrfach erprobt, jedoch lassen sich bei jedem Modell größere oder kleinere Nachteile finden die FRENZEL (2010) 4 Gruppen zuordnet.

- Mathematischer Ansatz

Ein einfacher mathematischer Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Penetration wird bei GEHRING (1995), STEVENSON (1999), ALBER (1999), RUTSCHMANN (1974) und MIKURA (1980) angenommen. Diese Ergebnisse stimmen jedoch nicht mit den Untersuchungen aus Tunnelvortriebsdaten und Penetrationstests von BRULAND (2000a) und ROSTAMI (1997) überein.

- Repräsentativität

Repräsentative Penetrationsprognosemodelle benötigen eine solide, ausreichende Datenbasis. Dies ist bei unterschiedlichen geologischen Verhältnissen schwer zu realisieren. BETHAZ et al. (2001), SANIO (1983) und GEHRING (1995) haben für die Repräsentativität möglicherweise eine zu kleine Datenbasis. Bei ALBER (1999), BRULAND (2000a) und BARTON (2000) basieren die Untersuchungen auf Gripper-TBM mit kleinen Bohrkopfdurchmessern. Die Umlegung der Ergebnisse auf Verkehrstunnelröhren mit Durchmesser > 10 m ist fraglich.

- Eingangsparameter

Einige der Modelle verwenden Klassifikationssysteme als Grundlage der Penetrationsbestimmung. Diese Gebirgsklassifikationssysteme wurden entwickelt um das Gebirge zu beschreiben und Auswirkungen auf die Stabilität beim Hohlraumbau abzuschätzen, nicht aber um die Penetration zu prognostizieren. Bei anderen Modellen werden Parameter verwendet die in einer typischen Tunnelplanung nicht erhoben werden, wie bei BRULAND (2000a) der Drilling Rate Index und bei MIKURA (1980) der Schmidhammer Rückprallwert. Auch werden maschinentechnische Parameter wie Diskendurchmesser oder Drehmoment bei vielen Modellen nicht mit einbezogen.

- Prognosegenauigkeit

Als Grundlage für ein Prognosemodell dient ein gut fundiertes geologisch-geotechnisches Gebirgsmodell. Die natürliche Schwankungsbreite der dafür erforderlichen Faktoren wird nur im Modell von BETHAZ et al. (2001) berücksichtigt.

Das derzeit laufende, gemeinsame Forschungsprojekt „ABROCK - Prognose von Penetration und Verschleiß im maschinellen Tunnelbau“ der Montanuniversität Leoben, der TU München, der

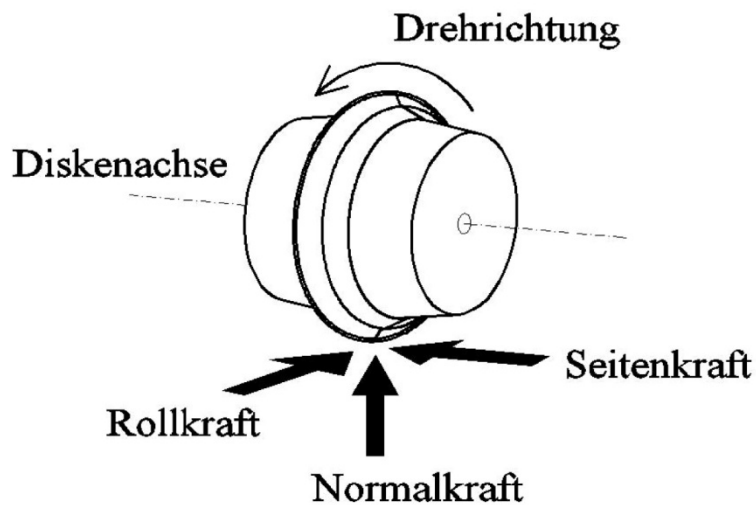


Abb.4.3: Auftretende Kräfte beim Schneidprozess an einem Diskenmeißel (aus BIERMEIER 2011, modifiziert nach ROSTAMI, 1997)

Der eigentliche Lösevorgang im maschinellen Tunnelbau basiert auf dem Absplittern von Gesteinschips durch das Zusammenwachsen von einzelnen Rissen, verursacht durch benachbarte Schneidrollen. Abbildung 4.4 illustriert dieses Prinzip.

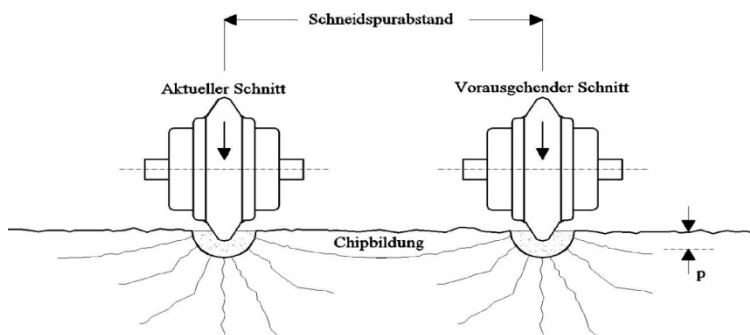


Abb.4.4: Chipbildung durch Zusammenwachsen einzelner Risse benachbarter Schneidrollen (aus BIERMEIER, 2011 modifiziert nach ROSTAMI, 1997).

Der Schneidrollenabstand (S) am Bohrkopf einer gängigen Tunnelbohrmaschine beläuft sich auf rund 60 – 90 mm. Das Verhältnis zwischen S und Penetration (P) soll laut ROSTAMI (1997) 10 bis 20 betragen. Für die Verwendung von Tunnelausbruchmaterial als Gesteinskörnung ist die Größe des anfallenden Gesteinsmaterials von essentieller Bedeutung. Ein größerer Schneidspurabstand erscheint sinnvoll um gröberes Ausbruchmaterial zu erhalten. Die Versuche an den Linearschneidmaschinen (LCM) wurden folglich mit unterschiedlichen Schneidspurabständen und zusätzlich mit unterschiedlichen Penetrationstiefen durchgeführt. Erste Hinweise auf einen grobkörnigeren Materialanfall bei großen Diskenabständen wurden von THALMANN (1995) publiziert (Abbildung 4.5).

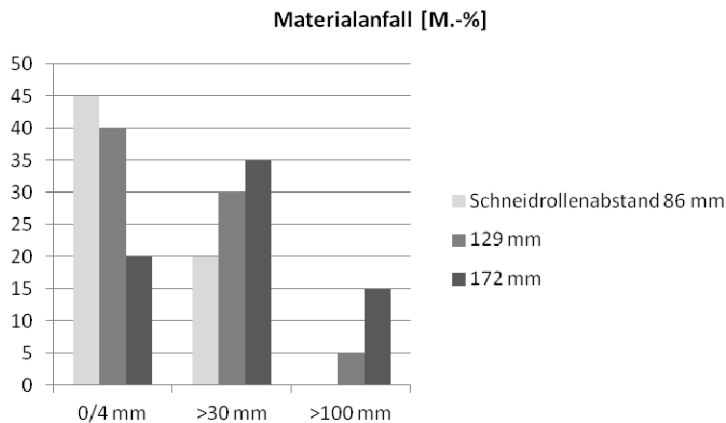


Abb.4.5: Materialanfall bei variablem Schneidspurabstand (aus RESCH, 2012 modifiziert nach THALMANN, 1995).

4.3 Methodik

Aus Gründen der Zeitökonomie und Logistik wurden die Linearschneidversuche an zwei unterschiedlichen Orten durchgeführt. Einerseits in Zeltweg bei SANDVIK Mining and Construction GmbH und andererseits am Earth Mechanics Institute der Colorado School of Mines in Golden. Die Ergebnisse der Schneidversuche auf Basis der beiden Prüfstände sind vergleichbar, jedoch ist die Funktionsweise der Prüfstände leicht unterschiedlich. Aus diesem Grund werden sie in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

4.3.1 LCM der SANDVIK Mining and Construction

Am Linearschneidprüfstand der SANDVIK in Zeltweg wurden folgende Lithologien untersucht:

- Imberg Sandstein
- Granitgneis
- Hornblendegneis

Der Prüfstand (LCM) lässt sich grundsätzlich in 3 Elemente unterteilen (Abbildung 4.6 und Abb.4.7).

- Das Grundgerüst inklusive der Schlittenführung.
- Der Schlitten inklusive der Meißelhalterung.
- Die Wanne für die Gesteinsproben.



Abb.4.6: Foto des Linearschneidprüfstands mit Grundgerüst, Schlitten, Führung, und Probenwanne. Die einzelnen Gesteinsblöcke sind hintereinander in der Wanne eingespannt.

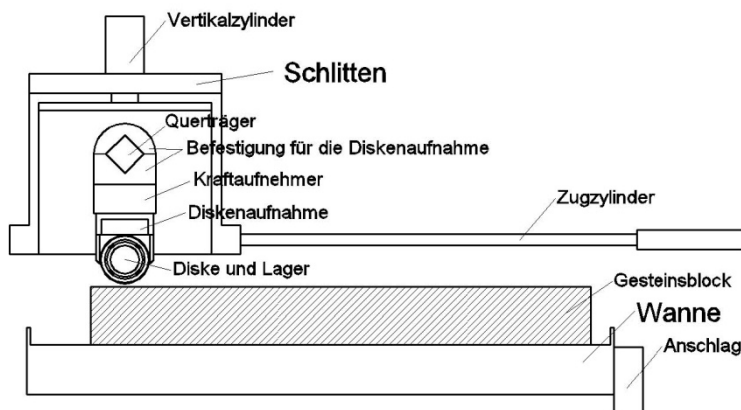


Abb.4.7: Schematische Skizze des Linearschneidprüfstandes der SANDVIK Mining and Construction GmbH (BIERMEIER, 2011).

Die Schlittenführung ist am Grundgerüst montiert, welches wiederum fest am Boden fixiert ist. Mittels computerangesteuerter Hydraulik kann sich der Schlitten entlang der Führung nach vorne und hinten bewegen. Am Schlitten selbst befindet sich ein Querträger, der mittels Hydraulikzylinder vertikal verstellt werden kann und die gewünschte Penetrationstiefe der Diske einstellt. Die Diskenhalterung samt Sensoren für die Krätemessung befindet sich am Querträger und ist mit Hilfe eines Antriebsmotors horizontal verstellbar. Die Metallwanne besteht aus 20 mm dicken Blechen und dient als Halterung für die Gesteinsproben. Die Wanne wird wiederum mittels Hydraulikzylinder seitlich am Grundgerüst fixiert. Die verwendete Schneidrolle ist eine 10“ Diske mit konstantem Profil und 13 mm breitem Schneidring. Die breite Schneidspitze soll die Breite einer sonst auf einer Tunnelvortriebsmaschine verwendeten 17“ Zoll Diske imitieren, da die LCM der SANDVIK Mining and Construction GmbH auf die Diskengröße von 10“ Zoll limitiert ist.

4.3.1.1 Variation der Penetrationstiefe

Der Vertikalzylinder bestimmt die vertikale Position des Querträgers und somit auch die der daran befestigten Schneidrolle. Bei jedem neuen Probekörper wird die Diske manuell auf Kontakt zur Gesteinsprobe geführt und der Nullpunkt bestimmt. Von diesem Nullpunkt aus kann für jede Messebene durch Computeransteuerung eine gewünschte Penetrationstiefe gewählt werden.

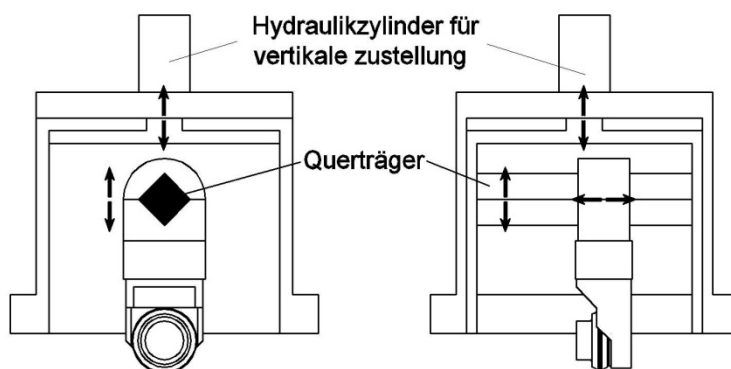


Abb.4.8: Detailskizze zur Beweglichkeit des Querträgers mittels Vertikalzylinder und der Diskenhalterung mittels Antriebsmotor (horizontal) (BIERMEIER, 2012).

Die Genauigkeit der Zustellung durch den Vertikalzylinder liegt theoretisch im Bereich von 0,1 mm. Abweichungen von bis zu 0,2 mm wurden während der Versuchsdurchführung toleriert. Abbildung 4.8 illustriert eine Detailskizze der vertikalen und horizontalen Zustellung des Schlittens.

4.3.1.2 Variation des Schneidspurabstandes

Die horizontale Zustellung der Diskenhalterung inklusive der Sensorik und der Schneidrolle selbst erfolgt über einen Antriebsmotor. Die maximale Bewegungsspannweite der Diskenhalterung beläuft sich auf 450 mm (Abbildung 4.9). Die millimetergenaue Zustellung ermöglicht eine beliebige Variation des Schneidspurabstandes.

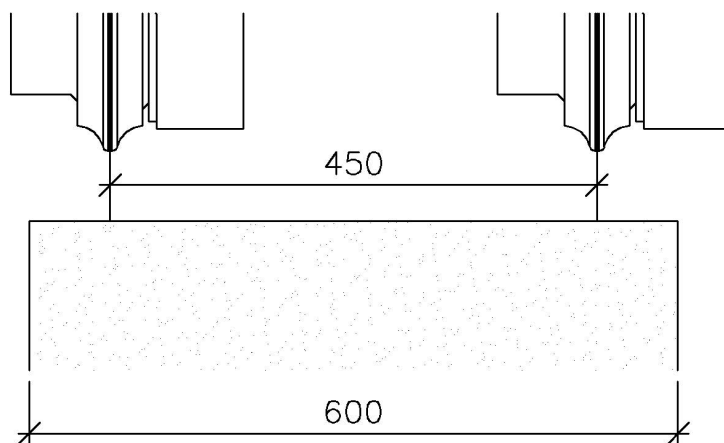


Abb.4.9: Darstellung der maximalen horizontalen Verstellbarkeit der Diske in Bezug auf die maximale Breite des darunterliegenden Probekörpers (BIERMEIER, 2011).

4.3.2.3 Versuchsaufbau

Die vom Steinmetz in 30 cm Kantenlänge geschnittenen Proben wurden aneinandergereiht in die Wanne eingebaut. Im Falle des Imberg Sandsteines beläuft sich die Würfelanzahl auf 8 Stück in der Wanne. Im Falle des Granitgneises und des Hornblendgneises auf 6 Würfel pro Wanne. Der ausschlaggebende Punkt für die unterschiedliche Probenanzahl in der Wanne resultiert aus der geringeren Anzahl der Rohmaterialien.

Die Blöcke wurden mittels einer Konstruktion aus Stützblechen und Schrauben (BIERMEIER, 2011) in der Wanne befestigt und in Längsrichtung mit einem Drehmomentschlüssel mit 200 Nm angezogen und befestigt. In Querrichtung wurden die Bleche mit 100 Nm verspannt. Die seitlichen Stützelemente weisen eine Länge von 295 mm auf, sodass jeder einzelne der 30 cm langen Gesteinswürfel von einem einzelnen Stahlblech gestützt und sauber gelagert wird. Durch das Fortschreiten der Penetration in der Gesteinsprobe sind die seitlichen Stahlbleche alle 25 mm Penetrationstiefe gegen kleinere auszutauschen damit die Diskenhalterung während des Schnitts nicht auf den Blechen aufliegt. Der Grund für das oftmalige Austauschen der Bleche in kleinen Schritten (alle 25 mm) ist die sonst fehlende seitliche Stützung der Probekörper. Das

Wechseln der Bleche funktioniert über die Schraubkonstruktion. Abbildung 4.10 zeigt eine Skizze der Verspannung der Gesteinsproben in der Wanne.

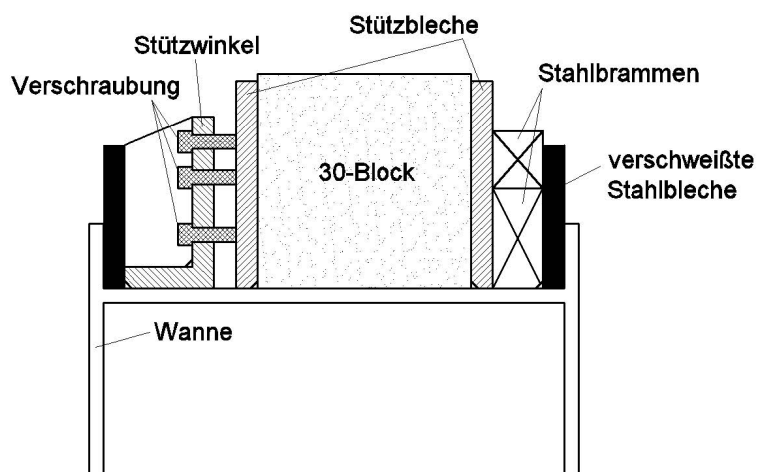


Abb.4.10: Skizze der Verspannung der Probenkörper in der Stahlwanne (BIERMEIER, 2011).

Der Einbau der Probekörper in die Wanne erfolgte in unterschiedlichen Orientierungen der Schieferung zur Schneidachse (normal und schiefwinkelig (schräg) zur Schieferung). Die Unterschiede der Sieblinien gleicher Lithologien bei abweichender Gefügeorientierung sollen Aufschluss über den Einfluss der Vortriebsrichtungen geben. Tabelle 4.1 fasst die getesteten Orientierungen der Gesteinswürfel zusammen.

Gesteinsart	Schieferungsrichtung (CLAR Wert)	Gefügeorientierung zur Schneidachse	Kürzel
Imberg Sandstein	isotrop (keine Schieferung)	-	IS
Granitgneis	008/84	normal	GrGn NSF
Granitgneis	188/52	schräg/schiefwinkelig	GrGn SSF
Hornblendegneis	180/89	normal	Amph NSF

Tab.4.1: Schieferungsorientierung der Gesteinswürfel zur Schneidrichtung

4.3.2.4 Schneidprogramm

Die Erstellung des Schneidprogramms in Zeltweg war ein iterativer Prozess. Das entwickelte Schneidprogramm, das von BIERMEIER (2011) angewendet wurde (siehe Tabelle 4.2), änderte sich mit Fortschritt der Versuche aufgrund von neuen Erkenntnissen und die metamorphen Lithologien wie Granitgneis und Hornblendegneis wurden mit einem, auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse aus den bereits durchgeführten Versuchen, fortgeschriebenen Schneidprogramm untersucht (siehe Tabelle 4.3).

Um die optimale Ausnutzung der Gesteinskörper zu gewährleisten wurde zuerst ein Schneidprogramm entwickelt, welches verschiedene Penetrationstiefen und unterschiedliche Schneidspurabstände umfasste. Die Schneidgeschwindigkeit bei den Versuchen war 1,5 m/s.

Die verwendeten Penetrationstiefen waren:

- 3 mm
- 5 mm
- 7 mm

Die verwendeten Schneidspurabstände waren:

- 40 mm
- 60 mm
- 80 mm
- 100 mm

Das Schneidprogramm wurde so gewählt, dass jede Penetrationstiefe mit jedem Schneidspurabstand kombiniert wurde. Einzige Ausnahme dabei war die 3 mm Penetration, welche nicht mit 80 mm und 100 mm Schneidspurabstand kombiniert wurden, da es bei dieser geringen Penetration und großem Spacing zu keinem Gesteinschipping mehr kommt. Aufgrund der ersten Ergebnisse vom Imberg Sandstein wurde bei den metamorphen Lithologien die 3 mm Penetration auch bei einem Spacing von 60 mm nicht mehr angewendet.

Das detaillierte Programm für den Imberg Sandstein ist in Tabelle 4.2 zusammengefasst. In der Tabelle ist zwischen Konditionierungs- und Messebenen zu unterscheiden. Konditionierungsebenen wurden vor jeder Änderung im Schneidprogramm durchgeführt um das Gestein, so wie real im Tunnelbau, durch vorangegangene Schnitte vorzuschädigen.

Schnittebenen	Schnittanzahl	Probennahmen	Penetration [mm]	Summe Penetration [mm]	Schneidspurabstand [mm]	Grund
3	15	0	3	9	40/60	Konditionierung
4	20	12	3	21	40/60	Messung
4	20	12	5	41	40/60	Messung
4	20	12	7	69	40/60	Messung
2	6	0	5	79	100	Konditionierung
4	12	4	5	99	100	Messung
4	12	4	7	127	100	Messung
1	3	0	5	132	80	Konditionierung
4	12	4	5	152	80	Messung
4	12	4	7	180	80	Messung
Anzahl Schnitte Gesamt 132		Probennahmen 52		TOTAL 180 mm		

Tab.4.2: Schneidprogramm Imberg Sandstein

Vor einer Messebene wurde das Gestein durch vorausgegangene Schnittebenen konditioniert um die wahren Gebirgsverhältnisse einer TBM-Ortsbrust zu simulieren. In den Messebenen wurden jeweils die Randschnitte ausgeschieden um den Einfluss von Brüchen zur freien Fläche zu vermeiden. Abbildung 4.11 erläutert die Positionen der einzelnen Schnitte an einem Gesteinsblock im Profil.

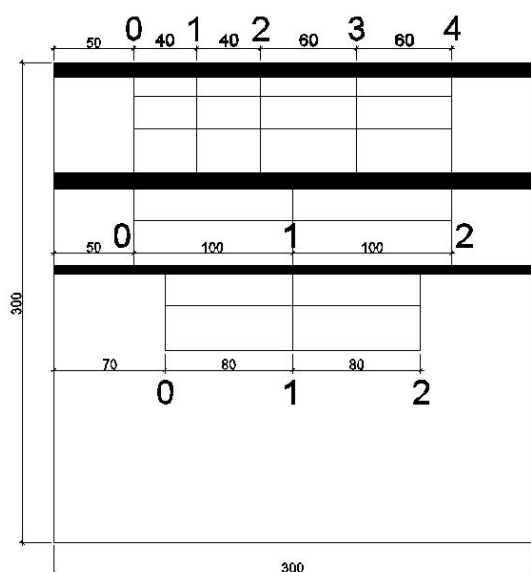


Abb.4.11: Darstellung der Positionen der einzelnen Schnitte im Imberg Sandstein in den jeweiligen Messebenen (BIERMEIER, 2011).

Die großen Ziffern in Abbildung 4.11 stellen die fortlaufenden Nummern der Schnittspuren in einer Schneidebene dar. Die kleineren Ziffern dazwischen verdeutlichen den Schneidspurabstand bzw. den Abstand zum Rand des Blocks in Millimeter. Es lässt sich ablesen, dass bei einem Spacing von 40/60 mm jeweils Schnitt 0, 2 und 4 ausgeschieden und Schnitt 1 für Analysen mit Spacing 40 mm herangezogen wurden. Schnitt 3 wurde für Analysen mit Spacing 60 mm verwendet. Bei den Schneidspurabständen 80 mm und 100 mm diente jeweils der Schnitt 1 für die Probenahme und die Schnitte 0 und 2 wurden ausgeschieden.

Nach ersten Erkenntnissen wurde das Schneidprogramm optimiert und ein alternatives Programm für den Granitgneis und den Hornblendegneis herangezogen. Die geringste Penetrationstiefe mit 3 mm sowie der geringste Schneidspurabstand mit 40 mm wurden nicht weiter verwendet. Der Grund dafür war der geringe Bezug zu realen Penetrationstiefen und realem Spacing im maschinellen Tunnelbau. Zusätzlich kommt bei 60 mm Spacing und 3 mm Penetration zu keinem permanenten Gesteinschipping.

Das detaillierte Programm für den Granitgneis und für den Hornblendegneis ist in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Schnittebenen	Schnittanzahl	Probennahmen	Penetration [mm]	Summe Penetration [mm]	Schneidspurabstand [mm]	Grund
2	8	0	5	10	60	Konditionierung
4	16	4	5	30	60	Messung
4	16	4	7	58	60	Messung
2	6	0	5	68	80	Konditionierung
4	12	4	5	88	80	Messung
4	12	4	7	116	80	Messung
2	6	0	5	126	100	Konditionierung
2	6	2	5	136	100	Messung
2	6	2	7	150	100	Messung
Anzahl Schnitte Gesamt 88		Probennahmen 20	TOTAL 150 mm			

Tab.4.3: Schneidprogramm Granitgneis und Hornblendegneis

Bei einem Spacing von 60 mm wurden 4 Schnitte pro Ebene ausgeführt, wobei die beiden mittleren in die Auswertung aufgenommen wurden. Bei Schneidspurabstand 80 mm und 100 mm war die Auswertung analog zum Imberg Sandstein. Auch hier wurden pro Ebene 3 Schnitte durchgeführt, wobei nur der Mittlere als Probe entnommen wurde. Insgesamt wurden pro Spacing/Penetrationssetting vier bzw. bei Spacing 100 mm zwei Messebenen ausgeführt und aus jeder Messebene eine Probe entnommen.

Im Zuge der Probenahme wurde das gesamte anfallende Gesteinsmaterial, der in der Mitte liegenden Gesteinsblöcke, händisch aufgesammelt und die feinkörnigen Reste mit einem Industriestaubsauger aufgesaugt. Das Ausbruchmaterial vom ersten und vom letzten Block in der Reihe wurde aufgrund von Randeinflüssen nicht eingesammelt. Das Gesteinsmaterial wurde anschließend auf die Korngrößenverteilung und die Kornform analysiert.

4.3.2 LCM der Colorado School of Mines

Am Linearschneidprüfstand der CSM wurden folgende Lithologien untersucht.

- Kalkglimmerschiefer
- Augengneis
- Schiefergneis

Im Gegensatz zum Linearschneidprüfstand in Zeltweg, an dem die Diske über das Gestein rollt, wird die Probe am Prüfstand der CSM unter der Schneidrolle hinweg geschoben. Die Einspannung der Probekörper erfolgt mittels Betonbettung anstatt der Einspannung mit Stahlblechen wie in Zeltweg. Die Ergebnisse der Untersuchungen in Colorado und Zeltweg sind trotz der Unterschiede im Prüfanlagenaufbau vergleichbar.

Der Prüfstand besteht aus einem Stahlrahmen an dem die Sensorik für die dreidimensionale Kräftemessung sowie der Diskenmeißel befestigt sind. Eine Stahlwanne mit 120 x 104 cm wird mittels Hydraulik unter dem Stahlrahmen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1 m/s durchgeschoben (Abbildung 4.12). Durch die vertikale Veränderung der Position der Diske am Stahlrahmen kommt es zur Penetration in die Probenwanne. Abbildung 4.13 zeigt eine schematische Skizze des Prüfstands sowie der aufgenommenen Kräfte und der Schneidspuren.



Abb.4.12: Schneidprüfstand an der Colorado School of Mines.

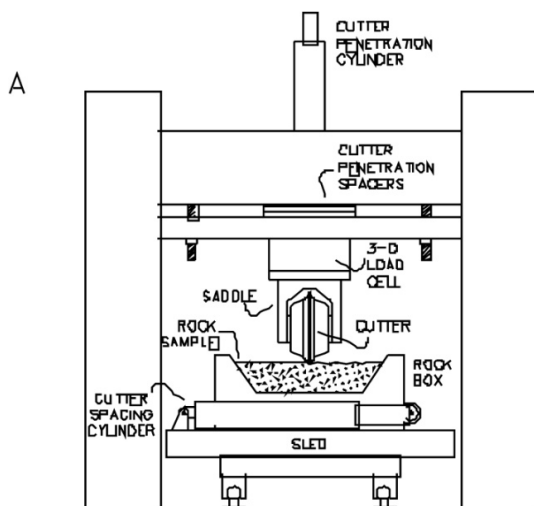
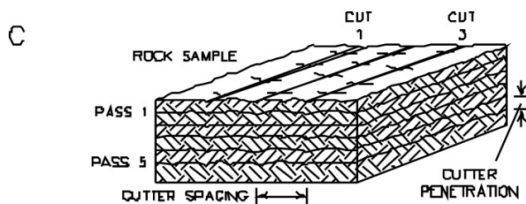
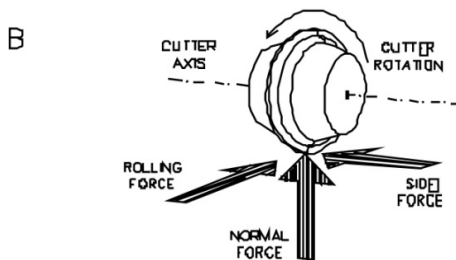


Abb.4.13: A: Schematische Skizze des Linearschneidprüfstands an der CSM. B: Die beim Schneidprozess aufgenommenen Kräfte. C: Beispiel einer geschnittenen Gesteinsprobe. (CIGLA & OZDEMIR, 2000)



4.3.2.1 Variation der Penetrationstiefe

Um die Penetrationstiefe zu ändern werden Metallplatten mit unterschiedlichen Dicken zwischen dem Stahlrahmen und der Diskenaufhängung montiert (Abbildung 4.13.A). Die Stahlplatten haben eine Dicke von 0,1 Zoll (2,54 mm) und 1 Zoll (2,54 cm). Im Gegensatz zum Schneidprüfstand in Zeltweg, an dem die Penetration hydraulisch auf Zehntelmillimeter eingestellt werden kann, ist man hier aufgrund der Distanzplatten auf 0,1 Zoll Abstände limitiert. Die maximal erreichbare Penetration bei dieser Maschinenauslegung ist 5,6 Zoll (14,2 cm). Aus diesem Grund wurde das Schneidprogramm für die Versuche in Colorado leicht abgeändert.

4.3.2.2 Variation des Schneidspurabstandes

Nach dem Einbau der Box in den Prüfstand wird die Position des Probeträgers mit einem Metallstift markiert. Von dort aus werden per Hand die gewünschten Spacings, mittels Maßband und Textmarker, am Prüfstandsrahmen eingezeichnet. Zum Einstellen des Schneidspurabstands wird die Probenbox mit Hydraulikzylindern nach links oder rechts bis zur gewünschten Markierung verschoben.

4.3.2.3 Versuchsaufbau

Die Gesteinsproben wurden in Würfel mit 30 cm Kantenlänge geschnitten und mit unterschiedlichen Orientierungen der Schieferung zur Schneidrichtung in die Probenwanne eingebaut (Tab.4.4). Aufgrund des Wannenformats von 120 x 104 cm war es möglich jeweils 2 unterschiedliche Orientierungen in einer Wanne zu testen. Im Gegensatz zur Schraubkonstruktion in Zeltweg wurden die Proben in Colorado mit Beton eingegossen um für die nötige Seitenstützung zu sorgen. Jeweils 3 Gesteinswürfel hintereinander wurden eingebaut. Abbildung 4.14. zeigt, stellvertretend für alle Lithologien, die Anordnung der Probenwürfel in der noch nicht betonierten Stahlwanne.

Gesteinsart	Schieferungsrichtung (CLAR Wert)	Gefügeorientierung zur Schneidrichtung	Kürzel
Kalkglimmerschiefer	181/89	normal	KGS NSF
Kalkglimmerschiefer	091/89	parallel	KGS PSF
Kalkglimmerschiefer	090/52	schräg	KGS SSF
Kalkglimmerschiefer	stark verfaltet	-	KGS V
Augengneis	358/71	normal	AugGn NSF
Augengneis	088/72	parallel	AugGn PSF
Augengneis	115/50	schräg	AugGn SSF
Schiefergneis	105/69	schräg	SG SSF

Tab.4.4: Schieferungsorientierung der Gesteinswürfel zur Schneidrichtung



Abb.4.14: Anordnung der Gesteinswürfel in der noch nicht betonierten Probenwanne. (MORI, 2012)

4.3.2.4 Schneidprogramm

Für die Versuche in Colorado konnte das Schneidprogramm von Zeltweg nicht übernommen werden, weil die maximal einstellbare Penetration mit 142,2 mm limitiert ist. Das Programm wurde genau auf diese Penetrationstiefe ausgelegt und ist in Tabelle 4.5 ersichtlich. Die Schneidgeschwindigkeit betrug bei diesen Versuchen 1 m/s.

Schnittebenen	Schnittanzahl	Probennahmen	Penetration [mm]	Summe Penetration [mm]	Schneidspurabstand [mm]	Grund
2	8	0	5,1	10,2	60	Konditionierung
4	16	4	5,1	30,6	60	Messung
4	16	4	7,6	61	60	Messung
2	6	0	5,1	71,2	80	Konditionierung
4	12	4	7,6	101,6	80	Messung
2	6	0	5,1	111,8	100	Konditionierung
4	12	4	7,6	142,2	100	Messung
Anzahl Schnitte Gesamt 88		Probennahmen 16		TOTAL 142,2 mm		

Tab.4.5: Schneidprogramm Kalkglimmerschiefer, Augengneis und Schiefergneis

Die Anordnung der Schnitte in den einzelnen Ebenen ist in den Abbildungen 4.15 – 4.17 ersichtlich. Bei einem Schneidspurabstand von 60 mm wurden 10 Schnitte pro Ebene ausgeführt, wobei Schnitt 0 und Schnitt 5C im Mörtelbett zu liegen kommen. Die beiden, jeweils in der Mitte der Gesteinsblöcke zu liegen kommenden Schnitte (2 und 3 bzw. 7 und 8), wurden für die Korngrößen- und Kornformauswertung herangezogen. Bei den Versuchen mit Schneidspurabstand 80 mm und 100 mm wurden pro Schnittebene jeweils 8 Schnitte durchgeführt. Die mittleren Schnitte in den Gesteinsblöcken (Schnitt 2 und Schnitt 6) wurden für die weitere Auswertung als Proben ausgewählt.

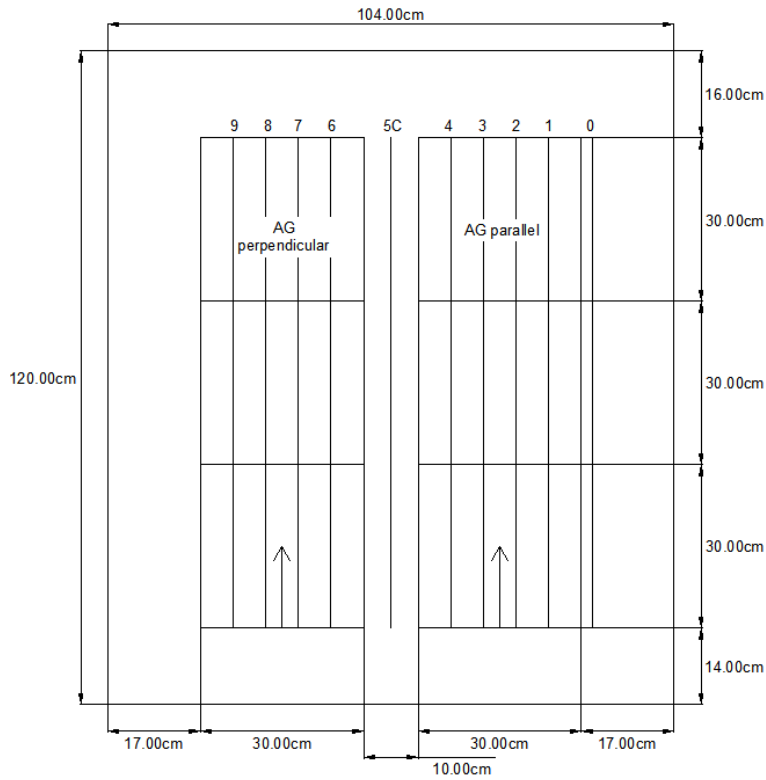


Abb.4.15: Anordnung der Schnitte bei 60 mm Schneidspurabstand in der Probenwanne. (MORI, 2012)

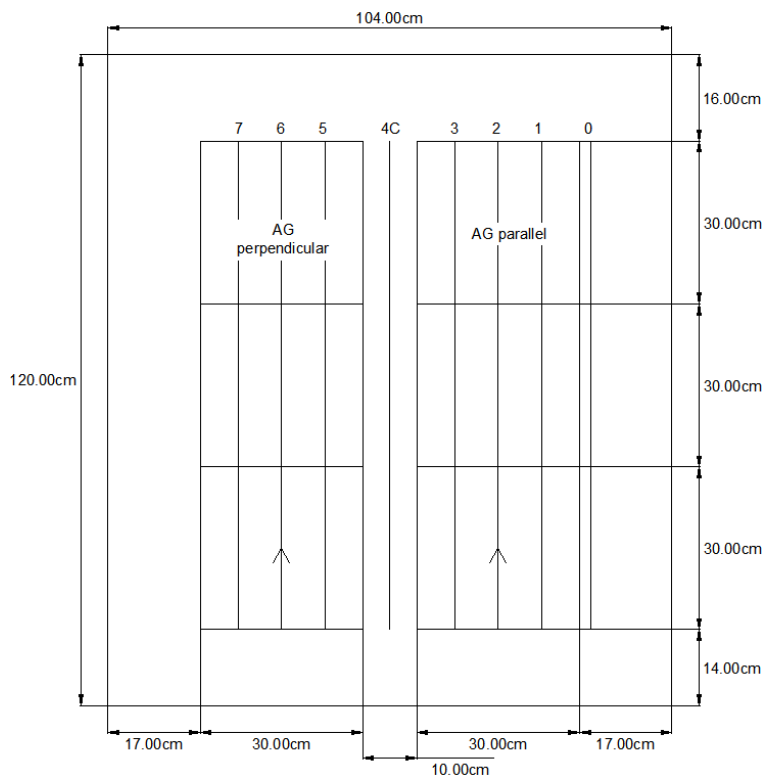


Abb.4.16: Anordnung der Schnitte bei 80 mm Schneidspurabstand in der Probenwanne. (MORI, 2012)

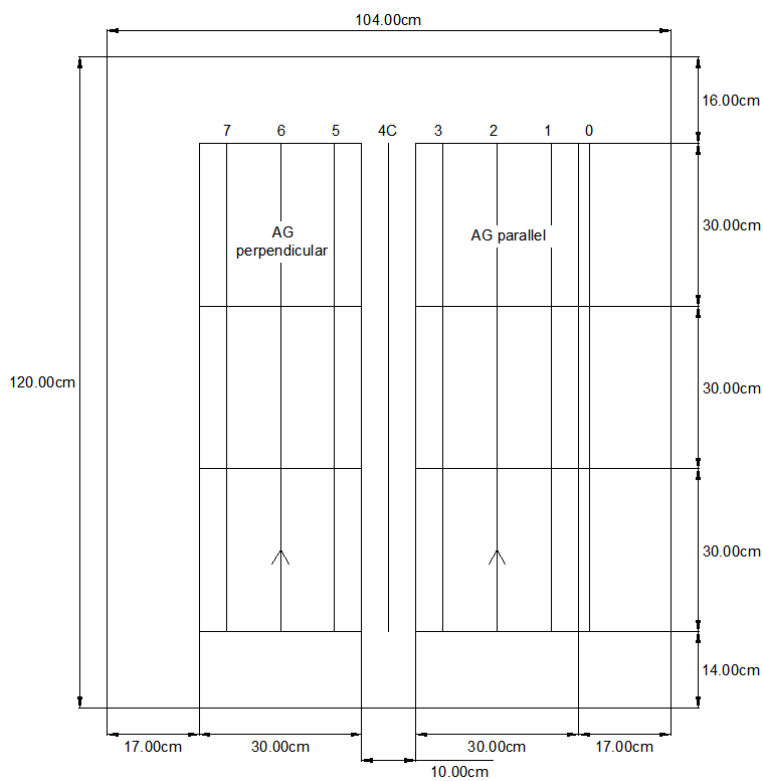


Abb.4.17: Anordnung der Schnitte bei 100 mm Schneidspurabstand in der Probenwanne. (MORI, 2012)

Das Aufsammeln des Ausbruchmaterials wurde mittels händischem Aufsammeln und einem Handstaubsauger durchgeführt. Der Bereich der Probenahme erstreckte sich von 10 cm nach Eindringen der Diske in den Gesteinsblock bis 10 cm vor dem Verlassen der Diske aus dem Gesteinsblock. Zum besseren Verständnis ist der Probenahmebereich in Abbildung 4.18 dargestellt.



Abb.4.18: Probenahmebereich an der LCM in Colorado.

4.3.3 Korngrößenanalyse

Die Korngrößenanalyse erfolgte, bei den Proben die in Zeltweg geschnitten wurden, am Institut für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben. Dazu wurden Norm-Prüfsiebe mit folgenden Maschenweiten verwendet:

- 63 mm
- 31,5 mm
- 16 mm
- 8 mm
- 4 mm
- 2 mm
- 1 mm

Die Klassierung erfolgte durch Trockensiebung.

Bei den Proben, die an der CSM in Colorado geschnitten wurden, erfolgte, aufgrund der dort landesüblichen Zoll-Maßeinheit, die Klassierung in folgende Maschenweiten:

- 88,9 mm
- 45 mm
- 32 mm
- 16 mm
- 9,51 mm
- 4 mm
- 2 mm
- 1,19 mm

Die Klassierung erfolgte mittels eines Roto-Tap Siebturmes. Dieser Siebturm kombiniert drehende und schlagende Bewegungen.

Die Proben mit gleicher Penetrationstiefe und gleichem Schneidspurabstand wurden gemittelt und auf logarithmischen Diagrammen dargestellt. Durch die Darstellung auf logarithmischen Diagrammen fallen die unterschiedlichen Kornklassen beim Auswerten nicht ins Gewicht.

4.3.4 Kornformanalyse

Die Kornformanalyse wurde mit einer Schiebelehre durchgeführt und gibt das Verhältnis zwischen längster und kürzester Kornachse an (Aspect Ratio). Für die Bestimmung der Aspect Ratios der metamorphen, geschieferten Lithologien wurden jeweils 20 Körner aus den Klassen 16/32 mm sowie 8/16 (Zeltweg) bzw. 9,51/16 mm (Colorado) ausgemessen. In den größeren Siebfraktionen waren zum Teil weniger als 20 Körner enthalten, deshalb wurde auf eine Vermessung dieser Körner aus Gründen der Repräsentativität verzichtet.

Die Auswertung in Masseprozent teilt die Körner in gedrunen ($AR < 3$) und plattig ($AR > 3$), wobei als Grenze ein Aspect Ratio von 1:3 angenommen wurde.

4.4 Ergebnisse

Die Darstellung der Korngrößenanalysen und der Kornformuntersuchungen folgt in den nachstehenden Unterkapiteln.

4.4.1 Ergebnisse der Korngrößenanalysen

Aus den Voruntersuchungen am isotropen Imberg Sandstein durch BIERMEIER (2011) geht hervor, dass der Schneidspurabstand einen wesentlichen Einfluss auf das anfallende Ausbruchmaterial hat, weniger jedoch die Penetrationstiefe.

Die folgenden Ergebnisse fassen die Auswertungen der anisotropen, metamorphen Lithologien zusammen. Für die Darstellung der verwendeten Parameter und Lithologien wurden in den Diagrammen folgende Abkürzungen verwendet:

-S:	Schneidspurabstand/Spacing
-P:	Penetrationstiefe
-KGS:	Kalkglimmerschiefer
-AG:	Augengneis
-SG:	Schiefergneis
-GrGn:	Granitgneis
-Amph:	Hornblendegneis/Amphibolgneis
-NSF:	Normal zur Schieferung geschnitten
-PSF:	Parallel zur Schieferung geschnitten
-SSF:	Schiefwinkelig/Schräg zur Schieferung geschnitten
-V:	Verfaltet

4.4.1.1 Einfluss der Gefügeorientierung auf das Ausbruchmaterial

4.4.1.1.1 Sieblinien Kalkglimmerschiefer

Der Kalkglimmerschiefer wurde in drei Gefügeorientierungen zur Schneidrichtung getestet. Als vierte Probe wurde ein verfalteter Kalkglimmerschiefer verwendet. Die Abbildungen 4.19 – 4.22 verdeutlichen die Ergebnisse der Sieblinien bei gleicher Lithologie jedoch unterschiedlicher Gefügeorientierung (normal, parallel und schräg zur Schieferung sowie eine verfaltete Probe).

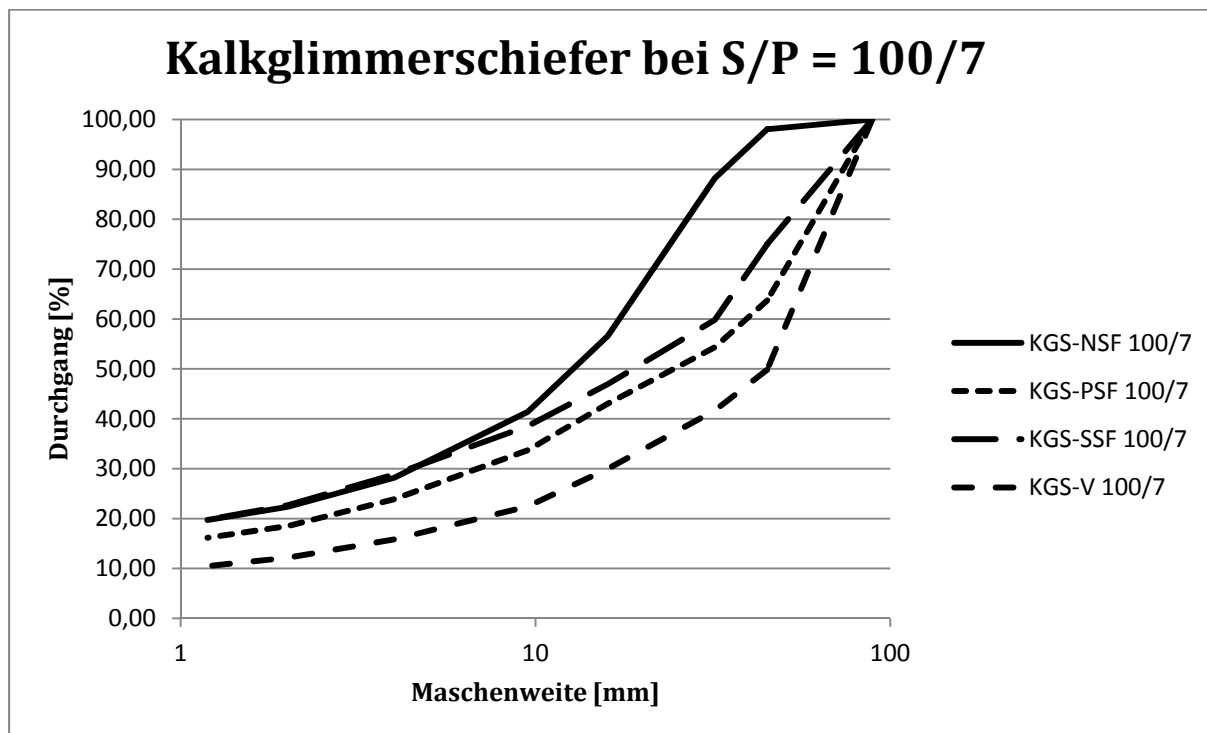


Abb.4.19: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers bei Schneidspurabstand 100 mm und Penetrationstiefe von 7,6 mm in 4 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung sowie verfaltet).

