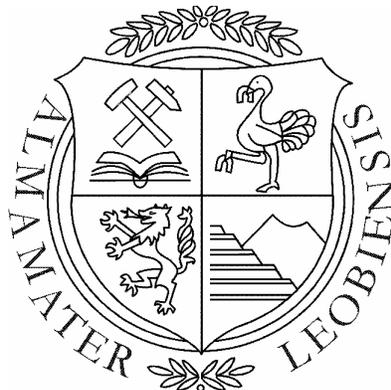




DISSERTATION

zum Erwerb des akademischen Grades eines
Dr. mont. der Doktoratsstudienrichtung

BERGWESEN



eingereicht am Institut für Bergbaukunde,
Bergtechnik und Bergwirtschaft der
Montanuniversität Leoben

von

DI Andreas Grasedieck

betreut und begutachtet von:

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Peter Moser und Univ. Prof. Dr. Ing. Finn Ouchterlony



THEMA

Die Natürliche Bruchcharakteristik (NBC) von Gesteinen in der Sprengtechnik

Leoben, Adnet, Millstatt

2003 bis 2006



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Informationen und Quellen nicht benutzt und die benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Andreas Grasedieck



Inhalt

1. Kurzfassung und Abstract.....	1
1.1. Kurzfassung.....	1
1.2. Abstract.....	2
2. Gegenstand und Ziel der Dissertation.....	3
2.1. Hintergrund.....	3
2.2. Ziel der Dissertation.....	4
3. Der Begriff der Natürlichen Bruchcharakteristik.....	6
3.1. Allgemeines.....	6
3.2. Auswertung der Literatur.....	6
3.2.1. Definition der NBC nach Steiner.....	6
3.2.2. Ergebnisse der Untersuchungen von Reichhoff.....	7
3.2.3. Zerkleinerbarkeit nach Rittinger.....	8
3.2.4. Workindex W_i nach Bond für die Sprengarbeit.....	9
4. Durchgeführte Experimente und Art der Analysen.....	11
4.1. Einleitung.....	11
4.1.1. Allgemeines.....	11
4.1.2. Verwendete Materialien.....	12
4.2. Sprengversuche.....	15
4.2.1. Sprengversuche im Modellmaßstab.....	15
4.2.2. Knäppersprengungen.....	16
4.2.3. Großsprengungen.....	17
4.2.4. Sprengversuche im Labormaßstab mit besonderer Anordnung.....	18
4.2.4.1 Entkoppelte Sprengladungen.....	18
4.2.4.2 Wave Trap-Versuche.....	20
4.2.4.3 Sprengversuche an Betonzylindern mit Stahlummantelung.....	20
4.3. Mechanischen Zerkleinerungsversuche.....	21
4.3.1. Aufbereitungstechnische Zerkleinerungsversuche.....	21
4.3.2. Spezielle mechanische Zerkleinerungsversuche.....	23
4.4. Beprobung von Aufbereitungsanlagen.....	24
4.5. Bestimmung der Korngrößenverteilung der zerkleinerten Proben.....	25
4.5.1. Korngrößenbestimmung durch Sieben.....	25
4.5.1.1 Art und Durchführung der Siebung.....	25
4.5.1.2 Analyse der Sieblinien.....	29
4.5.2. Korngrößenbestimmung nach dem Prinzip der gravimetrischen Sedimentation.....	32
4.6. Untersuchung der Körner der zerkleinerten Proben.....	34
4.6.1. Einführende Erklärung.....	34
4.6.2. Bestimmung der Anzahl der Körner je Kornklasse.....	34
4.6.2.1 Zählen im Grobkornbereich (> 2 mm).....	34
4.6.2.2 Bildanalyse im Feinkornbereich (< 2 mm).....	34
4.6.3. Untersuchung des Aufbaues in den einzelnen Kornklassen.....	36
4.6.4. Bestimmung der In situ-Korn/Mineralgröße (erweiterte Methode von Wimmenauer).....	38
4.7. Tabellarische Übersicht über die durchgeführten Zerkleinerungsversuche.....	41
4.7.1. Laborsprengversuche.....	41
4.7.2. Knäppersprengversuche.....	43
4.7.3. Großsprengversuche.....	43
4.7.4. Mechanischen Zerkleinerungsversuche.....	44
4.7.5. Beprobung von Hauwerk aus Aufbereitungsanlagen.....	45
5. Verfahren zur Beschreibung der Natürlichen Bruchcharakteristik und Abgrenzung des Begriffes der „Selbstähnlichkeit“.....	46
5.1. Einleitung.....	46
5.2. Beschreibung der NBC nach Grasedieck.....	46
5.3. Abgrenzung des Begriffes der Selbstähnlichkeit.....	49



5.3.1.	Veranschaulichung der Analyse der NBC an Hand von Beispielen.....	50
5.3.2.	Festlegung und Berechnung der Grenzen der Selbstähnlichkeit.....	51
5.3.3.	Flussdiagramm zur Beurteilung der Selbstähnlichkeit.....	55
6.	Untersuchung der Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven von Sprenghauwerk.....	57
6.1.	Allgemeines.....	57
6.2.	Untersuchungen in Magnetitbeton.....	57
6.2.1.	Einleitung.....	57
6.2.2.	Sprengungen von Proben aus Magnetitbeton im Labormaßstab.....	59
6.2.3.	Sprengversuche im Labormaßstab mit besonderer Anordnung.....	60
6.2.3.1	Sprengversuche mit entkoppelten Sprengstoffladungen.....	60
6.2.3.2	Sprengversuche an Betonzylindern mit Stahlummantelung.....	65
6.2.3.3	Wave Trap Versuche.....	68
6.2.4.	Abhängigkeit der Lokalen Neigung von der Probengröße.....	71
6.3.	Untersuchungen in Amphibolit.....	73
6.3.1.	Einleitung.....	73
6.3.2.	Amphibolit Sprengungen im Labormaßstab.....	73
6.3.3.	Knäppersprengungen.....	75
6.3.4.	Großsprengungen.....	77
6.3.5.	Vergleich der Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven für Labor-, Knäpper- und Großsprengungen.....	80
6.4.	Untersuchungen in Bärarp-Gneis.....	82
6.4.1.	Einleitung.....	82
6.4.2.	Modellsprengungen im Labormaßstab.....	82
6.4.3.	Großsprengungen im Bärarp-Gneis.....	84
6.4.4.	Vergleich der Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven für Labor- und Großsprengungen.....	86
6.5.	Die Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven für Sprenghauwerk.....	88
6.5.1.	Allgemeine Betrachtungen.....	88
6.5.2.	Die natürliche Bruchcharakteristik im Vergleich verschiedener Materialien.....	89
6.5.3.	Materialien mit Lokalem Minimum $< 63 \mu\text{m}$	90
6.5.4.	Grobkörnige Materialien mit unklarem Lokalem Minimum.....	92
7.	Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven aus mechanischen Zerkleinerungsprozessen.....	94
7.1.	Untersuchungen im BBK-Beton.....	94
7.1.1.	Mechanische Zerkleinerungen.....	94
7.1.2.	Spezielle mechanische Versuche mit definiert aufgebrachter Kraft.....	95
7.1.3.	Vergleich der Versuche der mechanischen Zerkleinerung.....	96
7.2.	Untersuchungen im Amphibolit.....	98
7.2.1.	Einleitung.....	98
7.2.2.	Optimierte Zerkleinerungskette (OZK).....	98
7.2.3.	Ergebnisse aus der Anlagenbeprobung in Eibenstein.....	100
7.2.4.	Vergleich von OZK Versuchen mit der Anlagenbeprobung.....	102
7.3.	Untersuchungen im Bärarp-Gneis.....	103
7.3.1.	Einleitung.....	103
7.3.2.	OZK Versuche.....	103
8.	Vergleich der Charakteristik von Zerkleinerungsergebnissen aus sprengender und mechanischer Zerkleinerung.....	105
8.1.	Allgemeines.....	105
8.2.	NBC im Vergleich Sprengen - Mechanische Zerkleinerung.....	105
8.2.1.	Beobachtungen im BBK-Beton.....	105
8.2.2.	Beobachtungen im Amphibolit.....	108
8.2.3.	Beobachtungen im Bärarp-Gneis.....	110
8.3.	Vergleich der mechanische Zerkleinerung mit der Sprengtechnik hinsichtlich des Feinmaterialanteils.....	111
8.4.	Zusammenfassung.....	112



9.	Untersuchung der Zahl und des Aufbaus von Körnern in den einzelnen Korngrößenklasse	114
9.1.	Allgemeines	114
9.2.	Die Anzahl der Körner in einem Zerkleinerungsprodukt	114
9.2.1.	Vorgehensweise beim Berechnen der Anzahl von Teilchen	114
9.2.2.	Kugel-Würfel Mischtyp und Korrelation mit dem Kornformfaktor	116
9.2.3.	Vergleich gezählter und gerechneter Teilchenzahlen	119
9.2.4.	Zusammenhang zwischen Partikelanzahlen und Siebkurven.....	122
9.2.5.	Teilchenzahlen und Korngrößenklassen	123
9.3.	Aufbau der Körner in einem Zerkleinerungsprodukt	127
9.3.1.	Ergebnisse der Auszählungen von Streupräparaten	127
9.3.2.	Auswertung der Auszählungen	131
9.3.3.	Kombination von absoluten Teilchenzahlen mit deren Zusammensetzung.....	138
10.	In situ Mineralkörnergrößenverteilungen.....	142
10.1.	Allgemeines	142
10.1.1.	Vergleich der Lokalen Minima mit der In situ-Korngrößenverteilung.....	145
10.2.	Zusammenfassung	147
11.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	148
11.1.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	148
11.2.	Diskussion weiterer zu behandelnder Fragen.....	154
11.2.1.	Welche Parameter beeinflussen die Charakteristik der Grobflanke?	154
11.2.2.	Warum produziert mechanische Zerkleinerung relativ mehr Feinmaterial als sprengende Zerkleinerung bzw. mechanische Zerkleinerung mit definiert aufgebrachtener Kraft?	156
11.2.3.	Was bedeutet das Lokale Minimum physikalisch?.....	156
11.3.	Empfehlung für weiterführende Untersuchungen.....	157
12.	Danksagung	158
13.	Literatur	159
14.	Anhang.....	162
14.1.	Anhang 1 (Siebanleitung).....	162
14.2.	Anhang 2 (Probendetails von Sprengproben)	163
14.2.1.	BBK-Beton	auf Anfrage
14.2.2.	Bårarp Gneis	auf Anfrage
14.2.3.	Bitustein Amphibolit	auf Anfrage
14.3.	Anhang 3 (Probendetails von Knäppersprengungen).....	auf Anfrage
14.3.1.	Bitustein Amphibolit	auf Anfrage
14.4.	Anhang 4 (Probendetails von Großsprengungen).....	auf Anfrage
14.4.1.	Bårarp Gneis	auf Anfrage
14.4.2.	Bitustein Amphibolit	auf Anfrage
14.5.	Anhang 5 (Probendetails von der Mechanischen Zerkleinerung)	auf Anfrage
14.5.1.	BBK-Beton	auf Anfrage
14.6.	Anhang 6 (Beprobung von Hauwerk und Aufbereitungsanlagen).....	auf Anfrage
14.6.1.	Bitustein Amphibolit	auf Anfrage
14.7.	Anhang 7 (Probendetails von sonstigen Proben).....	auf Anfrage
14.7.1.	Alzo	auf Anfrage
14.7.2.	LUMOSSED.....	auf Anfrage
14.7.3.	Magnesit.....	auf Anfrage
14.7.4.	Sandstein.....	auf Anfrage (blasting@a1.net)



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Energieregister Funktion.....	9
Abbildung 2. Versuchsanordnung bei in der Sprengkammer gesprengten Proben.	16
Abbildung 3. Absiebung der Großsprengung bei Cementos Portland	18
Abbildung 4. Aufbau der stahlrohrentkoppelten Sprengversuche und Foto nach der Sprengung.....	19
Abbildung 5. Stahlrohre im Anschliff (a), Stahlrohre nach der Sprengung (b), Visualisierung der Risse und Luftporen durch UV Licht im gesprengten Betonblock (c).....	19
Abbildung 6. Wave Trap-Versuche.....	20
Abbildung 7. Versuchsaufbau der eingespannten Probe und gegossener BBK Betonzylinder.....	21
Abbildung 8. Zerkleinerungsstammbaum für Amphibolit (Böhm et al. 2002)	22
Abbildung 9. Quellzementversuche (a), Druckversuche (b) und Point-Load-Versuche an einem 200 mm- Würfel (c)	24
Abbildung 10. Flussdiagramm der Aufbereitungsanlage Hengl-Bitustein (Böhm et al. 2004). Die rot markierten Kreise zeigen Punkte der Probenahme jener Proben an, die während der Anlagenbeprobung genommen wurden. An der Stelle 1 (grüner Kreis) wurde zu einem früheren Zeitpunkt eine nicht repräsentative Probe genommen.....	25
Abbildung 11. Histogramm und Häufigkeitsverteilungskurve einer Amphibolitprobe.....	27
Abbildung 12. Darstellung einer Summenkurve von BIT 21 im log-log Diagramm (GGS Netz)	28
Abbildung 13. Darstellung der Summenkurve im linearen Maßstab	28
Abbildung 14. Summenkurve der BIT 21-Probe mit tatsächlichen Siebschritten und mit den an die DIN-Norm angepassten Schritten	31
Abbildung 15. Vergleich der Charakteristiken der experimentell bestimmten und der auf die DIN-Schritte umgerechneten Sieblinien anhand von siebklassenweisen Lokalen Neigungen n (berechnet nach Gleichung 5).....	32
Abbildung 16. Funktionsweise des LUMOSSED Fotosedimentometers(Quelle: http://www.chem-eng.fh-mannheim.de/imv/Lumosed_A.htm)	33
Abbildung 17. Fotos von aufgestreuten Körnerpräparaten zur Ermittlung der Anzahl von Teilchen	35
Abbildung 18. Vergleich zwischen manuell gezählten und mittels Bildanalyse ermittelten Teilchenanzahlen.....	36
Abbildung 19. Fotos der Dünnschliffanalysen zur Bestimmung der Art bzw. des Aufbaues der Körner in den verschiedenen Fraktionen	37
Abbildung 20. Vergleichstafeln zum Abschätzen von Prozentanteilen	38
Abbildung 21. Aus den Auszählungen berechnete und gemittelte In Situ Korngrößenverteilungen im log-log Netz (GGS-Netz) dargestellt	39
Abbildung 22. Darstellung der Vorgangsweise der In situ Korngrößenbestimmung anhand eines Beispiels am Bärarp Gneis.....	40
Abbildung 23. Korngrößenverteilungskurven von Amphibolit, Sandstein und Kalkstein (für Sprengversuche im Modellmaßstab).....	47
Abbildung 24. NBC Diagramme für Amphibolit, Sandstein und Kalkstein. Die n -Werte wurden anhand der Normsiebreihe ermittelt.....	48
Abbildung 25. Basisdiagramm für die Beurteilung	54
Abbildung 26. Beurteilung der Korngrößenverteilungskurven für 2 Zerkleinerungsversuche in Amphibolit hinsichtlich Ihrer Selbstähnlichkeit.....	55
Abbildung 27. Flussdiagramm zur Beurteilung der Selbstähnlichkeit	56
Abbildung 28. Zerkleinerungskurven aller Versuche im BBK-Beton im Überblick.....	58
Abbildung 29. Lokale Neigungen aller BBK-Beton-Versuche im Überblick.....	58
Abbildung 30. Lokale Neigungen aller normal gesprengten BBK-Beton-Würfel	59
Abbildung 31. Proben, die mit entkoppelten Ladungen gesprengt wurden (Die Grenzen der Selbstähnlichkeit wurden aus allen Sprengungen im Labormaßstab von BBK Beton ermittelt)	61
Abbildung 32. Vergleich der Charakteristik von entkoppelten (mittelwert aus 11 entkoppelten) und nicht entkoppelten (Mittelwert aus 6 normalen) Sprengproben.....	62
Abbildung 33. Darstellung der Zerkleinerungskurven < 10 mm von entkoppelten und nicht entkoppelten Sprengproben	63



Abbildung 34. Zusammenhang zwischen Entkoppelungsverhältnis und dem Feinanteil < 1 mm (aus der Gesamtkurve)	64
Abbildung 35. Zusammenhang zwischen spezifischem Energieeintrag und spezifischer Oberfläche (Wallner 2003)	64
Abbildung 36. Dünnschliffuntersuchungen von eingespannten Sprengproben bezüglich Mikrorisse und Foto der Probe nach der Sprengung (MBC 100).....	66
Abbildung 37. Lokale Neigungen der in Stahlrohre eingespannten Proben	67
Abbildung 38. Sequenz eines Wave-trap Versuches aus einer normalen Videoaufnahme.....	68
Abbildung 39. Korngrößenverteilungen aus den Wave Trap Versuchen (WT_1 und WT_2) und im Vergleich dazu die Korngrößenverteilungen normal gesprengter Proben. Kurven eines 270 mm Prismas (MBW 2) und eines 600 mm Prismas (MBW 60)	69
Abbildung 40. Lokale Neigungen der Wave Trap Versuche und eines 270 mm (MBW 2) und eines 600 mm Prismas (MBW 60).....	69
Abbildung 41. Darstellung der Energieregisterfunktion mit MBW 2 (270 mm Prisma).....	71
Abbildung 42. Abhängigkeit der Lokalen Neigung von der Probengröße	72
Abbildung 43. Summenkurven aller Modellsprengungen.	74
Abbildung 44. Darstellung der Lokalen Neigungen aller Modellsprengungen im Amphibolit	74
Abbildung 45. Summenkurven der Knäppersprengungen im Amphibolit.....	75
Abbildung 46. Knäpper (HS1, HS 2 und HS4), wieder zusammengefügt nach der Sprengung, und ein Knäpper (HS3) mit zwei simultan gezündeten Bohrlöchern vor der Sprengung.....	76
Abbildung 47. Lokale Neigungen der Knäppersprengungen in Amphibolit	77
Abbildung 48. Darstellung der Summenkurven der Großsprengung 420-4/2003 der Firma Hengl Bitustein und einer unrepräsentativen Feinmaterialprobe einer Großsprengung aus demselben Steinbruch.	78
Abbildung 49. Darstellung der lokalen Neigungen einer repräsentativ abgeseibten Großsprengung und einer unrepräsentativen Feingutprobe des Sprenghauwerks einer Großsprengung.....	79
Abbildung 50. Sieblinien ausgewählter Sprengversuche von Labor über Knäpper bis zu Großsprengungen im BIT Amphibolit.....	80
Abbildung 51. Lokale Neigungen für unterschiedliche Größen von Sprengversuchen im Amphibolit	81
Abbildung 52. Modellsprengungen des Bårarp-Gneises.....	83
Abbildung 53. Lokale Neigungen der Modellsprengungen im granitischen Gneis von Bårarp.....	84
Abbildung 54. Summenkurven der Großsprengungen.....	85
Abbildung 55. Lokale Neigungen der Großsprengungen im Bårarp-Gneis.....	86
Abbildung 56. Verläufe der Charakteristik der Korngrößenverteilungskurven abhängig von der Probengröße	87
Abbildung 57. NBC-Charakteristik aus Durchschnittsproben verschiedener Materialien.....	89
Abbildung 58. Gesteine ohne Neigungsminima im gesiebten Bereich.	90
Abbildung 59. Kombinierte Zerkleinerungskurven aus der NBC-Ermittlung mit den LUMOSSED-Ergebnissen.....	91
Abbildung 60. Verlauf der Lokalen Neigungen im Feinbereich < 100 µm anhand der Proben vom Institut für Aufbereitung.....	92
Abbildung 61. Durchschnitt aller Magnesitsprengproben ohne klares Neigungsminimum im gesiebten Bereich.	93
Abbildung 62. Zerkleinerungskurven der im Brecher gebrochenen Magnetitbeton-Hälften im Durchlauf und im Kreislauf	94
Abbildung 63. Exponentenverlauf der im Brecher zerkleinerten Magnetitbeton-Hälften.....	95
Abbildung 64. Lokale Neigungen der mechanisch zerkleinerten Proben.....	96
Abbildung 65. Durchschnittskurven der Lokalen Neigung aus der mechanischen Zerkleinerung	97
Abbildung 66. Siebkurven der mechanischen Zerkleinerung von Amphibolit.....	99
Abbildung 67. Darstellung der NBC-Kurven aus der Aufbereitung, ihre Selbstähnlichkeitsgrenzen und die Grenzen der Selbstähnlichkeit aus den gewichteten Mittelwerten aller durchgeführten Untersuchungen.	99
Abbildung 68. Darstellung der Summenkurven aus der Anlagenbeprobung.....	100
Abbildung 69. Lokale Neigungen verschiedener Proben aus der Aufbereitungsanlage	101



Abbildung 70. Vergleich der Lokalen Neigungen aus der OZK mit der Anlagenbeprobung.....	102
Abbildung 71. NBC durch mechanische Zerkleinerung.....	103
Abbildung 72. Darstellung des GGS-Exponentenverlaufes aus der mechanischen Zerkleinerung zur Bestimmung der NBC.....	104
Abbildung 73. Darstellung der Durchgangskurven im BBK Beton mit $k_{\max} = 10 \text{ mm}$	106
Abbildung 74. Darstellung der Durchgangskurven im BBK Beton mit $k_{\max} = 1 \text{ mm}$	106
Abbildung 75. Exponentenverlauf von Durchschnittsproben aus BBK Beton.....	107
Abbildung 76. Darstellung der Durchgangskurven im Bitustein Amphibolit mit $k_{\max} = 1 \text{ mm}$	109
Abbildung 77. Vergleich von mechanischer mit sprengtechnischer Zerkleinerung und Labor mit Großmaßstab.....	109
Abbildung 78. Verläufe der Lokalen Neigungen, abhängig von Prozessen und Maßstäben.....	111
Abbildung 79. Korrelation von gezählten und gerechneten Teilchenanzahlen.	119
Abbildung 80. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off für ALZO Kalkstein.....	120
Abbildung 81. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off BBK Beton	120
Abbildung 82. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off für Bärarp Gneis.....	121
Abbildung 83. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off für Bitustein Amphibolit.....	121
Abbildung 84. Linearitätsbereiche der verschiedenen Gesteine (In diesem Diagramm werden die Teilchen pro Klasse dargestellt normiert auf 1 Teilchen in der Klasse 31,5 mm - 63 mm. Verbindungslinien zwischen den im Diagramm dargestellten Punkten dienen nur dazu, die Teilchenzahl der einzelnen Korngrößenklassen besser zum Ausdruck zu bringen).....	125
Abbildung 85. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im Bärarp Gneis.....	129
Abbildung 86. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im BBK Beton.....	129
Abbildung 87. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im ALZO Kalkstein.....	130
Abbildung 88. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im SST Sandstein	130
Abbildung 89. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im Bitustein Amphibolit.....	131
Abbildung 90. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im Bärarp Gneis.....	132
Abbildung 91. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im BBK Beton.....	132
Abbildung 92. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im ALZO Kalkstein.	133
Abbildung 93. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im SST Sandstein.	133
Abbildung 94. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im Bitustein Amphibolit.....	134
Abbildung 95. Berechnung der 50%-Anteile aus der Summe der Einzelkörner	135
Abbildung 96. Darstellung der Lokalen Neigungen und der Lokalen Minima aus den Siebergebnissen	136
Abbildung 97. Korrelation zwischen Minima aus GGS-Netz und 50 % Einzelkörnern	137
Abbildung 98. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für BA Gneis.....	139
Abbildung 99. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für BBK Beton.....	139
Abbildung 100. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für ALZO Kalkstein	140



Abbildung 101. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für SST Sandstein	140
Abbildung 102. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für Bitustein Amphibolit	141
Abbildung 103. Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der In situ-Korngrößen verschiedener Gesteine.....	143
Abbildung 104. Summenkurven der In situ-Korngrößenverteilungen.....	144
Abbildung 105. Rückstandskurven der In situ-Korngrößenverteilungen.....	145
Abbildung 106. Zusammenhänge zwischen lokalen Minima und In situ-Korngröße	146
Abbildung 107. NBC Diagramme für Amphibolit, Sandstein und Alzo Kalkstein.....	148
Abbildung 108. Basisdiagramm für die Beurteilung der Selbstähnlichkeit	149
Abbildung 109. NBC-Charakteristik aus Durchschnitssproben verschiedener Materialien.....	150
Abbildung 110. Verlauf der Lokalen Neigungen im Feinbereich < 100 µm anhand der Proben vom Institut für Aufbereitung.....	151
Abbildung 111. Berechnung der 50%-Anteile aus der Summe der Einzelkörner	153
Abbildung 112. Rückstandskurven der In situ-Korngrößenverteilungen.....	154



Tabellen

Tabelle 1. Betonrezeptur für Magnetitbeton (alle Angaben in Massen-%).....	13
Tabelle 2. Zusammenfassung der Materialparameter der Gesteine aus dem Less Fines Projekts (- = nicht gemessen).....	13
Tabelle 3. Zusammenfassung der Materialparameter der Gesteine aus dem Blast Control.....	14
Tabelle 4. Zusammenfassung der Materialparameter der Gesteine aus den anderen Forschungsprojekten des Institutes für Bergbaukunde (* Olsson et al. 2003).....	15
Tabelle 5. Darstellung der tatsächlich gesiebten und der an die DIN-Norm angepassten Siebschritte anhand des Beispiels von Amphibolit, Probe BIT 21	30
Tabelle 6. In situ Korngrößenverteilung am Beispiel von Schliffen der Proben BIT 66-1 bis BIT 66-3, ALZO 81 ALZO 82, ALZO 83, BA 1-1 und BA 1-2 (Basis für die KGV sind Sehnenschnittlängen)	39
Tabelle 7. Sprengversuche in Magnetitbeton.....	41
Tabelle 8. Sprengversuche im Amphibolit	42
Tabelle 9. Sprengversuche in Bärarp Gneis	42
Tabelle 10. Knäppersprengungen in Amphibolit.....	43
Tabelle 11. Details der Großsprengungen im Bärarp- Steinbruch (Moser et al. 2003).....	43
Tabelle 12. Großsprengung 420-4/2003 und eine unrepräsentative Probe einer Großsprengung im Steinbruch Eibenstein	44
Tabelle 13. Mechanische Zerkleinerungsversuche in Magnetitbeton	44
Tabelle 14. Daten von Aufbereitungsproben vom Steinbruch Eibenstein.....	45
Tabelle 15. Bestimmung der Selbstähnlichkeit von 11 Korngrößenverteilungskurven für Amphibolit.	53
Tabelle 16. Darstellung der p-Wellengeschwindigkeiten von im Stahlrohr gesprengten und völlig unbeanspruchten Proben (Miklautsch 2002). *Die Proben MBC 1/3 und MBC 1/4 wurden aus einen unbeanspruchten Betonwürfel MBC 20 ausgebohrt.	65
Tabelle 17. Lage und Position der Minima der Lokalen Neigungen.....	113
Tabelle 18. Darstellung der Kugelanteile als „Kornfaktor“	117
Tabelle 19. Vergleich von gezählten und gerechneten Teilchenanzahlen mit 100 % Kugelanteil. Die färbig markierten Felder zeigen den Bereich in dem die Zählung und die Berechnung der Teilchenzahlen laut der Definition des Cut-Offs nicht mehr übereinstimmen.	118
Tabelle 20. Linearitätsbereiche mit k, N und dazugehörigen Steigungswerten (a-Werte).....	124
Tabelle 21. Ergebnisse der Dünnschliffauszählungen (Angaben in %).	128
Tabelle 22. Berechnetes 50 %-Einzelkörner-Minimum und Lokale Minima aus den GGS-Plots der untersuchten Proben	136
Tabelle 23. Berechnetes 50 %-Einzelkörner-Minimum und Lokale Minima aus den GGS-Plots der untersuchten Proben und die Minima aus dem Kurven-Schnittpunkt „Einzelkörner plus 2–7 Aggregate“ mit „> 7 Aggregate“	138
Tabelle 24. Summenkurven der In situ-Korngrößenverteilungen der untersuchten Gesteine. (Basis für die Summenkurven sind Sehnenschnittlängen).....	143
Tabelle 25. Berechnetes 50 %-Einzelkörner-Minimum und Lokale Minima aus den GGS-Plots der untersuchten Proben, verglichen mit den Rückstandswerten aus der In situ-Korngrößenverteilung.	145



1. Kurzfassung und Abstract

1.1. Kurzfassung

Die natürliche Bruchcharakteristik (NBC) von Gesteinen in der Sprengtechnik

Die natürliche Bruchcharakteristik (NBC) ist in der mechanischen Zerkleinerung hinlänglich bekannt. Ziel der vorliegenden Arbeit war es zum ersten, den Gültigkeitsbereich der NBC auf die Sprengtechnik auszuweiten, zum zweiten eine messbare Definition für die NBC aufzustellen und drittens herauszufinden, welche Materialparameter die Bruchcharakteristik bedingen.

Die NBC wird durch die Bewertung der Selbstähnlichkeit als messbarer Parameter bestimmt. Definitionen wie „Hochselbstähnlich“, „Selbstähnlich“ und „Schwachselbstähnlich“ werden vorgestellt. Die NBC eines Gesteines wird aber nicht nur durch die charakteristische Ausformung der Korngrößenverteilung in log-log Darstellung definiert sondern auch durch Lage und Position des Neigungsminimums der Verteilungskurve – genannt das „Lokale Minimum“. Das Lokale Minimum ist – im Gegensatz zur Charakteristik der Verteilung unbeeinflusst vom Prozess und von der Größe der untersuchten Proben.

Aus der Analyse von Streupräparaten aus Zerkleinerungsprodukten konnte eine Verteilungskurve von Einzelkörnern und Aggregaten ermittelt werden. Die Korngröße, bei der der Anteil an Einzelkörnern unter 50 % fällt, entspricht dem Lokalen Minimum.

Beim Auszählen von Dünnschliffen unzerkleinerten Materials wurde eine In situ Korngrößenverteilung ermittelt. Das pro Gestein auftretende Maximalkorn aus der Rückstandskurve korreliert mit allen vorher beschriebenen Minima.

Somit konnte das Lokale Minimum, das eine relative Abreicherung von Teilchen darstellt, durch 3 messbare Größen mit dem Materialgefüge bzw. der Materialzusammensetzung in Zusammenhang gebracht werden.



1.2. Abstract

The natural breakage characteristics (NBC) of rocks in blasting

The natural breakage characteristic (NBC) is well known in mechanical comminution processes. The aims of this Thesis were first to validate the NBC for rock-blasting, second to develop a procedure for a measurable definition of the NBC and third to find those material parameters which are responsible for the existence of a natural breakage-characteristics.