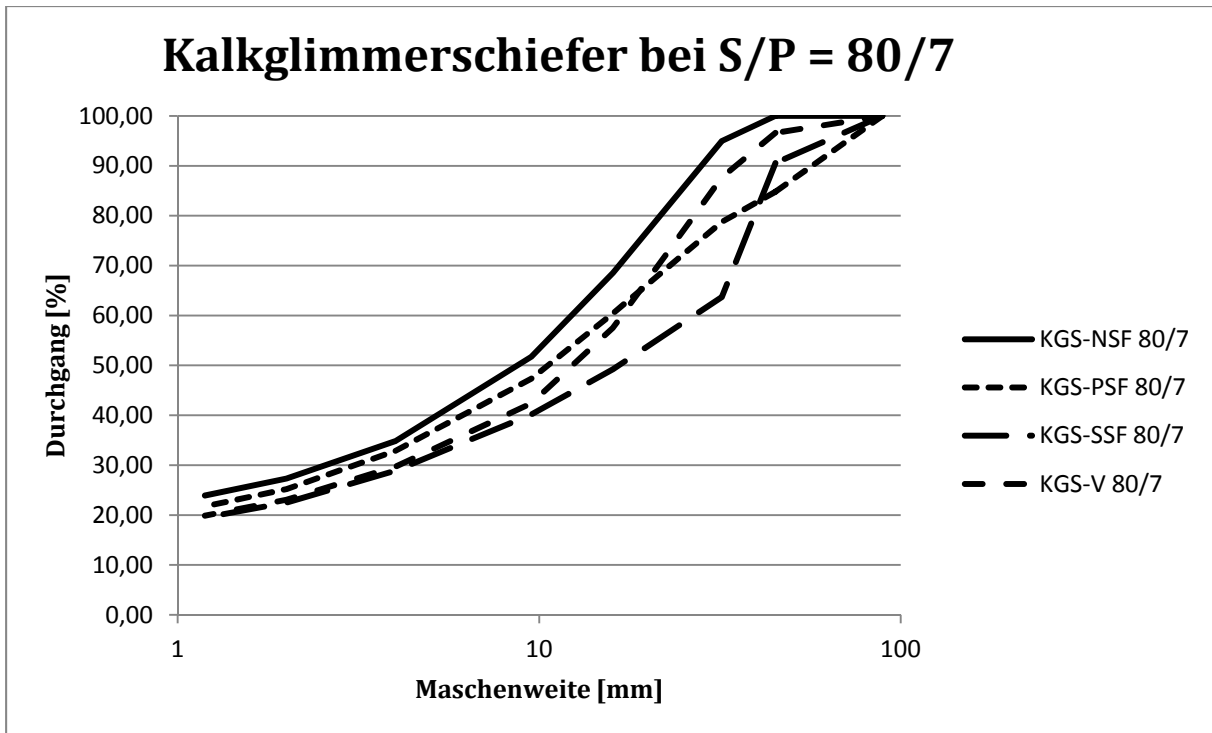


Abb.4.20: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers bei Schneidspurabstand 80 mm und Penetrationstiefe von 7,6 mm in 4 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung sowie verfaltet).

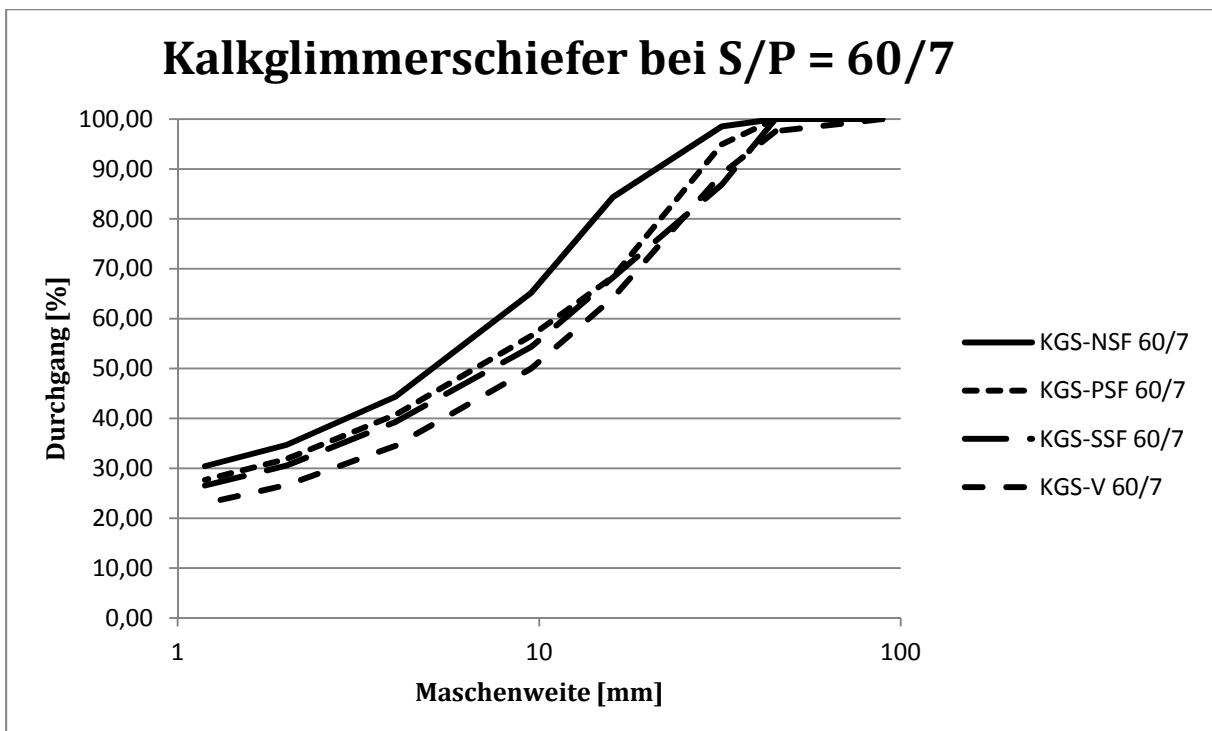


Abb.4.21: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers bei Schneidspurabstand 60 mm und Penetrationstiefe von 7,6 mm in 4 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung sowie verfaltet).

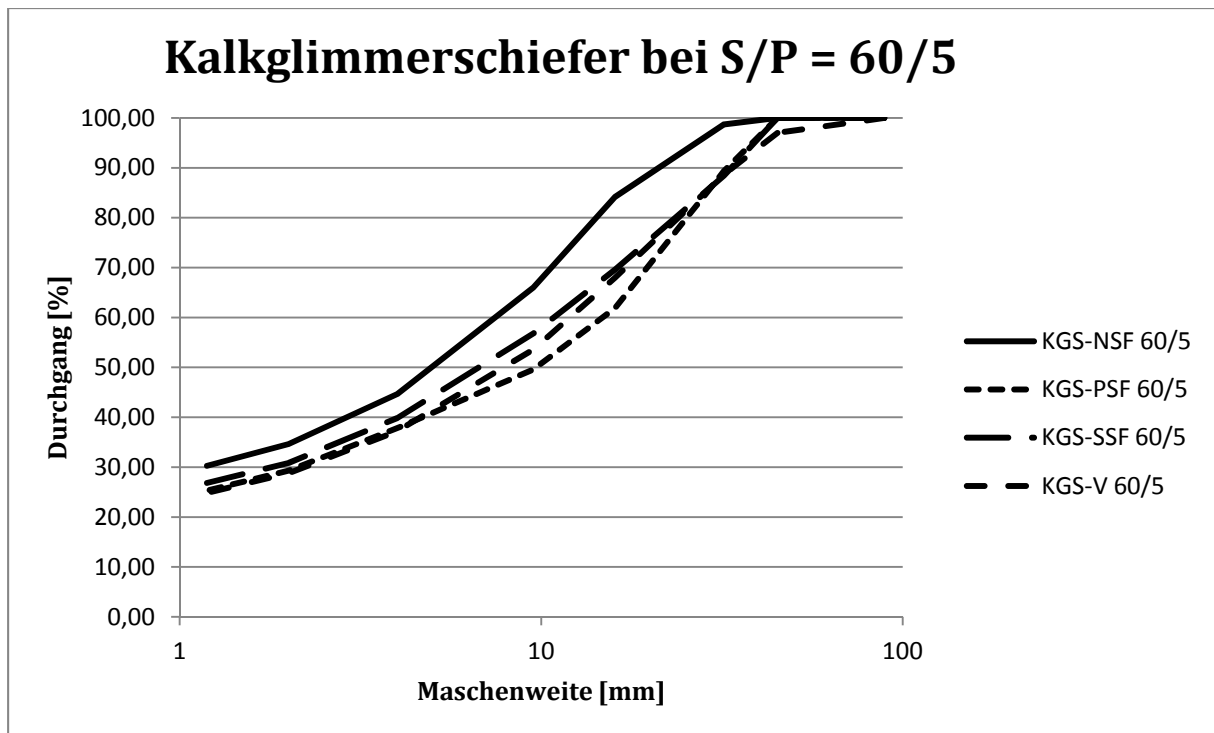


Abb.4.22: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers bei Schneidspurabstand 60 mm und Penetrationstiefe von 5,1 mm in 4 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung sowie verfaltete).

Abbildung 4.19 zeigt den Kalkglimmerschiefer in 4 Gefügeorientierungen bei einem Schneidspurabstand von 100 mm und einer Penetrationstiefe von 7,6 mm. Der Feinkornanteil (< 1,19 mm) schwankt von rund 10,5 % beim verfalteten Gestein bis hin zu rund 20 % normal sowie schräg zur Schieferung. Die größte Sieblinie wird durch den verfalteten Kalkglimmerschiefer dargestellt, die feinste durch den Kalkglimmerschiefer der normal zur Schieferung getestet wurde. Dazwischen liegen etwas feiner der schräg zur Schieferung getestete und etwas gröber der parallel zur Schieferung geschnittene KGS. Bei den Abbildungen 4.20 (Schneidspurabstand 80 mm bei Penetration 7,6 mm), Abbildung 4.21 (Schneidspurabstand von 60 mm und Penetration 7,6 mm) sowie bei Abbildung 4.22 (Schneidspurabstand 60 mm und Penetration 5,1 mm) sind die Unterschiede in den Sieblinien in Abhängigkeit der Gefügeorientierung nicht so stark nachweisbar wie beim größten Schneidspurabstand und der größten Penetration, jedoch erweist sich der Kalkglimmerschiefer normal zur Schieferung in allen Fällen als der mit der feinsten Sieblinie. Außerdem kommt es zu einer permanenten Zunahme des Feinkornanteils bei Verringerung des Schneidspurabstandes bei allen Proben (Abb.4.20: Feinkorngehalt von rund 20 % - rund 24 %; Abb.4.21: Feinkorngehalt von rund 23 % bis rund 30 %; Abb.4.22: Feinkorngehalt von rund 25 % - rund 30 %).

4.4.1.1.2 Sieblinien Augengneis

Der Augengneis wurde in drei Gefügeorientierungen zur Schneidrichtung getestet (normal, parallel und schräg). Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Abbildungen 4.23 – 4.26 illustriert.

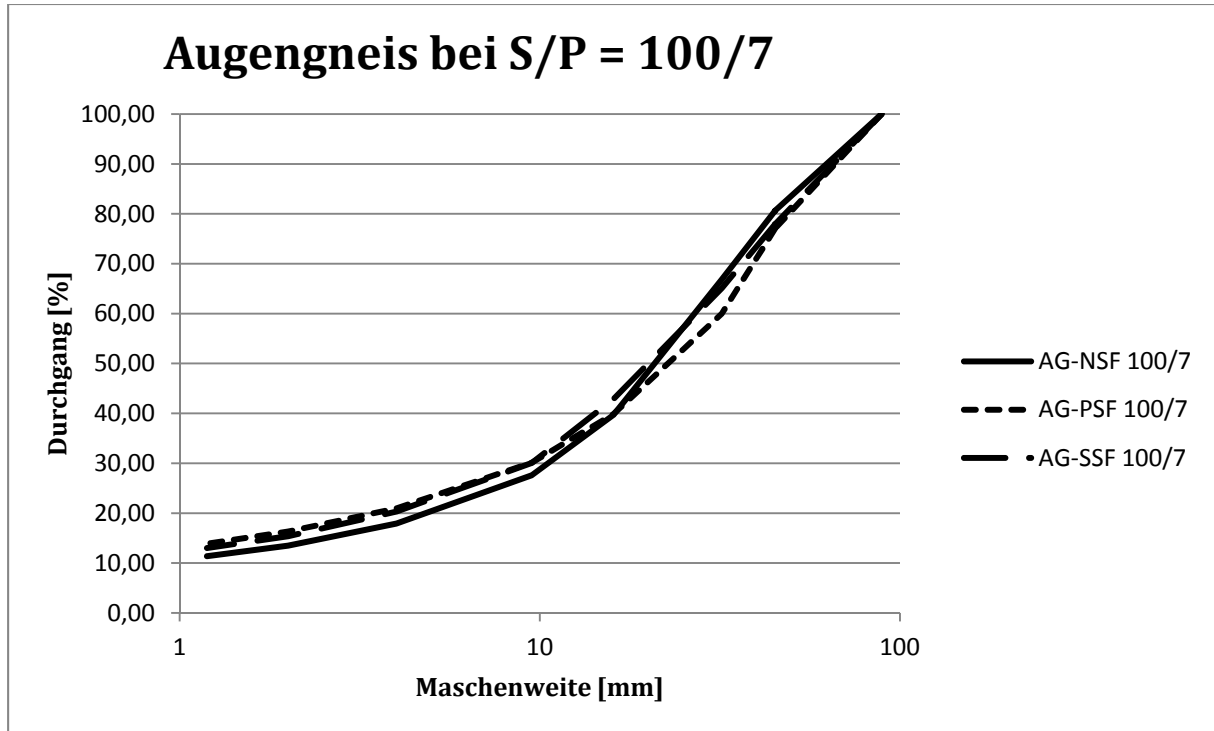


Abb.4.23: Korngrößenanalyse des Augengneises bei Schneidspurabstand 100 mm und Penetrationstiefe von 7,6 mm in 3 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung).

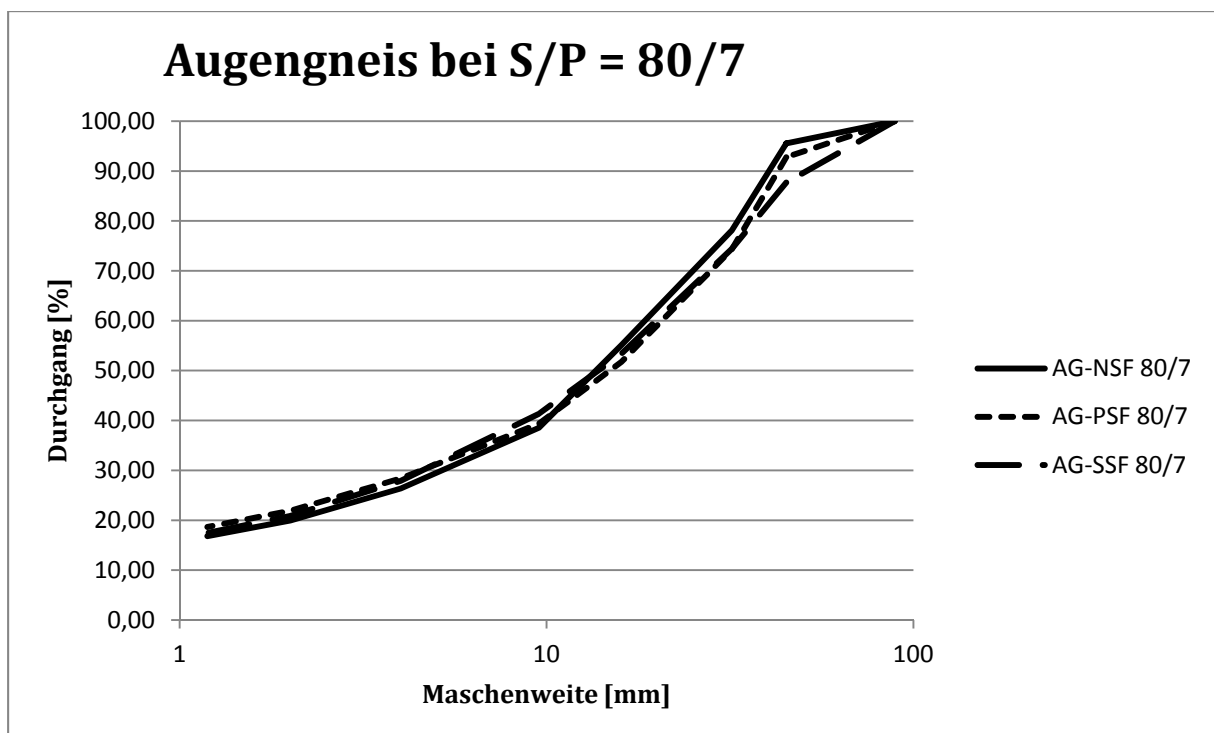


Abb.4.24: Korngrößenanalyse des Augengneises bei Schneidspurabstand 80 mm und Penetrationstiefe von 7,6 mm in 3 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung).

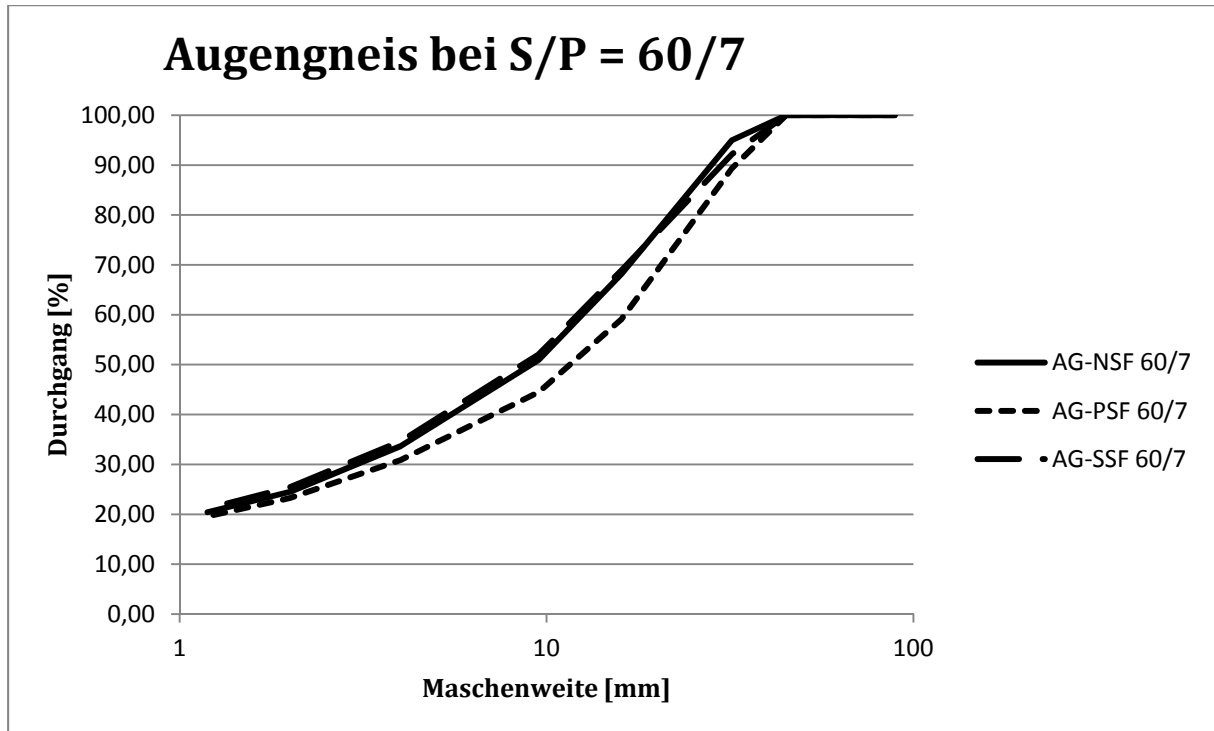


Abb.4.25: Korngrößenanalyse des Augengneises bei Schneidspurabstand 60 mm und Penetrationstiefe von 7,6 mm in 3 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung).

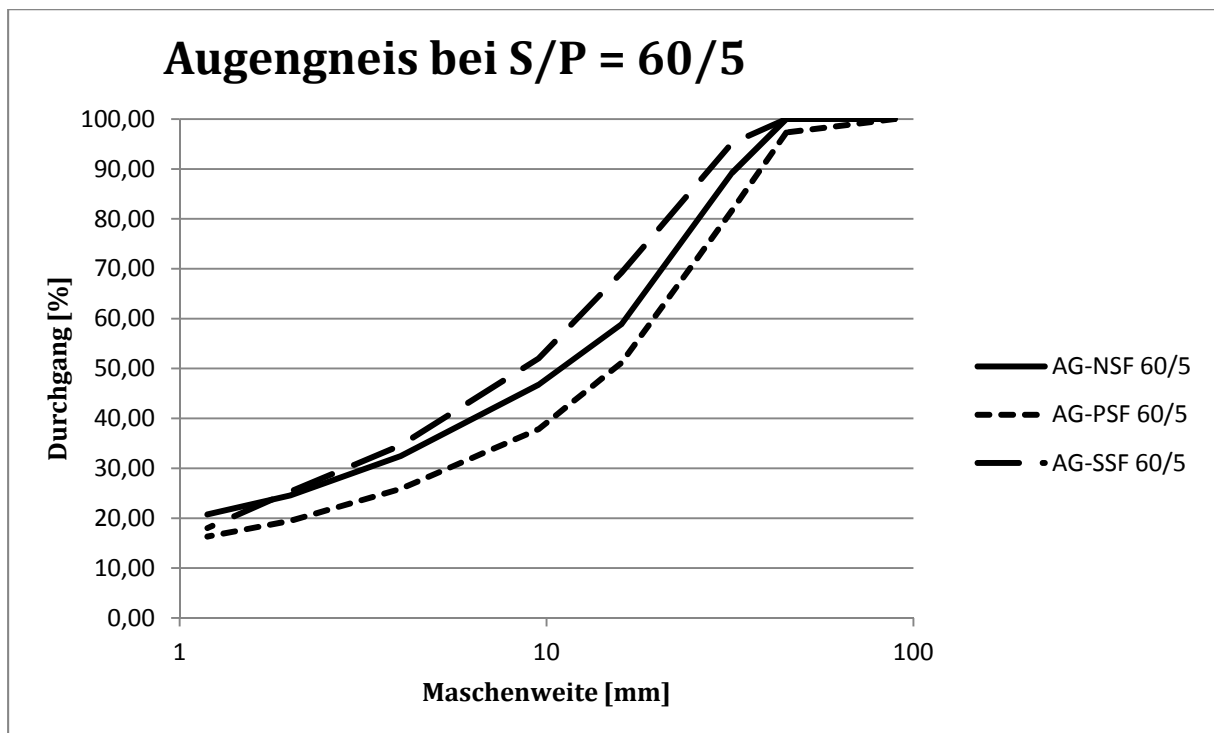


Abb.4.26: Korngrößenanalyse des Augengneises bei Schneidspurabstand 60 mm und Penetrationstiefe von 5,1 mm in 3 Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung).

Aus den unterschiedlichen Darstellungen des Augengneises geht hervor, dass sich die Sieblinien des Ausbruchmaterials in Abhängigkeit der Schieferungsorientierung nicht sonderlich unterscheiden. Beim Schneidspurabstand von 60 mm zeigt sich, dass der parallel zur Schieferung geschnittene Augengneis einen etwas gröberen Materialanfall aufweisen kann als die anderen beiden Gefügeorientierungen. Der Feinkornanteil (< 1,19 mm) steigt auch bei dieser Lithologie mit abnehmendem Schneidspurabstand an (bei 100 mm: rund 11,5 – 14 %; bei 80 mm: rund 17 – 18,5 %; bei 60 mm: 19,5 – 21 %). Die Penetrationstiefe von 5,1 mm bei 60 mm Schneidspurabstand in Abbildung 4.26 zeigt keine Zunahme des Feinkornanteils im Gegensatz zur Abbildung 4.25 bei gleichen Spacing und tieferer Penetration.

4.4.1.1.3 Sieblinien Granitgneis

Der Granitgneis wurde in zwei Gefügeorientierungen zur Schneidrichtung getestet (normal, und schräg). Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Abbildungen 4.27 – 4.32 illustriert. Da die Versuche am Granitgneis in Zeltweg durchgeführt wurden, beinhalten die Ergebnisse, im Gegensatz zu Kalkglimmerschiefer und Augengneis auch Sieblinien mit 5 mm Penetration bei 80 und 100 mm Schneidspurabstand.

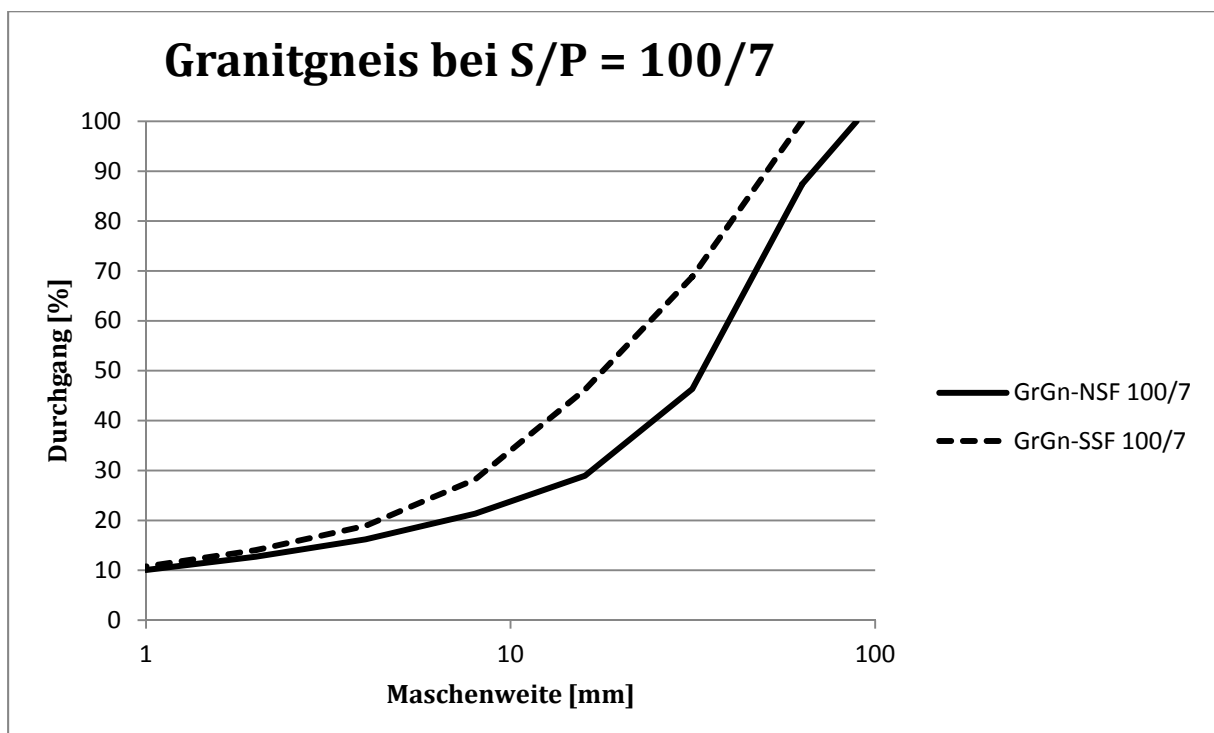


Abb.4.27: Korngrößenanalyse des Granitgneises bei Schneidspurabstand 100 mm und Penetrationstiefe von 7 mm in 2 Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

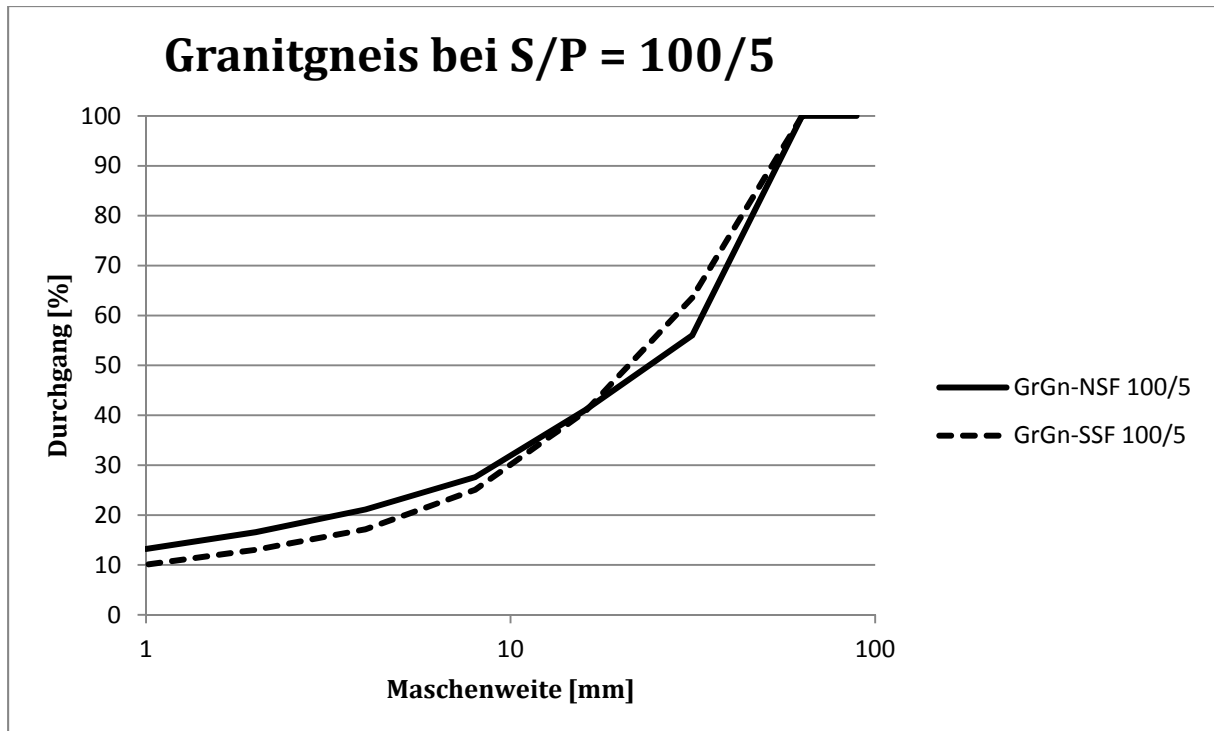


Abb.4.28: Korngrößenanalyse des Granitgneises bei Schneidspurabstand 100 mm und Penetrationstiefe von 5 mm in 2 Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

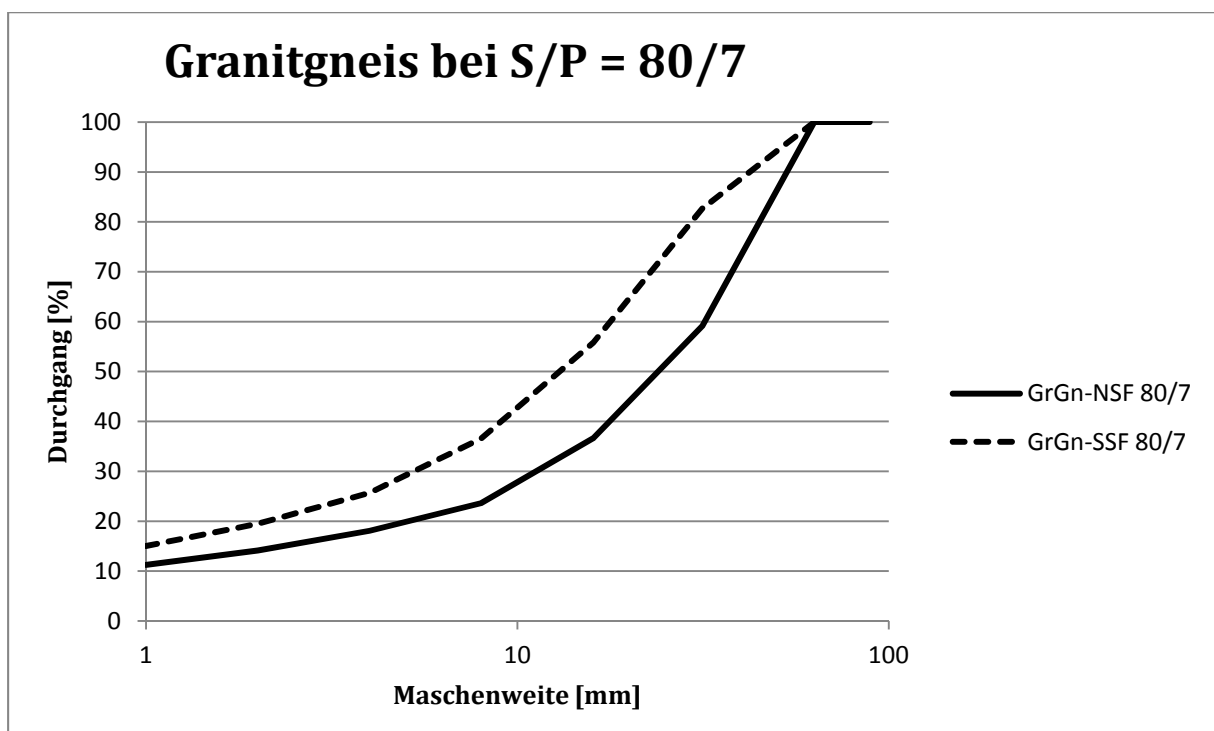


Abb.4.29: Korngrößenanalyse des Granitgneises bei Schneidspurabstand 80 mm und Penetrationstiefe von 7 mm in 2 Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

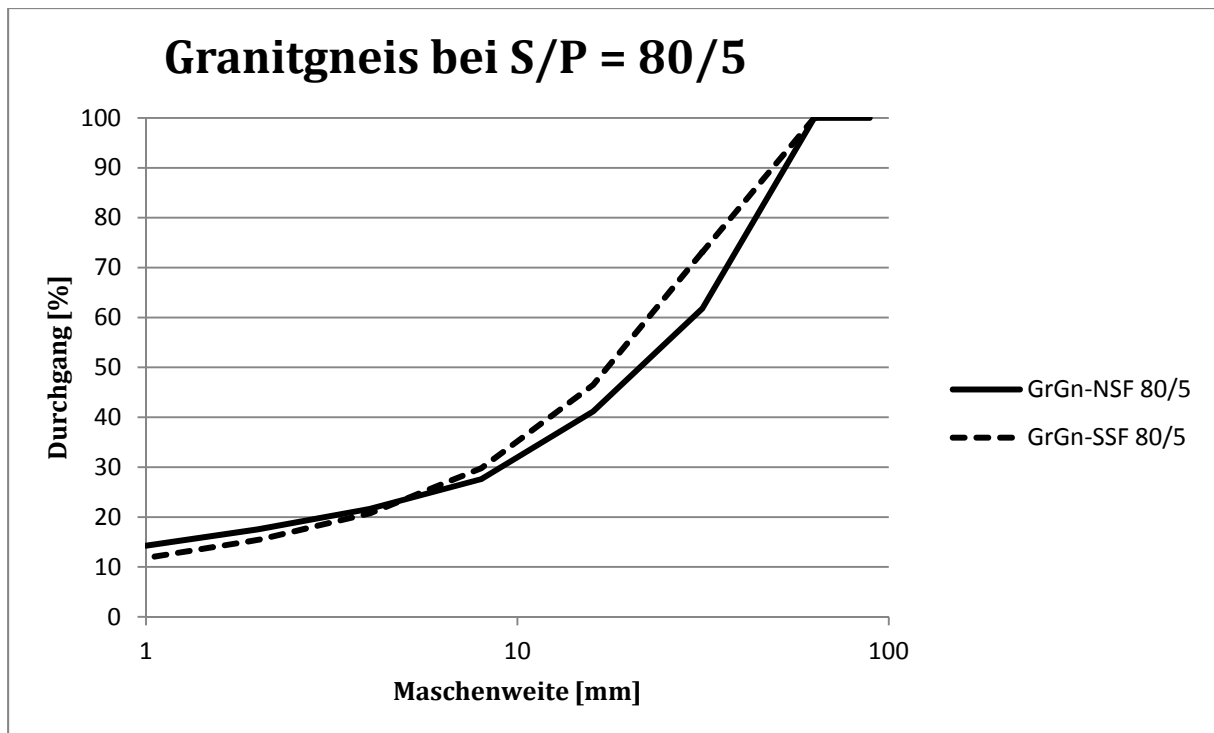


Abb.4.30: Korngrößenanalyse des Granitgneises bei Schneidspurabstand 80 mm und Penetrationstiefe von 5 mm in 2 Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

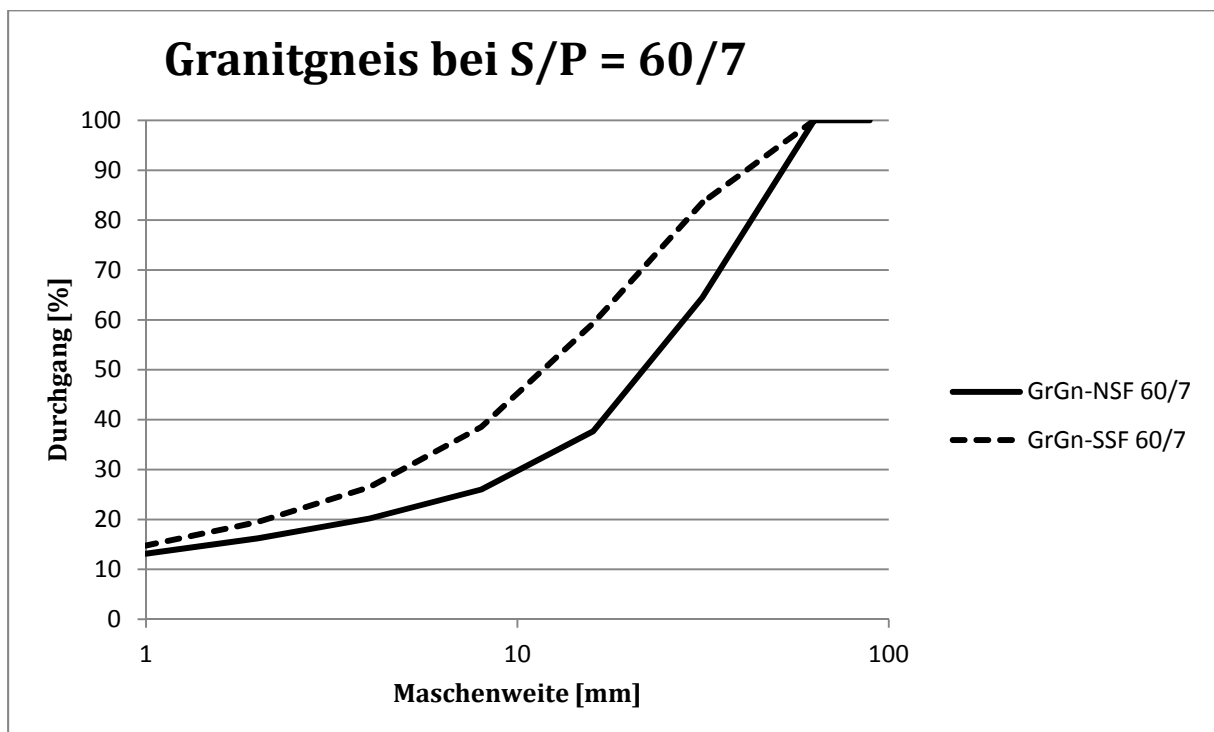


Abb.4.31: Korngrößenanalyse des Granitgneises bei Schneidspurabstand 60 mm und Penetrationstiefe von 7 mm in 2 Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

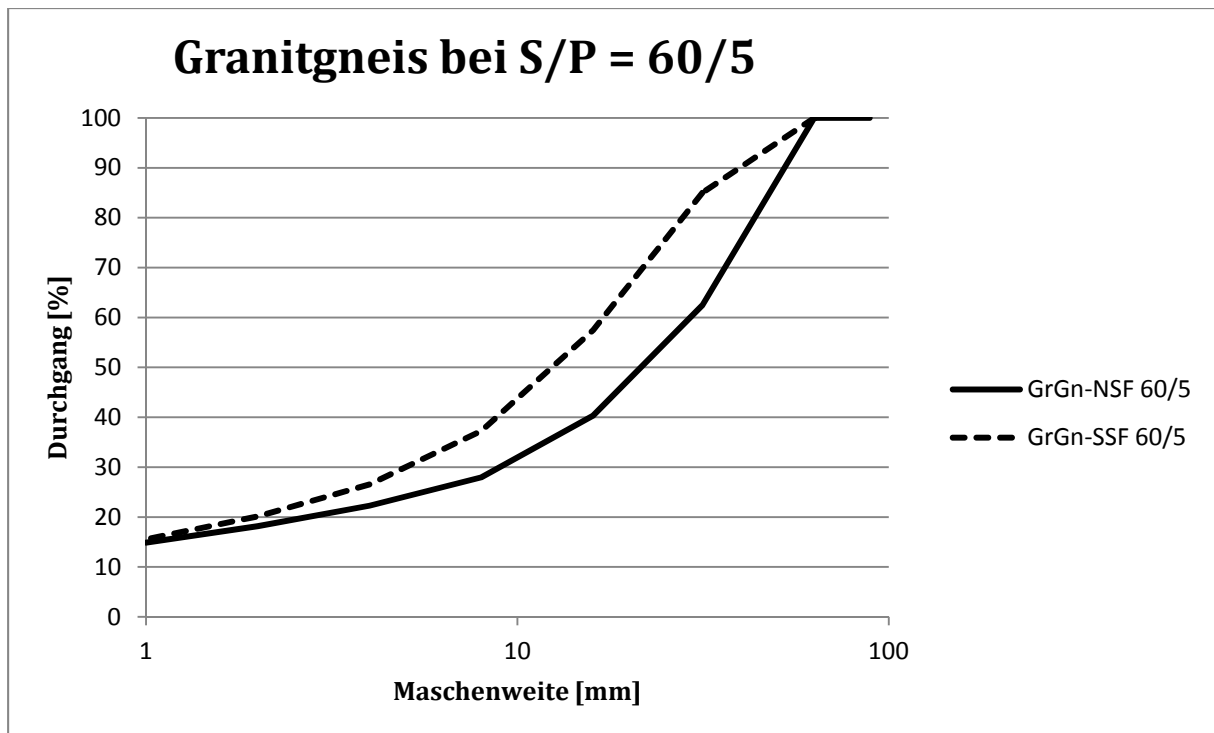


Abb.4.32: Korngrößenanalyse des Granitgneises bei Schneidspurabstand 60 mm und Penetrationstiefe von 5 mm in 2 Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

Aus den Korngrößenverteilungskurven des Granitgneises zeigt sich, dass bei allen Schneidspurabständen bei einer Penetrationstiefe von 7 mm die schräg zur Schieferung geschnittene Probe eine gröbere Sieblinie liefert. Bei einer Penetrationstiefe von 5 mm verhält sich das Ausbruchmaterial ähnlich, jedoch nicht so deutlich. Vor allem bei den Schneidspurabständen von 80 und 100 mm überlappen sich die Siebkurven annähernd. Auch bei dieser Lithologie lässt sich ein Anstieg des Feinkorngehaltes bei abnehmendem Schneidspurabstand feststellen. Bei einer Penetrationstiefe von 7 mm steigt der Feinstkorngehalt von rund 10 – 11 % (100 mm Spacing) über 11 – 15 % (80 mm Spacing) bis zu 13 – 15 % (60 mm Spacing). Ein ähnlicher Trend ist auch bei einer Penetrationstiefe von 5 mm festzustellen (100 mm Spacing: 10 – 13 %; 80 mm Spacing: 12 – 14 %; 60 mm Spacing: 15 – 15,5 %).

4.4.1.2 Einfluss des Schneidspurabstandes auf das Ausbruchmaterial

Für die Untersuchungen zum Einfluss des Schneidspurabstandes, bei gleicher Penetration auf das Ausbruchmaterial, wurden fünf Lithologien herangezogen (Granitgneis, Hornblendegneis, Schiefergneis, Kalkglimmerschiefer und Augengneis).

4.4.1.2.1 Sieblinien Kalkglimmerschiefer

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.33 - 4.36) verdeutlichen den Einfluss des Schneidspurabstandes auf das Ausbruchmaterial bei gleichbleibender Penetrationstiefe in vier Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung sowie verfaltet).

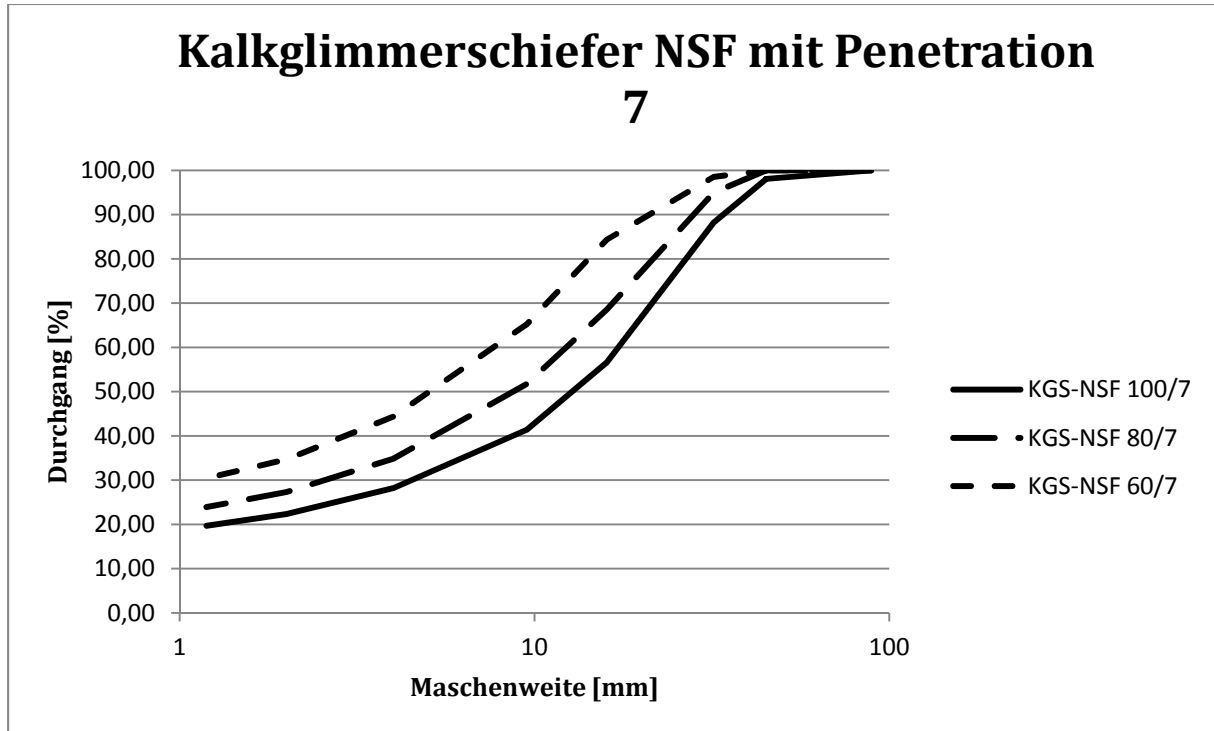


Abb.4.33: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers normal zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

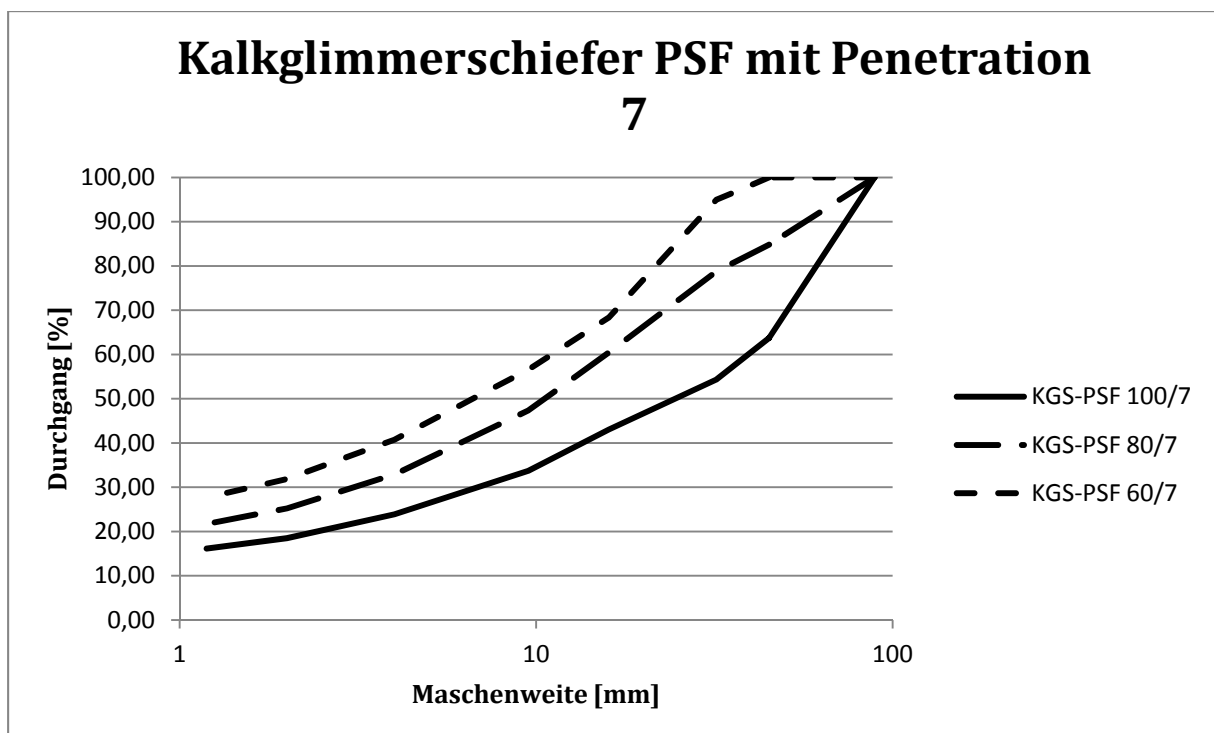


Abb.4.34: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers parallel zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

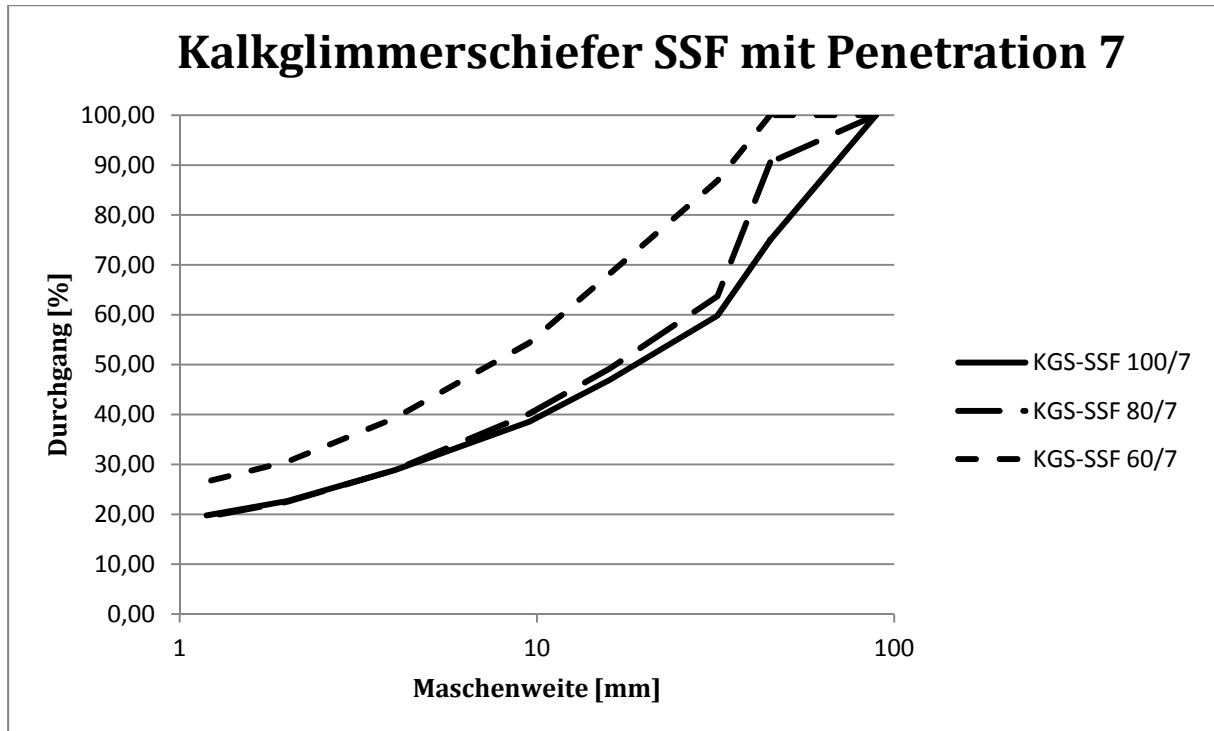


Abb.4.35: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers schräg zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

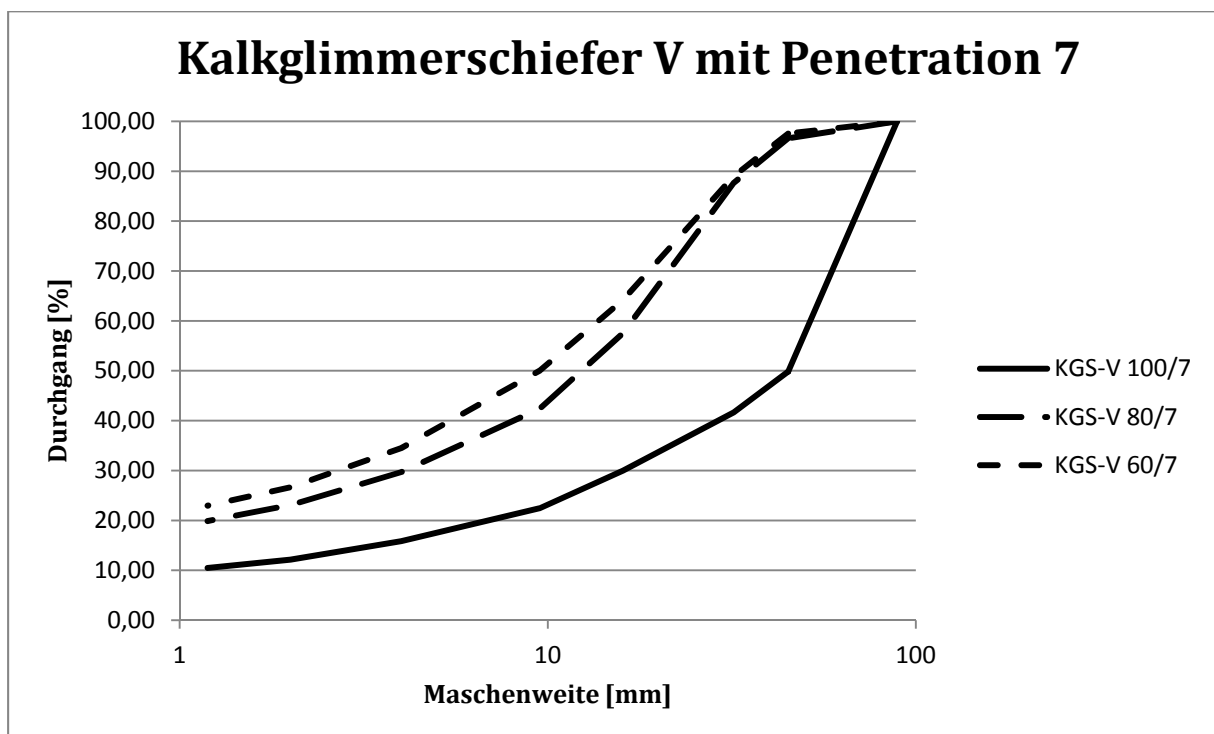


Abb.4.36: Korngrößenanalyse des verfaulteten Kalkglimmerschiefers bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

Die Abbildungen 4.33 – 4.36 zeigen eine deutliche Veränderung der Korngrößenverteilungskurven bei Änderung des Schneidspurabstands. Mit Zunahme des Schneidspurabstandes liefert der Kalkglimmerschiefer in allen Gefügeorientierungen eine gröbere Sieblinie. Auch der Feinkornanteil (< 1,19 mm) nimmt bei zunehmendem Schneidspurabstand stetig ab. Der Feinkornanteil erstreckt sich beim Kalkglimmerschiefer normal zur Schieferung von rund 20% bei 100 mm Schneidspurabstand bis hin zu 30,5 % bei 60 mm Spacing. Parallel und schräg zur Schieferung zeigen sich ähnliche Werte. Beim verfalteten Kalkglimmerschiefer liegen die Feinkorngehalte einige Prozentpunkte darunter (10,5 – 23 %).

4.4.1.2.2 Sieblinien Augengneis

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.37 – 4.39) verdeutlichen den Einfluss des Schneidspurabstandes auf das Ausbruchmaterial bei gleichbleibender Penetrationstiefe in drei Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung).

Analog zum Kalkglimmerschiefer zeigt der Augengneis, in allen Schieferungsorientierungen zur Schneidrichtung, eine gröbere Korngrößenverteilung bei zunehmendem Schneidspurabstand. Der Feinkornanteil zeigt die gleiche Tendenz und steigt von rund 11,5 (NSF) bis 14 % (PSF) bei einem Schneidspurabstand von 100 mm auf rund 19,5 (PSF) – 21 % (SSF) an. Ein Einfluss der Gefügeorientierung auf den Feinkornanteil bei gleichem Penetrations- und Schneidspurabstandsetting ist nicht gegeben.

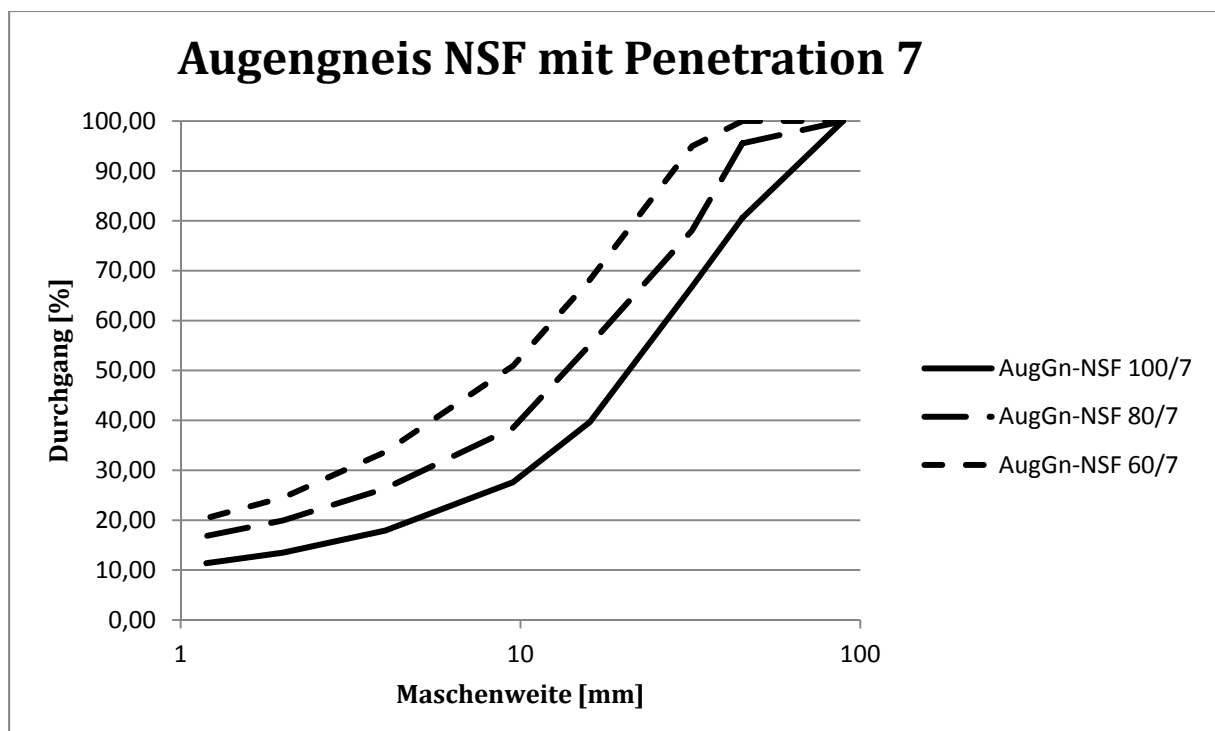


Abb.4.37: Korngrößenanalyse des Augengneises normal zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

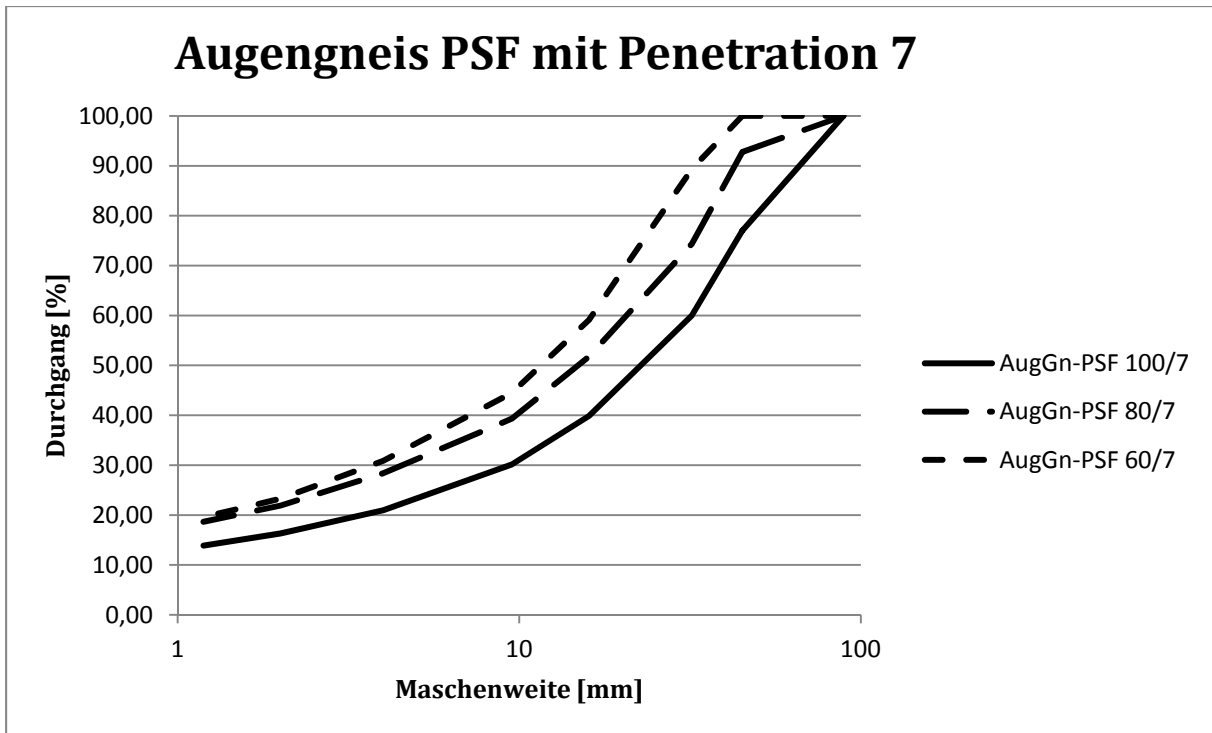


Abb.4.38: Korngrößenanalyse des Augengneises parallel zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

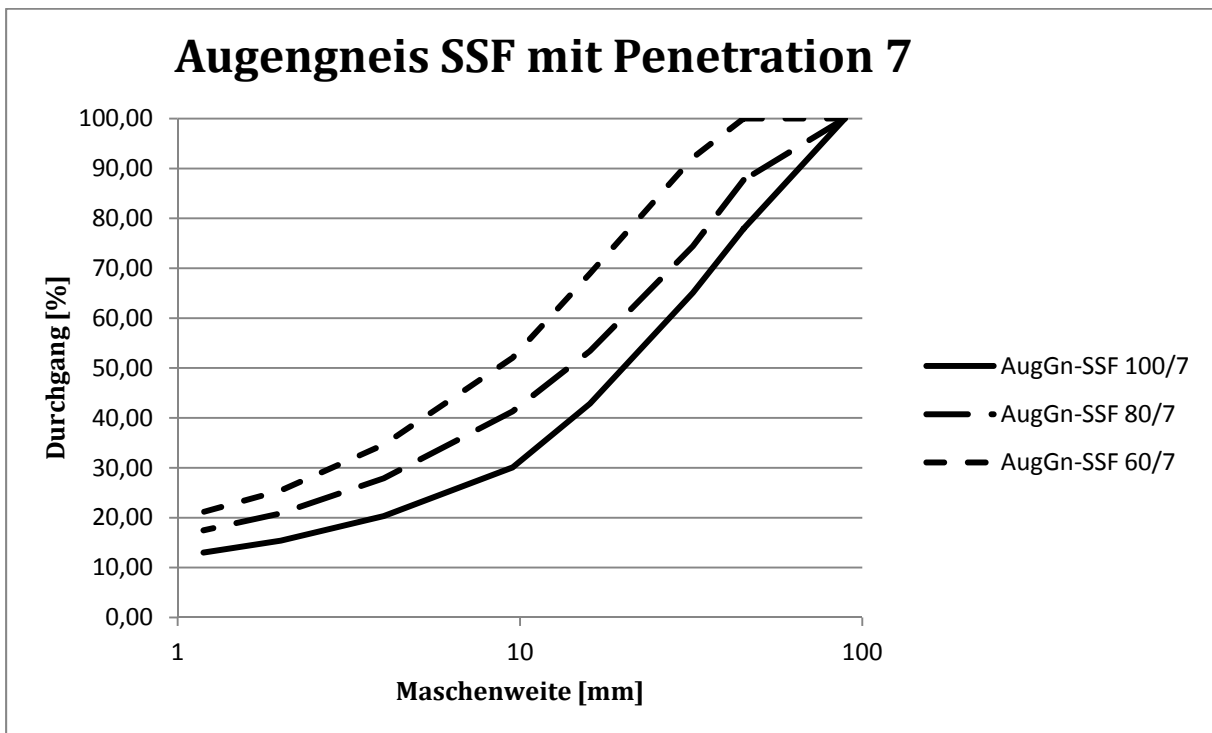


Abb.4.39: Korngrößenanalyse des Augengneises schräg zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

4.4.1.2.3 Sieblinien Granitgneis

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.40 - 4.43) verdeutlichen den Einfluss des Schneidspurabstandes auf das Ausbruchmaterial bei gleichbleibender Penetrationstiefe, von entweder 5 oder 7 mm, in zwei Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

Die Ergebnisse des Granitgneises unterschieden sich von den Resultaten des Kalkglimmerschiefers und des Augengneises nur in ihrer Deutlichkeit. Während sich beim KGS und AG der Einfluss des Schneidspurabstandes sehr deutlich auf die anfallenden Sieblinien auswirkt ist dieser Trend beim Granitgneis etwas schwächer ausgeprägt. Trotzdem lässt sich klar erkennen, dass auch bei dieser Lithologie der zunehmende Schneidspurabstand eine leicht gröbere Sieblinie liefert. Der Granitgneis, der normal zur Schieferung geschnitten wurde, zeigt bei einer Penetration von 5 mm fast idente Korngrößenverteilungskurven bei allen Schneidspurabständen, wobei auch hier der größte Schneidspurabstand den geringsten Feinkornanteil liefert. Die Kornanteile kleiner 1 mm erstrecken sich beim GrGn NSF bei 7 mm Penetration von 10 - 13 % sowie bei 5 mm Penetration von 13 - 15 % und beim GrGn SSF bei 7 mm Penetration von 11 - 15% und bei 5 mm Penetrationstiefe von 10 - 15,5 %.

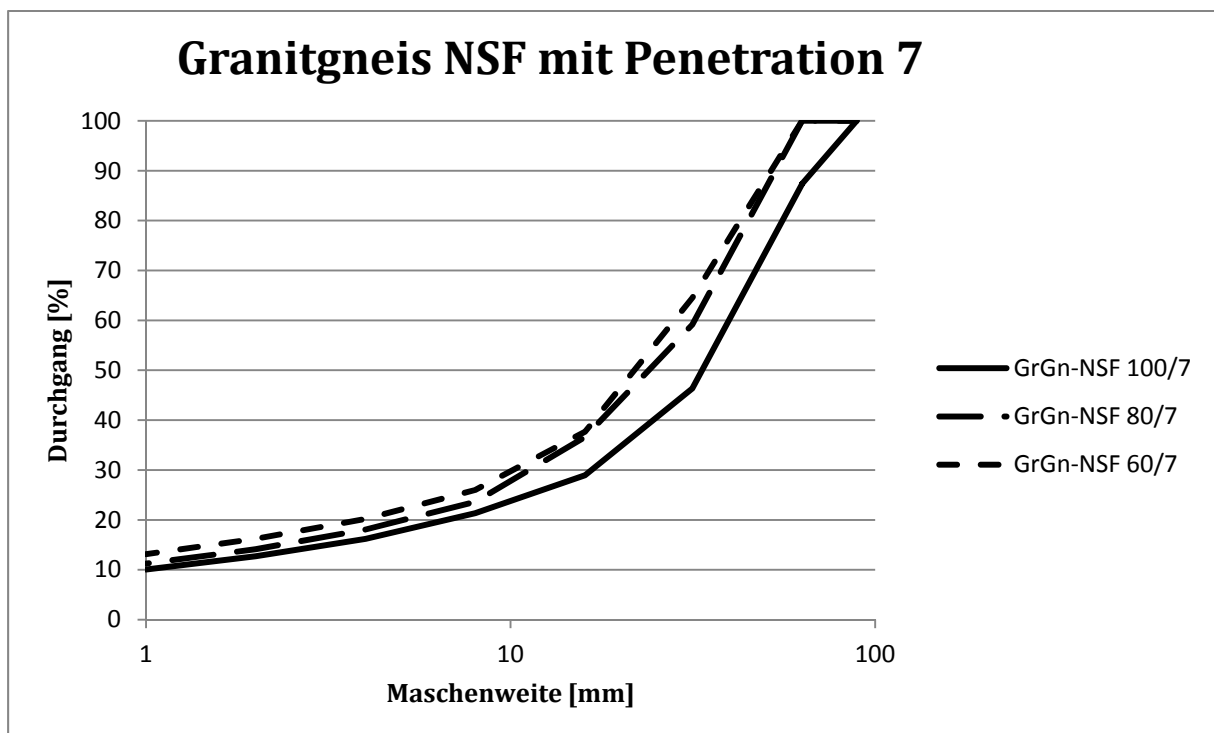


Abb.4.40: Korngrößenanalyse des Granitgneises normal zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

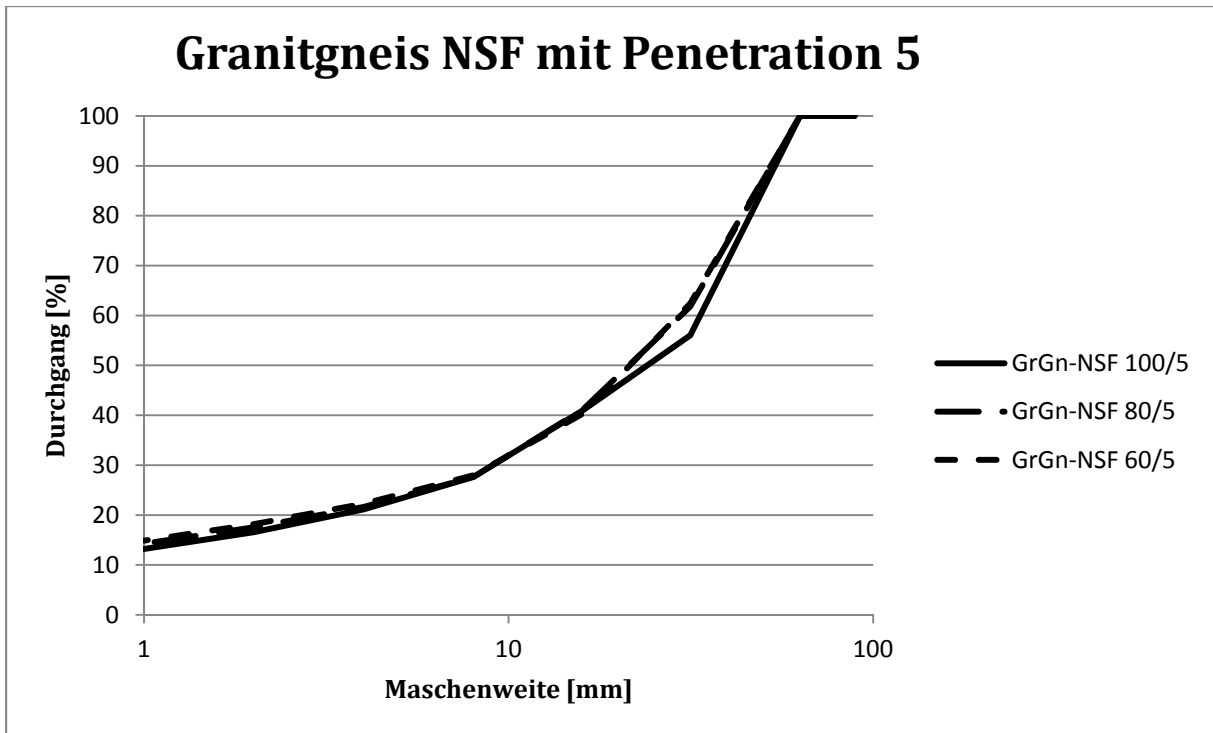


Abb.4.41: Korngrößenanalyse des Granitgneises normal zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 5 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

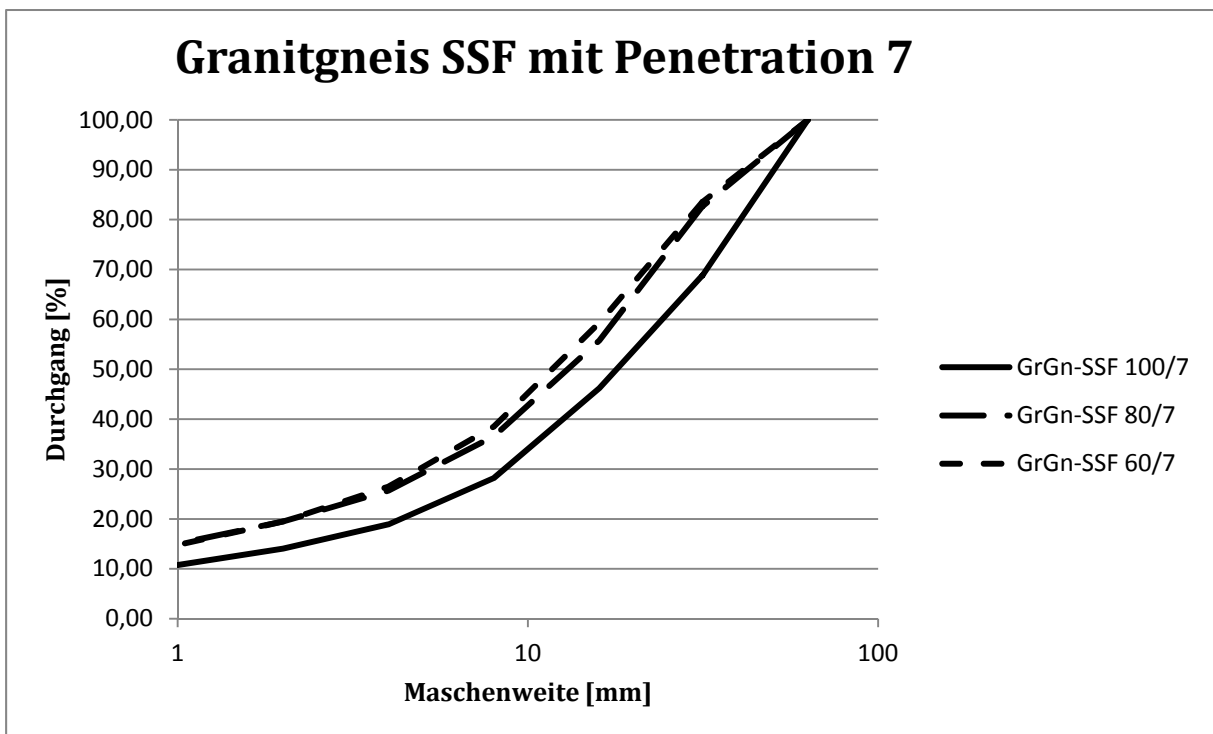


Abb.4.42: Korngrößenanalyse des Granitgneises schräg zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

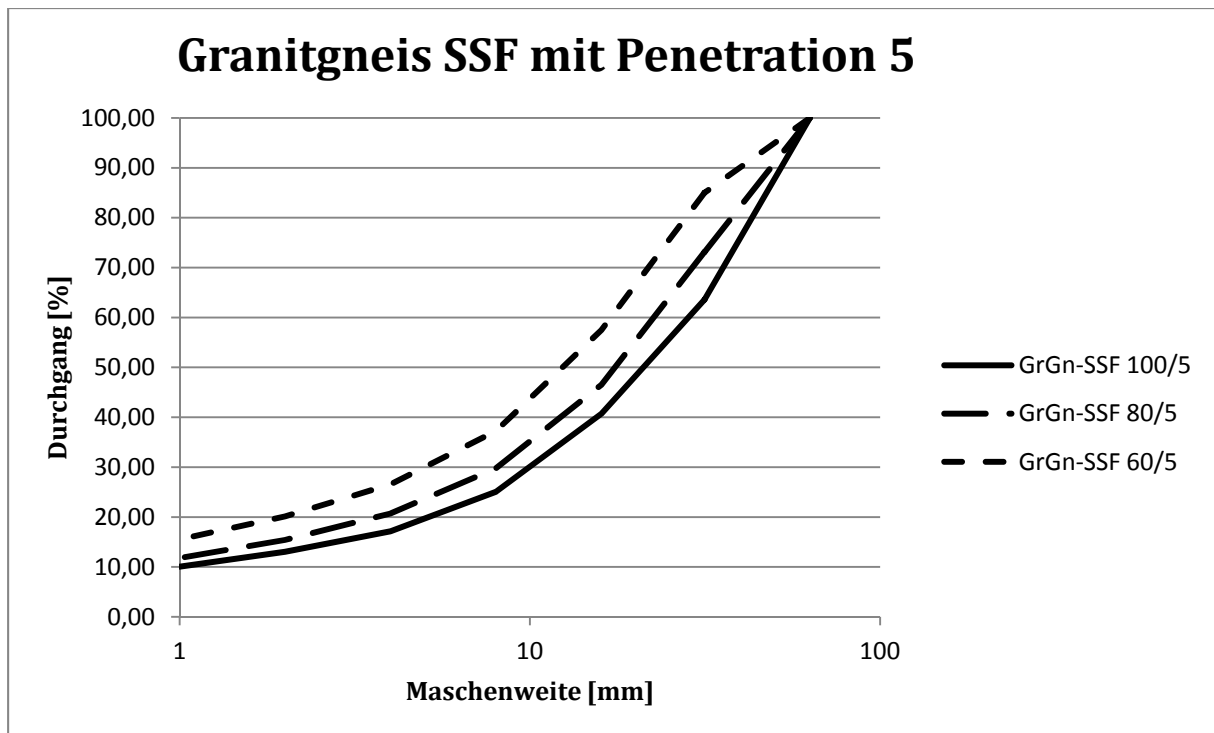


Abb.4.43: Korngrößenanalyse des Granitgneises schräg zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 5 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

4.4.1.2.4 Sieblinien Hornblendegneis

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.44 - 4.45) verdeutlichen den Einfluss des Schneidspurabstandes (60, 80, 100 mm) auf das Ausbruchmaterial beim normal zur Schieferung geschnittenen Hornblendegneis bei Penetrationstiefen von 7 und 5 mm.

Der Hornblendegneis zeigt, ähnlich wie der Granitgneis, eine leicht gröbere Sieblinie bei Vergrößerung des Schneidspurabstandes, jedoch nicht so deutlich wie KGS und AG. Die Kurven von 80 und 100 mm überlagern sich zum Teil, die Korngrößenverteilung bei 60 mm Spacing zeigt jedoch klar eine Zunahme des Feinkorngehalts und eine feinere Sieblinie. Die Feinkorngehalte bewegen sich zwischen 15 und 21 %.

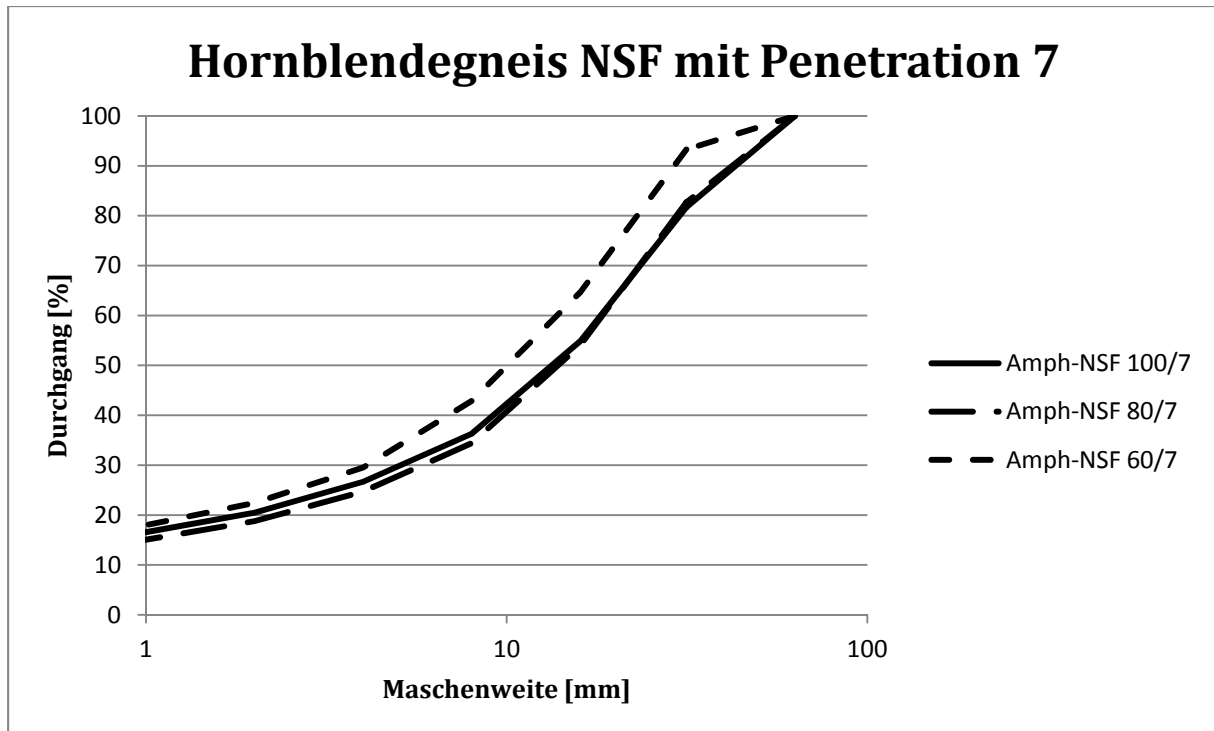


Abb.4.44: Korngrößenanalyse des Hornblendegneises normal zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

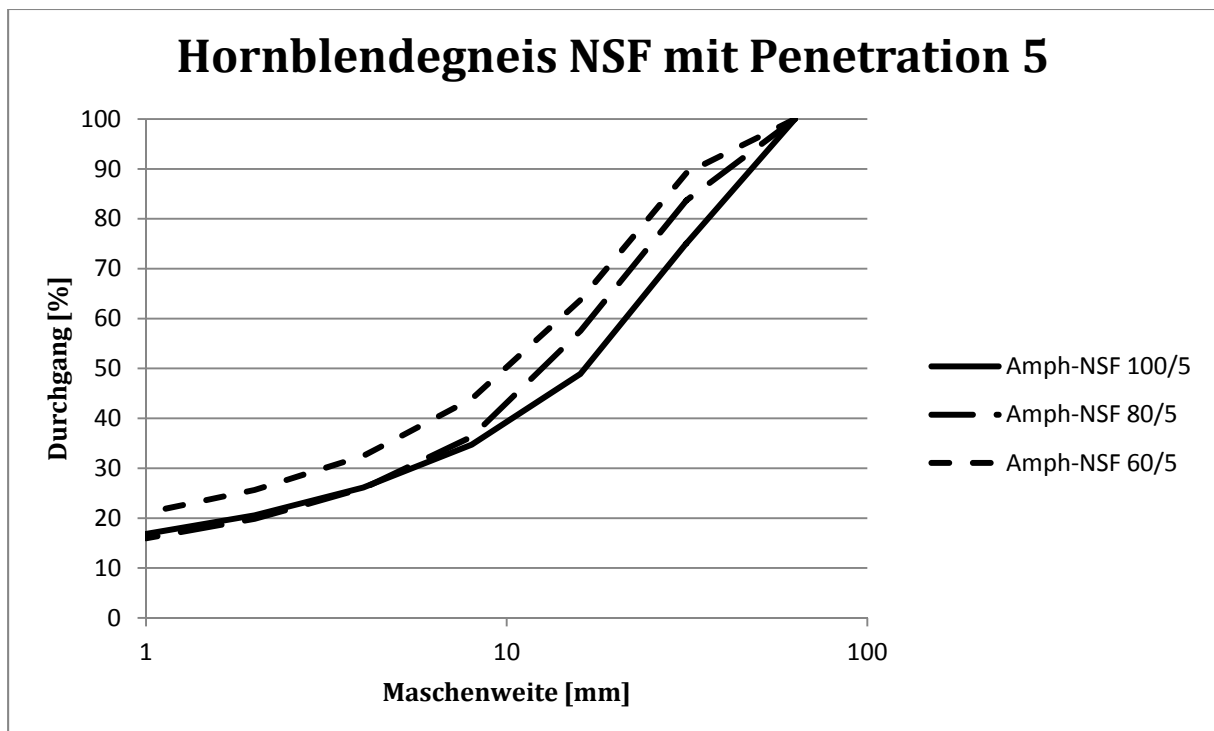


Abb.4.45: Korngrößenanalyse des Hornblendegneises normal zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 5 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

4.4.1.2.5 Sieblinien Schiefergneis

Abbildung 4.46 illustriert den Einfluss des Schneidspurabstandes (60, 80, 100 mm) auf das Ausbruchmaterial beim schräg zur Schieferung geschnittenen Hornblendegneis bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm.

Das Ergebnis verdeutlicht ganz klar die Zunahme des Feinkornanteils sowie die feinere Korngrößenverteilungskurve bei abnehmendem Schneidspurabstand. Die Feinkorngehalte schwanken dabei von 16 % bei 100 mm Spacing über 23 % bei 80 mm Spacing bis 35 % bei 60 mm Schneidspurabstand.

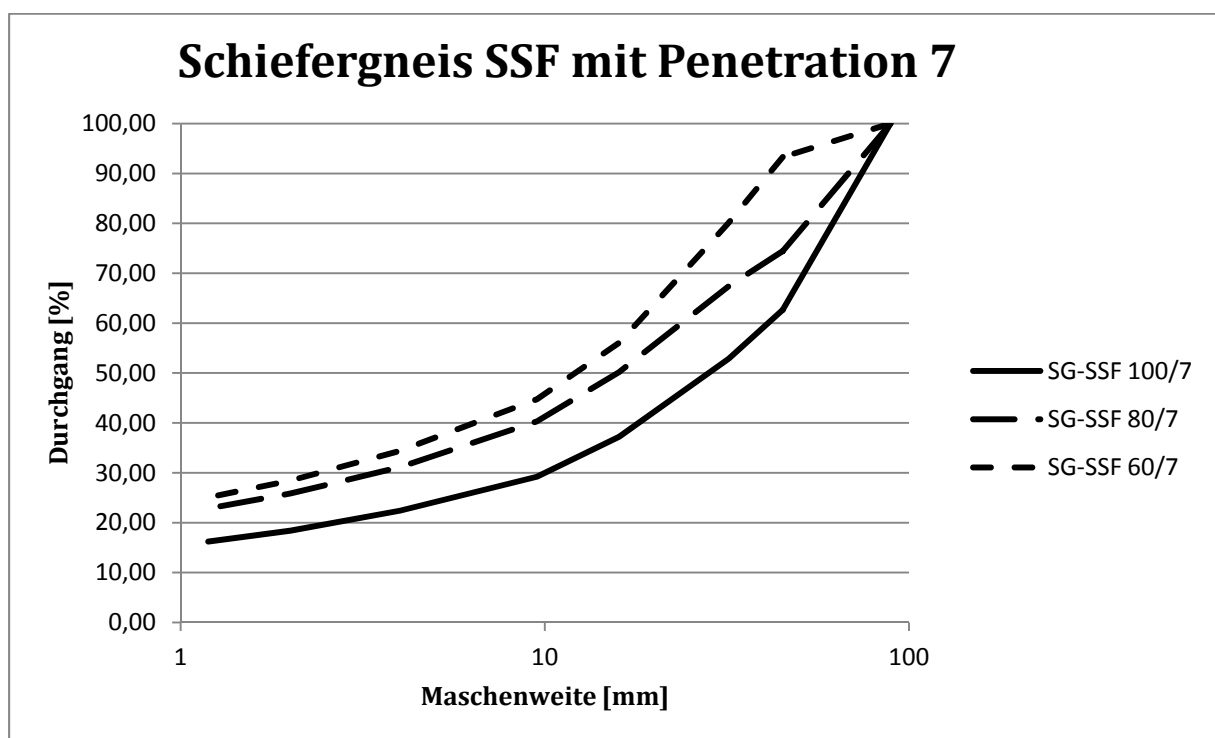


Abb.4.46: Korngrößenanalyse des Schiefergneises schräg zur Schieferung bei einer Penetrationstiefe von 7,6 mm bei drei unterschiedlichen Schneidspurabständen (60, 80 und 100 mm).

4.4.1.3 Einfluss der Penetration auf das Ausbruchmaterial

4.4.1.3.1 Sieblinien Kalkglimmerschiefer

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.47 – 4.50) verdeutlichen den Einfluss der Penetrationstiefe (5,1 und 7,6 mm) auf das Ausbruchmaterial bei konstant gehaltenem Schneidspurabstand (60 mm) beim Kalkglimmerschiefer in vier Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung sowie verfaltet).

In allen vier Diagrammen verlaufen die Kornsummenkurven parallel und überlappen sich zum großen Teil sogar. Der Feinkornanteil schwankt nur minimal (max. 2 %) und die Sieblinien verlaufen stetig d.h. ohne Ausfallkörnung.