The NBC is defined as a measurable parameter through the evaluation of the self similarity. New definitions like 'highly self similar', 'self similar' and 'weakly self similar' have been introduced. The NBC of a rock-material is not defined only by the characteristics of the particle size distribution curves in log-log scale but also by the position and size of the minimum slope of the particle size distribution curve – called "Local Minimum" The Local Minimum is – unlike the gradient of the Local Slopes –independent of the comminution-process and the scale of the samples investigated.

Preparations of polished thin sections from material from the different grain size classes (< 2 mm) were used to determine distribution curves from single grains and aggregates. The grain size where the proportion of single grains falls below a value of 50 % is the position of the Local Minimum.

Thin-sections of not comminuted material have been prepared. From there In situ grain size-distributions have been determined. The determined maximum grain size of each material correlates with the minima described above.

Consequently the Local Minimum, which is caused by a relative diminution of grains in the certain grain size-class, could be defined by three measurable parameters, which define a material-structure.



2. Gegenstand und Ziel der Dissertation

2.1. Hintergrund

Die Gewinnung von mineralischen Rohstoffen durch Sprengarbeit zielt heute zunehmend auf die Bereitstellung einer bestimmten Korngrößenverteilung des Hauwerkes für den weiteren Produktionsprozess ab. Die optimale Korngrößenverteilung unterscheidet sich dabei von Betrieb zu Betrieb und reicht von groben Blöcken (Werksteingewinnung) bis zu grober Korngrößenverteilung mit geringem Feinkornanteil, hin bis zu möglichst viel Feingut.

Das beachtliche mögliche wirtschaftliche Einsparungspotential in der Rohstoffgewinnung aus einer Optimierung der Korngrößenverteilung des Hauwerkes durch die Sprengarbeit wird durch die Tatsache deutlich, dass etwa in vielen Steinbrüchen 5 bis 30 % der Gesamtrohsteingewinnung als zu fein anfallen und anschließend entweder verhaldet werden müssen oder bestenfalls als minderwertiges Gut verkauft werden können. Darüber hinaus beeinflusst ein hoher Knäpperanteil im Rohhauwerk vielerorts sowohl die Produktivität der Ladearbeit als auch den Durchsatz am Primärbrecher. (Moser *et al.* 2003).

Es besteht demnach eine entsprechende Motivation zum einen festzustellen, inwieweit die Korngrößenverteilung von gesprengtem Hauwerk durch die Sprengarbeit beeinflusst werden kann und zum anderen das Korngrößenergebnis einer Sprengung in Abhängigkeit der Gebirgseigenschaften und der angewandten Sprengtechnik vorhersagen zu können.

Im Hinblick auf das Entwickeln von Ansätzen zur Vorhersage der möglichen Korngrößenverteilung von Sprenghauwerk wurde auf das von Steiner (1990, 1998) am Institut für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben entwickelte Konzept der „Natürlichen Bruchcharakteristik von Gesteinen“ zurückgegriffen.

Nach Steiner (1990) kann man von der Erfahrung ausgehen, dass die maschinen- und lenkungsbedingten Einflüsse auf die Korngrößenstreuung von Zerkleinerungsprodukten vor allem im Grobkornbereich hervortreten, wogegen die Korngrößenverteilungen im Feinkornbereich vorwiegend von der stofflichen Eigenart des Zerkleinerungsgutes bestimmt werden. In gewissem Ausmaß beeinflussbar ist zwar der Feingut-Mengenanteil, nicht aber seine Korngrößenverteilung. Daher ist die natürliche Bruchcharakteristik in den Feingutanteilen zu suchen.

Weiter führt Steiner (1990) wie folgt aus: „Die Erfahrung lehrt auch, dass alle Bemühungen um eine Verringerung der Korngrößenstreuung durch die bekannten schaltungstechnischen Maßnahmen einer Kreislaufzerkleinerung mit trennscharfer Klassierung an eine stoffeigene Grenze stoßen. Diese Grenze möge nun als die, natürliche Bruchcharakteristik‘ verstanden werden.“



Im Rahmen von 2 Forschungsprojekten der Europäischen Union – Blast Control (Project N°: BE97 – 4604) und Less Fines (GRD-2000-25224) – wurde am Institut für Bergbaukunde der Montanuniversität Leoben versucht, die Gesetze der Natürlichen Bruchcharakteristik (im weiteren als NBC bezeichnet) auch auf die sprengende Zerkleinerung anzuwenden und als Materialparameter für die Auslegung von Sprenganlagen heranzuziehen.

2.2. Ziel der Dissertation

Für die Anwendung des Konzeptes der Natürlichen Bruchcharakteristik zur Vorhersage der Korngrößenverteilung von Sprenghauwerk wurden u. a. folgende Fragen erhoben:

- a) Inwieweit ist die nach *Steiner (1990)* definierte „Natürliche Bruchcharakteristik“ auch in der Korngrößenverteilung von Sprenghauwerk zu finden?
- b) Weist der Feinanteil im Sprenghauwerk eine der Natürlichen Bruchcharakteristik ähnliche Charakteristik auf?
- c) In welchem Ausmaß und insbesondere bis zu welcher Korngröße wird die Charakteristik der Korngrößenverteilung eines Sprengergebnisses von der Natürlichen Bruchcharakteristik beeinflusst?

In einem ersten Untersuchungsschritt hat *Reichholf (2004)* dazu in seiner Dissertation anhand der Untersuchung der Korngrößenverteilung von gesprengten Gesteinsproben nachgewiesen, dass die natürliche Bruchcharakteristik nach Steiner auch beim sprengenden Zerkleinern von Gestein von Relevanz ist.

Die auf den Arbeiten von *Reichholf (2004)* aufbauende gegenständliche Dissertation verfolgt nun folgende Ziele:

- Entwicklung eines Verfahrens zur ingenieurmäßigen Beschreibung der NBC von Gesteinen insbesondere im Hinblick auf die Anwendung in der Sprengtechnik.
- Untersuchung des Verhaltens und Vergleich der NBC in unterschiedlichen Zerkleinerungsprozessen.
- Untersuchung zur Erklärung des Phänomens der Natürlichen Bruchcharakteristik anhand von physikalischen Parametern.



Dazu ist im Detail folgendes auszuführen:

- *Reichholf 2004* hat den Nachweis der Relevanz der NBC für das Zerkleinerungsergebnis der Sprengarbeit erbracht. Er hat jedoch noch keine klare Eingrenzung des „ Auftretens“ der NBC insbesondere in Richtung der Grobkornflanke von Sprenghauwerk ausgearbeitet. Aus den bisherigen Arbeiten geht nur qualitativ hervor, dass sich Zerkleinerungsergebnisse im Mittel- und Grobkornbereich nicht mehr charakteristisch zur NBC verhalten. Diese Abgrenzung des NBC-Bereiches eines Gesteins soll in der gegenständlichen Arbeit untersucht werden.
- Die Anwendung der NBC in der Sprengtechnik zur Vorhersage eines Zerkleinerungsergebnisses erfordert, dass eine Aussage über die Verteilungscharakteristik von zerkleinertem Gut im Voraus getroffen werden kann. Dabei soll nun im Rahmen dieser Arbeit eine Vorgehensweise erarbeitet werden, die es erlaubt, den NBC-Bereich eines Materials gleichsam als Materialparameter festzulegen. Damit soll eine Prognosemöglichkeit geschaffen werden, wie für einen üblichen Sprengzerkleinerungsprozess der Aufbau einer Korngrößenverteilungskurve im NBC-Bereich beschaffen ist.
- Schließlich ist es für die Entwicklung eines Konzeptes zur Prognose der Korngrößenverteilung und auch der Abklärung der Veränderbarkeit eines Zerkleinerungsergebnisses von großer Bedeutung auch zu ergründen, wodurch die NBC eines Gesteines bedingt ist und welche Umstände dazu führen, dass sich ein Material charakteristisch zerkleinert.



3. Der Begriff der Natürlichen Bruchcharakteristik

3.1. Allgemeines

Ganz allgemein gesprochen bezeichnet das Phänomen der Natürlichen Bruchcharakteristik (im weiteren als NBC bezeichnet) den Umstand, dass die Verteilung der Bruchstücke eines zerkleinerten Gutes eine materialspezifische Regelmäßigkeit aufweist und zu dem die Charakteristik der Verteilung von Bruchstücken durch einen Zerkleinerungsprozess nicht beliebig veränderbar ist.

Die NBC ist – vor allem in der Aufbereitung – seit längerem bekannt. Im deutschsprachigen Raum wird diese Beschreibung des Bruchverhaltens von Gesteinen zur Auslegung und Dimensionierung von Aufbereitungsmaschinen, speziell für Brecher und Mühlen eingesetzt.

In der Sprengtechnik hat das NBC-Konzept bisher noch keinen Eingang gefunden. Alle Untersuchungen zum sprengtechnischen Zerkleinerungsverhalten von Gestein (Cunningham 1987, Djordjevic 1999, Onederra 2004) und seine Beeinflussbarkeit gehen im Prinzip davon aus, dass das Zerkleinerungsergebnis im Hinblick auf die Korngrößenverteilung beliebig veränderbar bzw. steuerbar ist.

3.2. Auswertung der Literatur

3.2.1. Definition der NBC nach Steiner

Steiner (1990) beschreibt die NBC wie folgt:

„...die Erfahrung lehrt auch, dass alle Bemühungen um die Verringerung der Korngrößenstreuung durch die bekannten schaltungstechnischen Maßnahmen einer Kreislaufzerkleinerung mit trennscharfer Klassierung stets an eine stoffeigene Grenze stoßen. Diese Grenze möge nun als die ‚Natürliche Bruchcharakteristik‘ verstanden werden. Ihr Merkmal ist die kleinstmögliche Korngrößenstreuung, die bei einer Körnermengenzerkleinerung auf eine eindeutig definierte Maximalkorngröße erreichbar ist. Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen der Korngrößenstreuung und der spezifischen Oberfläche folgt der Satz: Für jede Maximalkorngröße gibt es eine Natürliche Bruchcharakteristik mit einem stofftypischen Maximum an Mengeninhalt der Grobkornflanke und einem stoffspezifischen Minimum an spezifischer Oberfläche. ...“

Diese Definition gilt für die optimierte Zerkleinerungskette (OZK), bei der es sich um eine energieoptimierte Kreislaufzerkleinerung handelt. Energieoptimiert heißt in diesem Zusammenhang, dass nur Material, welches die Grenzkorngröße noch nicht unterschritten hat, wieder der Zerkleinerung zugeführt wird (Steiner 1990).



Steiner unterscheidet zwischen homogenem und inhomogenem Zerkleinerungsverhalten. Unter homogenem Zerkleinerungsverhalten versteht er die Linearisierbarkeit einer Zerkleinerungskurve im Gates Gaudin Schuhman Netz (GGS Netz), das den Summendurchgang über der entsprechenden Korngröße in einem log-log Diagramm darstellt.

Die NBC wird von *Steiner (1990)* in 3 Ähnlichkeitssätzen mit variierenden Randbedingungen wie folgt mathematisch beschrieben:

Randbedingungen: $k_p = \text{var.}; k = \text{const.}$

Vereinbarung: $n_k = d \log D / d \log k$

Beobachtung: $n_k = \text{const.}$

Dadurch ergibt sich für die Korngrößenbezogene Häufigkeitsdichte:

$$dD/dk = n_k (D/k)$$

Gleichung 1

wobei k ... Korngröße, D ... Siebdurchgang, k_p ... Maximalkorngröße, n_k ... Korngrößenbezogene Steigung darstellt.

3.2.2. Ergebnisse der Untersuchungen von Reichholf

Reichholf (2004) hat in seiner Dissertation an Hand der Untersuchung von sprengtechnisch zerkleinerten Gesteinen und Beton folgende grundlegende Beobachtungen gemacht:

- Die Charakteristik der Verteilung der Körner von gesprengtem Gestein und Beton weist im Fein- bis Mittelkornbereich eine materialspezifische Regelmäßigkeit auf.
- Die Charakteristik der Korngrößenverteilung von gesprengtem Gut ist für das gleiche Gestein dem Gut aus einer Aufbereitungszerkleinerung selbstähnlich.
- Auch für sprengtechnisch zerkleinertes Material besteht eine sehr gute Korrelation zwischen dem Energieeintrag und der beim Zerkleinerungsvorgang geschaffenen neuen Oberfläche.



Reichholf (2004) hat auch versucht, eine Verbindung zwischen der Rissausbreitung in einem Gestein und der Korngrößenverteilungscharakteristik herzustellen. Dabei hat er folgendes beobachtet:

Bildet sich die Summenverteilung der Körner eines gesprengten Gesteins im logarithmischen GGS-Netz als Gerade ab, so breiten sich die Risse in diesen Materialien (Siderit und Magnesit) bevorzugt durch die Körner entlang von Spaltbarkeiten aus. Zeigt sich im GGS Netz eine gebogene Kurve, breiten sich die Risse bevorzugt um die Körner herum aus (Beton, Sandstein, Dolomit, Kalkstein).

Eine Untersuchung des Gefüges der Gesteine an Hand von Dünnschliffen erbrachte aber keine klaren Zusammenhänge mit den Charakteristiken (Höckern und Biegungen) der Korngrößenverteilungskurven der zerkleinerten Gesteine in der GGS Darstellung.

3.2.3. Zerkleinerbarkeit nach Rittinger

Die Hypothese von Rittinger beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag während des Zerkleinerungsprozesses und der resultierenden Oberfläche des Zerkleinerungsproduktes. Gemäß dieser Hypothese (Gleichung 2) ist der Rittinger-Koeffizient (R) ein Parameter, welcher den Widerstand eines Materials gegen Zerkleinerung darstellt.

$$a_s = R \times f$$

Gleichung 2

Wobei:

a_s spezifische Oberfläche [cm^2/g], R Rittinger Koeffizient [cm^2/J], f spezifischer Nettoenergieeintrag [J/g]

Der Rittinger-Koeffizient R in [cm^2/J] wird auf der Basis der natürlichen Bruchcharakteristik eines Gesteins bestimmt und korreliert neu geschaffene Oberfläche mit dem Nettoenergieeintrag. Zerkleinerungssysteme die entsprechend dem Prinzip der Optimierten Zerkleinerungskette (OZK) entworfen sind zeigen einen relativ konstanten Rittinger-Koeffizienten in aufeinander folgenden Zerkleinerungsschritten in einem großen Dispersitätsbereich (*Steiner 1998*).

Der Rittinger Koeffizient von OZK-Produkten reicht von $R = 10 \text{ cm}^2/\text{J}$ bis zu $R = 150 \text{ cm}^2/\text{J}$. Generell kann gesagt werden, je niedriger der Rittinger Koeffizient eines Materials ist, desto höher ist der Widerstand des Materials gegen Zerkleinerung.

Ein wichtiger Aspekt in der technischen Zerkleinerung ist der Aufwand an Energie, der notwendig ist, eine bestimmte Korngrößenverteilung zu schaffen. Abbildung 1 zeigt die Beziehung zwischen dem Energieeintrag während eines Zerkleinerungsprozesses und der resultierenden spezifischen Oberfläche des Zerkleinerungsproduktes.

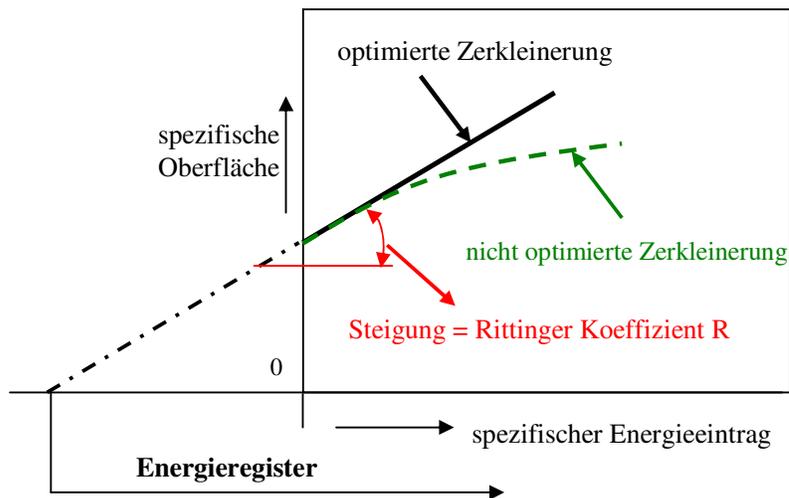


Abbildung 1. Energieregister Funktion

Die gerade Linie (schwarze durchgehende Gerade) in Abbildung 1 stellt einen Materialparameter dar (Steiner 1998). Eine nicht Optimierte Zerkleinerung verbraucht mehr Energie, um einen bestimmten Anteil an neuer Oberfläche zu schaffen, als eine nicht optimierte Zerkleinerung. Diese nicht optimierte Zerkleinerung ist in Abbildung 1 durch eine degressive Kurve dargestellt (grüne, strichlierte Linie).

3.2.4. Workindex W_i nach Bond für die Sprengarbeit

Bond & Whitney (1959) zeigen, dass die Energie, die erforderlich ist, Gestein sprengtechnisch zu zerkleinern auf derselben Basis wie in der mechanischen Zerkleinerung bewertet werden kann. Die notwendigen Informationen dafür sind:

- Masse von gesprengtem Hauwerk
- Der k_{80} Wert (Korngröße bei einem Durchgang von 80%)
- Masse an verwendetem Sprengstoff
- Den massenspezifischen Energieinhalt des Sprengstoffes



Der Workindex (W_i) nach Bond (*Bond 1952*) ist die erforderliche Energie in Kilowattstunden pro Tonne zu zerkleinerndes Material von einer theoretisch unendlichen Ursprungsgröße auf 80 % kleiner 100 μm .

$$W = \frac{10 \cdot W_i}{\sqrt{k_{80}}} - \frac{10 \cdot W_i}{\sqrt{P_{80}}}$$

Gleichung 3

wobei W ist der Energieeintrag in kWh/t,

P_{80} der 80 % Durchgangswert/größe (aus der Summenkurve) des Aufgabegutes in μm ,

k_{80} der 80% Durchgangswert/größe des Endproduktes in μm und

W_i der Work Index nach Bond.

In der Sprengtechnik gilt wegen der theoretisch unendlichen Aufgabegröße:

$$W_i = \frac{W \cdot \sqrt{P_{80}}}{10} \quad \text{und} \quad P_{80} = 100 \cdot \left(\frac{W_i}{W} \right)^2$$

Gleichung 4

Wobei W_i der Work Index nach Bond ist, P_{80} den 80 % Durchgangswert des Aufgabegutes in mm darstellt und W den Energieeintrag in kWh/t.



4. Durchgeführte Experimente und Art der Analysen

4.1. Einleitung

4.1.1. Allgemeines

Für das Erreichen der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Ziele der gegenständlichen Arbeit wurden am Institut für Bergbaukunde und am Institut für Aufbereitung der Montanuniversität Leoben folgende Untersuchungen durchgeführt:

- a) Einzelbohrlochsprengversuche im Labormaßstab an Gesteins- und Betonproben mit einer Masse von 4 kg bis 170 kg
- b) Einzel- und Mehrbohrlochsprengversuche im Halbmaßstab an Knäppern
- c) Großsprengversuche in Steinbrüchen
- d) Sprengversuche im Labormaßstab mit besonderer Anordnung
- e) Aufbereitungstechnische Zerkleinerungsversuche im Labormaßstab
- f) Beprobung von Gesteinsmaterial von Aufbereitungsanlagen
- g) Spezielle mechanische Zerkleinerungsversuche: einaxiale Druckversuche, Gesteinsspaltversuche mit Quellzement

Für alle oben angeführten Versuche wurden das Sprenghauwerk bzw. das mechanisch zerkleinerte Gut jeweils vom Maximalkorn bis zu einer Korngröße $< 63 \mu\text{m}$ abgesiebt.

Die für eine Beurteilung der Charakteristik der Korngrößenverteilungskurven aus der Sprengarbeit verwendeten Korngrößenverteilungen von Produkten der optimierten Zerkleinerungskette wurden sowohl am Institut für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben im Rahmen einer allgemeinen Zusammenarbeit mit dem Bergbaukundeinstitut als auch als Beitrag zum EU-Projekt Less Fines (*Böhm & Mayerhofer 2001*) bestimmt.



4.1.2. Verwendete Materialien

Für die Untersuchungen im Rahmen der gegenständlichen Dissertation wurden in erster Linie folgende Materialien verwendet:

- Magnetitbeton, angefertigt am Institut für Bergbaukunde nach dem Rezept dargestellt in Tabelle 1 und immer zwischen 28 und 31 Tage unter 100 % Luftfeuchtigkeit ausgehärtet (BBK Beton, MBW)
- Amphibolit aus dem Steinbruch Eibenstein der Firma Hengl Bitustein, Österreich (BIT)
- granitischer Gneis aus dem Steinbruch Bårarp, Schweden (BA Gneis)

Zusätzlich wurden für die Analysen im Rahmen der gegenständlichen Dissertation auch noch Ergebnisse von Versuchen herangezogen, welche an folgenden Materialien durchgeführt wurden:

- Kalkstein aus dem Steinbruch El Alto der Firma Cementos Portland, Spanien (CP)
- 4 verschiedene Kalkstein Typen der Firma Nordkalk aus dem Steinbruch Storungs, Gotland, Schweden. Die 4 Kalkstein Typen sind:
 - Reef Typ (NK R)
 - Krinoid Typ (NK K)
 - Fragmentory Typ (NK F)
 - Stromatoporoid Typ (NK S)
- Dolomit aus dem Steinbruch der Firma Marche les Dames Lhoist, Belgien (DMD)
- Kalkstein aus dem Steinbruch ALZO der Firma Calcinor, San Sebastian, Spanien (ALZO)
- Sandstein aus dem Steinbruch Imberg, Deutschland (SST Sandstein)
- Magnesit aus dem Bergbau Breitenau, Österreich (BR Magnesit)
- Siderit aus dem Bergbau Eisenerz, Österreich (Siderit EB)

Die vorstehend angeführten Materialien umfassen zum einen Gesteine, deren Zerkleinerungsverhalten im Rahmen des EU Projektes Less Fines untersucht wurde und zum anderen Gesteine, die auch *Reichhoff 2004* im Rahmen seiner Dissertation untersuchte.



Zement	Wasser	Quarzsand 0,1 -0,3mm	Fe-Pigment /Magnetit	Verflüssiger	Entschäu- mer
25,9 %	15,5 %	52,4 %	5,8 %	0,26 %	0,13 %

Tabelle 1. Betonrezeptur für Magnetitbeton (alle Angaben in Massen-%)

Die Charakterisierung der im Rahmen des EU Projektes Less Fines (GRD-2000-25224) verwendeten Gesteine ist im Detail im Bericht „Characterization of the mechanical properties of the rock“ (Grasedieck et al. 2004) beschrieben. Die Tabelle 2 zeigt zusammenfassend die wichtigsten Materialparameter für diese Gesteine.

Parameter	CP	BIT (normal zur Schieferung)	BIT (paral- lel zur Schieferung)	NK K	NK S	NK F	NK R
Dichte ρ [g/cm ³]	2,51	2,92	2,93	2,61	2,65	2,54	2,62
p-Wellengeschwindigkeit [m/s]	6880	6612	6950	5853	4535	4365	4582
s-Wellengeschwindigkeit [m/s]	6130	-	-	-	-	-	-
Statischer Emodul E_{stat} [GPa]	63,9	122	50	65	41	41	48
Dynamischer Emodul E_{dyn} [GPa]	90	178	88	93	55	58	54
Druckfestigkeit DF [MPa]	44	104	92	54	78	45	82
Keilspaltzugfestigkeit KZF [MPa]	6,5	15,1	12,8	6,6	4,3	5,4	4,6
charakteristische Länge $L_{ch}(E_{sta}; KZF)$ [mm]	172	235	76	210	254	175	307
Bruchenergie GF [N/m]	113	440	253	140	113	121	134
Diametral Druckfestigkeit DDF [MPa]	7,3	20,8	20,8	7,6	8,3	5,9	7,8

Tabelle 2. Zusammenfassung der Materialparameter der Gesteine aus dem Less Fines Projekts (- = nicht gemessen)

Die Charakterisierung der im Rahmen des EU Projektes Blast Control (Project N°: BE97 – 4604) verwendeten Gesteine ist im Detail in der Dissertation Reichholf (2004) dargelegt. Die Tabelle 3 zeigt zusammenfassend die wichtigsten Materialparameter für diese Gesteine.



Parameter	DMD	Siderit EB	ALZO
Dichte ρ [g/cm ³]	2,7	3,5	2,7
p-Wellengeschwindigkeit c_p [m/s]	3927	5855	6456
s-Wellengeschwindigkeit c_s [m/s]	2099	3467	3954
Statischer E-Modul E_{stat} [GPa]	58	82	70
Dynamischer E-Modul E_{dyn} [GPa]	40	101	98
Druckfestigkeit (DF) [MPa]	114	178	98
Zugfestigkeit (ZF) [MPa]	8,1	9,3	5,5
Point Load Index I_{S50} [MPa]	4,2	5,0	2,7
Zähigkeit / Toughness T [1]	14	19	18
Keilspaltfestigkeit σ_z [MPa]	3,0	-	5,7
charakteristische Länge l_{CH} [mm]	958	-	311
Spezifische Bruchenergie G_F [N/mm]	186	-	119
dyn. Schubmodul G_{dyn} [GPa]	14	41	41
dyn. Kompressionsmodul K_{dyn} [GPa]	31	62	54
dyn. Poisson Verh. μ_{dyn} [1]	0,2	0,2	0,3
offene Porosität Po [%]	2,7	0,7	1,6

Tabelle 3. Zusammenfassung der Materialparameter der Gesteine aus dem Blast Control

Die wichtigsten Materialparameter aus der im Rahmen anderer Forschungsgebiete des Institutes für Bergbaukunde verwendeten Materialien finden sich in Tabelle 4. Der BR-Magnesit und der SST-Sandstein sind im Detail in der Dissertation von *Reichholf (2004)* und der BBK Beton in der Diplomarbeit von *Miklantsch (2003)* dargelegt. Für den Bärarp Gneis wurden bislang noch keine Materialparameter bestimmt.



Parameter	BR Magnesit	SST Sandstein	BBK Beton	BA Gneis
Dichte ρ [g/cm ³]	3	2,6	2,17	-
p-Wellengeschwindigkeit c_p [m/s]	6392,5	4158,3	4036	5600*
s-Wellengeschwindigkeit c_s [m/s]	4303,3	2895,7	-	-
Statischer E-Modul E_{stat} [GPa]	47,3	29,3	18,1	-
Dynamischer E-Modul E_{dyn} [GPa]	110	48,1	25,8	-
Druckfestigkeit (DF) [MPa]	81,4	139,7	45,2	250*
Zugfestigkeit (ZF) [MPa]	12,8	7,7	-	12*
Point Load Index I_{S50} [MPa]	6,1	5,7	-	-
Zähigkeit / Toughness T [1]	6,4	18,1	-	-
Keilspaltfestigkeit σ_z [MPa]	7	7,4	-	-
charakteristische Länge l_{CH} [mm]	230,5	165,3	-	-
Spezifische Bruchenergie G_F [N/mm]	308,5	244,1	-	-
dyn. Schubmodul G_{dyn} [GPa]	54,8	20,2	-	-
dyn. Kompressionsmodul K_{dyn} [GPa]	73,1	25,9	-	-
dyn. Poisson Verh. μ_{dyn} [1]	0,2	0,2	-	-
offene Porosität P_o [%]	0,6	1,5	-	-

Tabelle 4. Zusammenfassung der Materialparameter der Gesteine aus den anderen Forschungsprojekten des Institutes für Bergbaukunde (* Olsson et al. 2003)

4.2. Sprengversuche

4.2.1. Sprengversuche im Modellmaßstab

Sprengversuche an kleinen Gesteinsproben im Labormaßstab wurden in der geschlossenen Sprengkammer des Institutes für Bergbaukunde der Montanuniversität Leoben, die sich am steirischen Erzberg befindet, durchgeführt. Während verschiedener Projekte wurden dort in den letzten 5 Jahren etwa 250 Sprengversuche an 13 verschiedenen Gesteinen und an 3 verschiedenen Typen Beton durchgeführt. Vielfältige Proben mit variierenden Massen von 4 kg bis 200 kg in Form von Prismen, Würfeln (Kantenlängen zwischen 100 mm und 600 mm), Zylindern (Durchmesser zwischen 100 mm und 300 mm) und irregulären Blöcken wurden mehrheitlich mit einem zentralen Bohrloch versehen (in der Regel \varnothing 5 mm) und mit granuliertem, mit 7 % Wachs desensibilisiertem Nitropenta (PETN) geladen. Die erreichte Ladedichte von PETN reichte von etwa 1,05–1,3 g/cm³. NO-NEL Zünder initiierten die Versuchssprengungen. Der Versuchsaufbau für die Sprengungen im Modellmaßstab ist in Abbildung 2 dargestellt.

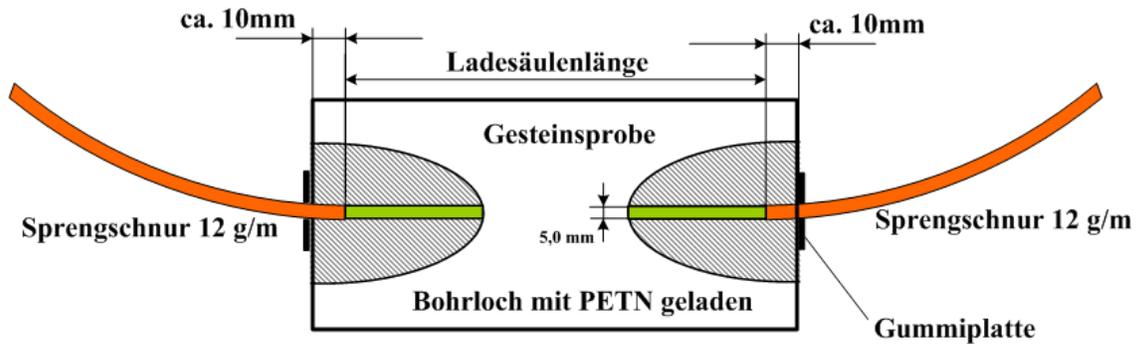


Abbildung 2. Versuchsanordnung bei in der Sprengkammer gesprengten Proben.

Nach der Sprengung wurden mit größter Sorgfalt alle Bruchstücke der Sprengproben in der Sprengkammer aufgesammelt, aufgekehrt und staubdicht in Kübel verpackt. Die Auslegung der Sprengkammer ermöglicht es praktisch 100% des gesprengten Materials verlustfrei aufzufangen (jedenfalls Gut > 1 mm). Die Gesamt-Verluste beim Sprengen in der Sprengkammer inklusive Siebverluste liegen meist bei < 0,5 %.