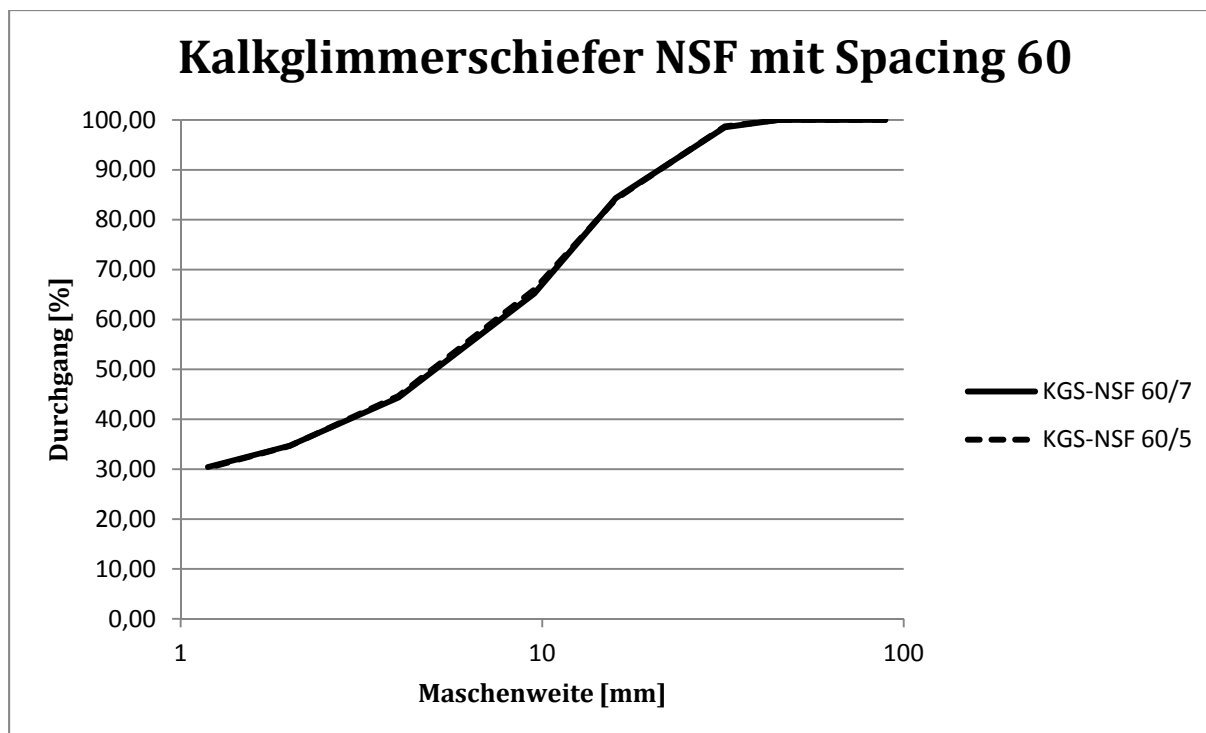


Abb.4.47: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

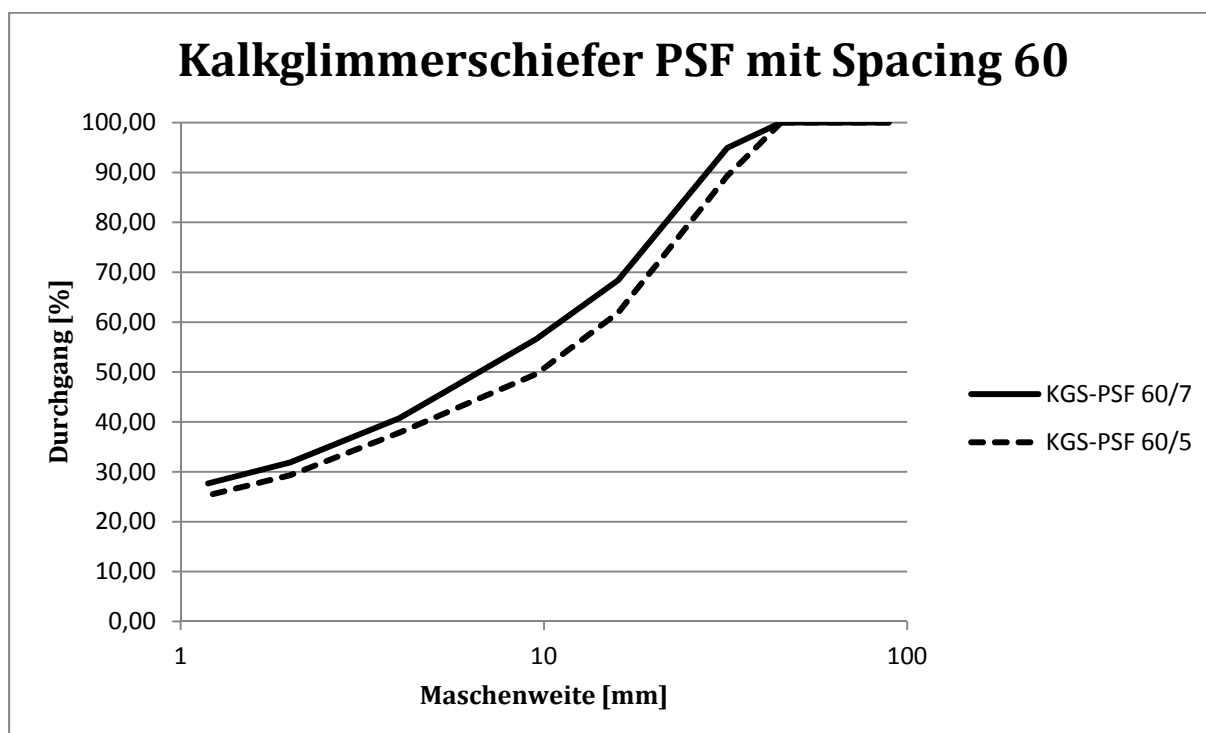


Abb.4.48: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers parallel zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

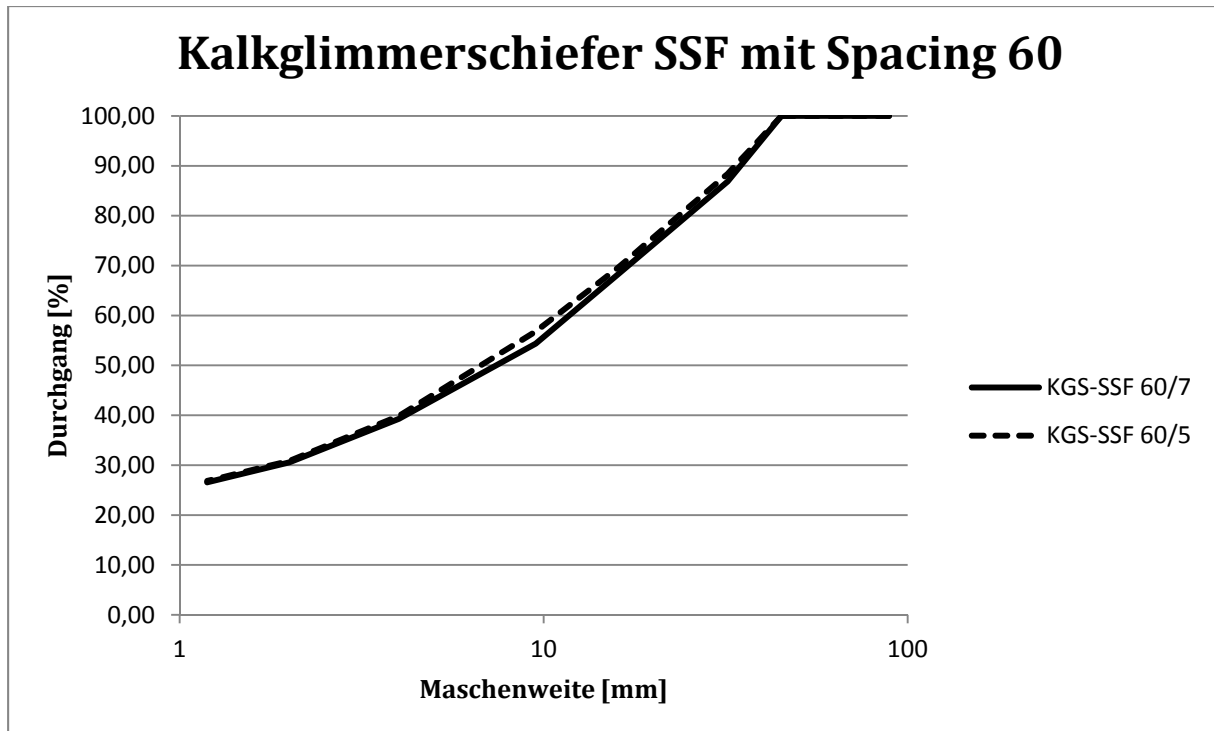


Abb.4.49: Korngrößenanalyse des Kalkglimmerschiefers schräg zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

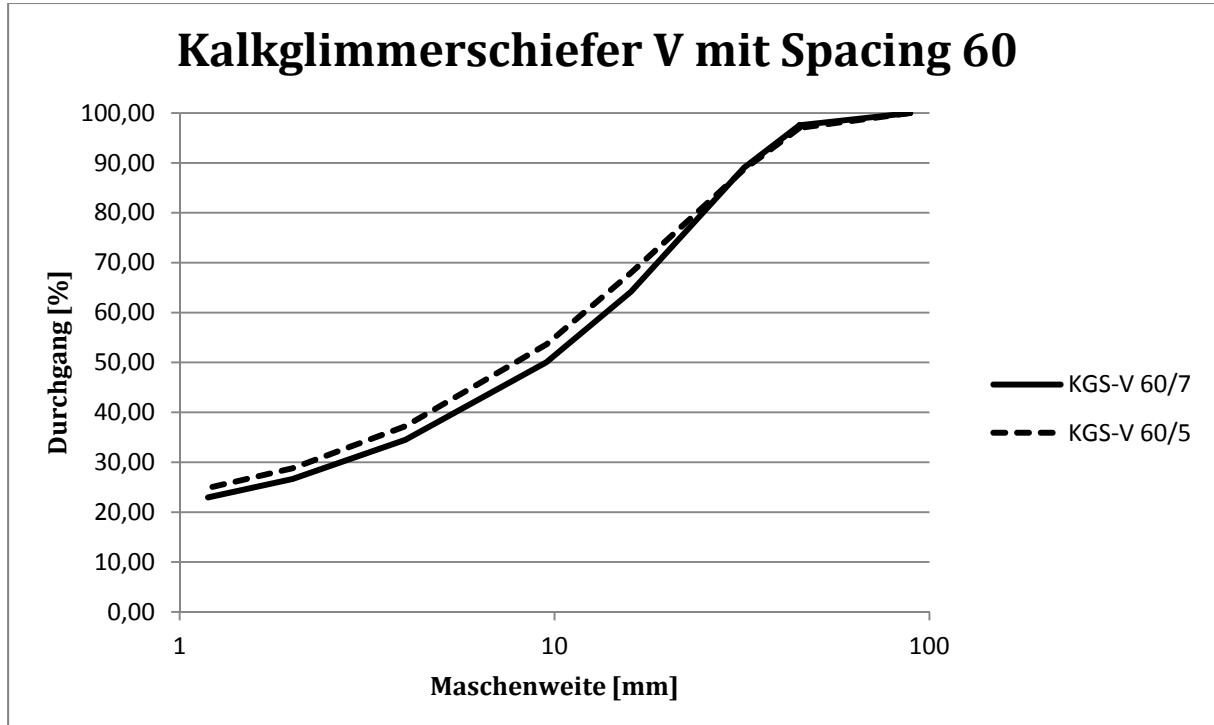


Abb.4.50: Korngrößenanalyse des verfaulten Kalkglimmerschiefers bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

4.4.1.3.2 Sieblinien Augengneis

Die folgenden Abbildungen (Abb. 4.51 – 4.53) verdeutlichen den Einfluss der Penetrationstiefe (5,1 und 7,6 mm) auf das Ausbruchmaterial bei konstant gehaltenem Schneidspurabstand (60 mm) beim Augengneis in drei Gefügeorientierungen (normal, parallel und schräg zur Schieferung).

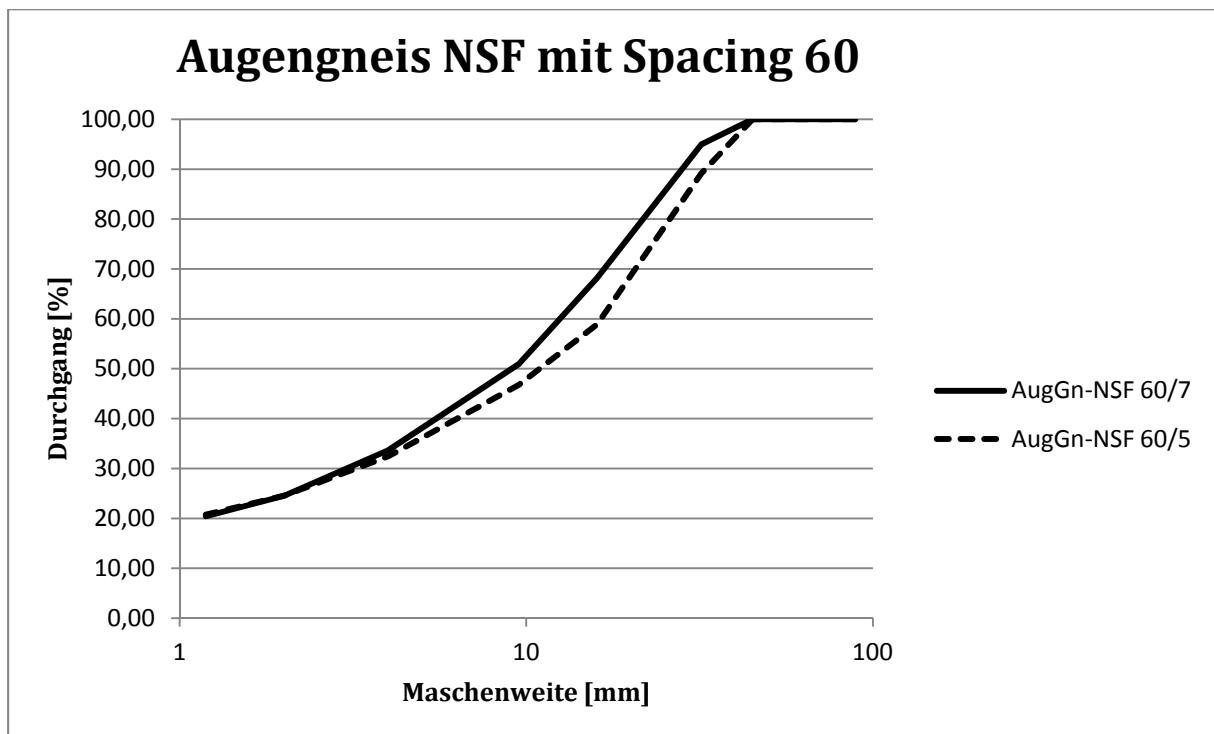


Abb.4.51: Korngrößenanalyse des Augengneises normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

Auch beim Augengneis verlaufen die Kornsummenkurven bei gleichem Spacing und unterschiedlicher Penetrationstiefe parallel und kontinuierlich ohne Ausfallkörnung. Beim schräg zur Schieferung getesteten Augengneis verlaufen die Sieblinien fast kongruent. Normal und parallel zur Schieferung liefert der Augengneis gering gröbere Sieblinien bei kleinerer Penetration. Der Feinkornanteil zwischen 5,1 und 7,6 mm Penetration schwankt nur marginal (max. 3 %).

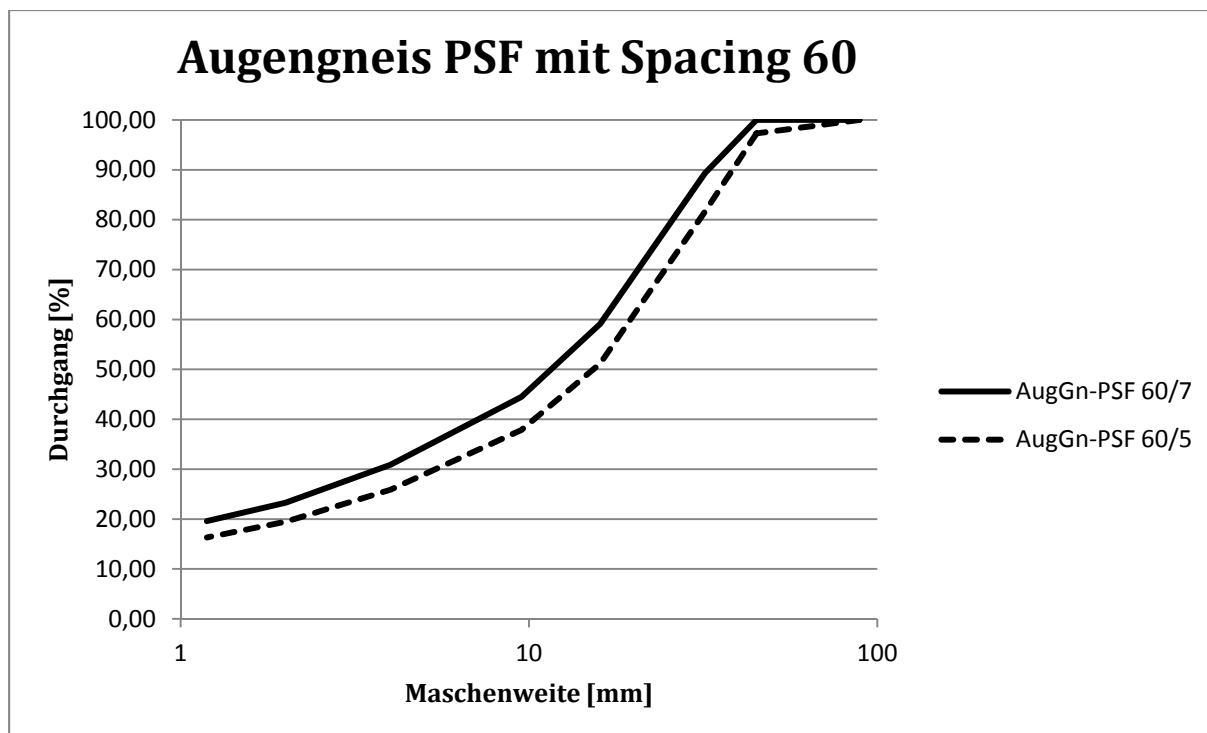


Abb.4.52: Korngrößenanalyse des Augengneises parallel zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

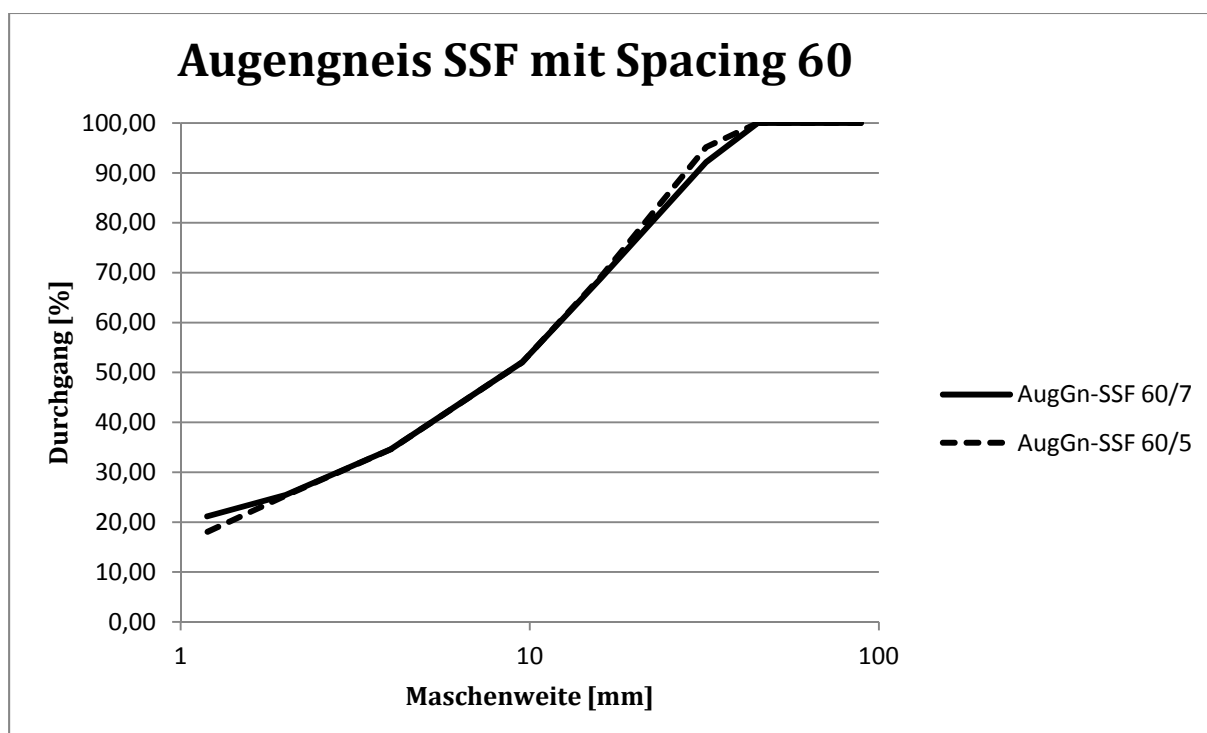


Abb.4.53: Korngrößenanalyse des Augengneises schräg zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

4.4.1.3.3 Sieblinien Granitgneis

Die Abbildungen 4.54 – 4.59 illustrieren den Einfluss der Penetrationstiefe (5 und 7 mm) auf das Ausbruchmaterial bei konstant gehaltenem Schneidspurabstand (jeweils 100, 80 und 60 mm) beim Augengneis in zwei Gefügeorientierungen (normal und schräg zur Schieferung).

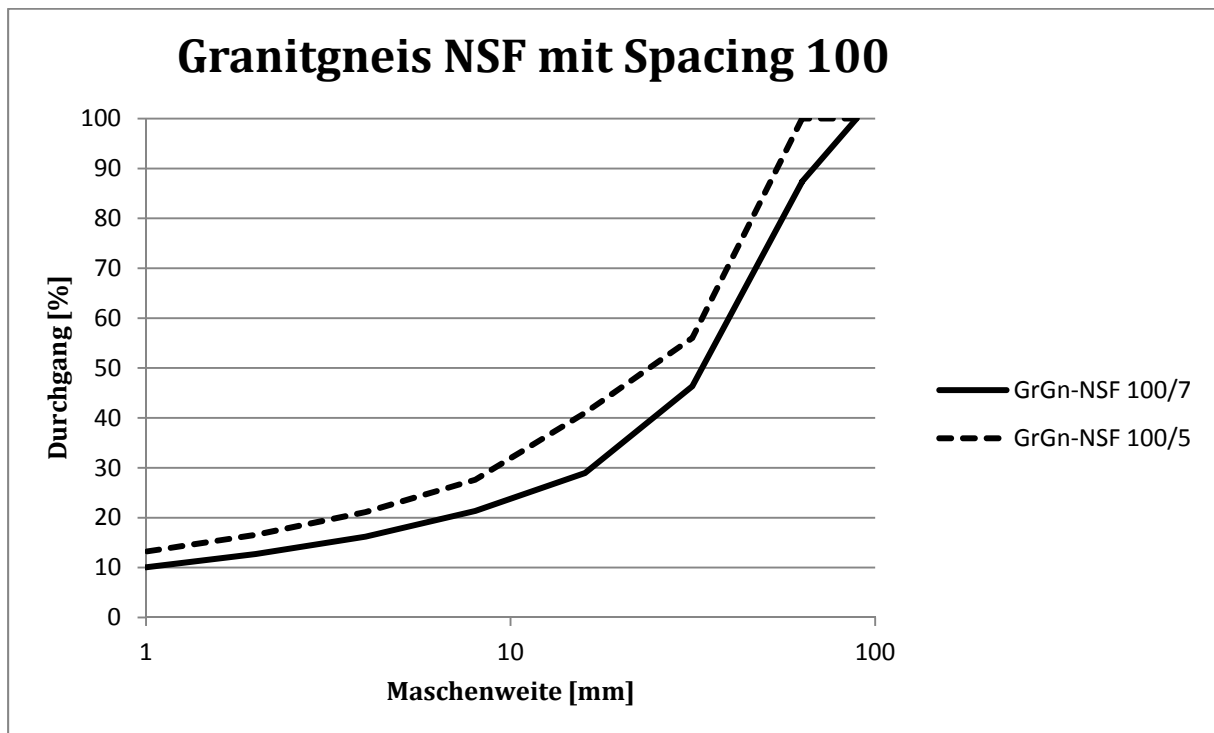


Abb.4.54: Korngrößenanalyse des Granitgneises normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 100 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

Bei einem Schneidspurabstand von 60 mm zeigen die Siebkurven des Granitgneises, sowohl normal als auch schräg zur Schieferung, einen identen Verlauf bei 5 und 7 mm Penetrationstiefe. Durch die Erhöhung des Schneidspurabstandes auf 80 bzw. 100 mm weichen die Sieblinien ein wenig voneinander ab. Es stellt sich heraus, dass beim normal zur Schieferung geschnittenen Granitgneis die größere Penetrationstiefe von 7 mm eine gröbere Kornsummenkurve liefert, hingegen verhält sich beim schräg zur Schieferung geschnittenen Granitgneis die Ausbruchcharakteristik genau konträr. Hier liefert die geringere Penetrationstiefe den größeren Materialanfall. Die Feinkorngehalte zwischen den beiden Eindringtiefen schwanken nur wenig (max. 3 %).

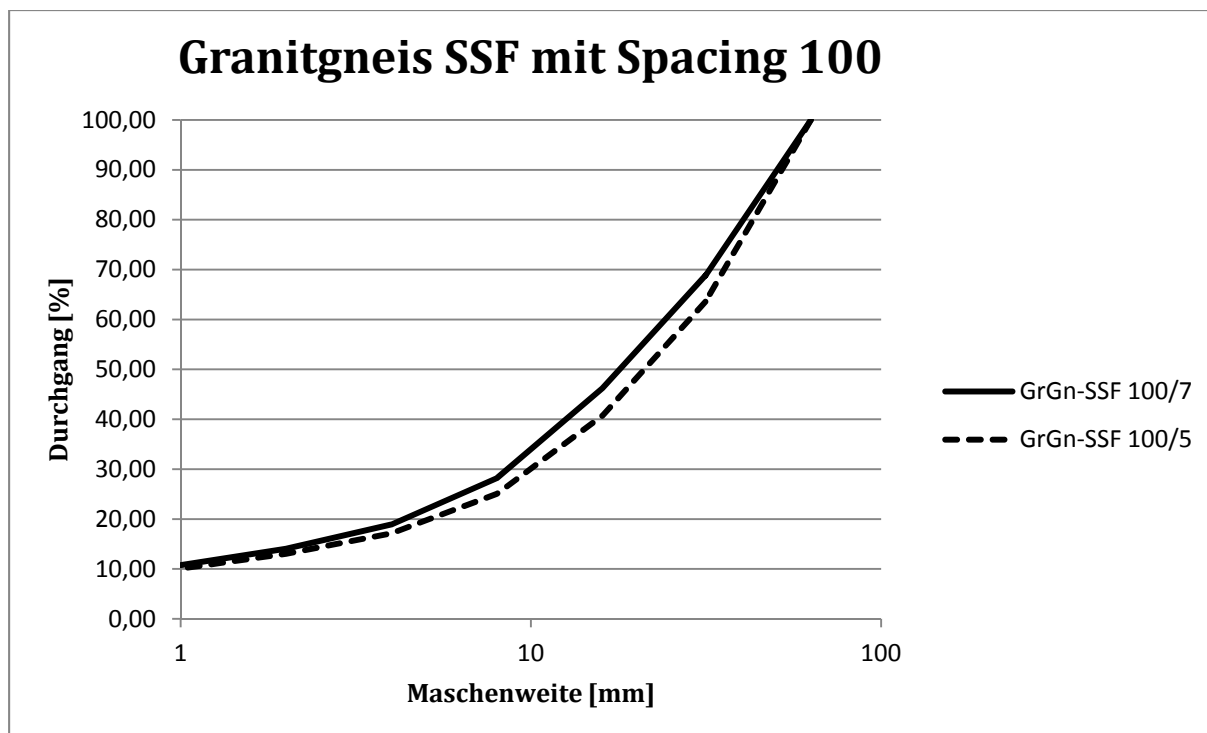


Abb.4.55: Korngrößenanalyse des Granitgneises schräg zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 100 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

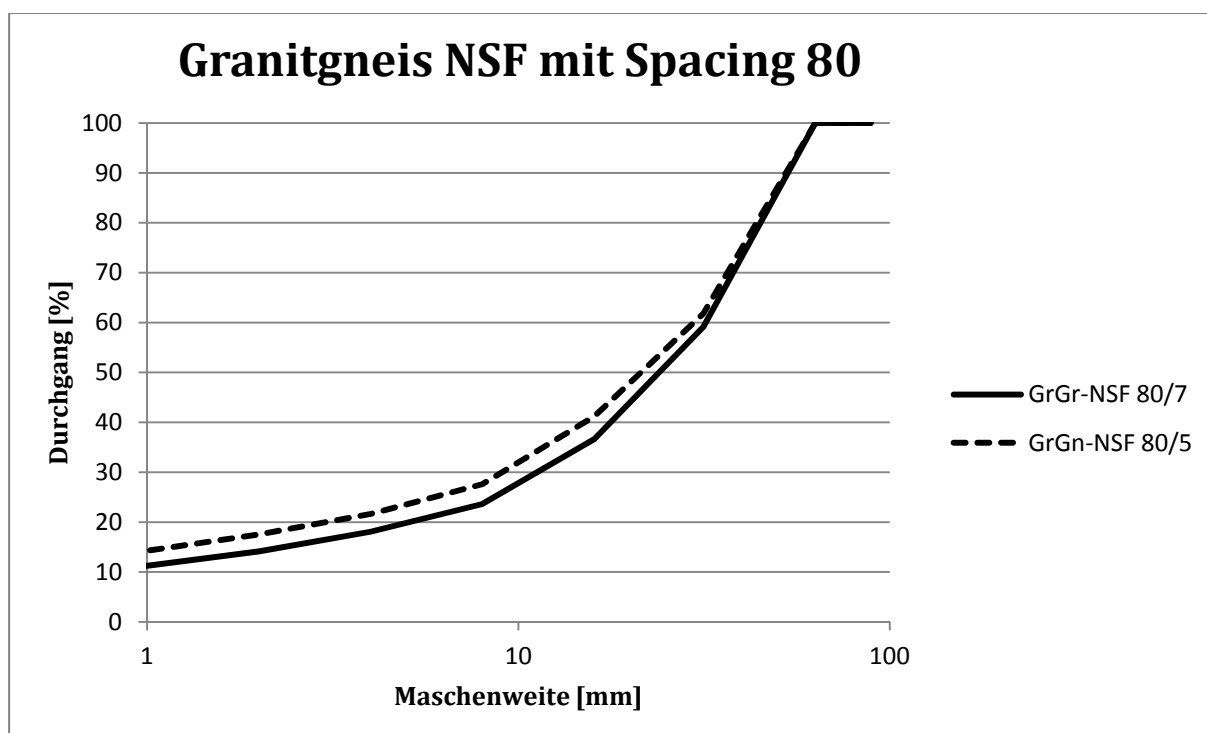


Abb.4.56: Korngrößenanalyse des Granitgneises normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 80 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

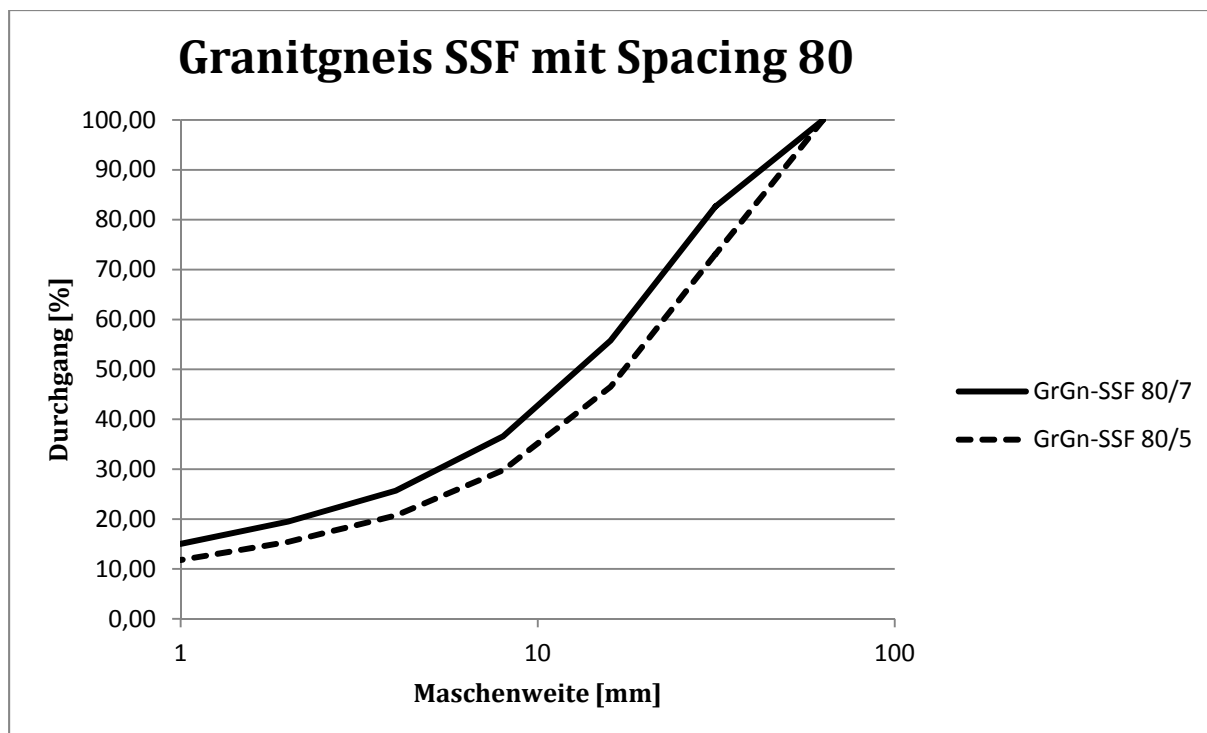


Abb.4.57: Korngrößenanalyse des Granitgneises schräg zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 80 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

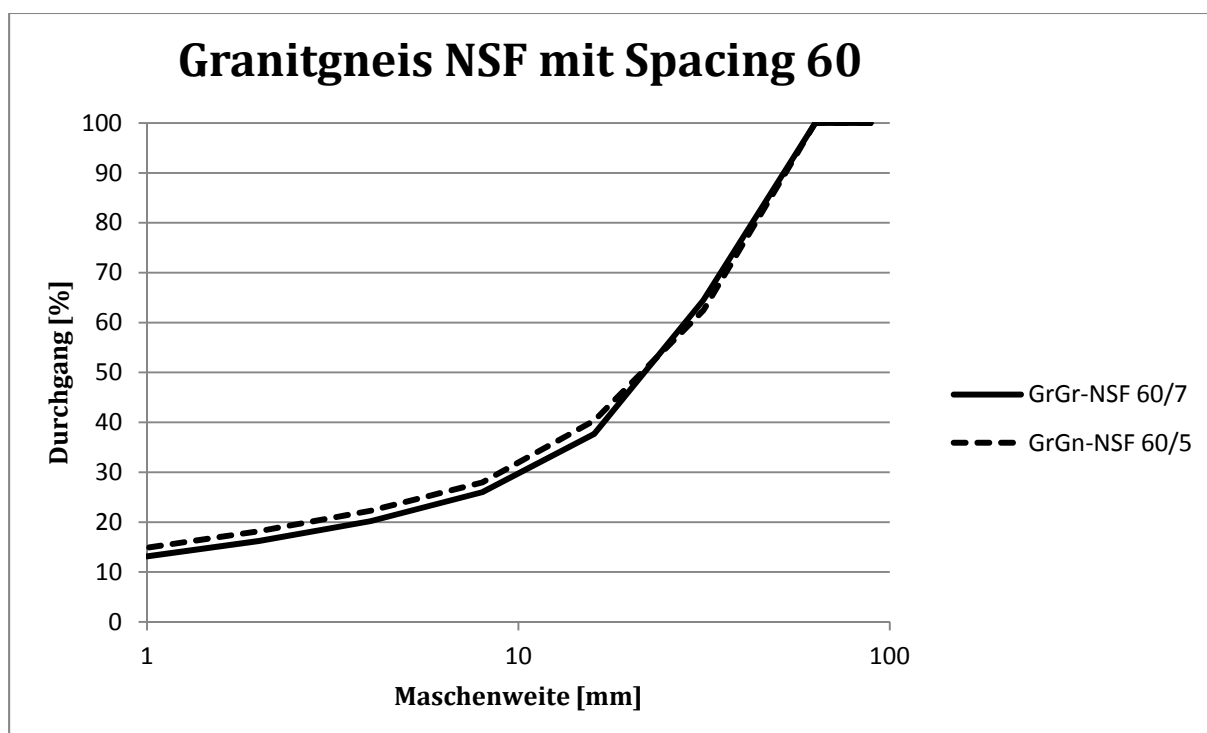


Abb.4.58: Korngrößenanalyse des Granitgneises normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

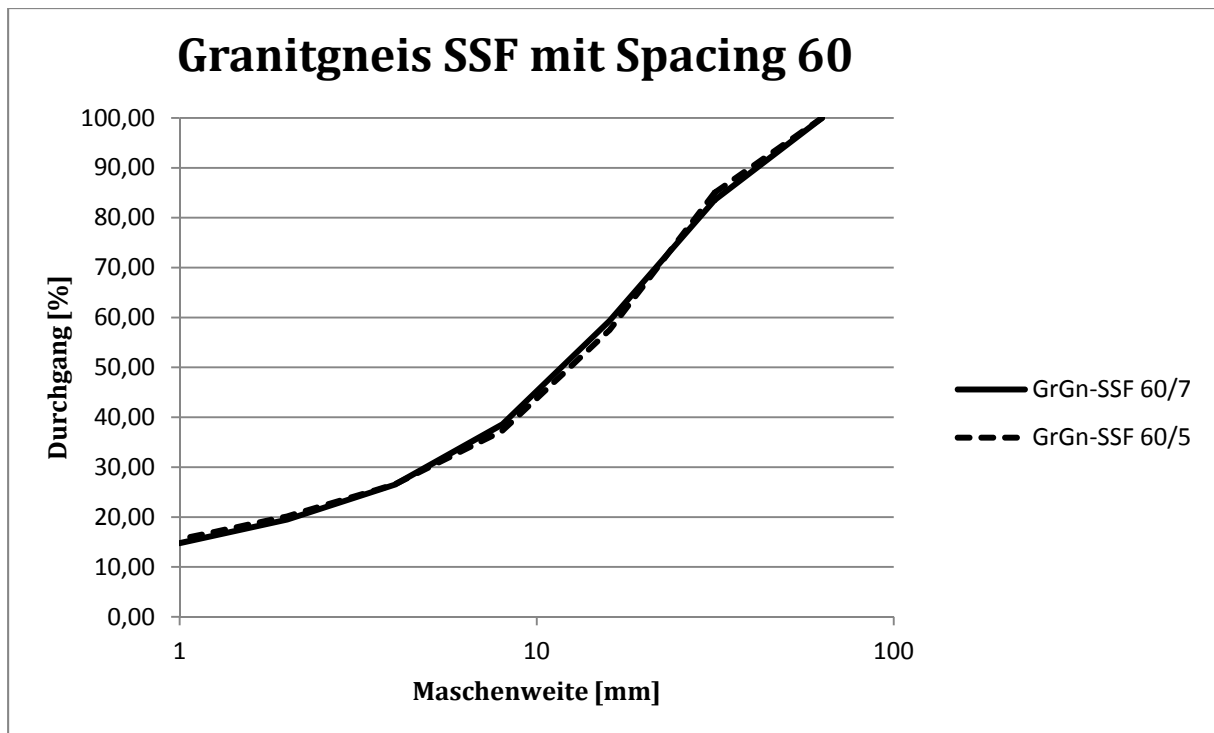


Abb.4.59: Korngrößenanalyse des Granitgneises schräg zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

4.4.1.3.4 Sieblinien Hornblendegneis

Die Abbildungen 4.60 – 4.62 illustrieren den Einfluss der Penetrationstiefe (5 und 7 mm) auf das Ausbruchmaterial bei konstant gehaltenem Schneidspurabstand (jeweils 100, 80 und 60 mm) beim Hornblendegneis normal zur Schieferung.

Das Ausbruchmaterial des Hornblendegneises zeigt, unabhängig von der Penetrationstiefe, bei allen Schneidspurabständen fast kongruente Kornsummenkurven. Der Anteil des Feinkorns steigt bei abnehmendem Schneidspurabstand gering an (15 – 21 %), verhält sich jedoch bei beiden Penetrationstiefen gleich. Die Sieblinien verlaufen kontinuierlich und zeigen keine Ausfallkörnung an.

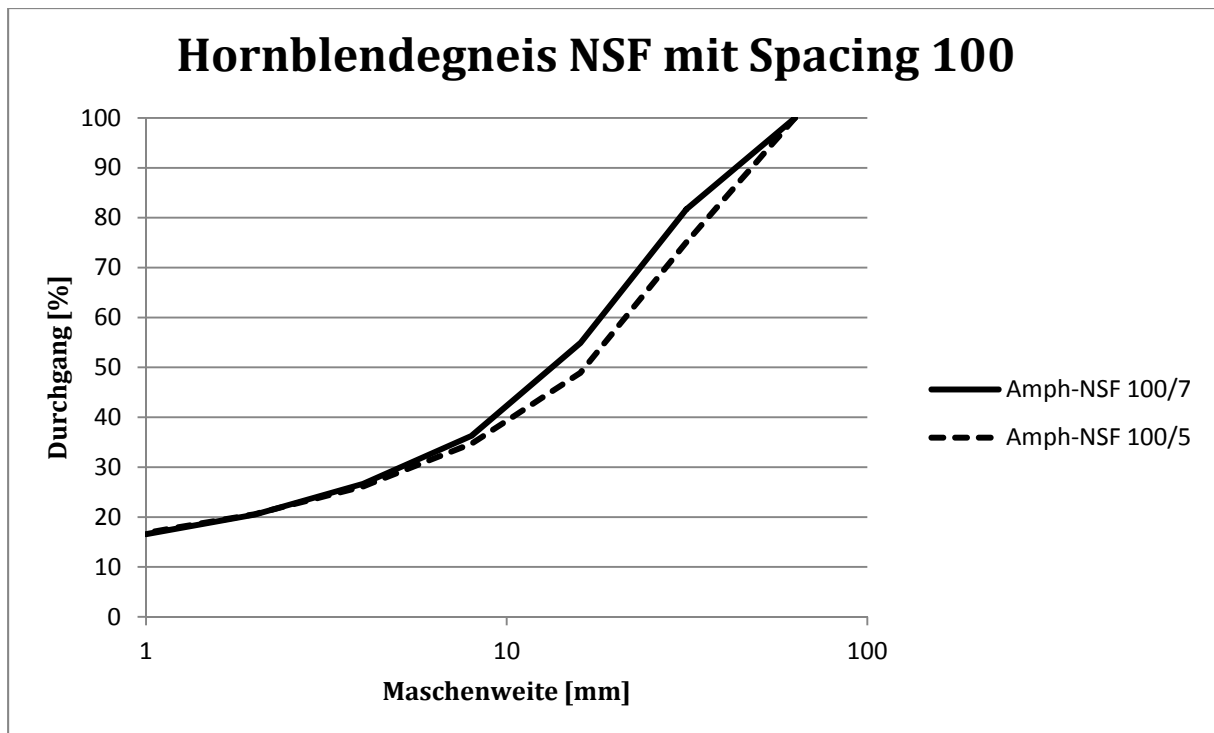


Abb.4.60: Korngrößenanalyse des Hornblendegneises normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 100 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

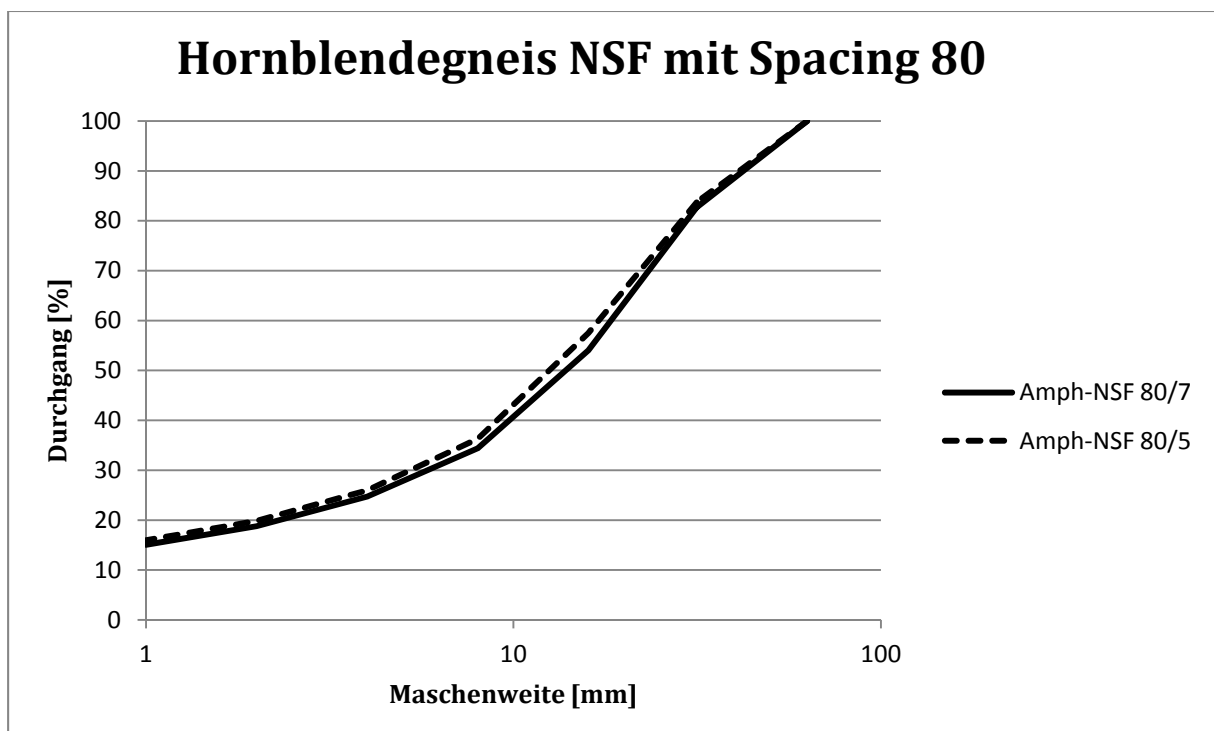


Abb.4.61: Korngrößenanalyse des Hornblendegneises normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 80 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

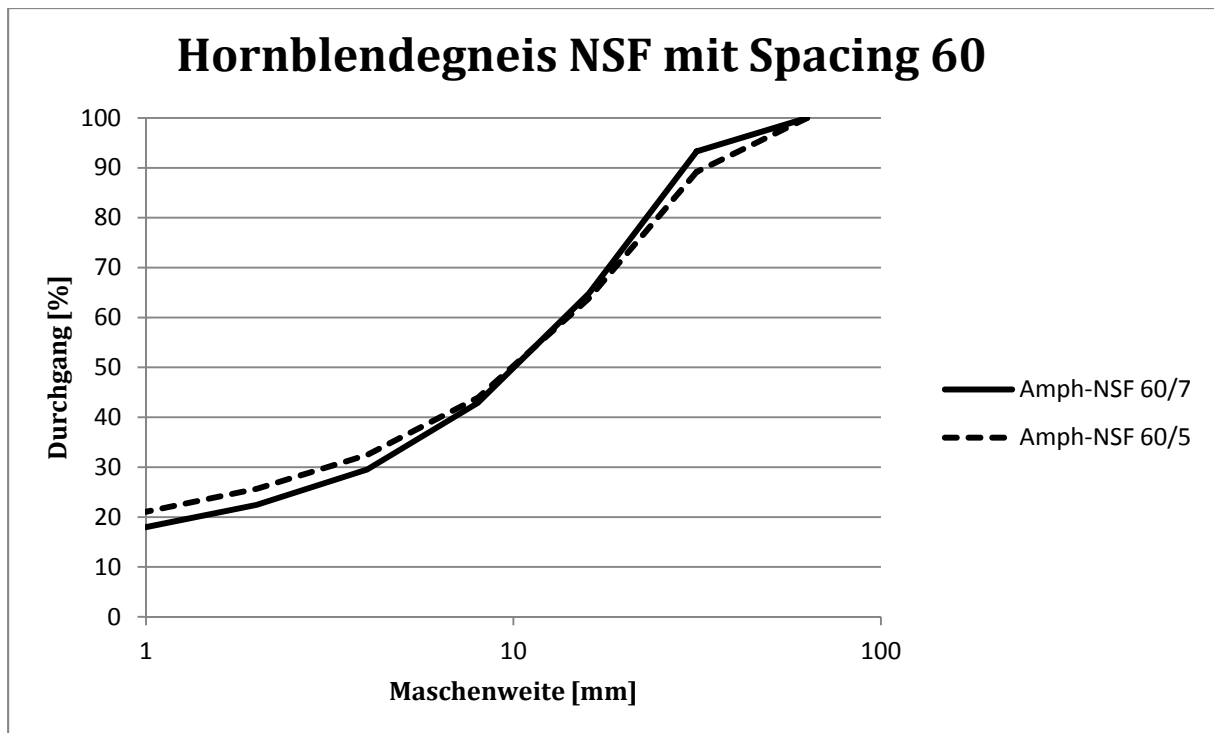


Abb.4.62: Korngrößenanalyse des Hornblendegneises normal zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5 und 7 mm).

4.4.1.3.5 Sieblinien Schiefergneis

Abbildung 4.63 zeigt den Einfluss der Penetrationstiefe (5,1 und 7,6 mm) auf das Ausbruchmaterial bei konstant gehaltenem Schneidspurabstand (60 mm) beim Schiefergneis schräg zur Schieferung.

Die Siebkurven für den Schiefergneis zeigen bei 5,1 und 7,6 mm Penetration einen parallelen und kontinuierlichen Verlauf. Bei einer Penetrationstiefe von 5,1 mm ergibt sich eine feinere Sieblinie. Der Granitgneis schräg zur Schieferung zeigt hingegen einen umgekehrten Trend mit einer größeren Sieblinie bei tieferer Penetration.

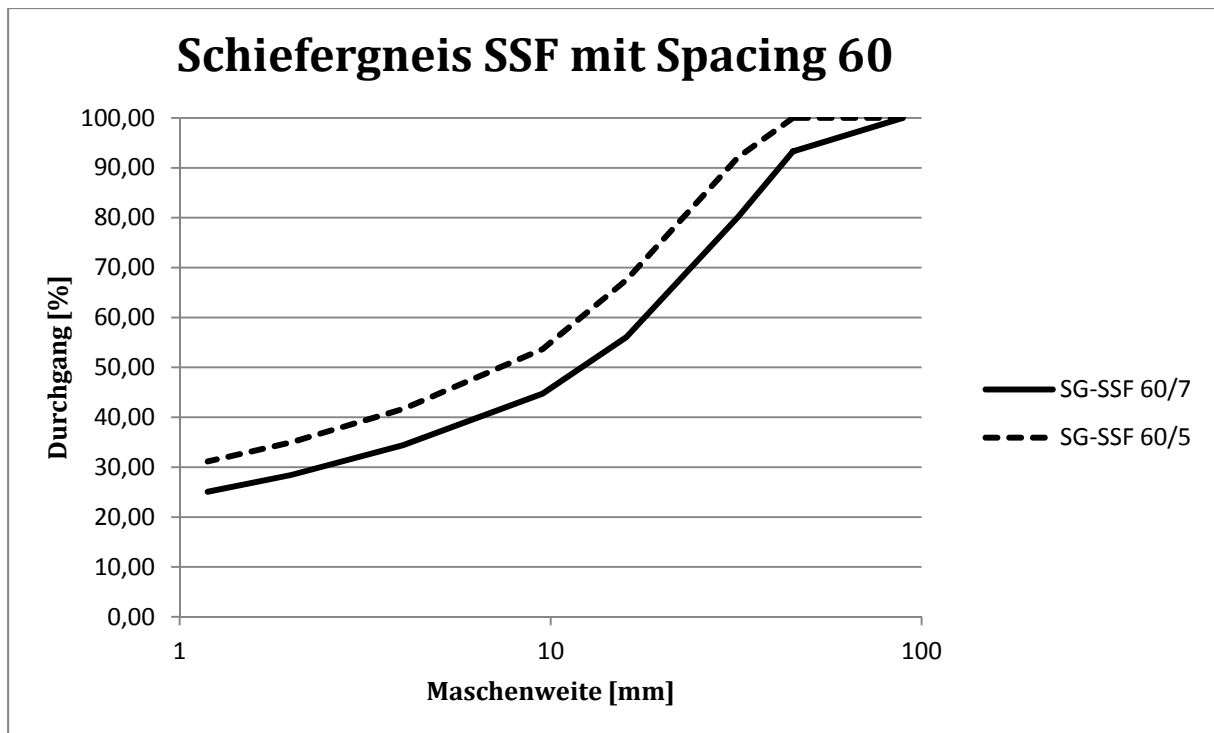


Abb.4.63: Korngrößenanalyse des Schiefergneises schräg zur Schieferung bei einem Schneidspurabstand von 60 mm bei zwei unterschiedlichen Penetrationstiefen (5,1 und 7,6 mm).

4.4.2 Ergebnisse der Kornformanalyse

Die Untersuchungen am isotropen Imberg Sandstein (BIERMEIER, 2011) zeigen einen höheren Anteil an plattigen Körnern als an gedrunenen Körnern im Ausbruchmaterial. Zusätzlich konnte ein großer Einfluss von Trennflächen auf die Kornform nachgewiesen werden. Die Auswertung eines Großblocks (ohne künstliche Trennflächen) lieferte bis zu 30 % mehr plattige Körner als das anfallende Ausbruchmaterial von den Gesteinswürfeln mit 30 cm Kantenlänge, die einem Trennflächenabstand von 30 cm entsprechen. Der Grund hierfür wird mit den Brüchen zur freien Fläche (Trennfläche) und der dadurch stattfindenden Veränderung des Ausbruchsverhaltens interpretiert.

4.4.2.1 Ergebnisse der anisotropen Lithologien

Die Auswertung der anisotropen Lithologien erfolgte in Gewichtsprozent in gedrungene (Aspect Ratio < 3) und plattige Körner (Aspect Ratio > 3). Aus jeder Messebene mit gleichen Schneidspurabstand- und Penetrationsspezifikationen wurden die Einzelproben zusammengefasst und als Sammelproben für die Fraktionen 16/32 mm sowie 8/16 (Proben aus Zeltweg) bzw. 9,51/16 mm für die Lithologien die in Colorado geschnitten wurden, ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst. Der Anteil der plattigen Körner überwiegt bei allen Lithologien mit Ausnahme des Hornblendegneises. Der prozentuale Anteil der plattigen

Körner schwankt dabei von 49 – 83 Gew.-%. Der Hornblendegneis zeigt als einzige Lithologie ein umgekehrtes Verhalten und liegt bei einem Anteil an plattigen Körnern von 38 Gew.-%.

Lithologie	Orientierung der Schieferung	Schneidspurabstand/Penetration										Gesamt			
		60/5		60/7		80/5		80/7		100/5				100/7	
		gedrungen [%]	plattig [%]	gedrungen [%]	plattig [%]	gedrungen [%]	plattig [%]	gedrungen [%]	plattig [%]	gedrungen [%]	plattig [%]	gedrungen [%]	plattig [%]	gedrungen [%]	plattig [%]
Granitgneis	normal zu SF	22	78	31	69	10	90	13	87	8	92	11	89	17	83
Granitgneis	schräg zu SF	50	50	55	45	53	47	58	42	45	55	54	46	51	49
Hornblendegneis	normal zu SF	65	35	61	39	70	30	67	33	62	38	67	33	62	38
Kalkglimmerschiefer	normal zu SF	46	54	39	61	NA	NA	47	53	NA	NA	52	48	46	54
Kalkglimmerschiefer	parallel zu SF	29	71	54	46	NA	NA	46	54	NA	NA	49	51	45	55
Kalkglimmerschiefer	schräg zu SF	16	84	15	85	NA	NA	26	74	NA	NA	17	83	19	81
Kalkglimmerschiefer	verfaltet	11	89	8	92	NA	NA	25	75	NA	NA	46	54	22	78
Augengneis	normal zu SF	25	75	33	67	NA	NA	28	72	NA	NA	35	65	30	70
Augengneis	parallel zu SF	32	68	24	76	NA	NA	22	78	NA	NA	10	90	23	77
Augengneis	schräg zu SF	29	71	32	68	NA	NA	44	56	NA	NA	22	78	32	68
Schiefergneis	schräg zu SF	20	80	26	74	NA	NA	49	51	NA	NA	61	39	40	60

Tab.4.6: Zusammenfassung der prozentualen Anteile (Gew.-%) von gedrunenen und plattigen Körnern bei den unterschiedlichen Spacing- und Penetrationssettings sowie als Gesamtheit für eine Lithologie.

Den höchsten Anteil an plattigen Körnern (83 Gew.-%) weist der Granitgneis, der normal zur Schieferung geschnitten wurde auf. Ähnlich hohe Werte liefert der verfaltete Kalkglimmerschiefer (78 Gew.-%) sowie der schräg zur Schieferung geschnittene Kalkglimmerschiefer (81 Gew.-%). Unterschiede zwischen Kornklassen innerhalb einer Lithologie konnten, mit Ausnahme des Hornblendegneises, nicht erkannt werden. Der Hornblendegneis zeigt eine prozentuale Zunahme an plattigen Körnern in der feineren Kornfraktion (8/16 mm) in allen Spacing- und Penetrationsvariationen.

4.5 Interpretation und Diskussion

Aus den Untersuchungen zum Einfluss der Gefügeorientierung auf die anfallende Korngrößenverteilung lässt sich keine für alle Lithologien gleich zutreffende Aussage ableiten. Während beim Kalkglimmerschiefer bei allen Analysen die Proben, welche normal zur Schieferung geschnitten wurden, die feinsten Sieblinien lieferten stellte sich beim Granitgneis heraus, dass alle Proben die schräg zur Schieferung geschnitten wurden die feinkörnigsten Sieblinien lieferten. Das Ausbruchmaterial des Augengneises zeigt keine wesentlichen Unterschiede der Sieblinie bei abweichenden Gefügeorientierungen. Dies ist vermutlich auf die weniger ausgeprägte Schieferung sowie auf den geringen Glimmergehalt zurückzuführen. Aus allen Untersuchungen wird jedoch deutlich, dass bei abnehmendem Schneidspurabstand der Feinkornanteil ansteigt.

Abbildung 4.64 illustriert die gesamten Bandbreiten der Siebkurven von den einzelnen Lithologien in den Gefügeorientierungen normal, parallel und schiefwinkelig zur Schieferung. Auffallend sind die hohen Feinkorngehalte (> 30 %) vom Kalkglimmerschiefer (schwarz) und vom Schiefergneis (blau). Dies ist höchstwahrscheinlich auf die geringen Druckfestigkeiten dieser beiden Lithologien (beide rund 80 MPa) sowie auf die hohen Glimmergehalte dieser Lithologien zurückzuführen. Granitgneis (rot) und Augengneis (grün) zeigen das meiste

Grobkorn und weisen zudem die höchsten Druckfestigkeiten der untersuchten Lithologien auf. Zusätzlich geht aus den mineralogischen Untersuchungen hervor, dass der Granit- und der Augengneis die grobkörnigsten Minerale in den Dünnschliffen aufweisen. Dies kann ein bestimmender Faktor für die Sieblinien des Ausbruchmaterials sein.

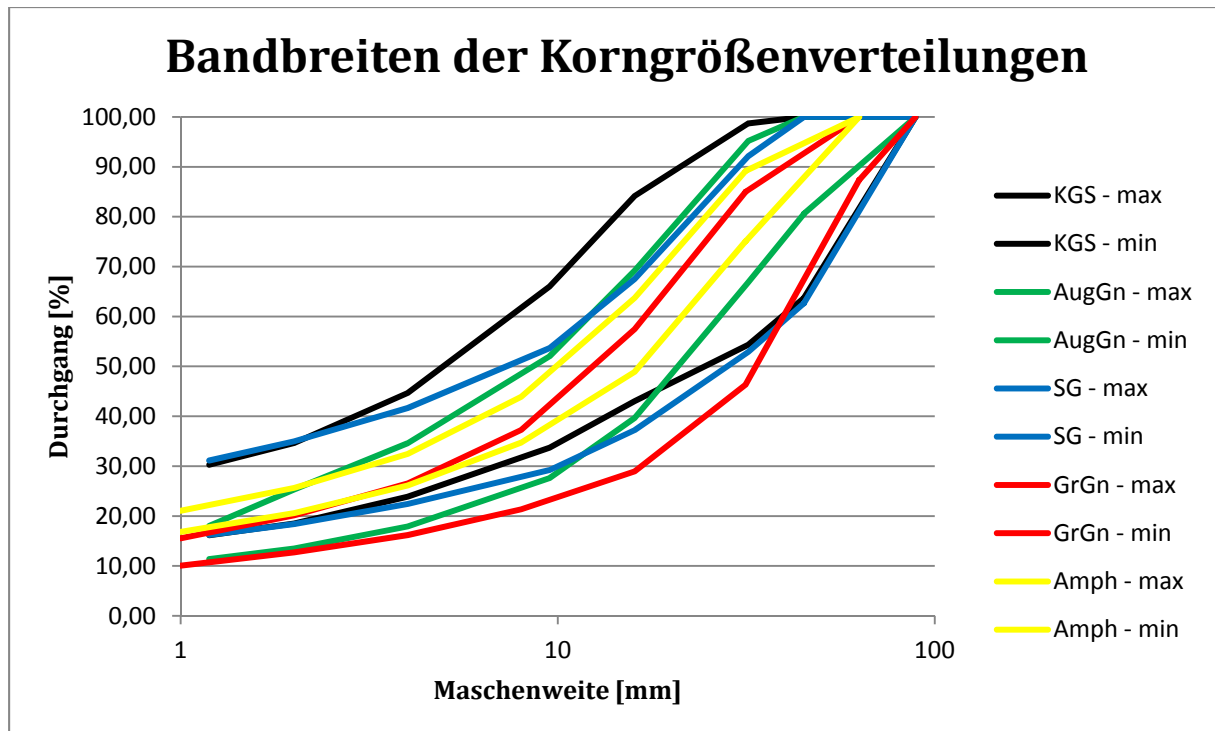


Abb.4.64: Bandbreiten der Korngrößenverteilungen von den untersuchten Lithologien.

Aus den Darstellungen mit konstant gehaltener Penetrationstiefe und variierendem Schneidspurabstand geht klar hervor, dass eine Zunahme des Schneidspurabstandes zu einer größeren Sieblinie führt. Des Weiteren erhöht sich im Zuge dessen auch der Feinkorngehalt des anfallenden Ausbruchmaterials. Kalkglimmerschiefer, Augengneis und Schiefergneis liefern, ganz unabhängig der geprüften Gefügeorientierung, klare Ergebnisse, hingegen fallen die Resultate bei den Hornblendegneisproben sowie bei den Granitgneisproben nicht so deutlich aus. Man erkennt zwar eine leicht gröbere Sieblinie bei Vergrößerung des Schneidspurabstandes, jedoch kommt es bei manchen Proben teilweise zu Überdeckungen der Kornsummenkurven bei unterschiedlichem Spacing. Die klaren Ergebnisse von KGS, AG und SG werden durch die bessere Einspannung im Mörtelbett am Linearschneidprüfstand der CSM erklärt. Durch die permanente seitliche Stützung, welche beim Prüfstand in Zeltweg durch das Wechseln der Stahlplatten immer wieder kurzzeitig wegfiel, sind die Resultate deutlicher.

Der Einfluss der Penetrationstiefe auf das Ausbruchmaterial ist nicht so deutlich zu erläutern wie der Einfluss des Schneidspurabstandes. Während der Kalkglimmerschiefer, der Augengneis

sowie der Hornblendegneis beinahe idente Sieblinien bei beiden Penetrationstiefen in allen Schieferungsorientierungen zur Schneidrichtung liefern, gibt es beim Granitgneis und beim Schiefergneis leichte Abweichungen. Einerseits zeigt der Granitgneis schräg zur Schieferung eine gröbere Sieblinie bei geringerer Penetration, andererseits illustriert der schräg zur Schieferung geschnittene Schiefergneis eine gröbere Sieblinie bei höherer Penetration. Auf alle Fälle ist aus den Ergebnissen abzuleiten, dass die Penetrationstiefe auf den Verlauf der Korngrößenverteilungskurve des anfallenden Materials einen weit geringeren Einfluss als der Schneidspurabstand hat. Diese Ergebnisse der geschieferten Lithologien bezüglich Einfluss von Schneidspurabstand und Penetrationstiefe auf das Ausbruchmaterial decken sich mit den Untersuchungen von BIERMEIER (2011) am isotropen Imberg Sandstein.

Die Analysen der einzelnen Kornformen des Ausbruchmaterials zeigen, mit Ausnahme des Hornblendegneises, einen geringen bis sehr deutlichen Mehranteil (49 – 83 Gew.%) an plattigen Körnern. Auswirkungen von Gefügeorientierung, Schneidspurabstand und Penetration auf die anfallenden Körner konnten in keiner Lithologie nachgewiesen werden. Einflüsse von Gesteinsparametern auf die Ergebnisse konnten nicht nachgewiesen werden, wobei anzumerken ist, dass der Hornblendegneis den geringsten Glimmergehalt, die höchste Spaltzugfestigkeit und den höchsten E-Modul dieser Lithologien aufweisen kann. Der Hornblendegneis zeigt bei allen Spacing- und Penetrationsvariationen einen Anstieg der plattigen Körner bei der Kornklasse 8/16 mm im Vergleich zur Klasse 16/32 mm. Als weiterer Trend konnte beim Hornblendegneis ein Maximum an gedrunenen Körnern jeweils bei 80 mm Schneidspurabstand erkannt werden. Für eine geplante Verwendung des Ausbruchmaterials als Gesteinskörnung erweist sich für den Hornblendegneis der Gleinalpe ein Schneidspurabstand von 80 mm, aus den oben genannten Erkenntnissen, als sinnvoll.

Grundsätzlich kann das anfallende Ausbruchmaterial nicht direkt einer Verwendung als Gesteinskörnung zugeführt werden. Es benötigt dazu eine Aufbereitung um den Rundungsgrad respektive die Gedrunenheit der Körner zu verbessern. Bei diesem Prozess kommt es zu einem zusätzlichen Anfall von Feinkorn. Lithologien mit größerem Materialanfall (von den vorliegenden Untersuchungen sind dies Granitgneis und Augengneis) sind unter diesen Aspekten besser für eine Verwendung als Gesteinskörnung anzusehen als Lithologien mit feinerem Materialanfall (von den vorliegenden Untersuchungen sind dies Kalkglimmerschiefer und Schiefergneis).

5 Auswirkungen der Diskenschnitte im maschinellen Tunnelbau auf die Schmidhammer Härteverteilung sowie die Rissfortpflanzung im Gestein

Ein großer Teil der Ergebnisse dieses Kapitels wurde bereits im Voraus von LASSNIG et al. 2012 "Decrease in Schmidt hammer hardness controlled by schistosity orientation of metamorphic rocks after loading with TBM cutters" im International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences publiziert.

Der Schmidhammer Indextest ist ein Standardversuch um Betone auf ihre Festigkeit zu testen (SCHMIDT, 1951). Ausgehend von den Betonprüfungen korrelierten bereits viele Autoren Zusammenhänge zwischen dem Schmidhammer Rückprallwert und geotechnischen Parametern von Gesteinsproben wie der uniaxialen Druckfestigkeit (UCS) und dem Elastizitätsmodul (E) (AUFMUTH, 1973; CARGILL & SHAKOOR, 1990; DEERE & MILLER, 1966; KAHRAMAN, 2001; KATZ et al. 2000; KYDIBINSKI, 1980; O'ROURKE, 1989; SHALABI et al., 2007; SACHPAZIS, 1990; SHOREY et al., 1984; YASAR & ERDOGAN, 2004; YILMAZ & SENDIR, 2002). YAGIZ (2009) erweiterte diese Arbeiten um eine neue Korrelation im Jahre 2009 an neun verschiedenen Lithologien bei denen der Korrelationskoeffizient zwischen 0,7 und 0,99 variiert.

Derzeit befinden sich zwei verschiedene Schmidhammer Typen am Markt welche sich durch verschiedene Energieeinträge und somit durch verschiedene Ergebnisse unterscheiden. Der Typ-L Hammer liefert, aufgrund eines geringeren Energieeintrags, kleinere Rückprallwerte für die gleichen Gesteinsproben als der Typ-N Hammer (BUYUKSAGIS & GOKTAN, 2007). In der Vorhersage von geotechnischen Parametern wie UCS und E-Modul erweist sich der Typ-N Schmidhammer als praktikabler und effizienter (AYDIN & BASU, 2005). Zusätzlich wird angeführt, dass beide Schmidhammertypen, für die Bestimmung der uniaxialen Druckfestigkeit von Gesteinen, in einem Bereich von bis zu 300 MPa erfolgreich verwendet wurden.

Ziel der Untersuchungen war es den Einfluss eines Schnittes mit einem Diskenmeißel, wie er im maschinellen Tunnelbau am Bohrkopf einer Tunnelbohrmaschine (TBM) verwendet wird, auf die Schmidhammerhärte von geschieferten Gesteinen zu bestimmen. Das Ganze bei unterschiedlichen Orientierungen der Schieferung zur Schneidspur.

Eine der wesentlichen Fragen, neben der Qualität des Ausbruchmaterials, ist im kontinuierlichen Tunnelbau die Penetrationsprognose welche mit unterschiedlichen Modellen berechnet werden kann (siehe Kapitel 4). Neben diversen Trennflächen- und Maschinenparametern spielt die UCS

eine wesentliche Rolle in den meisten Vortriebsprognosen (YAGIZ, 2008). Aufgrund der Vergleichbarkeit der Schmidhammer Härte mit der uniaxialen Druckfestigkeit von Gesteinen wurden Indextests an sieben verschiedenen Blockproben vor und nach dem Schneidversuch mit der Diske durchgeführt.

Anzumerken ist noch, dass vergleichende Studien zwischen Schneidraten von Roadheadern, also Teilschnittmaschinen, mit Schmidhammer Werten bereits durchgeführt wurden (GOKTAN & GUNES, 2005).

Anschließend an die Schmidhammer Tests wurden an den gleichen drei Lithologien Analysen zur Rissausbreitung durchgeführt. Angelehnt an die Arbeit von SCHORMAIR (2010), welcher die entstehenden Risse in Dünnschliffen durch den Bohrvorgang beim konventionellen Tunnelvortrieb untersucht hat, wurden hier die Gesteinsproben auf Rissfortpflanzung nach Diskenmeißelbelastung, wie im maschinellen Tunnelvortrieb angewandt, analysiert.

5.1 Methodik

An drei Lithologien (Kalkglimmerschiefer, Augengneis und Schiefergneis) wurden vor und nach dem Schneidversuch am Linearschneidprüfstand (siehe Kapitel 4) Schmidhammer Tests durchgeführt und die Werte verglichen. Von den gleichen Proben wurden anschließend Anschliffe und Dünnschliffe hergestellt, welche das dadurch entstehende Rissmuster sowie die Fortpflanzung der Risse beschreiben und erklären sollen.

Die mittleren geotechnischen Kennwerte der Lithologien sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Lithologie	UCS [MPa]	E - Modul [GPa]	V - Modul [GPa]	Poisson Zahl [-]	Zugfestigkeit [MPa]	Clar - Wert	
						Azimuth [°]	Neigung [°]
Augengneis	228,4 (SD 21,0)	36,7 (SD 1,8)	31,1 (SD 1,6)	0,11 (SD 0,02)	12,4 (SD 3,0)	358	71
						88	72
						181	89
Kalkglimmerschiefer	83,2 (SD 5,2)	54,5 (SD 2,2)	41,0 (SD 4,7)	0,21 (SD 0,01)	8,7 (SD 1,4)	90	52
						91	89
						130	40
Schiefergneis	81,4 (SD 47,3)	59,5 (SD 21,3)	54,1 (SD 21,1)	0,15 (SD 0,05)	11,0 (SD 9,0)	105	69

Tab.5.1: Arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen der geotechnischen Parameter der drei Lithologien (Die Daten vom Schiefergneis stammen aus ÖBB INFRASTRUKTUR BAU AG, 2007). Die CLAR-Werte geben die Raumlage der Schieferung der getesteten Probenkörper zur Schneidrichtung an.

Vor dem Schneidversuch wurden die Proben in Würfel mit einer Kantenlänge von 30 cm gesägt und in unterschiedlichen Gefügeorientierungen in die Stahlwanne (siehe Tab.5.1) gelegt. Die Gesteinswürfel wurden mit Stahlblechen in beiden Richtungen gestützt. Die Bleche wurden mit dem Drehmomentschlüssel mit Kräften von 200 Nm in Längsrichtung sowie mit 100 Nm von der

Seite befestigt um die Proben ausreichend zu stützen. Der verwendete Meißel ist eine 10“ Diske mit einer Schneidrollenbreite von 13 mm. Die Schneidgeschwindigkeit betrug in etwa 1,5 m/s. Die unterschiedlichen Schieferungsorientierungen zur Schneidrichtung sind in CLAR-Werte (Azimut/Neigung) in Tabelle 5.1 dargestellt.

Die Schnitte an den Gesteinsblöcken wurden mit 2 unterschiedlichen Penetrationstiefen durchgeführt. Beim Augengneis mit 8 mm und anschließend beim Kalkglimmerschiefer sowie beim Schiefergneis mit 6 mm, da erkannt wurde, dass die geringere Penetrationstiefe zur Bestimmung der entstehenden Risse ausreicht. Ausgeführt wurde das Ganze in zwei Schritten. Zuerst mit einer Penetration von 3 mm und anschließend mit einer Penetration von 5 mm (Augengneis) bzw. 3 mm (Kalkglimmerschiefer, Schiefergneis). Der Grund dafür liegt in den minimalen Höhenunterschieden der Gesteinsblöcke aufgrund geringer Ungenauigkeiten bei Zuschneiden der Würfel. Die tatsächlichen Penetrationen an den Blockproben schwanken um +/-1 mm.

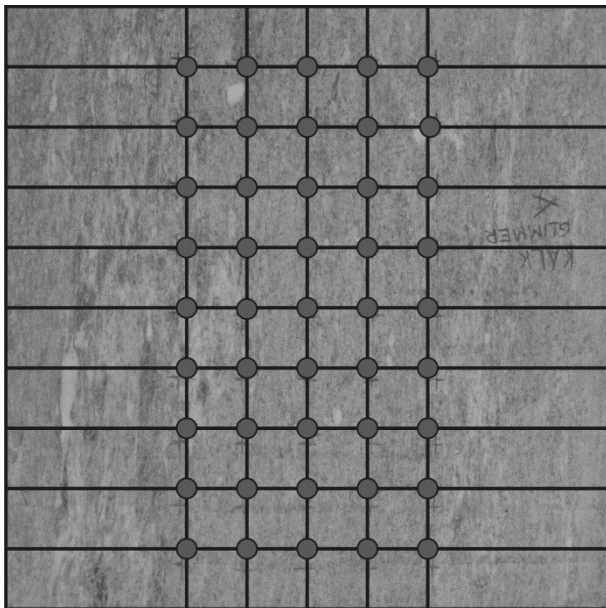


Abb.5.1: Testraster an der Gesteinsoberfläche mit 3 cm Abstand. Der Schnitt mit der Diske kommt genau in der mittleren Testspalte zu liegen. (LASSNIG et al., 2012)

5.1.1 Schmidhammer Tests

Die Schmidhammer Versuche wurden mit einem “Proceeq SilverSchmidt Concrete Test Hammer PC, Type N“ durchgeführt. Als Unterlage der Gesteinsblöcke wurden Stahlbleche verwendet um keinen Einfluss der Untergrundbeschaffenheit auf die Rückprallwerte (Hr) zu haben. Die Tests wurden mittels eines Testrasters mit 3 cm Abstand an der Gesteinsoberfläche durchgeführt (Abb.5.1). Jeder Messpunkt wurde drei Mal getestet und gemittelt. Für die Auswertung wurde jeweils der arithmetische Mittelwert der 5 Testspalten herangezogen. Die

gleiche Testanordnung wurde nach dem Schnitt mit der Diske wiederholt um den Einfluss des Schnittes auf die Härteverteilung rund um die Belastung feststellen zu können.

5.1.2 Untersuchungen der Rissfortpflanzung im Dünnschliff und Anschliff

Um den eigentlichen Bruchprozess im maschinellen Tunnelvortrieb besser verstehen zu können wurden aus den drei Lithologien Probekörper, makro- und mikroskopisch, auf ihre Rissausbreitung nach dem Diskenschneidversuch analysiert. Dazu wurde der Gesteinsblock nach den Schneidversuch in einer Holzschalung mit fluoreszierendem Epoxidharz (Epodye) ausgegossen und die größeren Risse verfüllt. Nach einer Aushärtezeit von etwa einer Woche wurden Bohrkern mit 5 cm Durchmesser direkt unter dem Schnitt aus dem Gesteinsblock gezogen (Abb.5.2).



Abb.5.2: Gezogener Bohrkern aus der Gesteinsprobe direkt unter den Schnitt mit der Diske.

Diese mit Harz verfüllten Kerne wurden anschließend in Scheiben geschnitten und aus den 35 Einzelproben wurden Anschliffe und Dünnschliffe für die makro- und mikroskopischen Untersuchungen hergestellt. Die Anschliffe und Dünnschliffe wurden auf großen Objektträgern mit 5 cm Durchmesser angefertigt, um den gesamten Bohrkern darstellen zu können.

Beim Herstellen der Schliffe wurden die Probekörper ein weiteres Mal mit fluoreszierendem Harz eingegossen und danach im Vakuumofen bei 50 °C einen Tag ausgehärtet. Analysiert wurden die drei Lithologien auch hier wieder in unterschiedlichen Raumlagen der Schieferung zur Schneidrichtung.

Die Anschliffe wurden hergestellt um eine grobe, makroskopische Orientierung des Rissmusters anhand von Fotos darstellen und beschreiben zu können. Dazu wurden sie unter sichtbarem Licht sowie zusätzlich mit ultraviolettem Licht beleuchtet. Die Dünnschliffe wurden im Polarisationsmikroskop analysiert um die mikrostrukturelle Fortpflanzung der Risse erheben zu können.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Ergebnisse der Schmidhammer Tests

Die erzielten Ergebnisse zeigen klar eine Abnahme der Schmidhammer Resultate rund um die Schneidspur. Alle Werte, die nach dem Schneidversuch ermittelt wurden zeigen geringere Werte (oder befinden sich innerhalb der Standardabweichung) als die aufgenommenen Werte an der frischen Gesteinsoberfläche. Die arithmetischen Mittelwerte der einzelnen 5 Testspalten in Abbildung 5.1 zeigen geringere Rückprallwerte nach dem Schneidversuch (Tab.5.2 und Tab.5.3). Die Auswertung der Daten direkt in der Schneidspur konnte aufgrund der fehlenden Glattheit der Gesteinsoberfläche nicht durchgeführt werden. Durch die mechanische Diagenese des feinkörnigen Rückstandes in der Spur steigerten sich die einzelnen Messwerte bei jedem Schmidhammer Test.

Lithologie	Schieferungs- orientierung Azimut/Neigung	Schmidhammer Werte (Hr) vor dem Schnitt				
		Links vom Schnitt		Schnittspur	Rechts vom Schnitt	
		6 cm	3 cm		3 cm	6 cm
Augengneis	358/71	82.4	81.8	82.2	81.3	81.6
Augengneis	088/72	82.0	81.9	81.7	81.6	81.4
Kalkglimmerschiefer	181/89	76.5	75.2	75.7	76.4	76.4
Kalkglimmerschiefer	090/52	72.7	74.4	75.7	75.5	76.1
Kalkglimmerschiefer	091/89	77.1	78.2	77.6	77.2	77.6
Schiefergneis	130/40	76.5	76.0	73.3	74.3	74.9
Schiefergneis	105/69	76.4	76.4	76.5	77.1	77.6

Tab.5.2: Ergebnisse der Schmidhammer Tests (Rückprall Werte Hr) vor den Diskenschneidversuch. Die Werte stellen arithmetische Mittel aus jeweils 3 Einzelversuchen dar. (LASSNIG et al., 2012)

Lithology	Schieferungs- orientierung Azimut/Neigung	Prozentuelle Abnahme des Rückprallwerts (Hr) [%]			
		Links vom Schnitt		Rechts vom Schnitt	
		6 cm	3cm	3cm	6cm
Augengneis	358/71	1,2	3,6	2,1	1,5
Augengneis	088/72	0,2	1,0	5,6	1,7
Kalkglimmerschiefer	181/89	2,2	2,2	6,1	2,8
Kalkglimmerschiefer	090/52	0,1	0,2	14,0	3,5
Kalkglimmerschiefer	091/89	0,8	3,7	4,3	0,8
Schiefergneis	130/40	0,4	0,0	4,3	2,3
Schiefergneis	105/69	0,2	6,1	13,5	5,8

Tab.5.3: Prozentuelle Abnahme der Rückprallwerte nach dem Schneidversuch. Die Werte der Mittelspalte (Schneidspur) konnten aufgrund der mechanischen Diagenese des feinkörnigen Rückstandes nicht ausgewertet werden. (LASSNIG et al., 2012)

Um die Visualisierung der Ergebnisse (Abb.5.3 – Abb.5.9) zu ermöglichen wurden demnach die Messdaten in der Schneidspur sowie Daten aus Bereichen in dem es zu „single-pass-chipping“ (Gesteinsabsplittern durch Einzelschnitte) gekommen ist niedrig gesetzt. Dadurch konnte bei der graphischen Darstellung ein gut verständlicher Kontrast erreicht werden.

In Tabelle 5.5 erkennt man, dass die Unterschiede in der Schmidhammer Härte beim Augengneis mit Hr 81,3 – Hr 82,5 geringer sind als bei den anderen beiden Lithologien. Die Spannweite der Ergebnisse reicht beim Kalkglimmerschiefer von Hr 72,7 – Hr 78,7 und beim Schiefergneis von Hr 73,3 – Hr 77,3.

In den folgenden Abbildungen (Abb.5.3 – Abb.5.9) ist die Härteverteilung an der Gesteinsoberfläche vor und nach der Belastung mit der Diske als Contourplot dargestellt. Eine Übersicht der folgenden Abbildungen zeigt Tabelle 5.4.

5.2.1.1 Augengneis: Schneidrichtung normal zur Schieferung (CLAR 358/71)

Der Augengneis in Abbildung 5.3 zeigt eine einigermaßen gleichmäßig verteilte Härte über die gesamte Gesteinsoberfläche vor und nach dem Schnitt mit der Diske. Die Härteabnahme 3 cm neben der Schneidspur ist eindeutig größer als 6 cm neben der Schneidspur. Links neben der Spur ist ein Ausreißer mit viel höherer Härteabnahme fest zu stellen, welche mit „single-pass-chipping“ erklärt wird. In der graphischen Darstellung (d) ist dies durch das helle Dreieck ersichtlich. Im abgebildeten Versuch wurde der Augengneis normal zur Schieferung geschnitten.

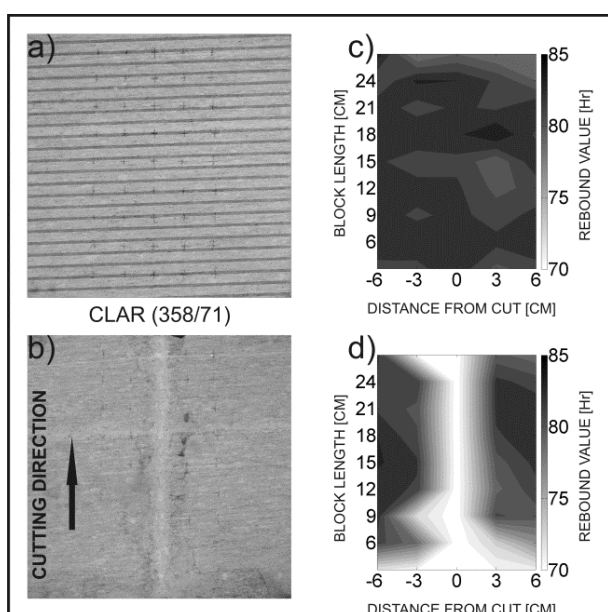


Abb.5.3: Augengneis. a) Gesteinswürfel mit transparentem Overlay der Schieferung bezogen auf die Schneidrichtung (CLAR 358/71) b) Gesteinsprobe nach dem Schneidversuch mit markierter Schneidrichtung c) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) des Ausgangsgesteins d) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) nach dem Schneidversuch. (LASSNIG et al., 2012)

5.2.1.2 Augengneis: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung (CLAR 088/72)

Der Augengneis in Abbildung 5.4 fällt steil nach rechts ein (CLAR 088/72). Man erkennt, dass die Rückprallhärte rechts neben der Schneidspur stärker abnimmt als links neben der Schneidspur. Sechs Zentimeter auf der linken Seite des Schnittes ist schon fast kein Einfluss mehr bemerkbar (Hr -0,3). Es kommt zu keinem „single-pass-chipping“ bei dieser Probe.

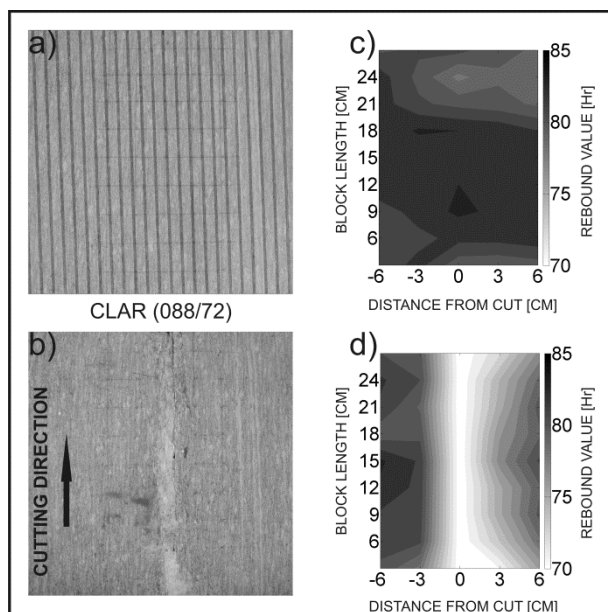


Abb.5.4: Augengneis. a) Gesteinswürfel mit transparentem Overlay der Schieferung bezogen auf die Schneidrichtung (CLAR 088/72) b) Gesteinsprobe nach dem Schneidversuch mit markierter Schneidrichtung c) Contourplot der Schmidthammer Härteverteilung (Hr) des Ausgangsgesteins d) Contourplot der Schmidthammer Härteverteilung (Hr) nach dem Schneidversuch. (LASSNIG et al., 2012)

5.2.1.3 Kalkglimmerschiefer: Schneidrichtung normal zur Schieferung (CLAR 181/89)

Abbildung 5.5 zeigt einen Kalkglimmerschiefer der normal zur Schieferung getestet wurde. Die Ergebnisse ähneln sehr stark den Ergebnissen des Augengneises der ebenfalls normal zur Schieferung getestet wurde (siehe Abb.5.3). Auf beiden Seiten neben der Schneidspur ist eine Abnahme der Härte bemerkbar. Der geringe Hr-Wert 3 cm rechts vom Schnitt wird mit „single-pass-chipping“ erklärt.

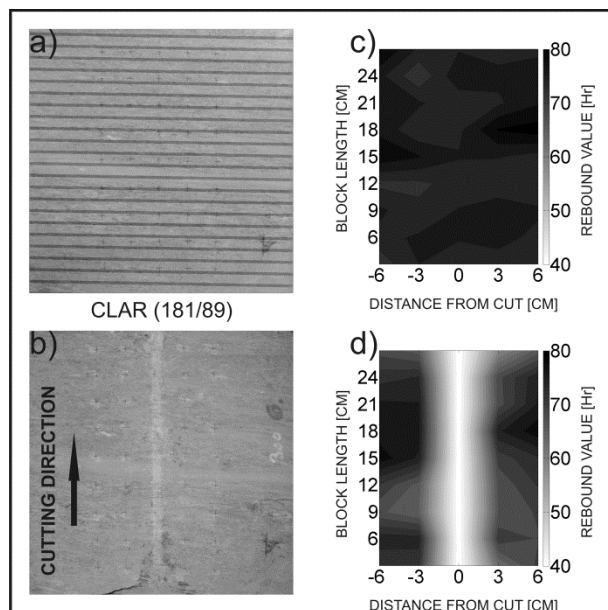


Abb.5.5: Kalkglimmerschiefer a) Gesteinswürfel mit transparentem Overlay der Schieferung bezogen auf die Schneidrichtung (CLAR 181/89) b) Gesteinsprobe nach dem Schneidversuch mit markierter Schneidrichtung c) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) des Ausgangsgesteins d) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) nach dem Schneidversuch. (LASSNIG et al., 2012)

5.2.1.4 Kalkglimmerschiefer: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung (CLAR 090/52)

Die eindeutigsten Ergebnisse wurden beim Kalkglimmerschiefer (CLAR 090/52) erzielt. Bei diesem Kalkglimmerschiefer fällt das Gefüge mittelsteil nach rechts ein (Abb.5.6). Es kommt zu einer deutlichen Abnahme der Härte in Richtung der einfallenden Schieferung sowie zu fast keinem Härteverlust links der Schneidspur.

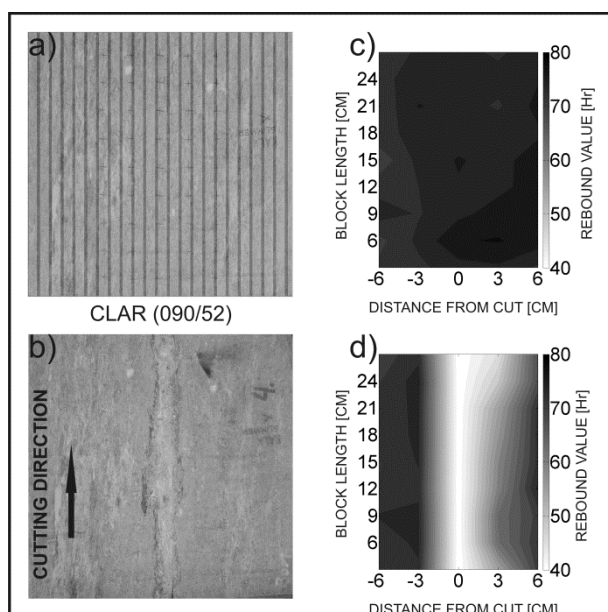


Abb.5.6: Kalkglimmerschiefer a) Gesteinswürfel mit transparentem Overlay der Schieferung bezogen auf die Schneidrichtung (CLAR 090/52) b) Gesteinsprobe nach dem Schneidversuch mit markierter Schneidrichtung c) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) des Ausgangsgesteins d) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) nach dem Schneidversuch. (LASSNIG et al., 2012)

5.2.1.5 Kalkglimmerschiefer: Schneidrichtung parallel zur Schieferung (CLAR 091/89)

Parallel zur Schieferung wurde der Kalkglimmerschiefer in Abbildung 5.7 getestet. Man erkennt eine starke Abnahme der Härte bei 3 cm Abstand von der Schneidspur und nur einen geringen Härteverlust 6 cm neben dem Schnitt.

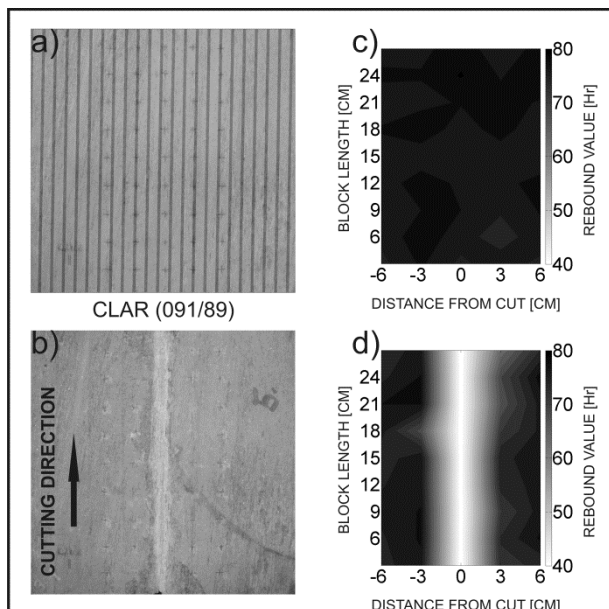


Abb.5.7: Kalkglimmerschiefer a) Gesteinswürfel mit transparentem Overlay der Schieferung bezogen auf die Schneidrichtung (CLAR 091/89) b) Gesteinsprobe nach dem Schneidversuch mit markierter Schneidrichtung c) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) des Ausgangsgesteins d) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) nach dem Schneidversuch. (LASSNIG et al., 2012)

5.2.1.6 Schiefergneis: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung (CLAR 130/40)

Die Schneidrichtung des Schiefergneises in Abbildung 5.8 ist schiefwinkelig zur Schieferung. Bei diesem Test kam es vermehrt zum „single-pass-chipping“, was durch das punktuelle Auftreten der hellen Bereiche im Contourplot verdeutlicht wird (Abb.5.8.d). Auch hier nimmt die Schmidhammer Härte vorwiegend in Richtung der einfallenden Schieferung ab und auf der gegenüberliegenden Seite kann ein Härteverlust nur geringfügig festgestellt werden.

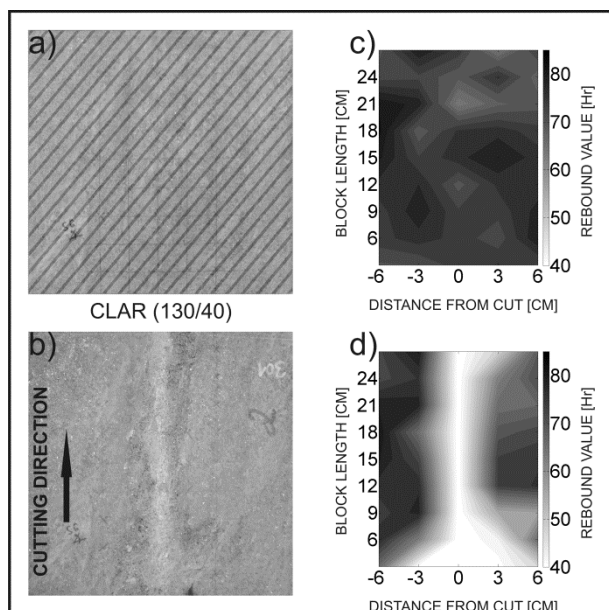


Abb.5.8: Schiefergneis a) Gesteinswürfel mit transparentem Overlay der Schieferung bezogen auf die Schneidrichtung (CLAR 130/40) b) Gesteinsprobe nach dem Schneidversuch mit markierter Schneidrichtung c) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) des Ausgangsgesteins d) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) nach dem Schneidversuch. (LASSNIG et al., 2012)

5.2.1.7 Schiefergneis: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung (CLAR 105/69)

Abbildung 5.9 zeigt einen Schiefergneis welcher mit einem Clar-Wert von 105/69 zur Schneidrichtung getestet wurde. Auch hier erkennt man, dass die Abnahme der Härte in Richtung der einfallenden Schieferung größer ist als auf der gegenüberliegenden Seite.