4.2.2. Knäppersprengungen

Zur Untersuchung des Zerkleinerungsverhaltens größerer Gesteinsblöcke (zum Teil mit größerem Bohrdurchmesser) wurden im Steinbruch Eibenstein 5 Knäppersprengungen an Amphibolit durchgeführt (Miklautsch 2003). Dies umfasste Blöcke von mehreren 100 kg bis zu mehreren Tonnen. Diese wurden in einem geschlossenen Metallcontainer gesprengt. Wie auch bei den Sprengungen im Labormaßstab wurde das Feinmaterial sorgfältig eingesammelt.



4.2.3. Großsprengungen

Für die Analyse der Korngrößenverteilung von im Vollmaßstab gesprengtem Gebirge wurden Versuchssprengungen in drei verschiedenen Steinbrüchen durchgeführt, wobei das gesprengte Hauwerk zum Großteil abgesiebt wurde. Die Großsprengungen fanden in folgenden Betrieben statt: Amphibolit Steinbruch Eibenstein der Firma Hengl Bitustein, Kalksteinbruch El Alto der Firma Cementos Portland, Spanien, Gneissteinbruch Bårarp, Schweden.

Im Steinbruch Eibenstein der Firma Hengl Bitustein wurde die Großsprengung 420-4/2003 mit etwa 2000 t abgesiebt, wobei das Größtkorn anhand von Blöcken im Hauwerk mit 1200 mm ermittelt wurde. Die gesamten 2000 t wurden auf einem Siebrost bei 100 mm abgesiebt und die Massen der beiden Fraktionen ermittelt. Aus dem Material < 100 mm wurden 8 Proben mit einer Gesamtmasse von 1,14 t genommen und mit Laborsieben bis zu 10 mm abgesiebt. Das Feinmaterial < 10 mm wurde in Leoben getrocknet und geteilt und daraus eine Sieblinie ermittelt. Details dieser Untersuchung finden sich bei *Grasedieck & Moser 2004*.

Bei Cementos Portland wurde die Großsprengung 10/2003 abgesiebt, um einerseits damit ein optisches Korngrößenmessprogramm zu kalibrieren und andererseits auch um eine Information über die Korngrößenverteilung der Großsprengung zu bekommen. Die verwendeten Siebschritte waren 100 mm, 40 mm und 20 mm. Als Größtkorn wurde 1000 mm angenommen. Das Material < 20 mm wurde beprobt und sowohl in Madrid als auch in Leoben im Labor gesiebt. (*Grasedieck & Moser 2004*). Da bei Cementos Portland mit dem Kalkstein auch Überlagerungsmaterial – bestehend aus Boden und Mergel – mit hereingesprengt werden musste, konnte diese Sprengung letztendlich leider nicht mit den Kalksteinmodellsprengungen verglichen werden. Zudem beeinflusste feuchtes Aufgabegut das Siebergebnis.



Abbildung 3. Absiebung der Großsprengung bei Cementos Portland

Im Gneissteinbruch Bärarp in Schweden wurden 7 Großsprengungen mit variierender Sprenggeometrie aber konstantem Sprengstoffenergieeintrag abgetan. Ziel der Arbeiten war es, den Einfluss der Geometrie auf den Feinkornanteil zu studieren. Nach der Sprengung wurde das Hauwerk vollständig abgesiebt und analysiert. Dabei siebte man in 3 Siebschritten die Proben ab: Zuerst wurde das gesamte Hauwerk (Knäpper ausgenommen) in einem Hercules Trommelsieb gesiebt, dann das Material < 200 mm auf einem Extec Sizer weiterverarbeitet und anschließend das Material < 25 mm nach präziser Probenteilung unter Laborbedingungen fertig gesiebt. Details dieser Versuchsprengungen sind in folgenden Veröffentlichungen beschrieben: *Olsson & Bergquist 2002, Moser et al. 2003, Moser & Grasedieck, 2003*.

4.2.4. Sprengversuche im Labormaßstab mit besonderer Anordnung

4.2.4.1 Entkoppelte Sprengladungen

Zur Prüfung der Frage, ob die Charakteristik der Feingutverteilung im Sprenghauwerk durch Reduzierung der Zermalmungszone rund um ein Bohrloch in Richtung höherer Gleichförmigkeit verschoben werden kann, wurden Versuche mit entkoppelten Sprengladungen durchgeführt. Als Entkopplungsmedien wurden neben Luft auch Silikone und Kombinationen aus verschiedenen Metallrohren (Kupfer, Messing, Stahl) verwendet.

Die Verwendung von Stahlrohrkombinationen zielte auf eine Dämpfung des Detonationsschlages rund ums Bohrloch ab (Abbildung 4, Abbildung 5). Es wurde damit auch sichergestellt, dass der

Einfluss des Gasdruckes im Bohrloch ausgeschaltet wurde, da die Stahlrohre intakt blieben. Die Proben wiesen nach der Sprengung auch unter dem Mikroskop keine Anzeichen einer Zermalmungszone oder einer Zerstörung rund um das Bohrloch auf.

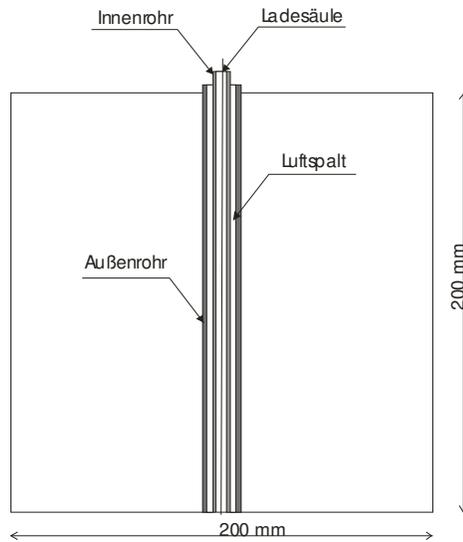


Abbildung 4. Aufbau der stahlrohrentkoppelten Sprengversuche und Foto nach der Sprengung

Da sich bei diesen Versuchen keine Zermalmungszone am Kontakt Sprengstoff-Material ausbildete, kann gefolgert werden, dass das gesamte Feinmaterial aus dem Rissbildungsvorgang kommt. Wie bei den normalen Sprengversuchen im Labormaßstab wurde auch bei den Sonderversuchen das gesamte Hauwerk aufgesammelt und vollständig bis $< 63 \mu\text{m}$ abgesiebt.



Abbildung 5. Stahlrohre im Anschliff (a), Stahlrohre nach der Sprengung (b), Visualisierung der Risse und Luftporen durch UV Licht im gesprengten Betonblock (c)

4.2.4.2 Wave Trap-Versuche

Um den Einfluss der an der Oberfläche der Sprengproben reflektierten Sprengwellen auf das Zerkleinerungsergebnis untersuchen zu können, wurden 8 Betonwürfel rund um einen zentralen, zu sprengenden Würfel angeordnet. Die rundherum angeordneten Würfel sollten während der Sprengung die Sprengwellen aufnehmen und durch diese weggeschleudert werden. So sollte eine Reflexion der Sprengwelle in den zentralen Block verhindert werden. Um eine gute Übertragung der Wellen zu gewährleisten, wurden die Fugen mit flüssigem Gips ausgefüllt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt (Miklantsch 2003).

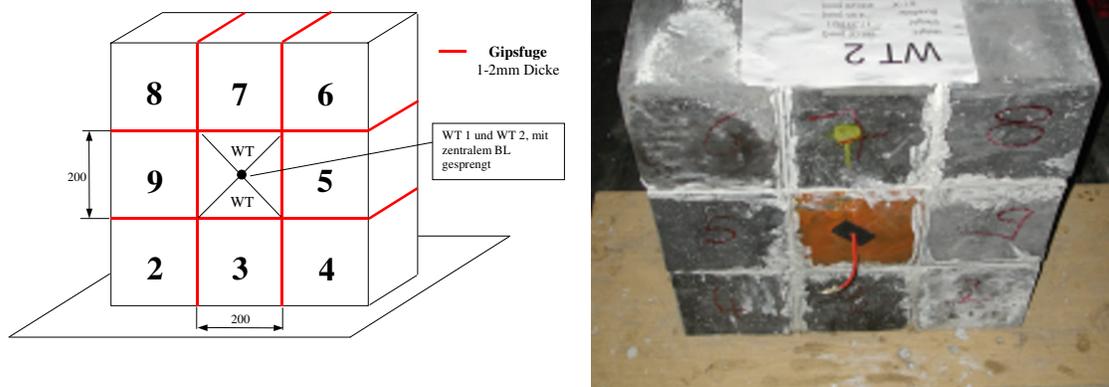


Abbildung 6. Wave Trap-Versuche

Aus normalen und Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen wurde die Wurfhöhe der Würfel gemessen und daraus die Energie abgeleitet, welche die Würfel durch die Sprengwelle aufnehmen.

Als Ergebnis der Versuche zeigte sich, dass der zentrale Sprengblock zerkleinert wurde, wohingegen die rund herum angeordneten Blöcke vollständig intakt blieben.

4.2.4.3 Sprengversuche an Betonzylindern mit Stahlummantelung

Um das Zerkleinerungsverhalten von Sprengproben mit „starrer“ Stahlummantelung studieren zu können, wurden Betonzylinder in Stahlrohre mit 110 mm Innendurchmesser und 10 mm Wandstärke eingegossen und mit einer Stahlplatte vor dem Sprengen an der Ober- und Unterseite verspannt (Abbildung 7). Wie bei den üblichen Sprengversuchen wurde ein axial im Betonzylinder angeordnetes 5 mm Bohrloch mit Nitropenta geladen.



Als Ergebnis der Sprengversuche zeigte sich, dass die Betonproben vollständig intakt blieben und nicht zerbrachen. Das Sprengbohrloch wurde lediglich von 5 mm auf etwa 10 mm vergrößert. Unter dem Mikroskop zeigten sich rund um das Bohrloch nur wenige feine Risse mit einer Länge von höchstens 2 mm.

Der übrige Bereich der Probe blieb vollkommen intakt. Dies wurde anhand von Durchschallungen und Dünnschliffuntersuchungen belegt (Miklautsch 2003).

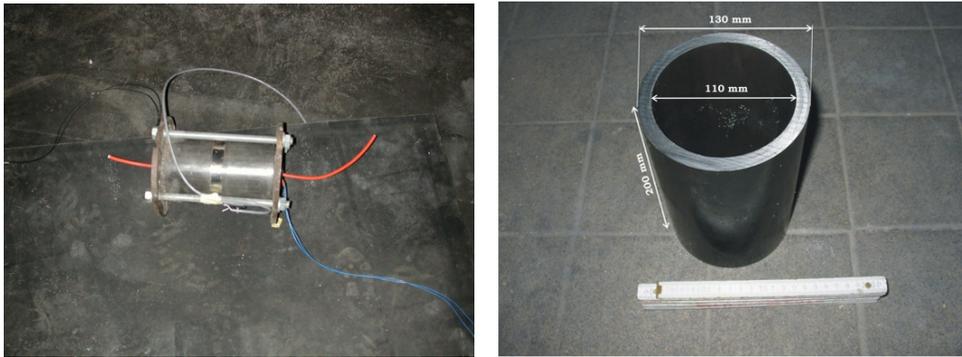


Abbildung 7. Versuchsaufbau der eingespannten Probe und gegossener BBK Betonzylinder

4.3. Mechanischen Zerkleinerungsversuche

4.3.1. Aufbereitungstechnische Zerkleinerungsversuche

Im Hinblick auf einen Vergleich des Zerkleinerungsverhaltens von gesprengten und mechanisch zerkleinerten Proben wurden Gesteinsblöcke mit einer Kantenlänge bis zu 200mm über mehrere Brech- und Mahlstufen zerkleinert. Es handelte sich dabei um energieoptimierte Kreislaufzerkleinerungen nach dem Prinzip der optimierten Zerkleinerungskette (OZK, Steiner 1998). Dabei wurde nach jeder Zerkleinerung an der Grenzkorngröße abgesiebt und nur das Material, das diese Grenzkorngröße noch nicht unterschritten hatte, noch einmal im Kreislauf aufgegeben. Dies entspricht einer energieoptimierten Zerkleinerungskette. Die Abbildung 8 zeigt als Beispiel den Zerkleinerungsstammbaum, wie er für Amphibolit verwendet wurde.

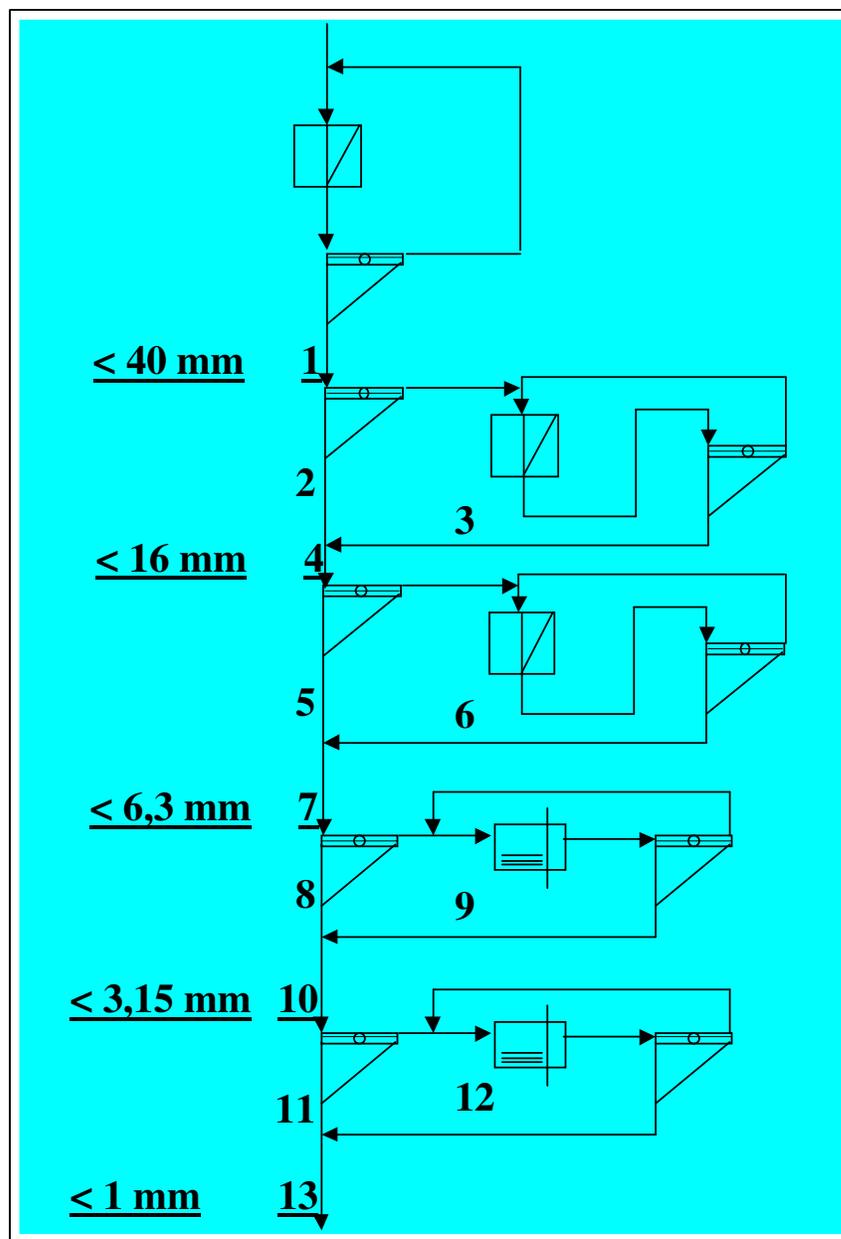


Abbildung 8. Zerkleinerungsstammbaum für Amphibolit (Böhm et al. 2002)

An den Brechern und Mühlen wurde während der Zerkleinerung die Energieaufnahme gemessen. An den Zerkleinerungsprodukten wurde die spezifische Oberfläche für die Produkte $< 40 \mu\text{m}$ und $40 \text{ bis } 100 \mu\text{m}$ gemessen und für die größeren Korngrößenklassen mittels eines Kornformfaktors rechnerisch ermittelt. Aus dem Zusammenhang zwischen Energieeintrag und neu geschaffener Oberfläche wurde der Rittinger Koeffizient abgeleitet und die Energieregisterfunktion aufgestellt.