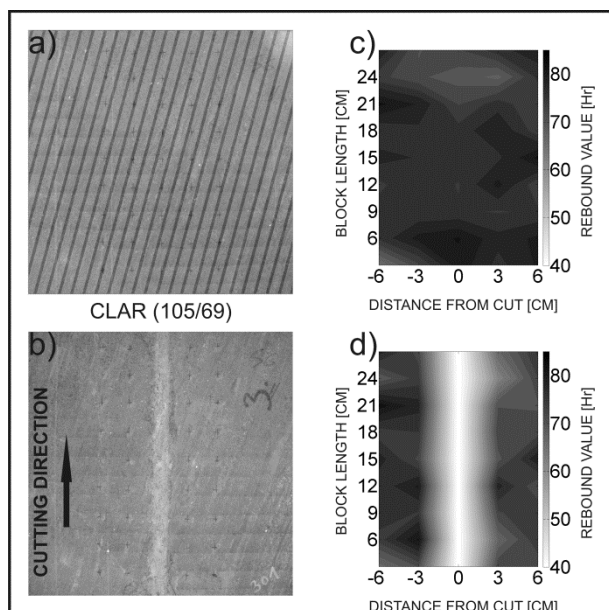


Abb.5.9: Schiefergneis a) Gesteinswürfel mit transparentem Overlay der Schieferung bezogen auf die Schneidrichtung (CLAR 105/69) b) Gesteinsprobe nach dem Schneidversuch mit markierter Schneidrichtung c) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) des Ausgangsgesteins d) Contourplot der Schmidhammer Härteverteilung (Hr) nach dem Schneidversuch. (LASSNIG et al., 2012)

5.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Rissfortpflanzung

Die Untersuchungen der Rissfortpflanzung, direkt unter den Diskenschnitten, liefern durchwegs konstante Ergebnisse. Während sich direkt unter dem Diskenschnitt eine Zermalmungszone ausbildet (Lösung des gesamten Kornverbandes), bildet sich darunter ein Bereich in dem harte Minerale (z.B.: Quarz, Granat) durch Mikrorisse zerlegt sind. Anschließend bildet sich ein Bereich in dem die Ausbreitung der Risse nur mehr entlang der Glimmerhorizonte respektive der Spaltbarkeiten von Mineralen stattfindet. In Abwesenheit von Glimmerlagen folgen die Risse den Korngrenzen der Minerale.

5.2.2.1 Augengneis: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung

Die Schieferungsflächen und somit die lagige Orientierung der Glimmerbahnen kontrolliert die Ausbreitung der Risse. Abbildung 5.10 zeigt einen Augengneis mit schiefwinkelig (72°) einfallender Schieferung unter sichtbarem und unter UV-Licht. Durch das schnittparallele Streichen der Schieferungsflächen ist eine tiefe Schädigung des Gesteins erkennbar (> 1 cm). Bis zu diesem Tiefenbereich hat sich der Kornverband aufgelöst und ist im Foto mit Harz ausgefüllt. Direkt unter dieser sogenannten Zermalmungszone entwickelt sich das Rissmuster entlang der vorherrschenden Schieferungsflächen respektive entlang der Glimmerminerale.

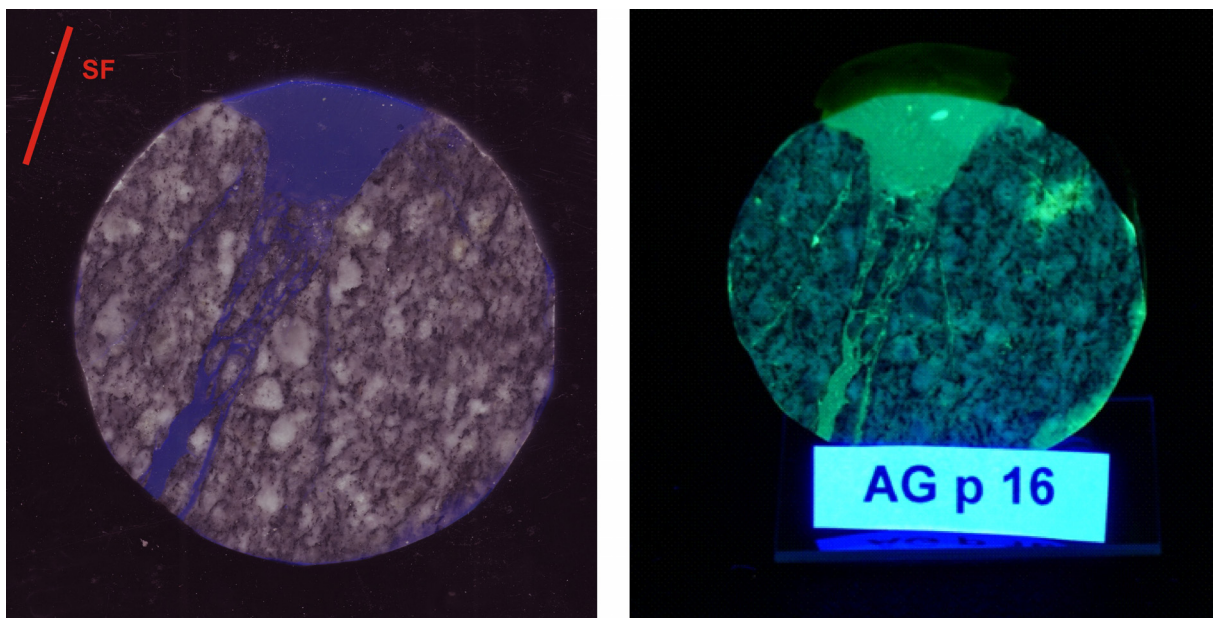


Abb.5.10: Anschliff des Augengneises mit 72° einfallender Schieferung unter sichtbarem Licht (links) und unter UV-Licht (rechts).

Abbildung 5.11 geht mehr ins Detail. Das Dünnschliffphoto zeigt den Bereich in 17 mm Tiefe unter dem Diskenschnitt. Die Zerstörung der einzelnen Minerale durch Mikrorisse ist eindeutig erkennbar (erscheint im Dünnschliff schwarz). In diesem Bereich des Dünnschliffs ist keine bevorzugte Orientierung des Rissnetzwerkes erkennbar.

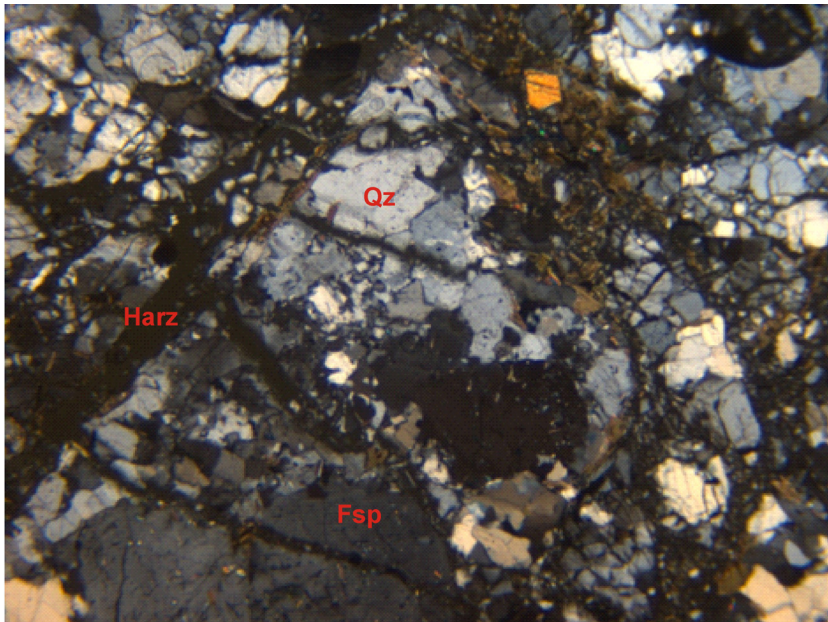


Abb.5.11: Dünnschliffphoto des Augengneises in rund 17mm Tiefe unter dem Diskenschnitt. Aufnahme unter gekreuzten Nicols. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

Die folgende Abbildung 5.12 zeigt den Bereich in rund 30 mm Tiefe. In dieser Tiefe findet fast keine Zerstörung der einzelnen Minerale mehr statt, die Risse pflanzen sich entlang der Korngrenzen der einzelnen Minerale fort. Bei Vorherrschen von Glimmermineralen entlang dieser, ansonsten entlang der Korngrenzen der Quarze und Feldspäte. Das fluoreszierende Harz ist im linken Bild (parallele Nicols) mit deutlicher Gelbfärbung erkennbar.

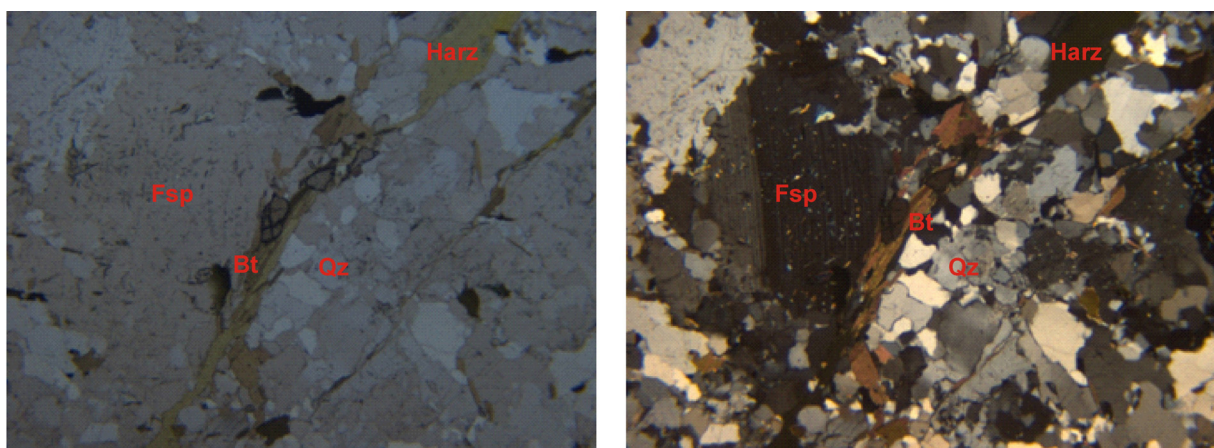


Abb.5.12: Dünnschlifffotos des Augengneises in rund 30 mm Tiefe. Aufnahme unter parallelen (links) und gekreuzten (rechts) Nicols. Unter parallelen Nicols ist das fluoreszierende Harz mit gelber Färbung erkennbar. Die Bildbreiten entsprechen jeweils 2,8 mm.

5.2.2.2 Kalkglimmerschiefer: Schneidrichtung normal zur Schieferung

Eine Kalkglimmerschieferprobe, die normal zur Schieferung geschnitten wurde ist in Abbildung 5.13 dargestellt. In dieser Probe ist zu erkennen, dass die Zermalmungszone weniger stark ausgeprägt ist, als in der Probe zuvor (nur rund 2 mm). In ungefähr 5 mm Tiefe verläuft ein horizontaler Riss, in rund 35 mm Tiefe erscheint eine in Belastungsrichtung auftretende Extensionskluft. Unter ultraviolettem Licht ist ersichtlich, dass um den horizontal verlaufenden Hauptriss Mikrorisse häufig auftreten, was auf die durchgängige Schieferungsfläche im Hintergrund der Oberfläche (in der Tiefe) des Anschliffs zurückzuführen ist und durchleuchtet.

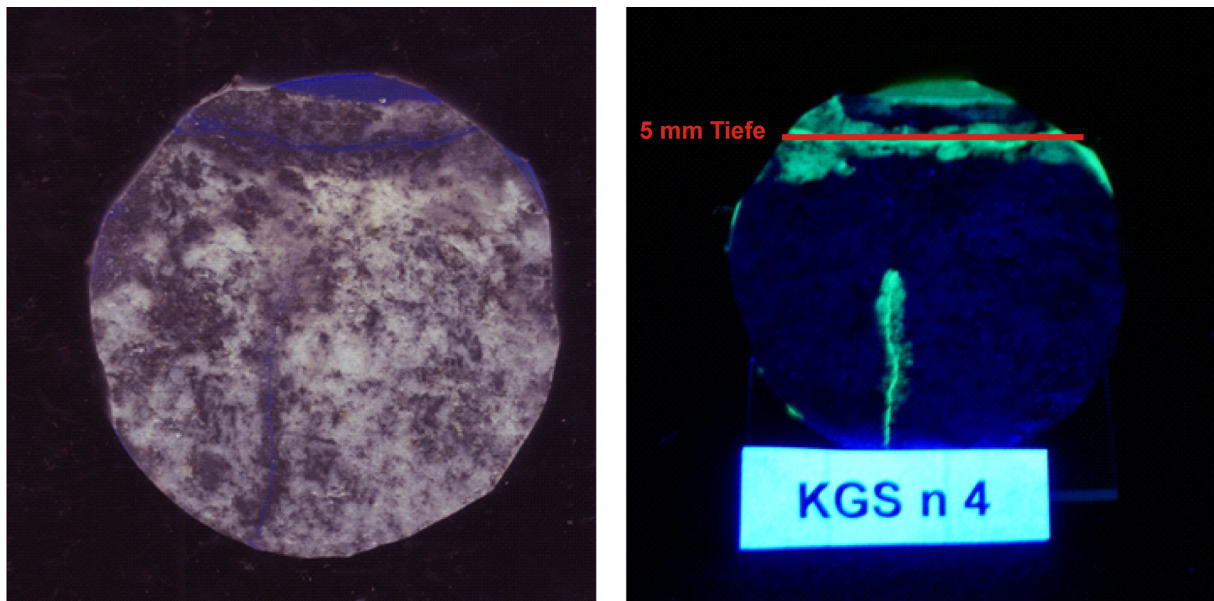


Abb.5.13: Anschliff des Kalkglimmerschiefers welcher normal zur Schieferungsrichtung geschnitten wurde unter sichtbarem Licht (links) und unter UV-Licht (rechts).

Der Bereich oberhalb des horizontalen Hauptrisses ist in Abbildung 5.14 visualisiert. In 3 mm Tiefe sind die Minerale netzwerkartig durch Mikrorisse (schwarze Linien durch die Mineralkörner) zerstört. Dabei ist auffällig, dass die interne Zerstörung der Minerale hauptsächlich die härteren Körner wie Quarze und Feldspäte betrifft. Die Calcite sind weniger durch Risse zerlegt als durch eine Verdichtung der im Mikroskop sichtbaren Spaltflächen. Bei den Muskoviten ist so gut wie keine interne Deformation im Dünnschliff nachweisbar.

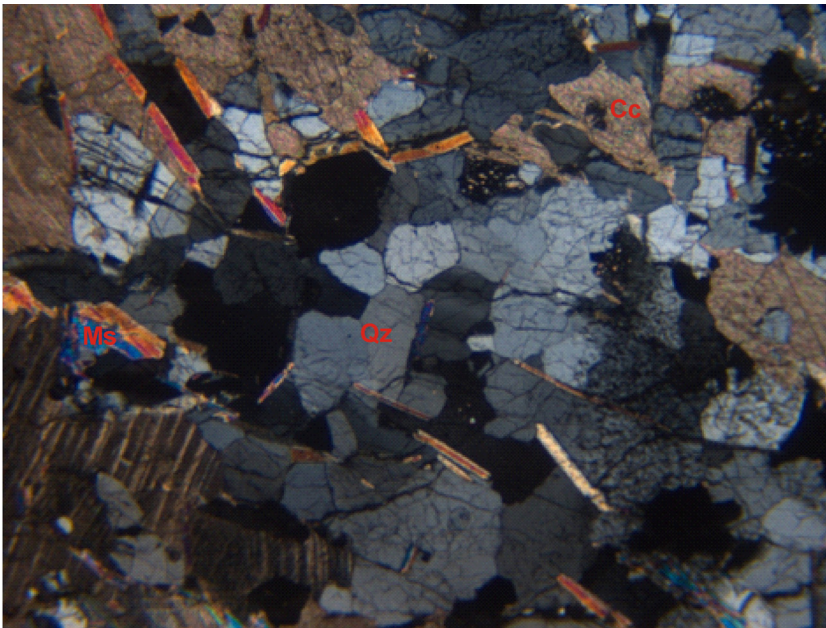


Abb.5.14: Dünnschlifffoto des Kalkglimmerschiefers in rund 3 mm Tiefe direkt über dem in 5 mm Tiefe liegenden horizontalen Hauptriss . Aufnahme unter gekreuzten Nicols. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

Der horizontale Hauptriss in dieser Probe ist in der nachstehenden Abbildung 5.15 abgebildet.

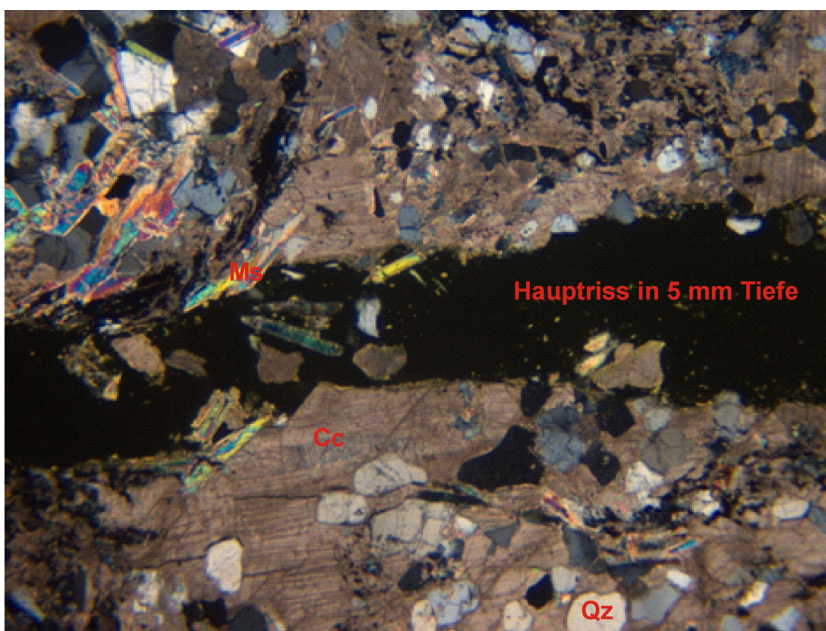


Abb.5.15: Dünnschlifffoto des Kalkglimmerschiefers in 5 mm Tiefe genau beim horizontalen Hauptriss. Aufnahme unter gekreuzten Nicols. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

Entlang des horizontalen Risses erkennt man, dass sich die Risse bei spröden Mineralen wie Quarz bereits an den Korngrenzen ausbreiten, bei Glimmern und Calciten entlang der Korngrenzen und entlang der Spaltbarkeiten.

Direkt unter dem horizontalen Riss, in 7 mm Tiefe, sind bereits viel weniger Mikrorisse (erkennbar anhand der schwarzen Linien durch die einzelnen Körner) in den einzelnen

Mineralen nachweisbar. Die meiste Energie dürfte bereits vom Haupttriss aufgenommen worden sein. Abbildung 5.16 zeigt die Abnahme der Mikrorisshäufigkeit innerhalb weniger Millimeter Tiefe durch die Energieaufnahme des Haupttrisses.

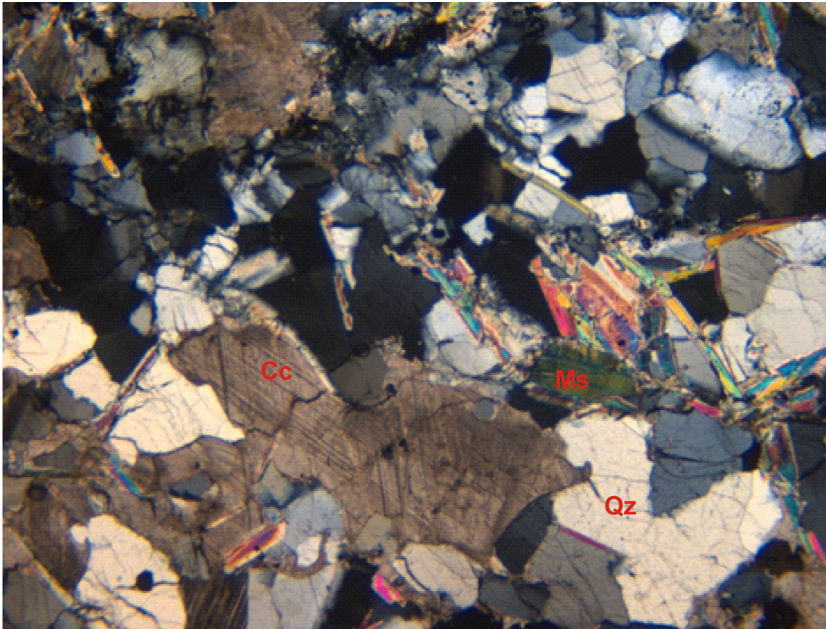


Abb.5.16: Dünnschliffphoto des Kalkglimmerschiefers in 7 mm Tiefe direkt unter dem horizontalen Haupttriss unter gekreuzten Nicols. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

Die Extensionskluft in 35 mm Tiefe ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Mikrorisse in den einzelnen Mineralen kommen in dieser Tiefe nicht mehr vor und die Ausbreitung der Extensionskluft verläuft strikt nach Korngrenzen respektive der Spaltbarkeiten der Calcite.

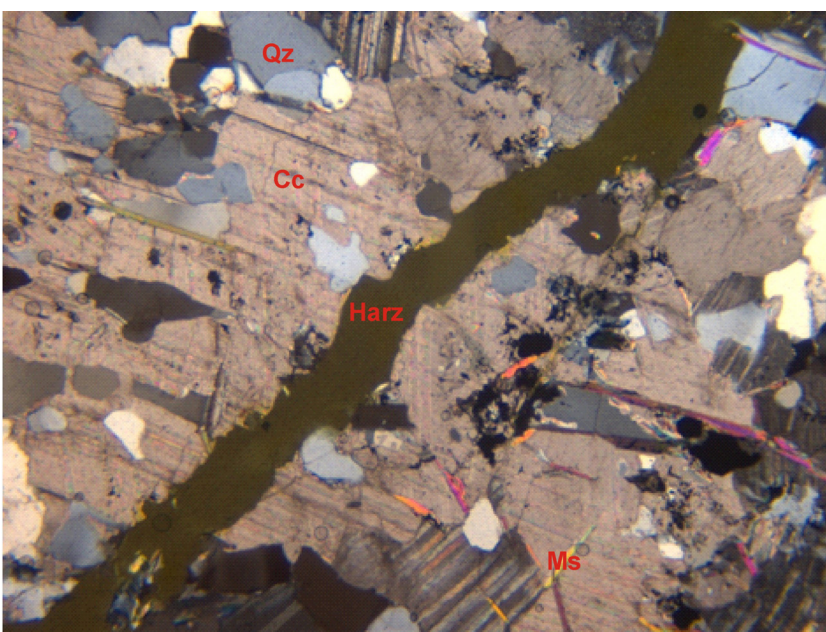


Abb.5.17: Dünnschliffphoto des Kalkglimmerschiefers in 35 mm Tiefe bei der Extensionskluft unter gekreuzten Nicols. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

5.2.2.3 Kalkglimmerschiefer: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung

Die folgende Probe in Abbildung 5.18 ist ein Kalkglimmerschiefer welcher im Streichen der Schieferung mit einem Einfallswinkel von 52° Grad getestet wurde. Man erkennt im Anschliff eine stark ausgeprägte Zermalmungszone welche tief reicht (knapp 1,5 cm), wobei bei dieser Probe nicht der komplette Kornverband zerstört wurde. Grundsätzlich folgen die Risse auch in dieser Gefügeorientierung der Schieferungsrichtung respektive den Glimmerbahnen.

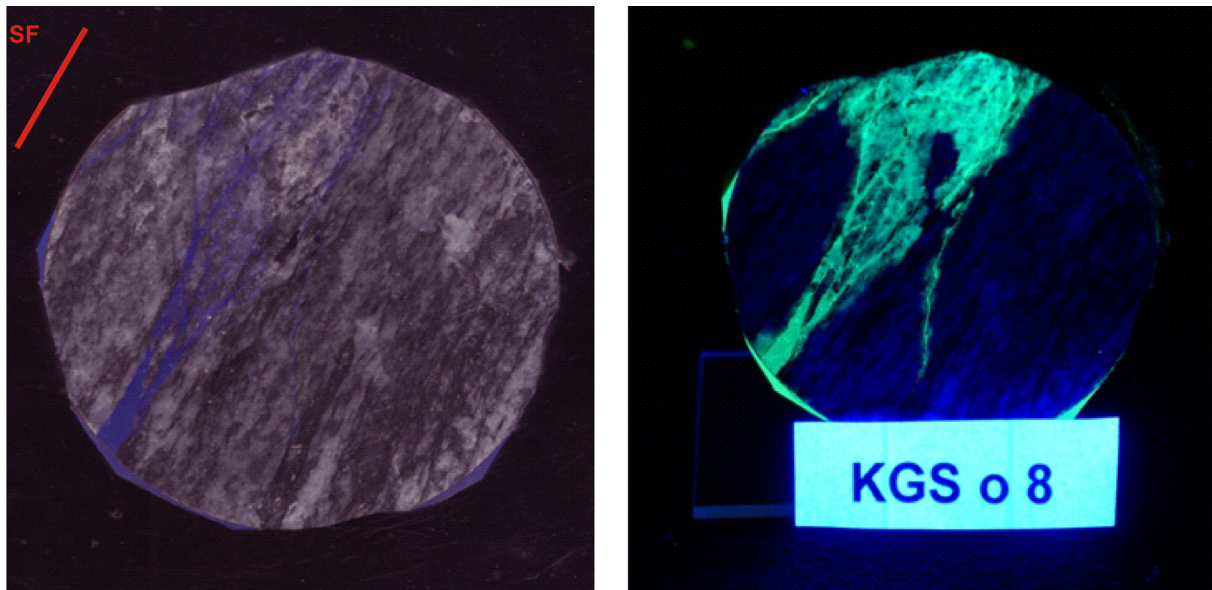


Abb.5.18: Anschliff des Kalkglimmerschiefers welcher mit 52° Grad Einfallsrichtung im Streichen der Schieferung geschnitten wurde unter sichtbarem Licht (links) und unter UV-Licht (rechts).

Ähnlich wie bei den vorangegangenen Dünnschliffen erkennt man auch bei dieser Probe eine netzwerkartige Struktur der Risse (in Schwarz) in geringer Tiefe (4 mm). Die spröden Minerale wie Quarz sind durchwegs zerlegt und der Kornverband der Gesteinsprobe ist in diesem Bereich stark gestört (Abbildung 5.19).

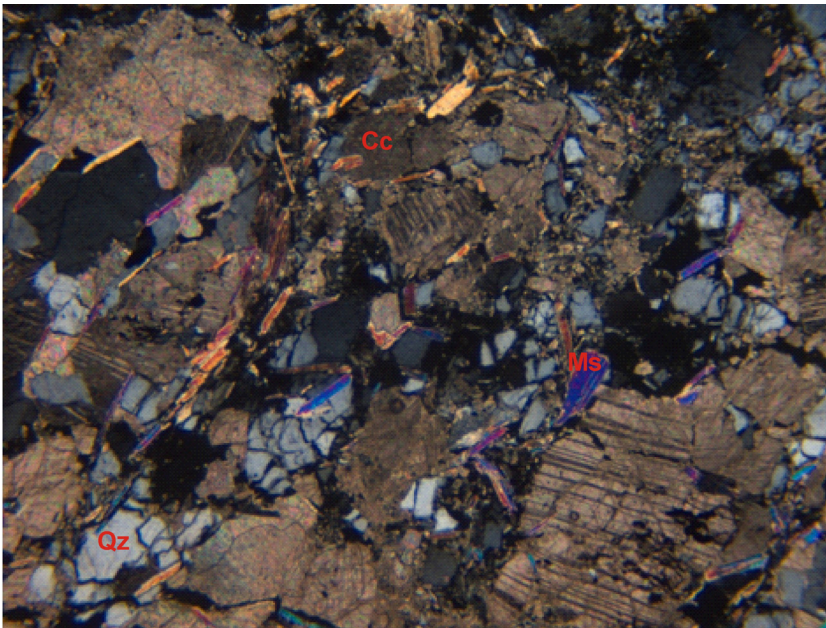


Abb.5.19: Dünnschliffphoto des Kalkglimmerschiefers mit 52° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

In rund 20 mm Tiefe ist in dieser Probe klar erkennbar, dass es zu fast keinen Rissen durch das Korn kommt. Die Risse pflanzen sich hauptsächlich entlang der rhomboederförmigen Spaltbarkeit der Calcite fort welche eine geringere Härte als die Quarze aufweisen. Ein Musterbeispiel für die Rissausbreitung im Calcit ist in Abbildung 5.20 illustriert.

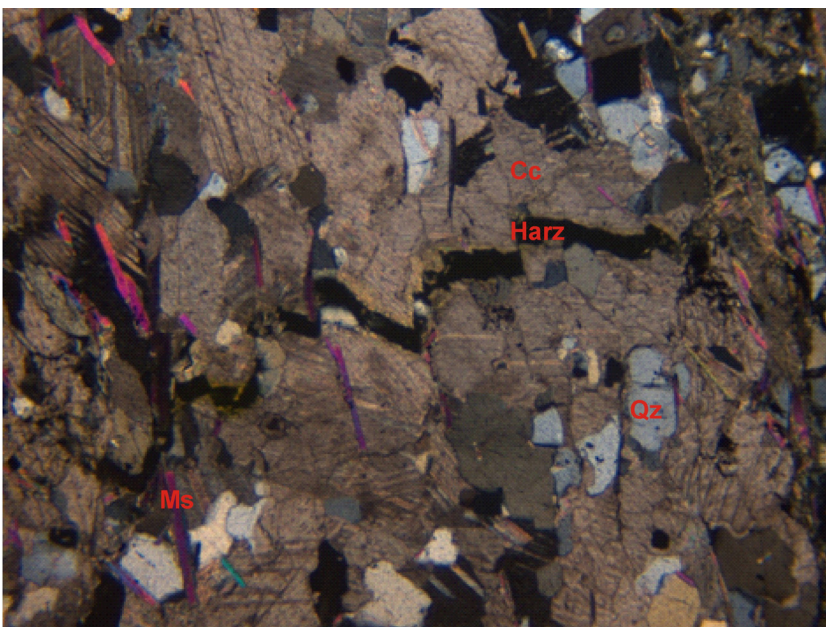


Abb.5.20: Dünnschliffphoto des Kalkglimmerschiefers mit 52° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Rissfortpflanzung entlang der Spaltbarkeit der Calcite. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

Sobald im Dünnschliff durchgehende Glimmerbänder auftreten entwickeln sich die Risse fast ausschließlich entlang dieser. In Abbildung 5.21, in 40 mm Tiefe der Probe, sind keine Mikrorisse mehr sichtbar und die Ausbreitung der Risse erfolgt ausschließlich entlang des durchgängigen Hellglimmers. Im Bild erkennbar in Schwarz befindet sich das Epoxidharz in dem teilweise gelöste Mineralfragmente schwimmen.

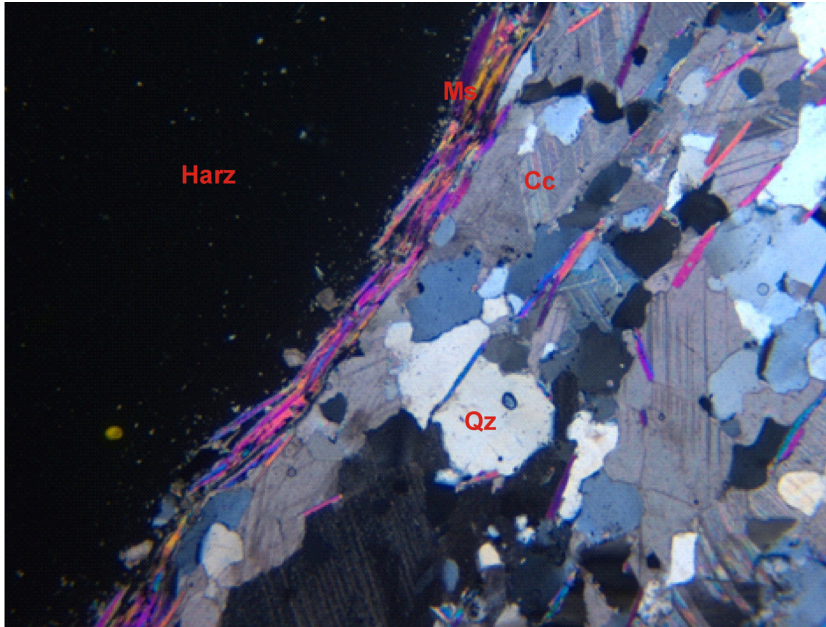


Abb.5.21: Dünnschliffphoto des Kalkglimmerschiefers mit 52° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Rissausbreitung entlang der durchgängigen Hellglimmer. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

5.2.2.4 Kalkglimmerschiefer: Schneidrichtung parallel zur Schieferung

Die folgende Probe des Kalkglimmerschiefers wurde exakt parallel zur Schieferung am Linearschneidprüfstand getestet. Abbildung 5.22 zeigt den Anschlag wiederum unter sichtbarem Licht sowie unter UV-Licht. Durch den Schnitt der Diske genau in Streichrichtung der saiger einfallenden Schieferung kommt es bei dieser Probe zur größten Zerstörung der Probe und somit zur tiefsten Zermalmungszone aller getesteten Gesteinskörper (rund 2,5 cm). Der Kornverband ist bis in diese Tiefe total gelöst und die Probe mit Harz aufgefüllt. Auch hier ist deutlich erkennbar, dass sich die Risse unter der Belastung der Diske in Schieferungsrichtung fortpflanzen.

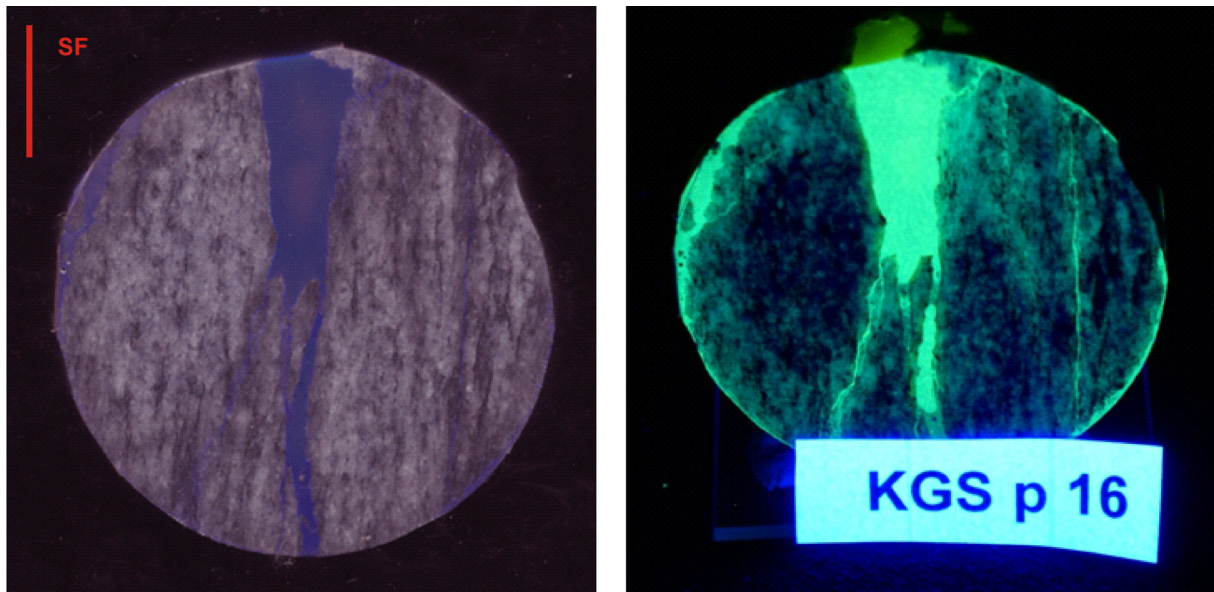


Abb.5.22: Anschliff des Kalkglimmerschiefers mit saiger einfallender Schieferung unter sichtbarem Licht (links) und unter UV-Licht (rechts).

Abbildung 5.23 verdeutlicht die interne Zerstörung der Probe am Ende des Zermahlungsbereichs in rund 25 mm Tiefe. Der Kornverband der einzelnen Minerale ist aufgebrochen und die Minerale schwimmen als Bruchstücke im gelben Harz.

Tiefer liegend, rund 30 mm unter dem Schnitt, folgen die Risse den deutlich ausgeprägten Glimmerhorizonten. Mikrorisse in den spröden Mineralkörnern sind in diesem Bereich nicht mehr festzustellen (Abbildung 5.24).

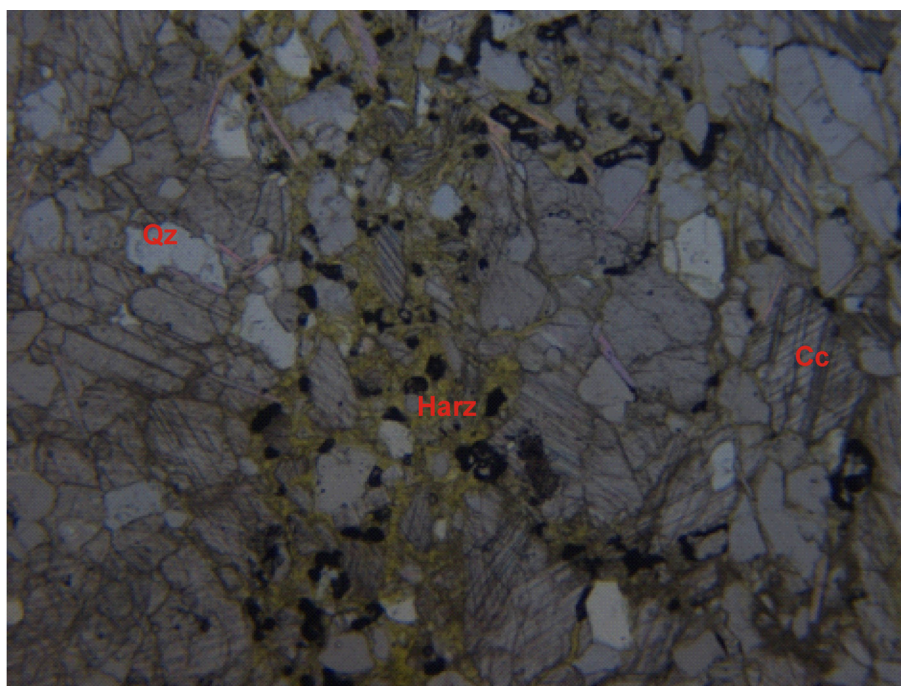


Abb.5.23: Dünnschlifffoto des Kalkglimmerschiefers mit saiger einfallender Schieferung unter parallelen Nicols. Zerstörter Kornverband in rund 25 mm Tiefe. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

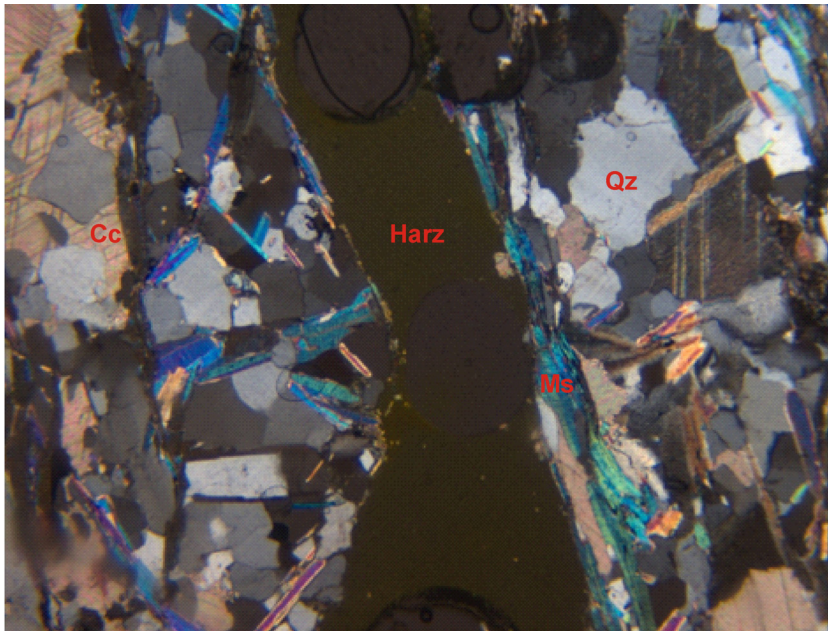


Abb.5.24: Dünnschliffphoto des Kalkglimmerschiefers mit saiger einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Rissausbreitung entlang der durchgängigen Hellglimmer. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

5.2.2.5 Schiefergneis: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung

Das nachfolgende Gestein, der Schiefergneis, hat den höchsten Glimmergehalt (rund 30 - 35 %) der drei untersuchten Lithologien. Die Glimmerbereiche, überwiegend aus Biotit, sind meist lagig angeordnet und wechseln sich mit quarzreicheren Bereichen ab. Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Lithologien erscheinen die durchgängigen Glimmerbahnen in dieser Gesteinsart am ausgeprägtesten. Abbildung 5.25 zeigt den Schiefergneis mit 40° Grad einfallender Schieferung unter sichtbarem Licht sowie unter UV Licht. Diese Abbildung zeigt klar den Vorteil des flouoreszierenden Harzes unter UV-Licht bei der makroskopischen Detektion von Rissen. Die Zermalmungszone ist in dieser Lithologie relativ zum Augengneis und zum Kalkglimmerschiefer gering ausgeprägt (ca. 2-3 mm). Die Ausbreitung der Risse und Mikrorisse folgt vorwiegend der Schieferungsorientierung mit Ausnahme der subvertikal verlaufenden Extensionskluft.

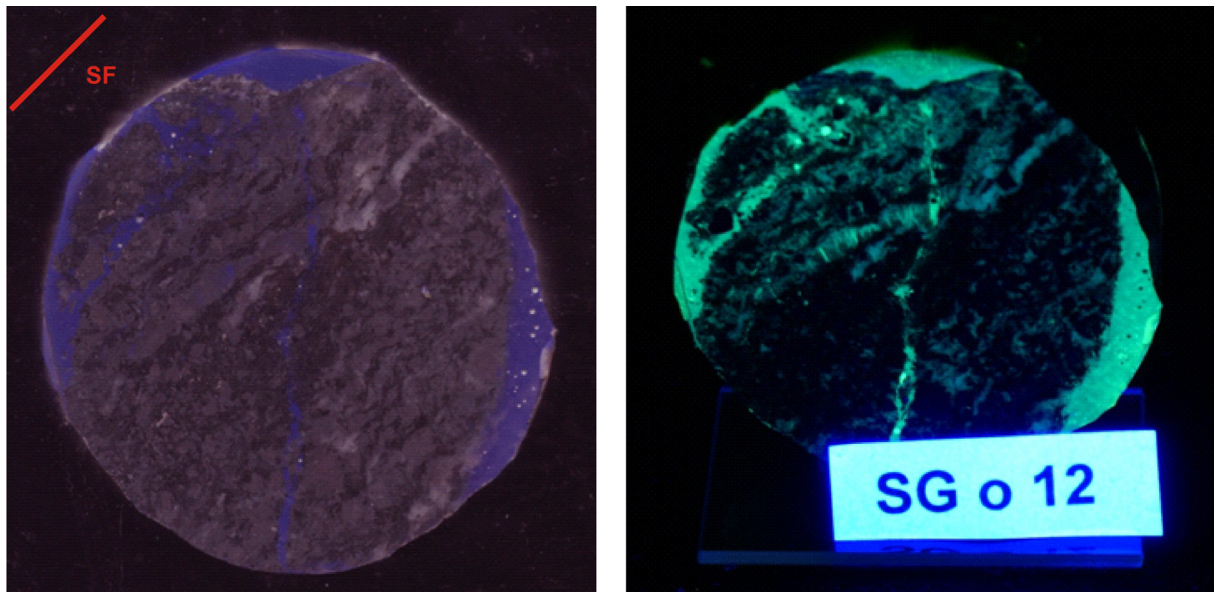


Abb.5.25: Anschliff des Schiefergneis mit 40° Grad einfallender Schieferung unter sichtbarem Licht (links) und unter UV-Licht (rechts).

Direkt unter der Schneidrolle in 3 mm Tiefe des Gesteinsdünnschliffs erkennt man wiederum die interne Zerstörung der einzelnen Minerale durch Mikrorisse (schwarze Linien durch die einzelnen Mineralkörner). Auffallend in dieser Probe ist, dass bei den Rissen in Abbildung 5.26 eine bevorzugte Orientierung der Risse, parallel zur Belastungsrichtung zum Teil erkannt werden kann.

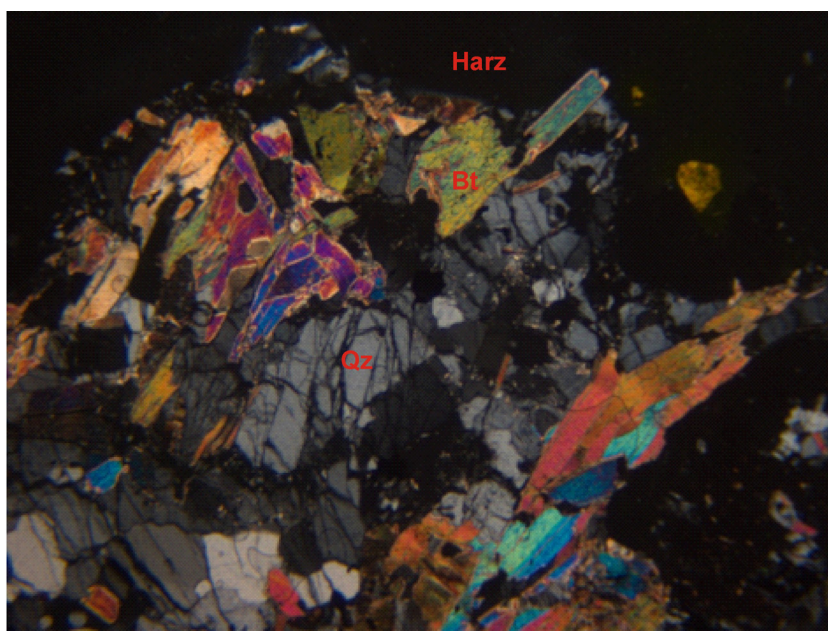


Abb.5.26: Dünnschliffphoto des Schiefergneis mit 40° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Zerstörung der spröden Minerale in 1mm Tiefe. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

Bereits in einer Tiefe von nur 5 mm nehmen die Mikrorisse in den Quarzkörnern stark ab und die meisten Risse pflanzen sich entlang der Glimmerbahnen fort. Abbildung 5.27 visualisiert die starke Abnahme der Mikrorisshäufigkeit im Vergleich zur vorangegangenen Abbildung.