Dies geschah in folgenden Rechenschritten:

$$a_s = \frac{f_A}{k_a}$$

Gleichung 5

Wobei:

f_A Kornformfaktor der spezifischen Oberfläche, $f_A = 6$ (Würfel, Kugel), $f_A \approx 10$ (Mineralkörner), a_s spezifische Oberfläche [cm^{-1}], k_a oberflächenäquivalente Korngröße [cm]

$$a_s = R \times f$$

Gleichung 6

Wobei:

a_s spezifische Oberfläche [cm^2/g], R Rittinger Koeffizient [cm^2/J], f spezifischer Nettoenergieeintrag [J/g]

4.3.2. Spezielle mechanische Zerkleinerungsversuche

Zur Untersuchung der Charakteristik der Verteilung von Feingut aus einer großen Breite unterschiedlicher Zerkleinerungsversuche wurden an Betonproben folgende Versuche durchgeführt:

- Zerkleinerung von 200 mm-Würfeln mittels Quellszement (BWK BETONAMIT - R) in einem zentralen Bohrloch mit einem Durchmesser von 18 mm (MBW_WT1-8QZ)
- Einaxiale Druckversuche an Kernen mit einem Durchmesser von 44,3 mm und einer Länge von 95 mm in einer hydraulischen Presse bis zum Versagen der Proben (MBK1-MBK4)
- Pointload Tests an 200 mm-Würfeln in einer hydraulischen Presse bis zum Versagen durch Aufbringen einer punktförmigen Last im Schwerpunkt der Kopffläche der Würfel (MBW_PL1 und MBW_PL1)



Das Material aus allen Zerkleinerungsversuchen wurde vollständig aufgesammelt und einer detaillierten Siebanalyse zugeführt. Die Ergebnisse der Zerkleinerungen sind in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9. Quellzementversuche (a), Druckversuche (b) und Point-Load-Versuche an einem 200 mm-Würfel (c)

4.4. Beprobung von Aufbereitungsanlagen

In Steinbruch Eibenstein der Firma Hengl Bitustein wurden während zweier Untersuchungskampagnen auch mehrere Proben von den verschiedensten Produktströmen aus der Aufbereitungsanlage genommen und neben einem Massenstrom auch eine Korngrößenverteilung bestimmt.

Ziel der Beprobungs-Kampagnen war es, den Einfluss des Aufgabegutes auf das Verhalten der Anlage einerseits und auf das Zerkleinerungsverhalten andererseits zu zeigen (Böhm et al. 2004). Von diesen Beprobungen wurden in der vorliegenden Dissertation nur jene Produktströme ausgewählt, die einerseits Feinmaterial enthielten und andererseits auch bis < 1 mm gesiebt wurden. Abbildung 10 zeigt Lage und Position der Probenahmestellen.

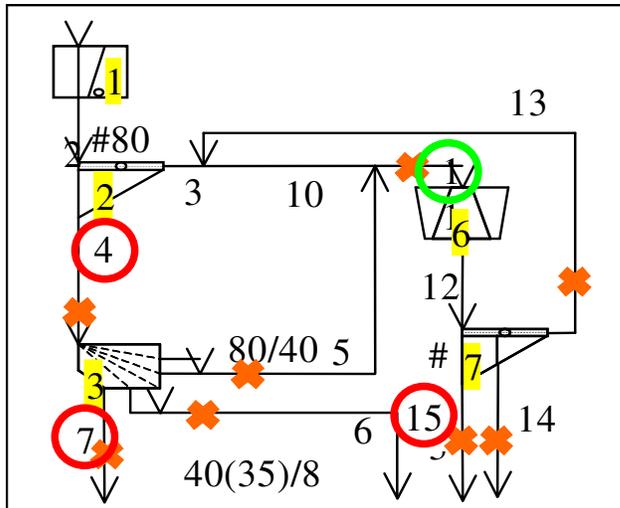


Abbildung 10. Flussdiagramm der Aufbereitungsanlage Hengl-Bitustein (Böhm et al. 2004). Die rot markierten Kreise zeigen Punkte der Probenahme jener Proben an, die während der Anlagenbeprobung genommen wurden. An der Stelle 1 (grüner Kreis) wurde zu einem früheren Zeitpunkt eine nicht repräsentative Probe genommen.

4.5. Bestimmung der Korngrößenverteilung der zerkleinerten Proben

4.5.1. Korngrößenbestimmung durch Sieben

4.5.1.1 Art und Durchführung der Siebung

Die zerkleinerten Proben wurden vor dem Sieben gegebenenfalls in einem Trockenschrank nachgetrocknet.

Das Material zwischen 125 mm und 10 mm wurde in Holzrahmensieben gesiebt. Im Grobbereich > 14 mm wurde jedes Korn einzeln gesteckt. Im Bereich < 14 mm wurde intensiv geschüttelt und zum Teil auch noch gesteckt. Das Material < 10 mm wurde probengeteilt und in einem Siebturm, der mit Analysensieben bestückt war, etwa 15–20 min gesiebt und anschließend händisch nachgesiebt. Ein manuelles Nachsieben ist – um einen scharfen Trennschnitt zu gewährleisten – zwingend erforderlich.

Die für Siebungen nach DIN festgelegten Siebschritte berechnen sich immer aus dem Doppelten der vorangegangenen kleineren Maschenweite



$$k_{i+1} = k_i \times 2$$

Gleichung 7

Die Verwendung von Normreihen gewährleistet gleiche Abstände bezüglich Maschenweiten im logarithmischen Maßstab. (0,063; 0,125; 0,250; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; ...). Die Norm sieht bei einigen Schritten ein Abrunden des verdoppelten Wertes vor, zum Beispiel bei 16 auf 31,5, und bei 63 auf 125, um die Reihe mit dem Doppelten des Vorangegangenen fortsetzen zu können bzw. um das 1000-fache des Ausgangswertes wieder zu erreichen. Mangels Verfügbarkeit passender Siebe konnten die Siebschritte, die in der Norm (DIN 18123) angegeben werden, jedoch nicht immer genau eingehalten werden.

Im Jahre 2001 führte das Institut für Bergbaukunde einen Siebstandard ein, der ab diesem Zeitpunkt für alle Siebungen Verwendung findet, und der sich bestens bewährt hat. Der verwendete Siebstandard ist ein sehr guter Kompromiss zwischen der Verfügbarkeit der Siebe am Institut für Bergbaukunde und der nötigen Feinheit der Siebschritte. Die verwendeten Siebschritte sind: 0,063; 0,1; 0,125; 0,250; 0,5; 1; 2; 6,3; 10; 12; 14; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 200; 250 mm.

Wie ersichtlich ist der Siebstandard am Bergbaukundeinstitut etwas detaillierter als der DIN Standard, mit zum Teil geringen Abweichungen von der Breite der Siebschritte (z.B. 6,3 mm an Stelle von 4 mm).

Die im Rahmen der Siebanalysen erhaltenen Fraktionen wurden gewogen, die gewogenen Massen in ein Probendatenblatt eingetragen, daraufhin die einzelnen Fraktionen beschriftet und in Plastiksäcke eingeschweißt. Kapitel 14 Anhang 1 beschreibt die am Institut für Bergbaukunde angewendete Vorgehensweise bei der Durchführung der Siebanalysen im Detail. Aus den Siebmassen je Korngrößenklasse wurde unter Berücksichtigung aller Verluste und Probenteilungen eine Prozentverteilung ermittelt.

Die Verteilung der Anteile pro Klasse kann in Histogrammen dargestellt werden. Durch den Flächenausgleich (*Schubert, 1989*) kann eine Ausgleichskurve ermittelt werden. Die Verwendung dieser Darstellungen ist jedoch äußerst kritisch, da der Anteil pro Klasse direkt von der Klassenbreite abhängig ist. Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit des Anteils pro Klasse von der Klassenbreite. Wäre in diesem Beispiel das erste Mal bei 2 mm (anstatt bei 0,063 mm) gesiebt worden, so wäre der Anteil hier 1,73 % (helle Rechtecke) anstatt eines fast vernachlässigbar geringen Anteils ($\ll 1\%$) in den 7 Einzelklassen darunter (siehe Zoombereich Abbildung 11).

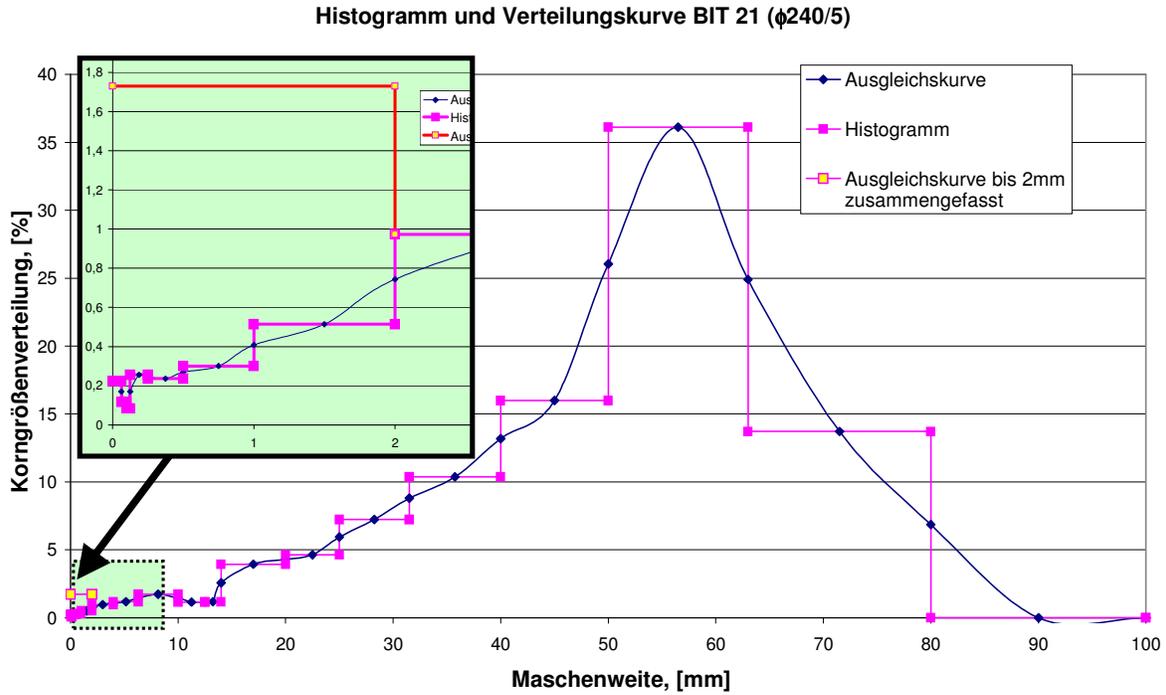


Abbildung 11. Histogramm und Häufigkeitsverteilungskurve einer Amphibolitprobe

Für alle weiteren Analysen wurde daher die Darstellung der Siebergebnisse in Summenkurven herangezogen, da die Summenverteilungen nicht durch die Größe der Siebschritte beeinflusst werden. Als Beispiel ist die Summenkurve einer Amphibolitprobe (BIT 21_240/5) in Abbildung 12 in einer log-log Darstellung abgebildet.

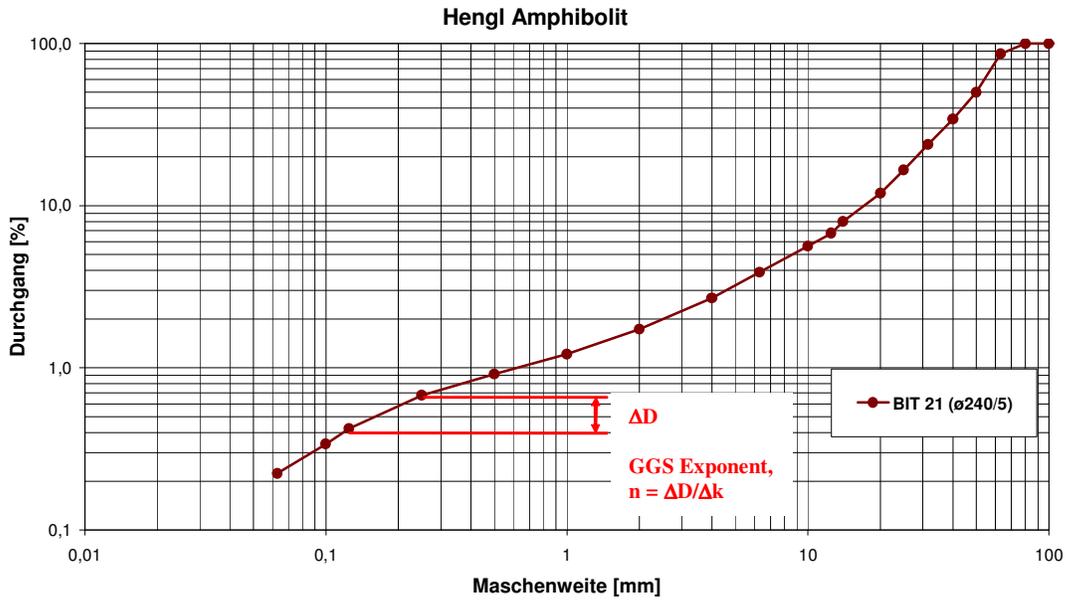


Abbildung 12. Darstellung einer Summenkurve von BIT 21 im log-log Diagramm (GGS Netz)

Abbildung 13 zeigt die Korngrößenverteilung des gleichen Zerkleinerungsergebnisses in einem linearen Netz (wie Abbildung 12).