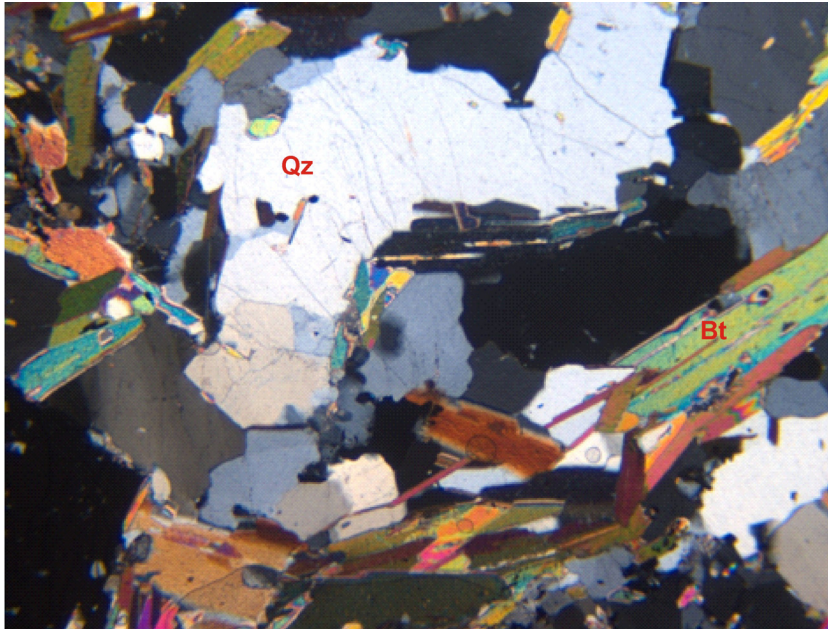


Abb.5.27: Dünnschliffphoto des Schiefergneis mit 40° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Mikrorisse in 5mm Tiefe unter dem Schnitt. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

In 25 mm Tiefe unter der Schneidspur existieren in dieser Lithologie keine Mikrorisse mehr und die Risse folgen den durchgängigen Glimmerbahnen. Der subvertikale Riss in der Mitte des Dünnschliffes entpuppt sich bei mikroskopischer Betrachtung als, durch einzelne Glimmerhorizonte abgelenkte, Extensionskluft. Durch diese Ablenkung ergibt sich der subvertikale Verlauf des Risses in Abbildung 5.28.

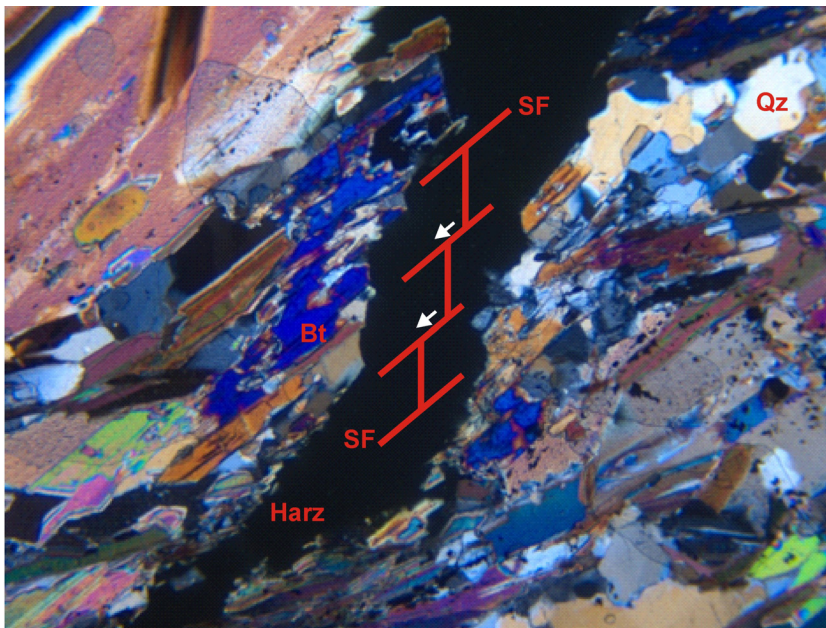


Abb.5.28: Dünnschliffphoto des Schiefergneis mit 40° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Subvertikale Extensionskluft durch Glimmerhorizonte abgelenkt. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

5.2.2.6 Schiefergneis: Schneidrichtung schiefwinkelig zur Schieferung

Ein weiterer Schiefergneisprobe, getestet mit 69° einfallender Schieferung, ist in Abbildung 5.29 dargestellt. Auch bei diesem Schiefergneis ist die Zermalmungszone, im Vergleich zu Augengneis und Kalkglimmerschiefer nur bis in geringe Tiefe nachweisbar (1 mm). Die Risse folgen der Orientierung der Schieferung entlang der einzelnen Glimmerhorizonte.

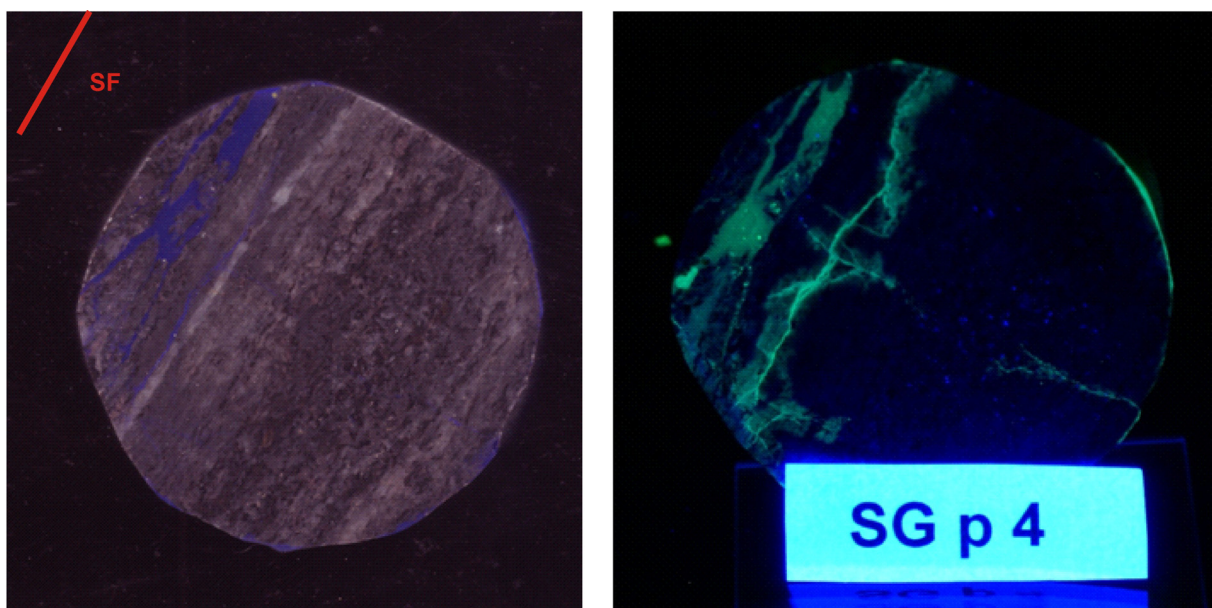


Abb.5.29: Anschliff des Schiefergneis mit 69° Grad einfallender Schieferung unter sichtbarem Licht (links) und unter UV-Licht (rechts).

In rund 5 mm Tiefe unter der Schneidspur erkennt man auch in dieser Probe durch Mikrorisse zerlegte Minerale. Die Zerlegung der Minerale durch die Risse (schwarze Linien) findet zumeist in den härteren Mineralen, wie hier Quarz und Granat, statt (Abbildung 5.30).

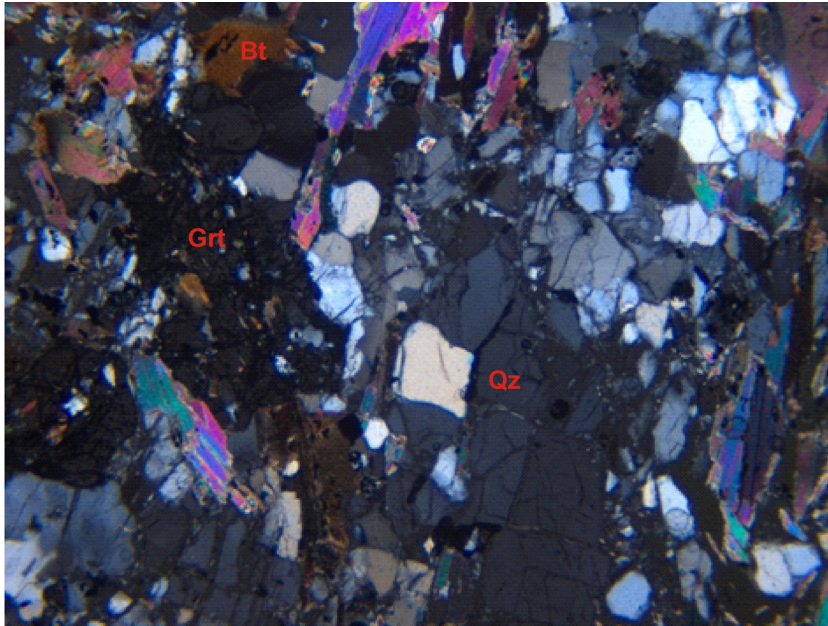


Abb.5.30: Dünnschliffphoto des Schiefergneis mit 69° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Mikrorisse in den kompetenteren Mineralen in 5 mm Tiefe. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

Der Schiefergneis weist bereits in geringer Tiefe von nur 10 mm nur mehr ganz wenige Mikrorisse durch die einzelnen Minerale auf und die hauptsächliche Rissfortpflanzung folgt den durchgehenden Glimmerbahnen (Abbildung 5.29). Bereits 15 mm unter der Schneidspur sind keine Risse durch die Einzelkörner mehr nachweisbar und die Risse folgen entweder den vorhandenen Glimmern oder sonst ganz klar den einzelnen Korngrenzen der Quarzminerale (Abbildung 5.32).

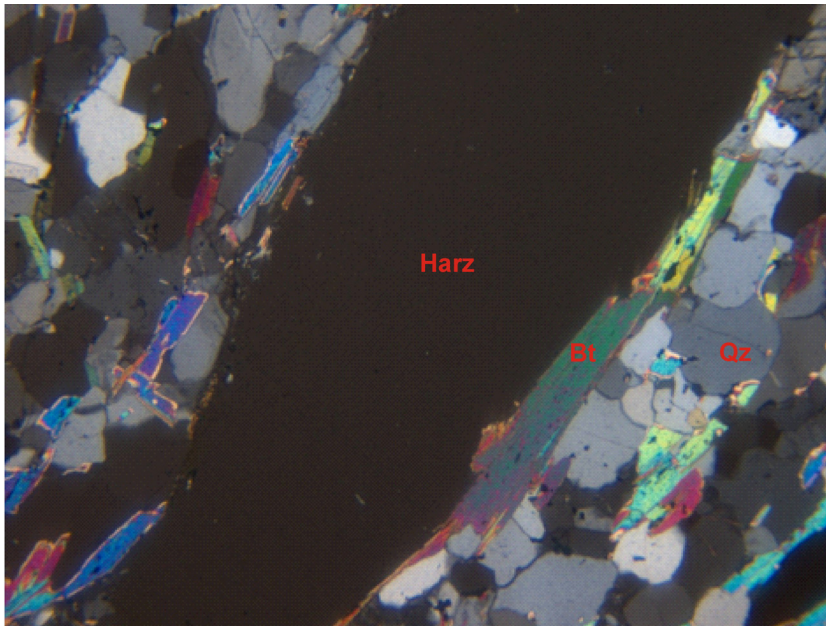


Abb.5.31: Dünnschliffphoto des Schiefergneis mit 69° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Rissausbreitung entlang der Glimmerbahnen in 10 mm Tiefe. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

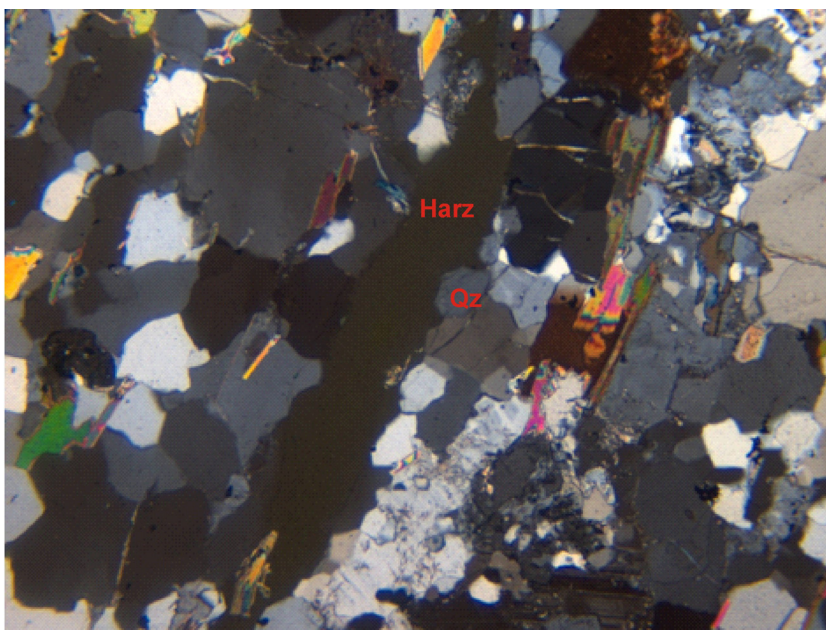


Abb.5.32: Dünnschliffphoto des Schiefergneis mit 69° Grad einfallender Schieferung unter gekreuzten Nicols. Rissausbreitung entlang der Korngrenzen von Quarzmineralen in 15 mm Tiefe. Die Bildbreite entspricht 2,8 mm.

5.3 Interpretation und Diskussion

Aus den durchgeführten Schmidhammer Tests, welche die Rückprallhärte des Gesteins widerspiegeln, geht klar hervor, dass die Rückprallwerte rund um die Schneidspur geringer sind als vor der Durchführung des Schneidversuchs. Die Abnahme der Härte ist bei den Gesteinsproben, die annähernd normal zur Schieferung getestet wurden (Augengneis CLAR

358/71 und Kalkglimmerschiefer CLAR 181/98), breiter um den Schnitt nachweisbar als bei der Probe die annähernd parallel zur Schieferungsrichtung untersucht wurde (Kalkglimmerschiefer CLAR 091/89). Die normal zur Schieferung geschnittenen Blöcke zeigen auch bei 6 cm Abstand zur Schneidspur noch eine eindeutige Abnahme der Härte. Der parallel zur Schieferung geschnittene Kalkglimmerschiefer zeigt im Gegensatz dazu bei einem Abstand von 3 cm zum Schnitt einen starken Rückgang der Härte sowie einen vergleichsweise niedrigen Härteverlust im Abstand von 6 cm um die Schneidspur. Generell ist die Schädigungszone bei Schnitten parallel zur Schieferung schmal und tief, bei Schnitten normal zur Schieferung breit und flach. Die restlichen Proben, welche mit einem schiefen Winkel zur Schneidrichtung getestet wurden illustrieren einen signifikanten Abfall der Härte in Richtung der einfallenden Schieferung aber kaum geringere Rückprallwerte auf der gegenüberliegenden Seite der Schneidspur.

Im Gegensatz zum Augengneis treten beim Kalkglimmerschiefer sowie beim Schiefergneis größere Hr-Schwankungen an der Gesteinsoberfläche auf (siehe Tabelle 5.2). Diese Schwankungen werden mit der unterschiedlichen Härte der einzelnen Mineralkörner, welche Glimmerlagen wechseln sich mit härteren Quarzlagen ab, am Probenkörper erklärt. AYDIN & BASU (2005) konnten bereits einen Einfluss der Größe der einzelnen Mineralkörner auf die Rückprallwerte erklären. Wenn Mineralkörner die Größe der Hammerspitze erreichen, weichen die dort ermittelten Werte klar vom Mittelwert ab.

Die Untersuchungen der Rissfortpflanzung direkt unter der Schneidspur mittels Anschliffen und Dünnschliffen bestätigen die oben genannten Annahmen durch die Visualisierung der einzelnen Risse in den Gesteinsproben. Bei der Probe, die normal zur Schieferung getestet wurde zeigt sich ein horizontaler Riss und folglich eine breitere Schädigung des Gesteins als bei der Probe die parallel zur Schieferung geschnitten wurde. Hier konnten die Risse weiter in die Tiefe verfolgt werden und außerdem bildete sich hier die Zermalmungszone tiefer aus. Der horizontale Riss beim normal zur Schieferung getesteten Kalkglimmerschiefer lässt sich durch die, nach vorne gleitenden, Scherbrüche zwischen den einzelnen Glimmerlagen erklären. Bei den Gesteinsproben mit schiefwinkelig bzw. parallel einfallender Schieferung konnte eindeutig eine Rissausbreitung entlang der Schieferungsrichtung nachgewiesen werden. Die Visualisierung der Risse mit fluoreszierendem Harz unter UV-Licht erwies sich hierbei als sehr hilfreich und funktionell.

Aus den Schmidhammer Ergebnissen wird angenommen, dass sich die Mikrorisse im Gestein, welche durch die Belastung mit dem Diskenmeißel entstehen, vorwiegend entlang der Schieferung respektive der Glimmerbahnen fortpflanzen. Dies wird durch die Untersuchungen an den Dünnschliffen und Anschliffen unter der Schneidspur bestätigt. Zusätzlich wird diese

Aussage durch Ergebnisse von SCHORMAIER (2010) unterstützt. In dieser Arbeit wird die Rissfortpflanzung bei anisotropen Gesteinen beim Gebirgslösen im Tunnelbau untersucht. Im speziellen wurden Gesteine nach dem Bohren mit Bohrkronen wie sie typischerweise im konventionellen Tunnelvortrieb verwendet werden auf die Ausbreitung der Mikrorisse untersucht. Die Ergebnisse zeigen, analog zu dieser Arbeit, die Aktivierung von Glimmerbahnen als Zonen der Rissausbreitung.

Auffällig ist, dass die Mikrorisse durch die Minerale bei den verschiedenen Lithologien bis in stark unterschiedliche Tiefenniveaus nachweisbar sind. Im Kalkglimmerschiefer und im Augengneis konnten diese Mikrorisse, je nach Gefügeorientierung, bis in Tiefen von rund 30 - 35 mm festgestellt werden bevor sich alle weiteren Risse nur mehr entlang der Glimmerbahnen respektive der Spaltbarkeiten und/oder Korngrenzen der Minerale fortpflanzten. Im Schiefergneis welcher einen weit höheren Glimmeranteil als die anderen Lithologien besitzt, konnten diese Mikrorisse nur bis circa 10 - 15 mm erkannt werden bevor sich alle Risse entlang der Glimmer ausbreiteten. Es wird angenommen, dass der hohe Glimmergehalt in dieser Gesteinsart dämpfend fungiert und die Energie rasch in den Schwächezonen des Gesteins (Glimmerhorizonte) kompensiert wird.

Die Fortpflanzung der Risse ins Gestein ist in der folgenden Abbildung 5.33 anhand der schiefwinkelig zur Schieferung getesteten Proben dargestellt.

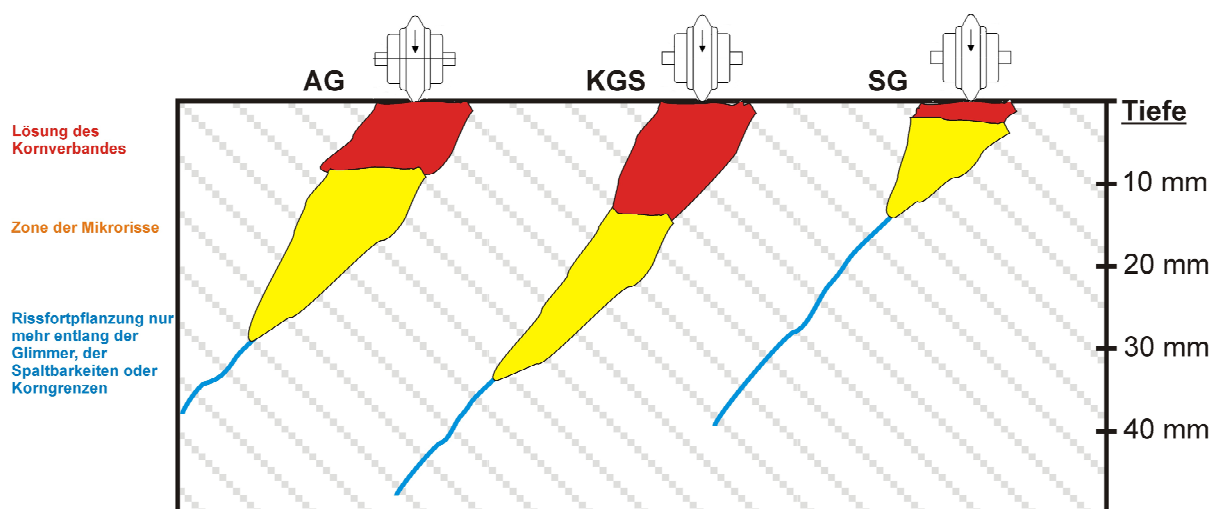


Abb.5.33: Schematische Darstellung der Ausprägung der Risse in der Tiefe. Rot bezeichnet die totale Lösung des Kornverbandes (Zermalmungszone), Gelb bezeichnet die Zone in der, nach unten hin abnehmend, Mikrorisse durch einzelne Minerale vorkommen, Grün bezeichnet die Zone in der sich die Risse nur mehr entlang der Glimmerbahnen, entlang der Korngrenzen oder entlang der Spaltbarkeiten von Mineralen ausbreiten.

Neben der Gefügeorientierung (im Streichen der Schieferung tiefere Schädigung als normal auf die Schieferung) spielt die Mineralogie eine große Rolle für die Entwicklung der Schädigungszonen. Gesteine mit hohen Glimmergehalten, wie der Schiefergneis, zeigen nur eine kleine Zone mit total aufgelöstem Kornverband. Der Glimmer fungiert hier dämpfend. Die Calcite im Kalkglimmerschiefer sind ausschlaggebend, dass sich bis zu 35 mm Tiefe, Risse zwar entlang der Calcit-Spaltbarkeiten, aber trotzdem noch durch das Korn entwickeln, während die Mikrorisse in den Quarzen bereits in 20 mm Tiefe unter der Schnittbahn nicht mehr sichtbar sind. Der geringe Glimmergehalt und die dadurch fehlende dämpfende Wirkung in den Augengneisen dürfte der Grund für die tiefe Schädigung der Quarze sein. Bis in 30 mm Tiefe lassen sich Mikrorisse in den Quarzen des Augengneises feststellen.

Im maschinellen Tunnelbau chippt das Gestein zwischen zwei Schneidspuren. Dabei kommt es zu einem Bruch des Gesteins zur freien Fläche des vorangegangenen Schnitts. Durch weitere Untersuchungen an Gesteinschips des Ausbruchmaterials (Lehrstuhl für Subsurface Engineering) lassen sich möglicherweise Rückschlüsse auf die Kombinationen der Rissbildung ziehen. Einerseits die Ausbreitung der Risse entlang der Schwächezonen (Glimmerbahnen und Spaltbarkeiten) und andererseits die Risse und Bruchbildungen zur freien Fläche. Das Zusammenspiel dieser Faktoren gibt Rückschluss auf die zu erreichenden Korngrößen und Kornformen im Ausbruchmaterial.

Die verschiedenen Penetrationsprognosemodelle im kontinuierlichen Tunnelvortrieb verwenden meist die uniaxiale Druckfestigkeit der Gesteine als wesentlichen Parameter in ihrer Berechnung. Da aber aus diesen Untersuchungen hervorgeht, dass durch die Gesteinsschädigung durch den Diskenmeißel die Schmidthammer Härte, welche ja mit der UCS mehr oder weniger gut korreliert, herabgesetzt wird, ist zu überlegen, ob eine uniaxiale Druckfestigkeit an mit Diskenmeißel vorgeschädigten Gesteinen für die Berechnung der Prognosemodelle verwendet werden kann.

Vergleiche zwischen tatsächlicher Penetration bei einem Tunnelbauwerk mit Penetrationsmodellen, welche UCS sowie vorgeschädigte Festigkeitswerte von Gesteinen verwenden, sollten für diese Fragestellung in Zukunft durchgeführt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die maximale Verwendung des anfallenden Gesteinsmaterials bei minimaler Umweltbelastung und maximaler Wirtschaftlichkeit ist das Ziel des Forschungsprojektes „Recycling von Tunnelausbruchmaterial“. Innerhalb des Forschungsprojektes wurden Randbedingungen für die Verwendbarkeit von Tunnelausbruchmaterial definiert. Während RESCH (2012) die Randbedingungen im Allgemeinen beleuchtet wird in dieser Arbeit der Fokus auf geologische und geotechnische Aspekte innerhalb der Rahmenbedingungen gelegt.

Prinzipiell beinhalten alle österreichischen geologischen Einheiten Gesteine die als Baurohstoffe und als Rohstoffe für bestimmte industrielle Anwendungen verwendbar sind. Tonige Lockergesteine finden in der Ziegelindustrie Anwendung, karbonatische Gesteine als Zuschlagstoffe für metallurgische Prozesse über Flussmittel, Füllstoffe bis hin zu Gesteinskörnung für Splittbeton. Bei silikatischen Gesteinen beschränken sich die Verwendungsmöglichkeiten auf Schüttungen im Damm und/oder Verkehrswegebau, auf die Verwendung als Gleisschotter und auf die Anwendung als Gesteinskörnungen für Splittbeton. Diese Verwendungsmöglichkeiten sind in Österreich in den Normen geregelt bzw. von der Industrie vorgegeben. Die Eignung einer Lithologie bereits in der Planungsphase am Ausgangsgestein als Gesteinskörnung für Beton zu beurteilen ist bis dato nicht möglich.

Zu diesem Zweck wurden insgesamt sechs unterschiedliche alpine Lithologien, welche bei aktuell in Bau befindlichen bzw. in naher Zukunft geplanten Tunnel- und Kraftwerksbaustellen vorkommen, auf eine Verwendung als Gesteinskörnung für Beton untersucht. Dazu wurden mineralogische, geologische und geotechnische Parameter an den alpinen Ausgangsgesteinen erhoben. Parallel dazu wurden die entnommenen Gesteinsarten großmaßstäblich aufbereitet und anschließend wurden drei unterschiedliche Betonsorten mit den Lithologien als Gesteinskörnung hergestellt.

Grundsätzlich lassen sich mit den sechs untersuchten Lithologien als Gesteinskörnung alle drei hergestellten Betonsorten verwirklichen. Innenschalen- sowie Tübbingbeton bedürfen dabei keinerlei aufwändigen Rezepturen. Wasserundurchlässiger Weiße Wannen Beton lässt sich nur mit auf die Lithologie abgestimmter Betonrezeptur vernünftig realisieren. Aufgrund dieser Tatsachen lässt sich ableiten, dass die entsprechenden Gesteinskennwerte (siehe Interpretation Kapitel 3) wie uniaxiale Druckfestigkeit, E-Modul, Cerchar Index Wert, Kompressionswellengeschwindigkeit und Glimmergehalt als versuchstechnisch abgedeckte Grenzwerte für die Eignung der Lithologien als Gesteinskörnung zu verstehen sind.

Der Schneidprozess an einer Tunnelvortriebsmaschine basiert auf dem Chippen von Gesteinsmaterial zwischen zwei benachbarten am Bohrkopf angebrachten Diskenmeißel. An Linearschneidprüfständen kann dieser Prozess im kleinen Maßstab simuliert und analysiert werden. Im Zuge der Dissertation wurden an unterschiedlichen alpinen Lithologien Schneidversuche an Linearschneidprüfständen durchgeführt um die Einflüsse von Gesteinsgefüge, Penetrationstiefe und Schneidspurabstand auf das Ausbruchmaterial verstehen zu können. Die Vergrößerung des Schneidspurabstandes führt bei allen untersuchten Lithologien zu einer gröberen Sieblinie während eine tiefere Penetration keine deutlichen Auswirkungen auf das Ausbruchmaterial zeigt. Gesteine mit geringerer Druckfestigkeit und hohem Glimmergehalt neigen dazu mehr Feinkorn im Ausbruch zu bilden. Lithologien mit hoher Festigkeit und größeren Mineralen (Augengneis, Granitgneis) liefern gröberes Ausbruchmaterial. Die Vermessung der Körner des Ausbruchmaterials zeigt, dass, bis auf eine Lithologie, die Mehrheit der Körner als plattig zu bezeichnen ist. Der Hornblendegneis weist als einzige Lithologie mehr gedrungene als plattige Körner auf.

Zusätzlich zu den Untersuchungen hinsichtlich der Korngrößenverteilung des Ausbruchmaterials wurden die beim Schneiden mit dem Diskenmeißel entstehenden Risse makro- und mikroskopisch untersucht. Mit Schmidhammer Tests wurden die Gesteine auf die Festigkeitsverteilung an der Oberfläche vor und nach dem Diskenschnitt untersucht. Als Ergebnis zeigte sich, dass die Abnahme der Schmidhammerfestigkeiten in Richtung der einfallenden Schieferung stets höher war als auf der gegenüberliegenden Seite des Schnitts. Daraus folgend wurden Dünnschliffe an Gesteinsproben direkt unter dem Diskenschnitt hergestellt und die Rissausbreitungsrichtung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Risse hauptsächlich den durchgängigen Glimmerhorizonten folgen und somit die Schieferungsorientierung einen wesentlichen Einfluss auf die Rissausbreitung hat. Direkt unter der Diske kommt es zu einer Lösung des gesamten Kornverbandes (Zermalmungszone). Die Tiefe dieser Zone hängt von der Schneidrichtung zur Schieferungsorientierung sowie vom Glimmergehalt der Lithologie ab. Mehr Glimmer bedeutet mehr Dämpfung und folglich eine geringmächtige Zermalmungszone. Direkt unter dieser Zone lässt sich ein Bereich beobachten, in dem sich Mikrorisse durch harte Minerale, wie Quarz und Granat, bilden. Unter dieser Zone erfolgt die Ausbreitung der Risse nur mehr entlang der Glimmerhorizonte sowie entlang der Spaltbarkeiten von Mineralen (z.B. Calcit). Bei Abwesenheit von Glimmern erfolgt die Fortpflanzung der Risse an den Korngrenzen der Minerale.

Es ist anzumerken, dass die Festigkeiten der Gesteine an der Oberfläche nach einem Diskenschnitt abnehmen. Die verschiedenen Penetrationsprognosemodelle im kontinuierlichen Tunnelvortrieb verwenden meist die uniaxiale Druckfestigkeit der Gesteine als wesentlichen

Parameter in ihrer Berechnung. Da die Schmidhammerhärte mit der uniaxialen Druckfestigkeit korreliert könnte man in Zukunft unter Umständen vorgeschädigte Druckfestigkeitswerte für Penetrationsprognosemodelle verwenden.

Grundsätzlich sollte die Untersuchung der Eignung von Tunnelausbruchmaterial für diverse Zwecke in Zukunft in die Planung von Tunnelprojekten mit einbezogen werden um die Schonung geogener Ressourcen zu gewährleisten.

6.2 Ausblick

Im Falle einer Verwendung von Tunnelausbruchmaterial, direkt auf der Baustelle als Gesteinskörnung für Beton, spielt die Qualitätssicherung eine wesentliche Rolle. Nachdem die, im jeweiligen Untertagebauwerk vorkommenden, Gesteine als verwendbar kategorisiert wurden, müssen die Gesteinsparameter einer ständigen Kontrolle unterzogen werden um eine stetige Qualität des Betons zu gewährleisten.

Für geologisch-geotechnische Prüfungen direkt auf der Baustelle kommen, aufgrund der Vibrationen und der Staubentwicklung, keine filigranen Testgeräte in Frage. Einfach durchzuführende Indextests erweisen sich hierbei als sinnvoll.

Neben der täglichen Kontrolle der Parameter (Glimmergehalt, Druckfestigkeit) auf der Baustelle ist eine periodische Qualitätskontrolle in einem akkreditierten Prüflabor (Glimmergehalt mittels Röntgendiffraktometrie bzw. mittels Auszählen von Dünnschliffen, Geotechnische Parameter aus uniaxialen Druckversuchen) zu empfehlen.

Für die Qualitätssicherung vor Ort sollte, vom dokumentierenden Ingenieurgeologen, auf der Baustelle nach jedem Abschlag eine Probe entnommen werden. Nach einer Aufbereitung mit einem Laborbackenbrecher und einem Siebturm, kann mittels eines Formtrenntisches der Schichtsilikatgehalt an der Fraktion 125 – 250 µm bestimmt werden. Für die Bestimmung der uniaxialen Druckfestigkeiten der Lithologien kann der Point-Load-Index Test auf der Baustelle herangezogen werden. Korrelationen zwischen dem Point-Load-Index Test und der uniaxialen Druckfestigkeit wurden bereits von vielen Autoren beschrieben (z.B.: BIENIAWSKI, 1975; BROCH & FRANKLIN, 1972; DAS, 1995, JERMY & BELL, 1991).

Die Abrasivität kann auf der Baustelle mit einem Cerchar-Prüfgerät ermittelt werden, da dieser Test einfach durchzuführen ist und die Ergebnisse weder von Vibrationen noch von Staubbelastungen verändert werden.

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen beschreibt RESCH (2012) durchzuführende Prüfungen an aufbereiteten Gesteinskörnungen im Baustellenlabor. Neben dem LCPC Test, welcher den

Widerstand gegen Zertrümmerung angibt, sollte der Gehalt an Feinteilen, der Frost-Tau Widerstand die Kornfeuchte und die Rohdichte bestimmt werden.

Für den maschinellen Tunnelbau ist eine automatisierte Probenahme vom Förderband in Erwägung zu ziehen. Dabei soll eine definierte Probemenge entnommen werden, welche anschließend soweit wie möglich automatisiert auf ihre geologisch-geotechnischen Parameter untersucht wird.

7 Literaturverzeichnis

- AFNOR NF P94-430-1 (2000): Determination du pivoir abrasive d'une roche – Partie 1. Essai de rayure avec une pointe; Paris.
- ALBER M. (1999): geotechnische Aspekte einer TBM-Vertragsklassifikation. 116 S. Berlin (Mensch-und-Buch-Verlag).
- AUFMUTH R.E. (1973): A systematic determination of engineering criteria for rocks. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 11:235-245.
- AYDIN A., BASU A. (2005): The Schmidt hammer in rock material characterization. Engineering Geology, 81:1-14.
- BARTON N. (2000): TBM Tunneling in jointed and faulted rock. 172 S., Rotterdam (A. A. Balkerna).
- BETHAZ E., PEILA D., INNAURATO N. (2001): Prevision of hard rock TBM boring time. In: Teuscher P. & Colombo A. (Hrsg.): Progress in tunneling after 2000. Proceedings of the AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress, 41-48, Bologna (Patron Editore).
- BIENIAWSKI Z.T. (1975): The Point Load Test in Geotechnical Practice. Engineering Geology Vol.9, 1:1-11.
- BIERMEIER F. (2011): Bestimmung der Einflüsse von Schneidspurabstand, Penetration und Trennflächengefüge auf das Ausbruchsverhalten von mit einer 10 Zoll Diske am Linearschneidprüfstand geschnittenem Imberg Sandstein. Unveröffentlichte Masterarbeit – Montanuniversität Leoben.
- BROCH E., FRANKLIN J.A. (1972): The Point Load Strength Test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9:669-697.
- BRULAND A. (2000a): Background and Discussion. In: Bruland A. (Hrsg.): Hard Rock Tunnel Boring, 1, 49 S., Norwegian University of Science and technology, Trondheim.

- BUYUKSAGIS I.S., GOKTAN R.M. (2007): The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44:299-307.
- BÜCHI E. (1984): Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine mit besonderer Berücksichtigung der Gesteinsanisotropie. Inauguraldissertation Phil.- Naturwiss.Fak. Universität Bern.
- CARGILL J.S., SHAKOOR A. (1990): Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27:495-503.
- CERCHAR – Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France (1986): The Cerchar Abrassiveness Index., 12 p.
- CIGLA M., OZDEMIR L. (2000): Computer Modeling for Improved Production of Mechanical Excavators. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME) Annual Meeting, Salt Lake City, Utah.
- CLIFF R.A. (1981): Pre-Alpine history of the Pennine zone in the Tauern window, Austria: U-Pb and Rb-Sr geochronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*; 77:262-266, Berlin.
- CLIFF R.A., NORRIS R.J., OXBURGH E.R., WRIGHT R.C. (1971): Structural, Metamorphic and Geochronological Studies in the Reisseck and Southern Ankogel Groups, the Eastern Alps. *Jb. Geol. B. — A. 114*, 121-272.
- DAS B.M. (1985): Evaluation of the Point Load Strength for Soft rock Classification. *Proceeding of the 4th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, WV, pp. 220-226.
- DEERE D.U., MILLER R.P. (1966): Engineering classification and index properties for intact rocks. Tech. Report No. AFWL-TR 65-116, University of Illinois.
- DREITLER J., (2012): Untersuchung der Ausbruchscharakteristik von am Linearschneidprüfstand geschnittenem Granitgneis – Teil 2. Bachelorarbeit an der Montanuniversität Leoben derzeit in Anfertigung.

FA. FARGON: Formtrenntisch – Hinweise zum Gebrauch. A-3040 Neuenglbach.

FFG-PROJEKT RECYCLING VON TUNNELAUSBRUCHMATERIAL (2012): Ergebnisse der Betongruppe.
Unveröffentlichter Zwischenbericht.

FFG-PROJEKT RECYCLING VON TUNNELAUSBRUCHMATERIAL (2012): Ergebnisse VÖZFI.
Unveröffentlichter Zwischenbericht.

FORUM MINERALISCHE ROHSTOFFE (2012): www.forumrohstoffe.at; 02.09.2011.

FRANK W., KLEIN P., NOWY W., SCHABERT S. (1976): Die Datierung geologischer Ereignisse im Altkristallin der Gleinalpe (Steiermark) mit der Rb/Sr Methode. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 23:191-203, Wien.

FRENZEL C., (2010): Verschleißkostenprognose für Schneidrollen bei maschinellen Tunnelvortrieben in Festgesteinen. *Münchener Geowissenschaftliche Abhandlungen - Reihe B* 15:1-64.

FREYBURG E. & SCHLIFFKOWITZ D. (2006): Bewertung der Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen nach petrographischen und mikrostrukturellen Kriterien. 16. Internationale Baustofftagung 2006, Weimar, Tagungsbericht Band 2:355-372.

FRISCH W. (1976): Ein Modell zur alpidischen Evolution und Orogenese des Tauernfensters. *Geologische Rundschau*, 65:375-393, Stuttgart.

FRISCH W. (1977): Der alpidische Internbau der Venedigerdecke im westlichen Tauernfenster. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte*, 11:675-696, Stuttgart.

FRISCH W., KUHLEMANN J., DUNKL I., BRÜGEL A. (1998): Palinspastic reconstruction and topographic evolution of the Eastern Alps during late Tertiary tectonic extrusion. *Tectonophysics*, 297:1-15, Amsterdam.

FROITZHEIM N., PLASIENKA D., SCHUSTER R. (2008): Alpine tectonics of the Alps and Western Carpathians. In: McCann T. (Hrsg.): *The geology of central Europe. Volume 2: Mesozoic and Cenozoic*. Bath: Geological Society, London, S. 1141-1232.

- GEHRING K. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. Felsbau, 13:439-448.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2007): Baurohstoffe in Österreich, Wien.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (1999): Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich 1:2.000.000, Wien.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2005): Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich – 133 Leoben, Geofast 1:50 000, Wien.
- GOKTAN R.M., GUNES N. (2005): A comparative study of Schmidt hammer testing procedures with reference to rock cutting machine performance prediction. . International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42:466-472.
- HERITSCH H. (1978): Die Metamorphose des Schiefergneis-Glimmerschiefer-Komplexes der Koralpe, Steiermark. Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins Steiermark, 108:19-30, Graz.
- HUBER H. (1971): Der Einfluss von gebrochenen Gneiszuschlagstoffen auf den Beton der Zementkraftwerke. Dissertation Universität Innsbruck – Mayrhofen.
- HOINKES G., KOLLER F., RANTITSCH G., DACHS E., HÖCK V., NEUBAUER F., SCHUSTER R. (1999): Alpine metamorphism of the Eastern Alps. Schweizer Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 79:155-181, Zürich.
- HOWARTH D.F., ADAMSON W.R., BERNDT J.R. (1986). Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 23:171-175.
- JERMY C.A. BELL F.G. (1991): Coal bearing strata and the stability of coal mines in South Africa. Proceedings of the 7th International Congress of Rock Mechanics. International Society of Rock Mechanics, Aachen, pp. 1125-1131.
- JERZ H. (1966): Untersuchungen über Stoffbestand, Bildungsbedingungen und Paläogeographie der Raibler Schichten zwischen Lech und Inn (Nördliche Kalkalpen). Geologica Bavarica, Band 56, Herausgegeben vom Bayer. Geologischen Landesamt, München S. 7.

- JODL H.G., RESCH D. (2011): NATM und TBM – eine baubetriebliche Gegenüberstellung. *Geomechanics and Tunneling* Vol. 4, 3:337-345
- KAHRAMAN S. (2001): Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38:98-994.
- KATZ O., RECHES Z., ROGEIERS J.C. (2000): Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37:723-728.
- KOLLER F. (1985): Petrologie und Geochemie der Ophiolite des Penninikums am Alpenostrand. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 128:83-150, Wien.
- KYDIBINSKI A. (1980): Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 17:167-171.
- LASSNIG K., EBNER F. (2010): Verwertung von Tunnelausbruchmaterial – Potential bei Zukunftsprojekten Österreichs aus Sicht der Geologie. Vortrag am Österreichischen Bergbautag, Mai 2010 in Bad Gastein.
- LASSNIG K., ENTACHER M., BIERMEIER F., GALLER R., EBNER F. (2012): Decrease of Schmidt hammer hardness controlled by schistosity orientation of metamorphic rocks after loading with TBM cutters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56:27-33.
- LISLERUD A. (1988): Hard Rock Tunnel Boring: Prognosis and Costs. *Tunneling and Underground Space Technology*, 3:9-17.
- LORENZ W., GWOSZ W. (2003): Handbuch zur geologisch-technischen Bewertung von mineralischen Rohstoffen. In: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.): *Geologisches Jahrbuch – Sonderhefte*, Reihe H, Heft SH 16, 498 S.
- LÖSCH T., (2012): Untersuchung der Ausbruchcharakteristik von am Linearschneidprüfstand geschnittenem Hornblendegneis. Bachelorarbeit an der Montanuniversität Leoben derzeit im Review.

- MARSCHALLINGER R., HOLUB B. (1989): Die Zentralgneise im Hochalm-Ankogel-Massiv (östliches Tauernfenster, Österreich). Teil II: zirkontypologische und geochemische Charakteristik. Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, 82:19-48, Wien.
- MIKURA E. (1980): Schnelle und verlässliche Verfahren zur Prognostizierung der Fräsleistung. Rock Mechanics and Rock Engineering, 12:221-230.
- MILNES A.G. (1974): Structure of the Pennine Zone (Central Alps): A New Working Hypothesis. Geological Society of America Bulletin, 85:1727-1732.
- MORI L., (2012): Results of Linear Cutting Tests on different alpine Lithologies performed at the Colorado School of Mines. Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben derzeit im Review.
- NEUBAUER F. (1988): Bau und Entwicklungsgeschichte des Rennfeld-Mugel- und des Gleinalm-Kristallins (Ostalpen). Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 42, 137 S., Wien.
- NEUBAUER F. (2002): Evolution of late Neoproterozoic to early Paleozoic tectonic elements in Central and Southeast European Alpine Mountain belts: review and synthesis. Tectonophysics, 352:87-103, Amsterdam.
- NEUBAUER F., FRISCH W. (1993): The Austro-Alpine Metamorphic Basement East of the Tauern Window. In: Raumer J.F. Von & Neubauer F. (Hrsg.): Pre-Mesozoic Geology in the Alps. 515-536, Berlin (Springer).
- NEUBAUER F., HANDLER R., HERMANN S., PAULUS G. (1994): Revised Lithostratigraphy and Structure of the Eastern Greywacke Zone (Eastern Alps). Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, 86:61-74, Wien.
- OBERHÄNSLI R. (Ed.) (2004): Metamorphic Structure of the Alps: Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft, 149.
- ONR 23303:2010 09 01: Prüfverfahren Beton (PVB) - Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe.
- O'ROURKE J.E. (1989): Rock index properties for geoen지니어ing in underground development. Mining Engineering, 41:106-110.

- OZDEMIR L., MILLER R., WANG F.-D. (1977): Mechanical tunnel boring prediction and machine design. Unveröffentlichter Bericht – Colorado School of Mines, Golden.
- ÖBB INFRASTRUKTUR BAU AG (2007): Koralmbahn – Gutachten zur Geologie, Hydrogeologie und Geomechanik. Einreichprojekt 2007.
- ÖNORM B 3100:2008 08 01: Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton, Wien.
- ÖNORM B 3131:2012 08 01: Gesteinskörnungen für Beton – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620, Wien.
- ÖNORM B 4710-1:2007 10 01: Beton – Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, Wien.
- ÖNORM EN 12620:2008 09 01: Gesteinskörnungen für Beton, Wien.
- ÖNORM EN 13242:2008 03 01: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau, Wien.
- ÖNORM EN 13450:2004 11 01: Gesteinskörnungen für Gleisschotter (konsolidierte Fassung), Wien.
- ÖVBB RICHTLINIE (2003): Innenschalenbeton, Wien.
- ÖVBB RICHTLINIE (2009): Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen, Wien.
- ÖVBB RICHTLINIE (2009): Tübbingsysteme aus Beton, Wien.
- PACHER F., RIEPL K. (1978): Über die chemische Zusammensetzung von Gneisen und Glimmerschiefern der Koralpe, Steiermark. Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins Steiermark, 108:45-54, Graz.
- PESTAL G., HEJL E., BRAUNSTINGL R., SCHUSTER R. (2009): Geologie der Österreichischen Bundesländer. Erläuterungen zur Geologischen Karte von Salzburg 1:200.000. Geologische Bundesanstalt, 162 S., Wien.