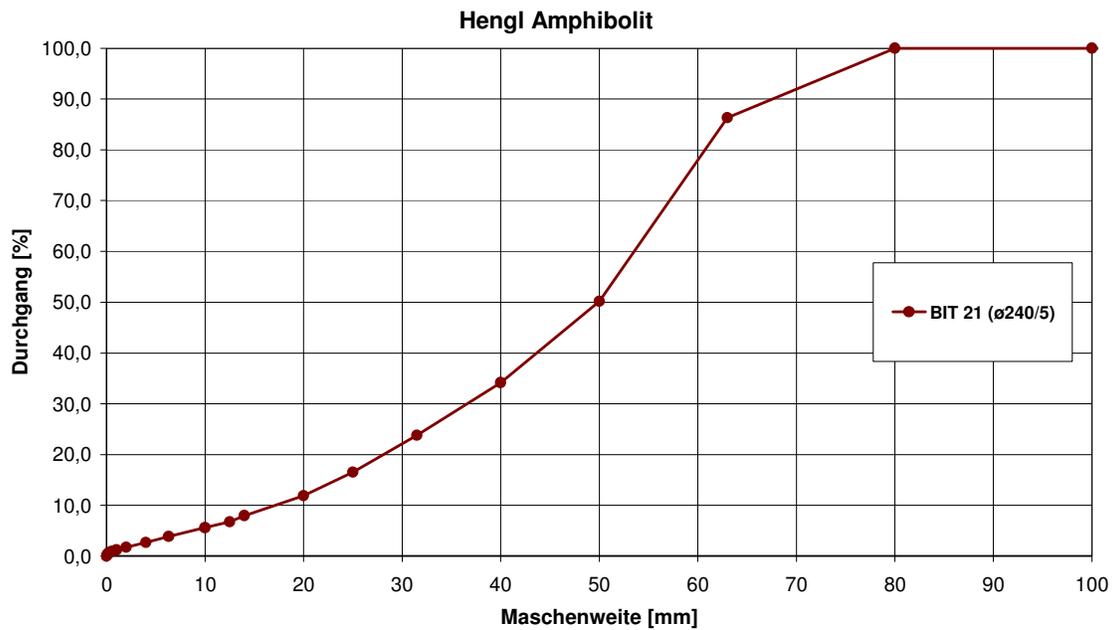


Abbildung 13. Darstellung der Summenkurve im linearen Maßstab



4.5.1.2 Analyse der Sieblinien

Wie vorstehend angeführt wurde bei der Auswahl der Siebe zur Erlangung einer ausreichenden Genauigkeit darauf geachtet, möglichst kleine Siebschritte zu verwenden. Dies ist auch der Grund, warum mehr als in der DIN-Norm vorgesehene Schritte verwendet wurden. Unter einer ausreichenden Genauigkeit versteht man, dass keine materialcharakteristischen Eigenschaften der Korngrößenverteilungskurve durch eine zu große Klassenbreite der Siebschritte überprägt werden.

Für die weiterführenden Analysen wurden die Siebergebnisse mittels GGS-Ansatz (*Gleichung 8*, Reichholf 2004, Steiner 1990) auf die Normsiebreihe (DIN 18123) wie folgt umgerechnet (interpoliert bzw. reduziert).

$$n = \frac{\log \frac{D_o}{D_u}}{\log \frac{k_o}{k_u}}$$

Gleichung 8

$$D_o = \frac{D_u}{\left(\frac{k_u}{k_o}\right)^n}$$

Gleichung 9

wobei D_o und D_u die Durchgangswerte und k_o und k_u die Korngrößenklassen oben und unten sind.

In den meisten Fällen der Umrechnung standen mehr Siebschritte zur Verfügung als dies die DIN-Norm für Siebungen vorsieht. In Tabelle 5 sind die zusammengefassten und nach Gleichung 8 und Gleichung 9 interpolierten DIN-Siebschritte dargestellt.

Als Beispiel wird hier die Interpolation des 8 mm Durchgangswertes nach Gleichung 8 aus Tabelle 5 gezeigt.



- Berechnung von n

$$n = \frac{\log \frac{D_o}{D_u}}{\log \frac{k_o}{k_u}} = \frac{\log \frac{5,67}{3,93}}{\log \frac{10}{6,3}} = 0,796$$

- Interpolation

$$D_o = \frac{D_u}{\left(\frac{k_u}{k_o}\right)^n} = \frac{3,93}{\left(\frac{6,3}{8}\right)^{0,796}} = 4,75$$

Die in Abbildung 14 dargestellte Summenkurve der BIT 21-Probe mit verschiedenen Siebschritten weist kaum Abweichungen zwischen den genormten und den tatsächlich gesiebten Siebschritten auf. Hinsichtlich der charakteristischen Ausprägung der Verteilungskurven haben die Abweichungen aber beachtliche Relevanz, wie dies aus Abbildung 15 ersichtlich ist.

BIT 21 (ø240/5) tatsächlich gesiebt			
Siebschritte		Durchgang	n
100/80	80	100,00	
80/63	63	86,29	0,617
63/50	50	50,19	2,344
50/40	40	34,21	1,719
40/31,5	31,5	23,83	1,513
31,5/25	25	16,60	1,563
25/20	20	11,96	1,472
20/14	14	8,01	1,122
14/12,5	12,5	6,83	1,416
12,5/10	10	5,67	0,832
10/6,3	6,3	3,93	0,796
6,3/4,0	4	2,73	0,803
4,0/2,0	2	1,74	0,644
2,0/1,0	1	1,23	0,509
1,0/0,5	0,5	0,92	0,410
500µ/250µ	0,25	0,68	0,430
250µ/125µ	0,125	0,43	0,681
125µ/100µ	0,1	0,34	0,991
100µ/63µ	0,063	0,22	0,909
<63µ	0	0,00	

BIT 21 (ø240/5) mit Normsiebreihe	
Siebschritte	Durchgang
125	100,00
63	86,29
31,5	23,83
16	9,31
8	4,75
4	2,73
2	1,74
1	1,23
0,5	0,92
0,25	0,68
0,125	0,43
0,063	0,22
0	0,00

Tabelle 5. Darstellung der tatsächlich gesiebten und der an die DIN-Norm angepassten Siebschritte anhand des Beispiels von Amphibolit, Probe BIT 21

Wichtiger Hinweis: Der jeweilige n-Wert bezieht sich in der gesamten Arbeit immer auf den unteren k-Wert (k_u).

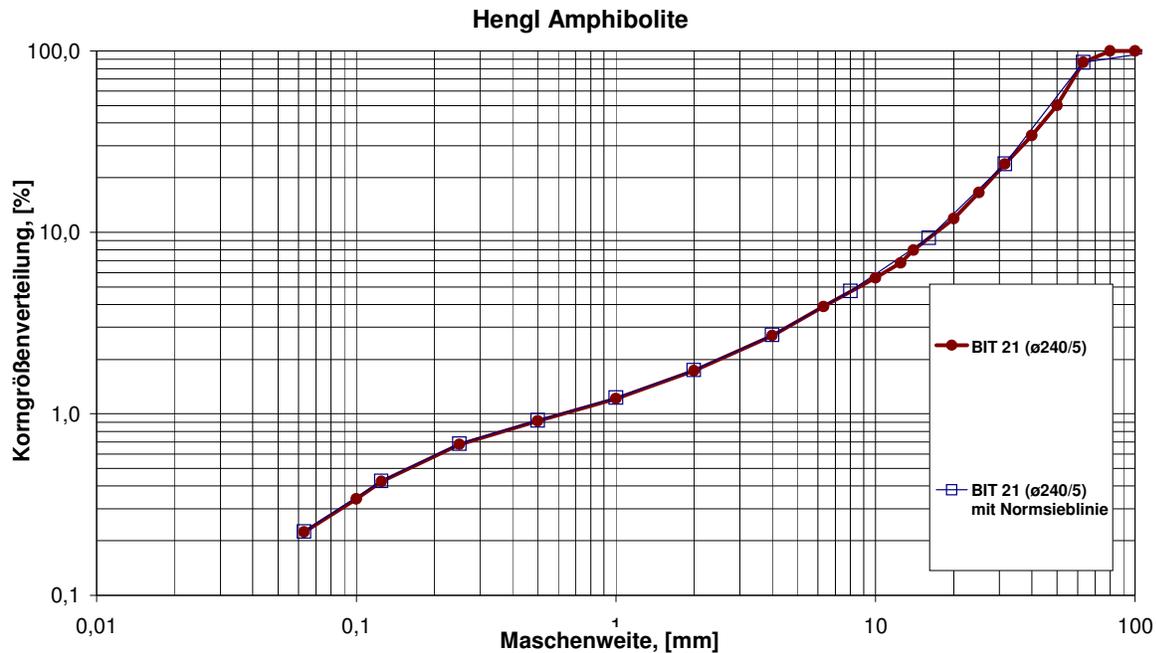


Abbildung 14. Summenkurve der BIT 21-Probe mit tatsächlichen Siebschritten und mit den an die DIN-Norm angepassten Schritten

In den großen Korngrößenklassen ist die Anzahl der Partikel im Vergleich zu den kleinen oft um mehrere Zehnerpotenzen geringer, obwohl der Massenanteil in den großen Klassen überwiegt. Durch das Zusammenfassen (anpassen an die Normsiebreihe) in den größeren Korngrößenbereichen wird gewährleistet, dass sich nicht „zufällig“ ein Korn in eine Klasse „verirrt“ und das Ergebnis beeinflusst. Durch große Massenanteile und geringe Partikelzahlen in den größeren Klassen ist eine durch Zufälligkeit hervorgerufene beachtliche Schwankungsbreite der Kurve im Grobbereich bei kleinen Klassenbreiten feststellbar. Diese zufällige Schwankung wird durch das Zusammenfassen ausgeglichen. (Abbildung 15).

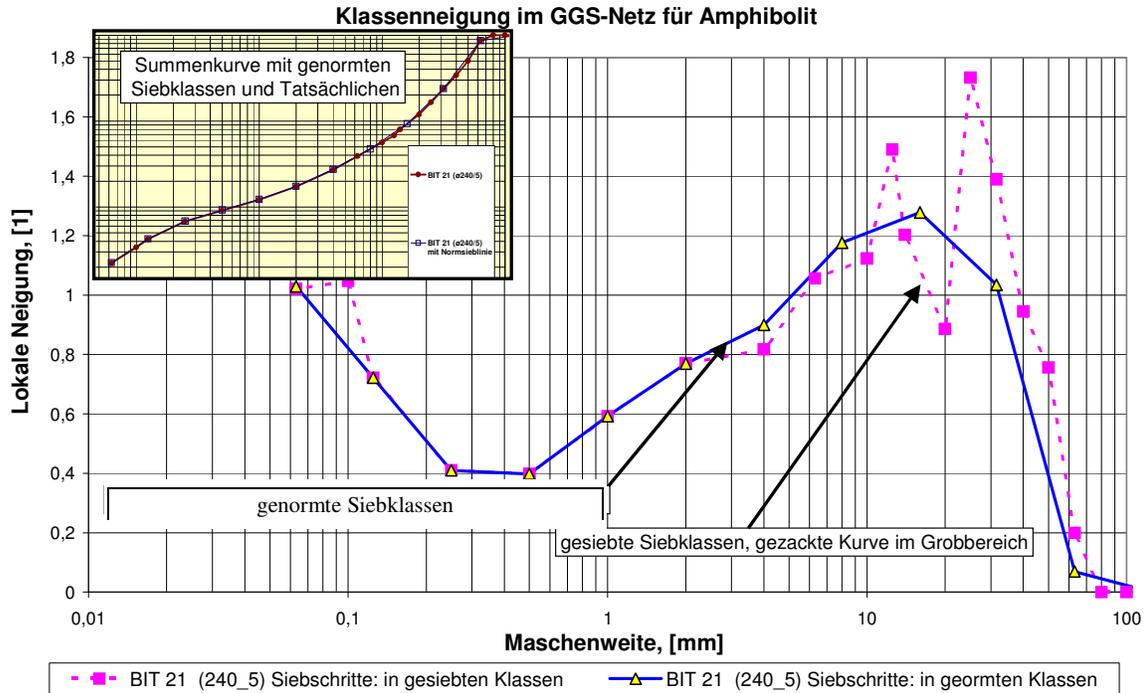


Abbildung 15. Vergleich der Charakteristiken der experimentell bestimmten und der auf die DIN-Schritte umgerechneten Sieblinien anhand von siebklassenweisen Lokalen Neigungen n (berechnet nach Gleichung 5)

4.5.2. Korngößenbestimmung nach dem Prinzip der gravimetrischen Sedimentation

Für das Bestimmen der Korngrößenverteilung im Größenbereich $< 100 \mu\text{m}$ ist das klassische trockene Sieben auch unter Laborbedingungen mit einer Reihe von Ungenauigkeiten verbunden.

Aus diesen Gründen wurde für den Bereich $< 100 \mu\text{m}$ auf ein alternatives Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung zurückgegriffen. Verwendet wurde dabei ein Verfahren, das unter dem Namen LUMOSSED bekannt ist.

Das Analyseverfahren LUMOSSED beruht auf dem Prinzip der gravimetrischen Sedimentation und zählt zu den sedimentationsfotometrischen Verfahren.

In einer Glasküvette befindet sich eine Suspension aus Wasser und dem zu analysierenden Material, die durch Rühren mit einem speziellen Rührstab homogenisiert wird. Die einzelnen Partikel beginnen dann entsprechend ihrer Sinkgeschwindigkeit zu sedimentieren. Dadurch ändert sich die Feststoffkonzentration in den einzelnen Messebenen unterschiedlich in Abhängigkeit von der Zeit. Zur Messung der Feststoffkonzentration werden drei Lichtbündel über Spiegel auf verschiedenen Höhen durch die Küvette geschickt und deren Lichtintensitätsänderungen von drei Sensoren aufge-



nommen. Die Lichtwerte werden als elektrische Signale einem Analog-Digital-Wandler zugeführt und von dort an einen Personal-Computer zur Verarbeitung weitergeleitet.

Die Absorption von Licht ist proportional dem Feststoffgehalt in der Suspension. Die Sinkgeschwindigkeit v_s [m/s] eines Partikels in Wasser ist eine Funktion des wirkenden Beschleunigungsfeldes (Gravitation) und daher abhängig von der Partikelmasse m_e und des Reibungskoeffizienten f . Daher ist es möglich, unter Berücksichtigung eines Formfaktors aus der Sinkgeschwindigkeit eine Korngrößenverteilung zu ermitteln.

$$v_s = \frac{m_e}{f} \qquad f = 3 \cdot \pi \cdot \eta_0 \cdot d$$

Gleichung 10

wobei η_0 die Viskosität [Pa s] und d der Durchmesser einer Kugel ist (Stok'sches Fallgesetz).

Das Messgerät dient überwiegend zur Bestimmung der Korngröße von Partikeln (*Gruber-Pretzler 2003*), die in einer Flüssigkeit dispergiert vorliegen. Es kann jedoch auch für andere Aufgaben, wie z.B. zur Beobachtung des Agglomerationsverhaltens von Pulvern in Flüssigkeiten, oder zur Untersuchung der Stabilität von Emulsionen herangezogen werden. Die Abbildung 16 zeigt die Funktionsweise des LUMOSSED Fotosedimentometers.

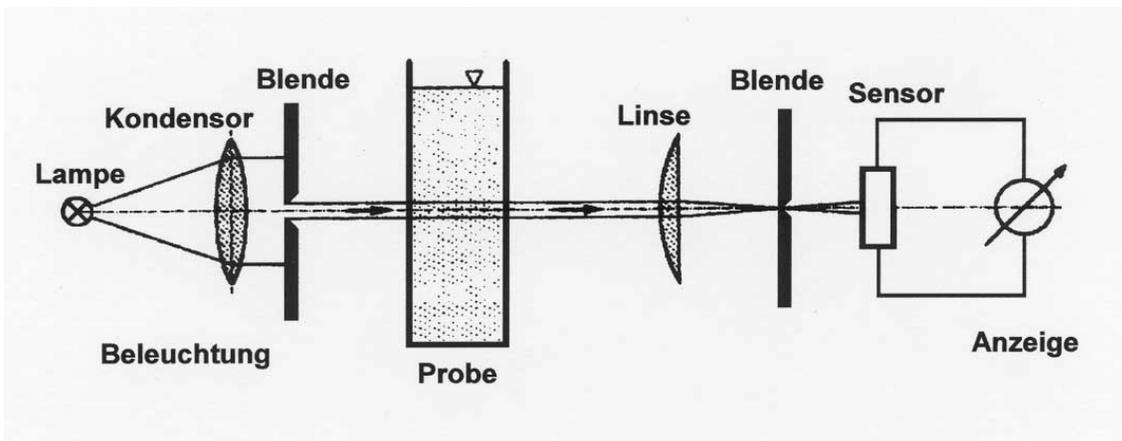


Abbildung 16. Funktionsweise des LUMOSSED Fotosedimentometers (Quelle: http://www.chem-eng.fb-mannheim.de/imv/Lumosedi_A.htm)



4.6. Untersuchung der Körner der zerkleinerten Proben

4.6.1. Einführende Erklärung

Zusätzlich zur systematischen Analyse der Korngrößenverteilung wurden in der gegenständlichen Dissertation auch Untersuchungen direkt an den Körnern der zerkleinerten Proben durchgeführt. Dies betraf zum einen das Bestimmen der Zahl der Körner in den einzelnen Korngrößenklassen und zum anderen auch die Beobachtung des Aufbaues der Körner.