- PESTAL G. & HELLERSCHMIDT-ALBER J. (2011): Bericht 2009 und 2010 über geologische Aufnahmen auf Blatt 154 Rauris. In Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt. Wien: Verlag der Geologischen Bundesanstalt.
- PLINNINGER R., KÄSLING H., THURO K., SPAUN G. (2003): Technical Note - Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40:259-263.
- PROSSNIGG W. (1969): Untersuchungen an granitoiden Gesteinen und Amphiboliten der Gleinalpe (Steiermark). Dissertation an der Universität Graz, 244 S., Graz.
- RAMEZANZADEH A., ROSTAMI J., KASTNER R. (2004): Performance Analysis of Hard Rock Tunnel Boring Machine at KCRC D320 (Hong Kong). In: Schubert Wulf (Hrsg.): *Rock Engineering: Theory and Practice*, Essen (VGE Verl. Glückauf).
- RAMEZANZADEH A., ROSTAMI J., KASTNER R. (2005): Influence of rock mass properties on performance of hard rock TBM. In: Hutton J.D. (Hrsg.): *RETC 2005 proceedings*, 725 – 737, Littleton (Society for Mining, Metallurgy and Exploration).
- RAMEZANZADEH A. (2005): Creusement de tunnels au rocher par tunnelier: analyse de performance et nouveaux modeles de prediction. Unveröffentlichte Dissertation, 333 S. Lyon.
- RESCH D., LASSNIG K., GALLER R., EBNER F. (2009): Tunnel excavation material – high value raw material. *Geomechanics and Tunneling* Vol. 2, 5:612-618.
- RESCH D. (2012): Entwicklung einer Bewertungsmatrix zur Planung der Verwertbarkeit von Tunnelausbruchmaterial in der Projektierungsphase. Unveröffentlichte Dissertation, Montanuniversität Leoben.
- ROSTAMI J., OZDEMIR L., NILSEN B. (1996): Comparison between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. In: Institute for Shaft Drilling Technology (Hrsg.): *Annual Technical Meeting of the Institute for Shaft Drilling Technology*, Las Vegas.
- ROSTAMI J. (1997): Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure. Unveröffentlichte Dissertation – Colorado School of Mines, Golden.

- RUTSCHMANN W. (1974): Vorschlag für ein System der Gebirgsklassifikation für mechanischen Vortrieb. Schweizerische Bauzeitung, 92:429-436.
- RVS 08.15.01 (2010): Technische Vertragsbedingungen, Unterbauplanum und ungebundene Tragschichten; Ungebundene Tragschichten – Wien: Österreichisches Forschungsgesellschaft Straße + Schiene + Verkehr
- SACHPAZIS C.I. (1990): Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 42:75-83.
- SANIO H.-P. (1983): Nettovortriebsprognose für Einsätze von Vollschnittmaschinen in anisotropen Gesteinen. Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten, 11:147 S., Bochum.
- SCHUSTER R., PESTAL G., REITNER J. (2006): Erläuterungen zur Geologischen Karte der Republik Österreich 1:50000 Blatt 182 Spittal an der Drau. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- SCHMID S.M., FÜGENSCHUH B., KISSLING E., SCHUSTER R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. Eclogae geol. Helv., 97:93-117, Basel.
- SCHMIDT E. (1951): A non-destructive concrete tester. Concrete, 59:34-35.
- SCHORMAIR N. (2010): Einfluss der Anisotropie bei der Gebirgslösung im Tunnelbau – Beobachtung und Modell. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen Reihe B, 14:124p.
- SHALABI F., CORDING E.J., AL-HATTAMLEH O.H. (2007): Estimation of rock engineering properties using hardness tests. Engineering Geology, 90:138-147.
- SHOREY P.R., BARAT D., DAS M.N., MUKHERJEE K.P., SINGH B. (1984): Schmidt hammer rebound data estimation of large scale in situ coal strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 21:39-42.

- SOMERTON W.H., ESFANDIARI F., SINGHAL A. (1969): Further Studies of the Relation of Physical Properties of Rock to Rock Drillability. Drilling and Rock Mechanics Symposium, Society of Petroleum Engineers, Austin, Texas.
- SÖLLNER F., HANSEN B.T. (1987): "Pan-afrikanisches" und "kaledonisches" Ereignis im Ötztal-Kristallin der Ostalpen: Rb-Sr- und U-Pb-Altersbestimmungen an Migmatiten und Metamorphiten. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 130:529-569, Wien.
- STANGL R. (2007): Tagbau Humpelgraben: Geologisch-lagerstättenkundliche Beschreibung mit geotechnischer Beurteilung hinsichtlich der geplanten Abbaugeometrie. Für: ABL Rohstoffgewinnungs GmbH, 17 S., Graz.
- STAN-KLECZEK I., IDZIAK A.F. (2008): Anisotropy of Elastic Properties of Rock Mass induced by Cracks. Acta Geodyn. Geomater. Vol. 5, No. 2 (150), 153-159.
- STAUB R. (1924): Der Bau der Alpen. Beitr. Geol. Kt. Schweiz, 52 (N.F. 82), 272 S., 70 Abb., 1 tekt. Karte, Bern.
- STEVENSON G.W. (1999): empirical estimates of TBM performance in hard rock. In: Hilton D.E. & Samuelson K. (Hrsg.): RETC 1999 proceedings, 993-1009, Littleton (Society for Mining, Metallurgy and Exploration).
- STIPP M., STÜNITZ H., HEILBRONNER R., SCHMID S.M. (2002): The eastern Tonale fault zone: a „natural laboratory“ for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C. Journal of Structural Geology, 24:1861-1884, Amsterdam.
- TEICH T. (1987): Chemische Untersuchungen am gebänderten Plagioklasgneis und Bänderamphibolit (feingebändert) der Gleinalpe, Steiermark. Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins Steiermark, 117:49-55, Graz.
- THALMANN C. (1995): Optimale Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial. Schweizer Ingenieur und Architekt – Zürich: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine Nr. 47.
- THALMANN C. (1996): Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Geotechnische Serie. Lieferung 91; 115 p.

- THÖNI M. (2006): Dating eclogite-facies metamorphism in the Eastern Alps – approaches, results, interpretations: a review. *Mineralogy and Petrology*, 88:123-148, Wien.
- TIWAG AG (2009): Speicherkraftwerk Kühltai: Ingenieurgeologisch - Geotechnischer Bericht - Beileitungsstollen. Verfasser: Geoconsult ZT GmbH, 187 S., Salzburg.
- TOLLMANN A. (1977): Geologie von Österreich, Band 1: Die Zentralalpen. XVI + 766 S., Wien (Deuticke).
- WACHTER K., (2012): Untersuchung der Ausbruchscharakteristik von am Linearschneidprüfstand geschnittenem Granitgneis. Unveröffentlichte Bachelorarbeit – Montanuniversität Leoben.
- WAGREICH M., FAUPL P. (1994): Paleogeography and geodynamic evolution of the Gosau Group of the Northern Calcareous Alps (Late Cretaceous, Eastern Alps, Austria). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 110:135-154, Amsterdam.
- WEST G. (1989): Technical Note – Rock Abrasiveness Testing for Tunneling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 26, 2:151-160.
- WIENERBERGER GMBH (2012): Laborbericht – FFG-Projekt “Verwertung von Tunnelausbruchmaterial – Untersuchungen an Bohrkernen der U1-Verlängerung Rothneusiedl.
- WIJK G. (1992): A model of tunnel boring machine performance. *Geotechnical and Geological Engineering*, 10:19-40.
- WINKLER, H.G.F. (1954): Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. – *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 31:337–343, Bonn.
- YAGIZ S. (2008): Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23:326-339.

- YAGIZ S. (2009): Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68:55-63.
- YASAR E., ERDOGAN Y. (2004): Estimation of rock physiomechanical properties using hardness methods. *Engineering Geology*, 71:281-288.
- YILMAZ I., SENDIR H. (2002): Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology*, 66:211-219.

8 Anhang

Anhang A: Mineralogie und Gefüge

Kalkglimmerschiefer					
Mineral [Vol.%]	Schliff 1	Schliff 2	Schliff 3	Schliff 4	Gesamt
Calcit	82,1	73,0	69,8	64,9	72,4
Quarz	12,0	14,8	16,4	12,6	13,9
Muskovit	5,1	11,3	12,1	12,6	10,3
Zoisit/Epidot	0,9	0,0	0,0	0,9	0,4
Biotit	0,0	0,9	0,0	1,8	0,7
Opake Phasen	0,0	0,0	0,9	1,8	0,7
Titanit	0,0	0,0	0,9	0,9	0,4
Chlorit	0,0	0,0	0,0	4,5	1,1
SUMME	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Augengneis					
Mineral [Vol.%]	Schliff 1	Schliff 2	Schliff 3	Schliff 4	Gesamt
Quarz	29,4	42,6	42,5	43,2	39,4
Feldspat	62,4	53,0	42,5	45,6	50,9
Biotit	3,7	3,5	10,0	9,6	6,7
Chlorit	2,8	0,9	1,7	0,0	1,3
Epidot/Zoisit	1,8	0,0	1,7	1,6	1,3
Apatit	0,0	0,0	1,7	0,0	0,4
SUMME	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Biotit Plagioklas Gneis					
Mineral [Vol.%]	Schliff 1	Schliff 2	Schliff 3	Schliff 4	Gesamt
Quarz	19,8	25,8	22,0	19,8	21,9
Muskovit	3,1	1,8	4,1	3,0	3,0
Biotit	34,4	25,7	29,8	27,2	29,3
Chlorit	5,1	4,2	4,3	3,9	4,4
Feldspat	35,4	41,5	38,0	46,1	40,3
Apatit	1,2	0,5	1,0	0,0	0,7
Opake Phasen	1,0	0,5	0,8	0,0	0,6
SUMME	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Hornblendegneis					
Mineral [Vol.%]	Schliff 1	Schliff 2	Schliff 3	Schliff 4	Gesamt
Quarz	23,3	19,2	30,4	27,4	25,1
Feldspat	14,7	6,7	1,7	6,0	7,3
Amphibol	35,3	42,5	41,7	47,0	41,6
Chlorit	8,6	3,3	3,5	1,7	4,3
Granat	2,6	14,2	2,6	7,7	6,8
Zoisit/Epidot	14,7	13,3	20,0	9,4	14,3
Opake Phasen	0,9	0,8	0,0	0,9	0,6
SUMME	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Granitgneis					
Mineral [Vol.%]	Schliff 1	Schliff 2	Schliff 3	Schliff 4	Gesamt
Quarz	50,8	46,7	33,9	40,7	43,0
Feldspat	41,0	42,1	53,0	49,6	46,4
Biotit	4,9	8,4	10,4	6,5	7,6
Chlorit	1,6	0,9	0,9	1,6	1,3
Zoisit/Epidot	1,6	0,0	0,9	1,6	1,0
Titanit	0,0	1,9	0,9	0,0	0,7
SUMME	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Schichtsilikatsbestimmung mittels Formtrenntisch (Fraktion 125 - 250 µm)				
Lithologie	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Kalkglimmerschiefer	23,95	23,59	24,51	24,64
Augengneis	7,14	8,54	9,75	11,1
Biotit Plagioklas Gneis	7,08	7,32	9,14	10,81
Hornblendegneis	8,88	9,63	12,57	12,79
Granitgneis	20,74	19,75	18,32	20,16

Glimmer-Gefüge-Index						
Lithologie	Schliff 1		Schliff 2		Schliff 3	
	Einregelung	Kontinuität	Einregelung	Kontinuität	Einregelung	Kontinuität
Kalkglimmerschiefer	2 bis 3	1	2	1	2	1
Augengneis	2 bis 3	1	2 bis 3	1	2 bis 3	1
Biotit Plagioklas Gneis	2	2	2 bis 3	2 bis 3	2	2 bis 3
Hornblendegneis	2	1	2	1	2	2
Granitgneis	2 bis 3	1	2 bis 3	1	2 bis 3	1 bis 2

Anhang B: Geotechnik

Hornblendegneis	Uniaxialtest				Spaltzugversuch	Triaxialtest						Ultraschall	
	UCS	E	V	Poisson Zahl	SPZ	UCS	E	V	Poisson Zahl	Phi	c	Hoek Brown Konstante mi	Vp
1						283,09	56820	50500	0,32	55	46,23	25,09	5037,59
2						283,66	64950	57470	0,07	54,86	45,01	20,28	4784,55
3	105,72	70430	58420	0,14									
4	85,07	58040	44440	0,12									
5	168,66	54310	33430	0,14									
6					14,22								
7					11,46								
8					25,14								
Granitgneis													
1						96,32	37660	27990	0,12	51,47	17,48	20,01	3771,25
2													3997,28
3	151,31	43490	36740	0,15									
4	161,94	42080	34930	0,12									
5	83,51	39580	28720	0,19									
6					9,26								
7					12,29								
8					9,23								
Kalkglimmerschiefer													
1						89,43	41940	25990	0,08	33,84	24,3	6,38	3637,12
2						88,211	46210	33610	0,11	32,79	24,34	5,82	3965,52
3	86,45	52620	39390	0,2									
4	85,98	54000	37750	0,21									
5	77,22	56930	46000	0,21									
6					9,46								
7					7,08								
8					9,57								
Augengneis													
1						283,41	27380	23640	0,08	51,61	51,23	21,19	3097,85
2						242,53				55,59	37,59	20,53	3182,17
3	230,83	36100	30110	0,09									
4	248,02	35320	30310	0,11									
5	206,28	38730	32950	0,12									
6					9,7								
7					12,05								
8					15,58								
Raibler Dolomit													
1													3946,8
2						184	71780	57410	0,14	58,24	26,76	29,43	5725,64
3	133,32	91170	82510	0,22									
4	168,97	93010	85720	0,21									
5	120,38	75700	66520	0,18									
6					10,27								
7					18,05								
8					17,72								
Bt-Plg-Gneis													
1						166,4	72130	54890	0,13	42,09	37,49	10,03	5485,18
2						84,57	77480	7327	0,06	61,22	12,47	53,42	5570,73
3	126,44	75300	71030	0,17									
4	149,8	85580	82270	0,2									
5	180,26	72710	63600	0,15									
6					19,87								
7					10,67								
8					15,9								

Anhang C: Geochemische Analysen

Analyse	KGS 1	KGS 2	KGS 3	KGS 4	KGS 5
SiO ₂ [%]	12,51	38,49	21,18	38,91	16,88
Al ₂ O ₃ [%]	2,03	8,65	5,59	8,29	4,47
Fe ₂ O ₃ (T) [%]	0,83	3,04	1,67	3,03	1,62
MnO [%]	0,088	0,144	0,068	0,144	0,07
MgO [%]	0,97	1,33	1,31	1,34	1,61
CaO [%]	46,18	25,21	38,89	25,06	41,04
Na ₂ O [%]	0,08	0,62	0,32	0,64	0,25
K ₂ O [%]	0,5	1,28	0,97	1,2	0,74
TiO ₂ [%]	0,087	0,401	0,241	0,382	0,187
P ₂ O ₅ [%]	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06
LOI [%]	36,96	20,46	30,38	20,49	32,64
Total [%]	100,3	99,68	100,7	99,53	99,55
Sc [ppm]	3	8	5	8	4
Be [ppm]	< 1	1	< 1	1	< 1
V [ppm]	12	64	41	61	31
Ba [ppm]	54	158	93	149	75
Sr [ppm]	529	619	632	622	619
Y [ppm]	19	15	12	17	12
Zr [ppm]	26	88	48	88	47
Cr [ppm]	< 20	50	30	50	20
Co [ppm]	6	20	6	22	9
Ni [ppm]	< 20	40	20	40	20
Cu [ppm]	30	30	20	30	20
Zn [ppm]	30	60	40	60	40
Ga [ppm]	3	13	8	12	6
Ge [ppm]	< 1	1	< 1	1	< 1
As [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb [ppm]	23	70	54	66	39
Nb [ppm]	2	10	5	10	5
Mo [ppm]	11	9	8	14	11
Ag [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
In [ppm]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Sn [ppm]	< 1	2	1	2	1
Sb [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cs [ppm]	1,6	5,7	4,5	5,4	3,3
La [ppm]	15,4	22,7	16,2	23,2	14,8
Ce [ppm]	13,5	43,2	26,3	44,5	23
Pr [ppm]	2,96	4,94	3,34	5,14	3,13
Nd [ppm]	12	19	12,9	20,1	12,2
Sm [ppm]	2,4	3,7	2,5	3,9	2,3
Eu [ppm]	0,58	0,76	0,55	0,81	0,5
Gd [ppm]	2,7	3,4	2,3	3,5	2,2
Tb [ppm]	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4
Dy [ppm]	2,3	3	2	3	2
Ho [ppm]	0,5	0,6	0,4	0,6	0,4
Er [ppm]	1,3	1,7	1,1	1,7	1,1
Tm [ppm]	0,19	0,26	0,17	0,26	0,16
Yb [ppm]	1,1	1,7	1,1	1,7	1
Lu [ppm]	0,18	0,27	0,17	0,27	0,16
Hf [ppm]	0,5	2,5	1,2	2,5	1,1
Ta [ppm]	0,4	1,4	0,5	1,1	0,5
W [ppm]	73	148	71	180	107
Tl [ppm]	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2
Pb [ppm]	13	11	7	10	< 5
Bi [ppm]	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Th [ppm]	2	7,4	4,7	7,3	4,1
U [ppm]	0,6	1,5	1,3	1,6	1,2

Analyse	Augengneis 1	Augengneis 2	Augengneis 3	Augengneis 4	Augengneis 5
SiO ₂ [%]	72,28	72,75	72,45	72,02	70,64
Al ₂ O ₃ [%]	14,8	14,25	13,82	14,27	14,76
Fe ₂ O ₃ (T) [%]	1,7	1,37	1,66	1,24	1,62
MnO [%]	0,047	0,042	0,053	0,038	0,045
MgO [%]	0,64	0,44	0,53	0,39	0,55
CaO [%]	2,04	1,88	1,88	1,84	2,07
Na ₂ O [%]	4,64	4,45	4,11	4,3	4,36
K ₂ O [%]	3,54	3,52	3,59	3,42	3,44
TiO ₂ [%]	0,211	0,16	0,196	0,136	0,205
P ₂ O ₅ [%]	0,08	0,06	0,05	0,04	0,07
LOI [%]	0,45	0,44	0,53	0,46	0,58
Total [%]	100,4	99,36	98,88	98,16	98,34
Sc [ppm]	4	3	5	3	3
Be [ppm]	3	3	2	3	2
V [ppm]	21	15	18	13	18
Ba [ppm]	765	689	807	598	882
Sr [ppm]	482	431	439	390	492
Y [ppm]	9	7	9	7	9
Zr [ppm]	133	92	103	86	126
Cr [ppm]	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Co [ppm]	81	141	196	120	112
Ni [ppm]	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu [ppm]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn [ppm]	30	< 30	30	< 30	30
Ga [ppm]	20	20	18	21	20
Ge [ppm]	1	1	1	1	1
As [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb [ppm]	113	112	118	116	112
Nb [ppm]	10	11	12	10	8
Mo [ppm]	5	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
In [ppm]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Sn [ppm]	1	2	2	2	1
Sb [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cs [ppm]	2,4	2,2	2,5	2,4	2,1
La [ppm]	41,6	17,7	11,7	13,1	38,8
Ce [ppm]	71,6	31,1	21,6	23,6	67,5
Pr [ppm]	7,1	3,2	2,41	2,48	6,8
Nd [ppm]	23,6	11,1	9	8,9	22,7
Sm [ppm]	3,7	2	2	1,6	3,7
Eu [ppm]	0,7	0,48	0,52	0,41	0,71
Gd [ppm]	2,5	1,7	2	1,4	2,6
Tb [ppm]	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4
Dy [ppm]	1,9	1,4	1,8	1,2	1,9
Ho [ppm]	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4
Er [ppm]	1	0,8	0,9	0,7	1
Tm [ppm]	0,15	0,12	0,14	0,11	0,15
Yb [ppm]	1	0,8	0,9	0,8	1
Lu [ppm]	0,16	0,14	0,15	0,15	0,16
Hf [ppm]	3,7	3	3,1	3	3,6
Ta [ppm]	10,8	12,2	24,7	2,5	2,1
W [ppm]	2160	2640	4860	1170	1070
Tl [ppm]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
Pb [ppm]	31	34	29	39	32
Bi [ppm]	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Th [ppm]	19,3	11,9	6,4	13,4	20,2
U [ppm]	3,2	7,3	3,4	11,2	4,2

Analyse	Bt-Plg-Gneis 1	Bt-Plg-Gneis 2	Bt-Plg-Gneis 3	Bt-Plg-Gneis 4	Bt-Plg-Gneis 5
SiO ₂ [%]	60,09	58,74	74,72	68,49	68,94
Al ₂ O ₃ [%]	17,74	18,62	11,6	14,57	14,86
Fe ₂ O ₃ (T) [%]	8,58	6,6	4,45	5,09	4,46
MnO [%]	0,083	0,056	0,054	0,061	0,052
MgO [%]	3,45	3,02	1,74	2,1	1,76
CaO [%]	0,52	0,75	1,15	0,66	0,69
Na ₂ O [%]	1,69	1,63	2,59	2,36	2,39
K ₂ O [%]	4,15	4,37	1,65	3,67	4,12
TiO ₂ [%]	0,746	0,786	0,393	0,653	0,554
P ₂ O ₅ [%]	0,11	0,13	0,24	0,17	0,17
LOI [%]	2,23	3,95	1,33	1,7	1,62
Total [%]	99,39	98,65	99,93	99,52	99,62
Sc [ppm]	18	17	9	12	11
Be [ppm]	5	3	3	2	2
V [ppm]	179	114	65	84	74
Ba [ppm]	679	1025	115	544	684
Sr [ppm]	123	93	119	120	137
Y [ppm]	32	26	25	26	23
Zr [ppm]	151	119	84	205	157
Cr [ppm]	90	60	40	60	50
Co [ppm]	69	85	98	97	91
Ni [ppm]	60	50	30	40	30
Cu [ppm]	100	30	50	< 10	< 10
Zn [ppm]	140	90	60	70	70
Ga [ppm]	28	28	17	22	21
Ge [ppm]	2	2	1	2	2
As [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	5
Rb [ppm]	195	161	85	151	148
Nb [ppm]	14	16	7	12	11
Mo [ppm]	21	11	15	9	10
Ag [ppm]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
In [ppm]	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Sn [ppm]	7	13	3	6	7
Sb [ppm]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cs [ppm]	11,9	8,8	6,5	7,7	6,4
La [ppm]	42,2	29,8	19,6	35	31,5
Ce [ppm]	82,1	60	39,3	70,7	63,4
Pr [ppm]	9,74	7,09	4,82	8,18	7,36
Nd [ppm]	37,8	27,8	19,3	31,2	28,2
Sm [ppm]	7,6	5,8	4,4	6,2	6
Eu [ppm]	1,33	1,24	0,87	1,29	1,47
Gd [ppm]	6,9	5,2	4,8	5,5	5,5
Tb [ppm]	1,1	0,8	0,8	0,9	0,9
Dy [ppm]	6,1	4,8	4,9	5,2	5
Ho [ppm]	1,2	1	1	1	1
Er [ppm]	3,6	2,9	2,7	3	2,8
Tm [ppm]	0,55	0,45	0,4	0,45	0,43
Yb [ppm]	3,7	2,9	2,6	3	2,8
Lu [ppm]	0,58	0,46	0,41	0,48	0,44
Hf [ppm]	4,3	3,4	2,3	5,6	4,5
Ta [ppm]	1,6	2,3	1,8	2,2	2,3
W [ppm]	414	646	835	835	840
Tl [ppm]	1	0,7	0,4	0,7	0,7
Pb [ppm]	18	14	8	22	28
Bi [ppm]	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Th [ppm]	14,8	11	6,6	14	11,3
U [ppm]	5,3	3,5	3	3,3	3

Analyse	Hbl-Gneis 1	Hbl-Gneis 2	Hbl-Gneis 3	Hbl-Gneis 4	Hbl-Gneis 4
SiO ₂ [%]	56,52	60,95	57,49	58,12	59,82
Al ₂ O ₃ [%]	15,88	15,6	15,21	14,11	16,03
Fe ₂ O ₃ (T) [%]	10,52	8,7	10,6	10,94	9,14
MnO [%]	0,184	0,144	0,168	0,174	0,155
MgO [%]	3,68	2,46	3,28	3,44	2,37
CaO [%]	8,29	6,67	8,62	8,46	6,96
Na ₂ O [%]	2,71	3,46	2,08	1,95	3,32
K ₂ O [%]	0,64	0,46	0,43	0,42	0,38
TiO ₂ [%]	0,662	0,722	0,659	0,621	0,668
P ₂ O ₅ [%]	0,12	0,12	0,09	0,09	0,13
LOI [%]	0,77	0,42	0,51	0,48	0,71
Total [%]	99,96	99,69	99,14	98,8	99,69
Sc [ppm]	37	26	37	39	28
Be [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
V [ppm]	227	163	232	207	160
Ba [ppm]	168	169	97	84	137
Sr [ppm]	239	210	269	226	223
Y [ppm]	18	15	19	18	16
Zr [ppm]	50	79	72	57	76
Cr [ppm]	20	30	< 20	< 20	< 20
Co [ppm]	61	55	79	109	104
Ni [ppm]	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu [ppm]	20	20	< 10	10	30
Zn [ppm]	100	80	100	100	70
Ga [ppm]	19	19	18	17	19
Ge [ppm]	2	2	2	2	2
As [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb [ppm]	22	13	13	13	11
Nb [ppm]	3	2	3	2	3
Mo [ppm]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
In [ppm]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Sn [ppm]	< 1	< 1	1	< 1	< 1
Sb [ppm]	1,2	0,7	0,8	0,5	< 0,5
Cs [ppm]	0,5	1,8	< 0,5	< 0,5	1,8
La [ppm]	8,2	7,3	7,2	7	7,4
Ce [ppm]	17,8	14,8	15,1	15	15,3
Pr [ppm]	2,26	1,81	1,97	1,99	1,95
Nd [ppm]	10	8,2	9,2	9,5	8,9
Sm [ppm]	2,6	2,2	2,4	2,6	2,4
Eu [ppm]	0,95	0,9	0,85	0,86	0,98
Gd [ppm]	3,2	2,8	3,1	3,3	3
Tb [ppm]	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5
Dy [ppm]	3,4	3,1	3,5	3,6	3,1
Ho [ppm]	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
Er [ppm]	2,1	1,9	2,3	2,4	2
Tm [ppm]	0,34	0,32	0,35	0,38	0,31
Yb [ppm]	2,3	2,1	2,4	2,5	2,1
Lu [ppm]	0,37	0,36	0,39	0,42	0,34
Hf [ppm]	1,4	1,9	1,8	1,5	1,8
Ta [ppm]	0,7	0,5	0,9	0,9	1,3
W [ppm]	342	350	484	782	809
Tl [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Pb [ppm]	< 5	< 5	6	11	< 5
Bi [ppm]	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Th [ppm]	1,4	1,5	1,3	1,4	1,5
U [ppm]	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2

Analyse	Granitgneis 1	Granitgneis 2	Granitgneis 3	Granitgneis 4	Granitgneis 5
SiO ₂ [%]	73,06	74,15	72,27	59,41	72,66
Al ₂ O ₃ [%]	13,92	14,47	14,18	16,34	14,09
Fe ₂ O ₃ (T) [%]	1,43	1,43	1,48	5,83	1,45
MnO [%]	0,037	0,035	0,036	0,096	0,036
MgO [%]	0,33	0,34	0,34	3,04	0,34
CaO [%]	1,34	1,23	1,25	5,82	1,32
Na ₂ O [%]	3,32	3,35	3,2	3,24	3,19
K ₂ O [%]	4,46	5,03	4,75	3,07	4,56
TiO ₂ [%]	0,19	0,202	0,206	1,113	0,201
P ₂ O ₅ [%]	0,13	0,14	0,14	0,24	0,14
LOI [%]	0,54	0,59	0,62	1,12	0,58
Total [%]	98,75	101	98,47	99,32	98,56
Sc [ppm]	3	3	3	15	3
Be [ppm]	6	7	6	3	6
V [ppm]	10	12	11	115	11
Ba [ppm]	289	313	315	380	289
Sr [ppm]	104	111	112	316	103
Y [ppm]	12	11	10	23	12
Zr [ppm]	99	109	111	208	109
Cr [ppm]	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Co [ppm]	55	58	53	52	45
Ni [ppm]	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu [ppm]	20	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn [ppm]	50	50	40	80	40
Ga [ppm]	20	19	20	22	20
Ge [ppm]	2	2	2	2	2
As [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb [ppm]	259	257	268	186	261
Nb [ppm]	11	11	12	15	13
Mo [ppm]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,6	< 0,5
In [ppm]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Sn [ppm]	14	14	15	6	17
Sb [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cs [ppm]	19,2	18,7	19,5	34,4	19,5
La [ppm]	27,1	24,4	26,4	33,5	26,8
Ce [ppm]	49,4	47	50,9	66,6	53,2
Pr [ppm]	5,63	5,45	5,65	7,93	5,9
Nd [ppm]	20,8	19,1	20,6	31,3	21,4
Sm [ppm]	4,4	4	4,2	6,4	4,6
Eu [ppm]	0,63	0,55	0,63	1,48	0,66
Gd [ppm]	3,6	2,9	3,4	5,7	3,8
Tb [ppm]	0,5	0,4	0,5	0,9	0,6
Dy [ppm]	2,5	2	2,3	4,9	2,6
Ho [ppm]	0,4	0,4	0,4	1	0,4
Er [ppm]	1,2	0,9	1,1	2,7	1,2
Tm [ppm]	0,18	0,14	0,17	0,4	0,18
Yb [ppm]	1,1	1	1,1	2,6	1,1
Lu [ppm]	0,18	0,15	0,17	0,41	0,17
Hf [ppm]	2,8	2,5	3,2	5,1	3
Ta [ppm]	2,6	2,5	2,7	2,2	2,8
W [ppm]	548	484	546	382	499
Tl [ppm]	1,4	1,5	1,4	1,2	1,4
Pb [ppm]	35	38	38	21	34
Bi [ppm]	1	0,6	0,6	0,8	0,9
Th [ppm]	14	12,8	14,8	12,3	14,3
U [ppm]	4,9	4,7	4,2	4,8	5,3

Analyse	Dolomit 1	Dolomit 2	Dolomit 3	Dolomit 4	Dolomit 5
SiO ₂ [%]	0,27	0,21	0,11	0,41	0,27
Al ₂ O ₃ [%]	0,07	0,07	0,05	0,04	0,09
Fe ₂ O ₃ (T) [%]	0,04	0,07	0,03	0,05	0,10
MnO [%]	< 0,001	0,00	< 0,001	0,00	0,00
MgO [%]	21,76	21,62	21,39	21,27	21,00
CaO [%]	30,64	31,00	30,28	30,76	30,26
Na ₂ O [%]	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
K ₂ O [%]	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,02
TiO ₂ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P ₂ O ₅ [%]	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
LOI [%]	47,03	47,10	47,20	46,94	47,06
Total [%]	99,86	100,10	99,10	99,50	98,83
Sc [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Be [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
V [ppm]	< 5	6,00	< 5	10,00	11,00
Ba [ppm]	7,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Sr [ppm]	99,00	117,00	87,00	108,00	128,00
Y [ppm]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Zr [ppm]	13,00	7,00	6,00	5,00	5,00
Cr [ppm]	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Co [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	5,00
Ni [ppm]	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu [ppm]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn [ppm]	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
Ga [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Ge [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
As [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	6,00
Rb [ppm]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Nb [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Mo [ppm]	< 2	10,00	< 2	3,00	10,00
Ag [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
In [ppm]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Sn [ppm]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sb [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cs [ppm]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
La [ppm]	0,40	0,30	0,30	0,30	0,40
Ce [ppm]	0,60	0,50	0,40	0,40	0,60
Pr [ppm]	0,06	0,05	< 0,05	< 0,05	0,06
Nd [ppm]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Sm [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Eu [ppm]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Gd [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Tb [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Dy [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ho [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Er [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Tm [ppm]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Yb [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Lu [ppm]	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Hf [ppm]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ta [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
W [ppm]	17,00	28,00	27,00	28,00	26,00
Tl [ppm]	< 0,1	0,20	< 0,1	0,10	0,20
Pb [ppm]	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Bi [ppm]	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Th [ppm]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
U [ppm]	2,20	8,20	2,00	9,30	10,90

Anhang D: Korngrößenverteilungen

Kalkglimmerschiefer Verfaltet				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	49,85	96,6	97,55	97
32	41,64	87,66	89,01	88,65
16	29,96	57,55	64,17	67,97
9,51	22,45	42,38	50,04	53,59
4	15,82	29,7	34,52	37,23
2	12,14	23,08	26,64	28,8
1,19	10,47	19,88	22,95	24,85
0	0	0	0	0

Kalkglimmerschiefer SSF				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	75	90,55	100	100
32	59,8	63,7	86,86	88,39
16	46,94	49,21	68,26	69,55
9,51	38,56	40,15	54,37	56,8
4	28,85	28,9	39,27	39,85
2	22,67	22,5	30,56	30,84
1,19	19,79	19,48	26,54	26,82
0	0	0	0	0

Kalkglimmerschiefer PSF				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	63,73	84,8	100	100
32	54,33	78,73	94,96	89,34
16	43,05	60,43	68,36	61,87
9,51	33,71	47,34	56,59	49,58
4	23,89	32,87	40,73	37,85
2	18,49	25,2	31,87	29,31
1,19	16,15	21,72	27,66	25,31
0	0	0	0	0

Kalkglimmerschiefer NSF				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	98,05	100	100	100
32	88,22	94,99	98,53	98,69
16	56,6	68,55	84,36	84,15
9,51	41,39	51,72	65,21	66,02
4	28,18	34,83	44,36	44,67
2	22,34	27,31	34,69	34,62
1,19	19,7	23,92	30,42	30,26
0	0	0	0	0

Augengneis NSF				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	80,61	95,53	100	100
32	66,85	78,1	94,96	89,16
16	39,65	55,12	68,2	58,89
9,51	27,61	38,52	50,94	46,77
4	17,91	26,36	33,67	32,43
2	13,48	19,93	24,52	24,56
1,19	11,37	16,83	20,41	20,73
0	0	0	0	0

Augengneis PSF				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	77,01	92,77	100	97,3
32	59,99	74,33	89,33	81,62
16	39,86	51,77	59,11	51,16
9,51	30,14	39,32	44,49	37,84
4	20,96	28,36	30,88	25,86
2	16,31	21,9	23,28	19,45
1,19	13,89	18,65	19,57	16,31
0	0	0	0	0

Augengneis SSF				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	77,9	87,68	100	100
32	65,06	74,42	92,13	95,16
16	42,83	53,39	68,91	69,22
9,51	30,07	41,29	52,04	52,02
4	20,32	27,91	34,64	34,61
2	15,37	20,88	25,45	25,33
1,19	13,02	17,47	21,14	18,01
0	0	0	0	0

Schiefergneis SSF				
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 80/7	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100
45	62,66	74,43	93,29	100
32	52,88	67,41	80,15	92,11
16	37,23	50,19	56,05	67,52
9,51	29,22	40,29	44,74	53,64
4	22,4	31,14	34,4	41,66
2	18,41	25,85	28,42	34,98
1,19	16,22	22,87	25,08	31,13
0	0	0	0	0

Hornblendegneis NSF						
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 100/5	S/ P = 80/7	S/ P = 80/5	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
63	100	100	100	100	100	100
31,5	81,71	75,08	82,68	83,68	93,28	89,18
16	54,86	48,92	54,02	57,49	64,69	63,72
8	36,29	34,71	34,42	36,3	42,88	43,9
4	26,67	26,12	24,72	25,97	29,54	32,45
2	20,48	20,59	18,8	19,84	22,43	25,63
1	16,57	16,84	15,07	15,94	17,97	21,05
0	0	0	0	0	0	0

Granitgneis NSF						
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 100/5	S/ P = 80/7	S/ P = 80/5	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
88,9	100	100	100	100	100	100
63	87,34	100	100	100	100	100
31,5	46,34	56,04	59,13	61,8	64,49	62,46
16	28,94	41,01	36,61	41,19	37,69	40,36
8	21,36	27,6	23,61	27,61	26	27,96
4	16,17	21,12	18,06	21,63	20,19	22,28
2	12,73	16,55	14,13	17,53	16,2	18,18
1	10,05	13,19	11,23	14,27	13,13	14,85
0	0	0	0	0	0	0

Granitgneis SSF						
Maschenweite [mm]	S/ P = 100/7	S/ P = 100/5	S/ P = 80/7	S/ P = 80/5	S/ P = 60/7	S/ P = 60/5
	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]	Durchgang [%]
63	100	100	100	100	100	100
31,5	68,82	63,57	82,68	73,13	83,53	85
16	46,21	40,68	55,78	46,5	59,34	57,48
8	28,21	25,07	36,59	29,8	38,55	37,25
4	18,9	17,14	25,68	20,72	26,49	26,56
2	14,04	13,03	19,47	15,42	19,5	20,14
1	10,78	10,06	15,02	11,8	14,77	15,55
0	0	0	0	0	0	0

Anhang E: Kornformen

Kalkglimmerschiefer NSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	59,09	82,35	141,44	42	58
9,51-16mm	44,02	40,57	84,59	52	48
Summe	103,11	122,92	226,03	46	54
60/7					
16-32mm	114,83	144,65	259,48	44	56
9,51-16mm	28,49	82,13	110,62	26	74
Summe	143,32	226,78	370,10	39	61
80/7					
16-32mm	96,05	116,91	212,96	45	55
9,51-16mm	43,66	42,56	86,22	51	49
Summe	139,71	159,47	299,18	47	53
100/7					
16-32mm	181,55	169,66	351,20	52	48
9,51-16mm	40,56	37,38	77,94	52	48
Summe	222,11	207,03	429,14	52	48
			SUMME	46	54

Kalkglimmerschiefer PSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	45,555	114,6475	160,2025	28	72
9,51-16mm	15,0925	32,8325	47,925	31	69
Summe	60,6475	147,48	208,1275	29	71
60/7					
16-32mm	198,885	155,635	354,52	56	44
9,51-16mm	39,95	49,1825	89,1325	45	55
Summe	238,835	204,8175	443,6525	54	46
80/7					
16-32mm	73,2525	96,835	170,0875	43	57
9,51-16mm	40,685	38,635	79,32	51	49
Summe	113,9375	135,47	249,4075	46	54
100/7					
16-32mm	95,8375	112,4675	208,305	46	54
9,51-16mm	40,78	32,095	72,875	56	44
Summe	136,6175	144,5625	281,18	49	51
			SUMME	45	55

Kalkglimmerschiefer SSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	25,35	180,4125	205,7625	12	88
9,51-16mm	21,0375	54,62	75,6575	28	72
Summe	46,3875	235,0325	281,42	16	84
60/7					
16-32mm	45,465	277,9625	323,4275	14	86
9,51-16mm	16,5325	74,6325	91,165	18	82
Summe	61,9975	352,595	414,5925	15	85
80/7					
16-32mm	40,225	110,9575	151,1825	27	73
9,51-16mm	20,26	61,51	81,77	25	75
Summe	60,485	172,4675	232,9525	26	74
100/7					
16-32mm	31,12	149,36	180,48	17	83
9,51-16mm	12,79	62,6425	75,4325	17	83
Summe	43,91	212,0025	255,9125	17	83
			SUMME	19	81

Kalkglimmerschiefer V					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	31,62	212,97	244,58	13	87
9,51-16mm	4,14	82,76	86,89	5	95
Summe	35,75	295,72	331,47	11	89
60/7					
16-32mm	25,38	307,79	333,17	8	92
9,51-16mm	8,43	93,71	102,14	8	92
Summe	33,82	401,50	435,31	8	92
80/7					
16-32mm	72,05	235,23	307,28	23	77
9,51-16mm	28,64	61,45	90,09	32	68
Summe	100,69	296,68	397,37	25	75
100/7					
16-32mm	106,10	126,96	233,06	46	54
9,51-16mm	38,72	45,96	84,68	46	54
Summe	144,82	172,91	317,73	46	54
			SUMME	22	78

Augengneis NSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	57,435	181,0175	238,4525	24	76
9,51-16mm	19,685	55,3725	75,0575	26	74
Summe	77,12	236,39	313,51	25	75
60/7					
16-32mm	98,515	196,155	294,67	33	67
9,51-16mm	26,565	55,3975	81,9625	32	68
Summe	125,08	251,5525	376,6325	33	67
80/7					
16-32mm	52,7175	136,745	189,4625	28	72
9,51-16mm	21,535	58,6625	80,1975	27	73
Summe	74,2525	195,4075	269,66	28	72
100/7			0		
16-32mm	104,5725	190,515	295,0875	35	65
9,51-16mm	24,7475	47,3525	72,1	34	66
Summe	129,32	237,8675	367,1875	35	65
			SUMME	30	70

Augengneis PSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	72,61	189,1875	261,7975	28	72
9,51-16mm	104,71	181,44	286,15	37	63
Summe	177,32	370,6275	547,9475	32	68
60/7					
16-32mm	73,6075	226,7475	300,355	25	75
9,51-16mm	15,4325	59,69	75,1225	21	79
Summe	89,04	286,4375	375,4775	24	76
80/7					
16-32mm	35,4975	115,4925	150,99	24	76
9,51-16mm	11,6	55,9225	67,5225	17	83
Summe	47,0975	171,415	218,5125	22	78
100/7					
16-32mm	69,85	731,88	801,73	9	91
9,51-16mm	16,4625	44,18	60,6425	27	73
Summe	86,3125	776,06	862,3725	10	90
			SUMME	23	77

Augengneis SSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	55,39	157,33	212,72	26	74
9,51-16mm	26,99	48,305	75,295	36	64
Summe	82,38	205,635	288,015	29	71
60/7					
16-32mm	94,1325	190,9575	285,09	33	67
9,51-16mm	24,7625	60,545	85,3075	29	71
Summe	118,895	251,5025	370,3975	32	68
80/7					
16-32mm	103,415	117,6925	221,1075	47	53
9,51-16mm	28,3525	51,18	79,5325	36	64
Summe	131,7675	168,8725	300,64	44	56
100/7					
16-32mm	55,24	242,4225	297,6625	19	81
9,51-16mm	25,4075	48,93	74,3375	34	66
Summe	80,6475	291,3525	372	22	78
			SUMME	32	68

Schiefergneis SSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	49,59	211,93	261,52	19	81
9,51-16mm	18,80	61,25	80,05	23	77
Summe	68,39	273,18	341,57	20	80
60/7			0,00		
16-32mm	99,13	313,86	412,99	24	76
9,51-16mm	35,30	61,45	96,75	36	64
Summe	134,43	375,31	509,74	26	74
80/7			0,00		
16-32mm	111,56	115,75	227,32	49	51
9,51-16mm	39,53	44,53	84,06	47	53
Summe	151,09	160,28	311,37	49	51
100/7			0,00		
16-32mm	182,40	118,61	301,01	61	39
9,51-16mm	53,98	30,49	84,46	64	36
Summe	236,38	149,09	385,47	61	39
			SUMME	40	60

Hornblendegneis NSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	836,59	391,57	1228,16	68	32
8-16mm	187,23	149,89	337,12	56	44
Summe	1023,82	541,46	1565,28	65	35
60/7					
16-32mm	1028,85	607,56	1636,41	63	37
8-16mm	151,55	157,61	309,16	49	51
Summe	1180,4	765,17	1945,57	61	39
80/5					
16-32mm	845,36	346,47	1191,83	71	29
8-16mm	199,34	108,61	307,95	65	35
Summe	1044,7	455,08	1499,78	70	30
80/7					
16-32mm	1095,3	487,33	1582,63	69	31
8-16mm	199,36	148,02	347,38	57	43
Summe	1294,66	635,35	1930,01	67	33
100/5					
16-32mm	397,91	192,13	590,04	67	33
8-16mm	68,24	89,38	157,62	43	57
Summe	466,15	281,51	747,66	62	38
100/7					
16-32mm	555,29	193,53	748,82	74	26
8-16mm	52,49	100,82	153,31	34	66
Summe	607,78	294,35	902,13	67	33
			SUMME	62	38

Granitgneis NSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	280,77	922,19	1202,96	23	77
8-16mm	35,95	200,78	236,73	15	85
Summe	316,72	1122,97	1439,69	22	78
60/7					
16-32mm	549,94	1099,87	1649,81	33	67
8-16mm	62,39	256,69	319,08	20	80
Summe	612,33	1356,56	1968,89	31	69
80/5					
16-32mm	42,51	852,35	894,86	5	95
8-16mm	72,61	231,37	303,98	24	76
Summe	115,12	1083,72	1198,84	10	90
80/7					
16-32mm	112,99	913,46	1026,45	11	89
8-16mm	53,95	254,95	308,9	17	83
Summe	166,94	1168,41	1335,35	13	87
100/5					
16-32mm	19,16	324,51	343,67	6	94
8-16mm	18,15	115,1	133,25	14	86
Summe	37,31	439,61	476,92	8	92
100/7					
16-32mm	23,35	527,84	551,19	4	96
8-16mm	54,46	116,27	170,73	32	68
Summe	77,81	644,11	721,92	11	89
			SUMME	17	83

Granitneis SSF					
60/5	gedrungen [g]	plattig [g]	Summe [g]	gedrungen %	plattig %
16-32mm	202,85	181,76	384,61	53	47
8-16mm	33,25	52,05	85,30	39	61
summe	236,10	233,81	469,90	50	50
60/7					
16-32mm	202,46	153,49	355,95	57	43
8-16mm	34,19	40,83	75,02	46	54
summe	236,65	194,31	430,96	55	45
80/5					
16-32mm	147,64	131,64	279,28	53	47
8-16mm	38,07	31,41	69,48	55	45
summe	185,71	163,05	348,76	53	47
80/7					
16-32mm	223,42	150,16	373,58	60	40
8-16mm	32,57	36,59	69,16	47	53
summe	255,99	186,75	442,74	58	42
100/5					
16-32mm	139,78	152,43	292,21	48	52
8-16mm	16,99	41,56	58,55	29	71
summe	156,77	193,99	350,76	45	55
100/7					
16-32mm	170,10	144,52	314,62	54	46
8-16mm	49,03	40,11	89,14	55	45
summe	219,13	184,63	403,75	54	46
			SUMME	51	49