4.6.2. Bestimmung der Anzahl der Körner je Kornklasse

4.6.2.1 Zählen im Grobkornbereich ($> 2\text{ mm}$)

In den groben Korngrößen bis $> 10\text{ mm}$ wurden alle vorhandenen Teilchen pro Klasse manuell gezählt. In den Klassen zwischen 10 mm und 2 mm wurde die Partikelzahl anhand von geteilten Proben bestimmt, da das Material $< 10\text{ mm}$ vom Siebvorgang her bereits in geteilter Form vorlag (durch Probenteilung beim Sieben).

4.6.2.2 Bildanalyse im Feinkornbereich ($< 2\text{ mm}$)

Wegen der großen Anzahl von Teilchen in den Klassen $< 2\text{ mm}$ wurde die Ermittlung der Körneranzahl je Kornklasse durch Auswertung von Bildern durchgeführt. Dazu wurden nacheinander mindestens 3 repräsentative Proben des Gutes $< 2\text{ mm}$ genommen, auf einer Feinwaage auf Milligramm genau gewogen und auf einem weißen Blatt so aufgestreut, dass es zu keinen (möglichst wenigen) Kornkontakten kam (Abbildung 17), anschließend wurden unter dem Binocular Digitalfotos angefertigt (Abbildung 17).

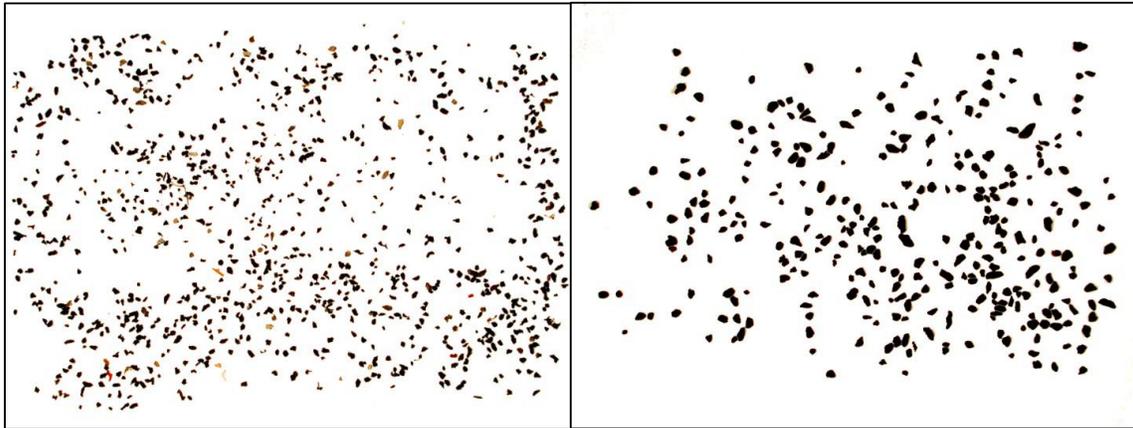


Abbildung 17. Fotos von aufgestreuten Körnerpräparaten zur Ermittlung der Anzahl von Teilchen

Die Fotos wurden dann mit dem Programm „Photoshop“ nachbearbeitet. Mit diesem Programm wird zuerst, wenn nötig das Bild gedreht und dann die Farbinformation gelöscht. Mit den Menüpunkten Autotonwertkorrektur und Tonwertkorrektur kann der Kontrast weiter verbessert und die Kornumrisse noch schärfer dargestellt werden. Über die Helligkeit und den Kontrast können die randlichen Schatten am besten beseitigt werden.

Die bearbeiteten Bilder wurden dann mit der CLEMEX – Bildanalysesoftware weiterbearbeitet (<http://www.clemex.com/>). In diesem Softwareprogramm werden zuerst über ein Gray - Treshold alle Grautöne eingefärbt. Dann können mit verschiedenen Werkzeugen wie Lasso, Linien, Flächenfüllung und Entfernen die Schrift und die randlichen Schatten entfernt werden, da diese ja nicht mitgezählt werden. Ab der Korngröße 500 – 250 μm empfiehlt es sich die Bildpunkte zu separieren. Zusätzlich können noch die Körner ausgeschieden bzw. umgefärbt werden, die nicht der Korngrößenklasse entsprechen. Dann muss jedes einzelne Bild durchgesehen werden und händisch noch Körner getrennt oder entfernt werden. Über die Boolesche &-Funktion werden zum Schluss die Körner nochmals umgefärbt und anschließend gezählt.

Die aus der Bildanalyse erhaltenen Anzahlen wurden gemittelt und in Anzahl der Körner pro Gramm (n/g) ausgegeben. Die Gesamtanzahl wurde durch Multiplikation mit der Gesamtmasse pro Klasse ermittelt.

Zum Vergleich wurden auch einige Fotos manuell ausgezählt und mit den automatisch ausgewerteten verglichen. Es konnte eine > 99 %-ige Übereinstimmung zwischen manueller und automatischer Bildauswertung gefunden werden (Abbildung 18).

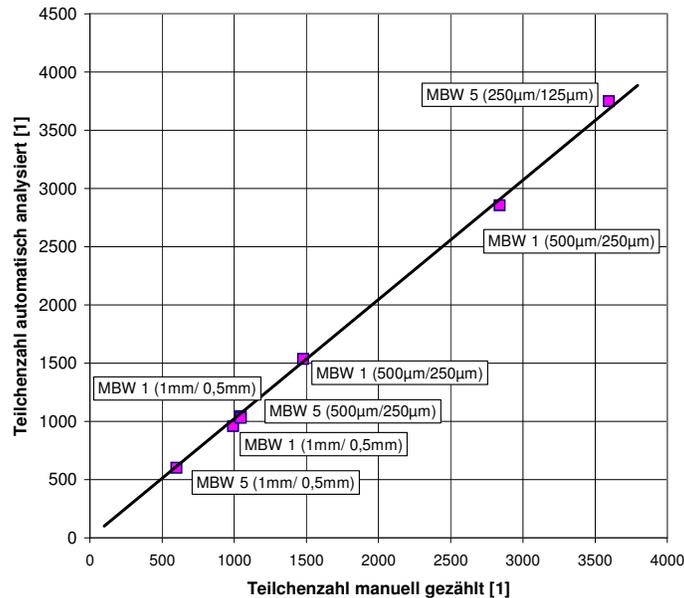


Abbildung 18. Vergleich zwischen manuell gezählten und mittels Bildanalyse ermittelten Teilchenanzahlen.

4.6.3. Untersuchung des Aufbaues in den einzelnen Kornklassen

Im Hinblick auf das Erklären der Charakteristik der Korngrößenverteilungen der zerkleinerten Proben wurden mikroskopische Untersuchungen zur Klärung des Aufbaues der Körner in den einzelnen Kornklassen durchgeführt. Dies umfasste den Korngrößenbereich < 2 mm. Dafür wurde Material aus den einzelnen Korngrößenklassen von Sandstein, Gneis, Amphibolit und ALZO-Kalk in durchsichtiges zwei-Komponenten Kunstharz eingestreut und anpoliert, die anpolierte Fläche auf ein Glasplättchen aufgeklebt, der Überschuss abgesägt und danach das Präparat auf ca. $30 \mu\text{m}$ Dicke geschliffen.

Die einzelnen Proben wurden mikroskopisch untersucht und die einzelnen Korntypen ausgewiesen und ausgezählt. Korntypen sind Aggregate oder Einzelkörner, wobei die Aggregate in Untertypen unterteilt wurden: Aggregate aufgebaut aus mehr als 7 Körnern, Aggregate aus 3–7 Körnern und Aggregate aus 2 Körnern.

Es wurden zumindest 100 – fallweise bis zu 330 – Körner je Kornklasse im Hinblick auf ihren Aufbau analysiert. Bei den Fraktionen $< 63 \mu\text{m}$ (bei ALZO $< 125 \mu\text{m}$) war das direkte Zählen der einzelnen Kornarten nicht möglich. Daher wurden die Prozent-Anteile anhand von Vergleichstafeln (Abbildung 20, Lof, 1982) abgeschätzt.

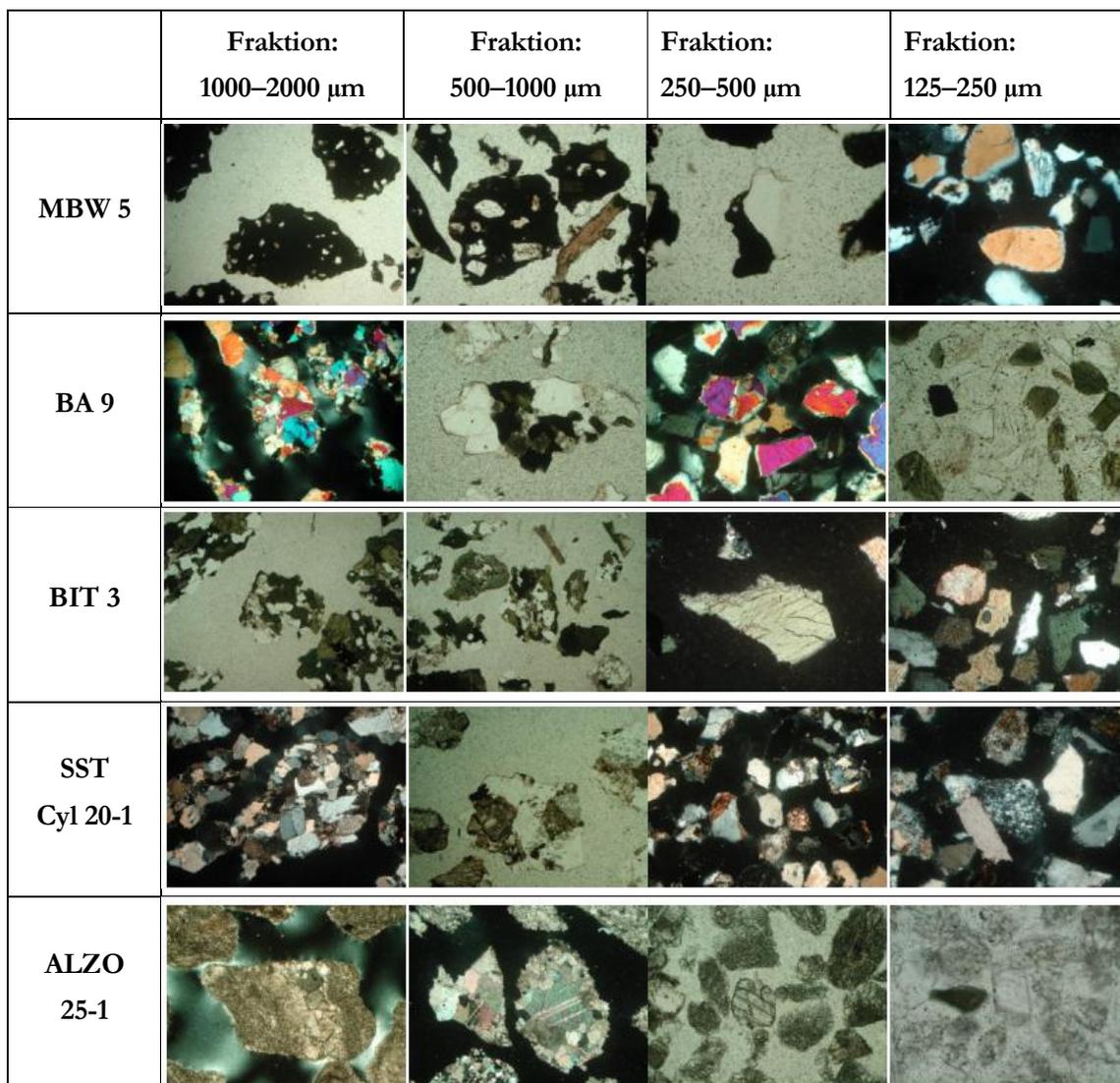


Abbildung 19. Fotos der Dünnschliffanalysen zur Bestimmung der Art bzw. des Aufbaues der Körner in den verschiedenen Fraktionen

Fotos von Dünnschliffen in verschiedenen Maßstäben und Ansichten (gekreuzte Polarisatoren, einfach polarisiertes Licht) sind in Abbildung 19 dargestellt. Ein deutlicher Trend von Aggregaten hin zu Einzelkörnern – bei generell abnehmender Korngröße – ist klar erkennbar.

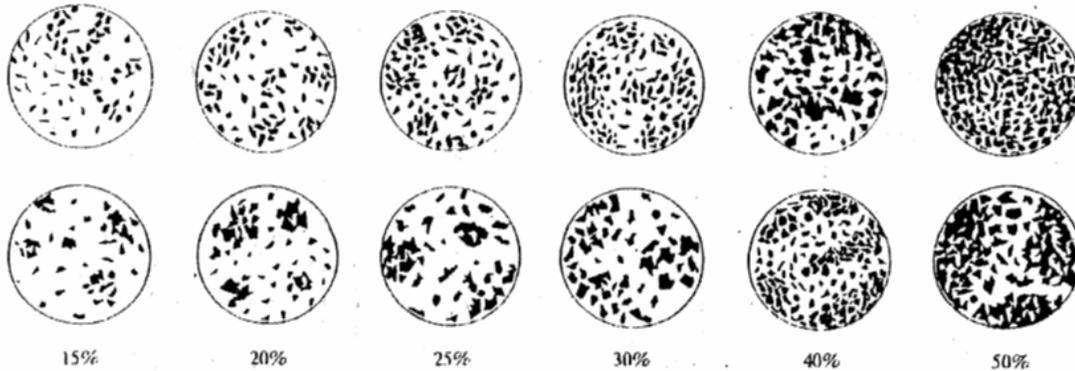


Abbildung 20. Vergleichstafeln zum Abschätzen von Prozentanteilen

4.6.4. Bestimmung der In situ-Korn/Mineralgröße (erweiterte Methode von Wimmenauer)

Um die In situ-Korn- bzw. Mineralgröße der für die Zerkleinerungsversuche verwendeten Materialien bestimmen zu können, wurden Dünnschliffe von unzerkleinerten Proben der Materialien angefertigt. Diese Dünnschliffe wurden maßstabsgetreu fotografiert. Die Digitalaufnahmen im PC bearbeitet und die Längen der einzelnen Körner entlang von vertikalen und horizontalen Linien (Abbildung 22) nach dem Sehnenschnittverfahren (*Wimmenauer 1985*) mit dem Computerprogramm AutoCAD vermessen. Die vermessenen Körner wurden der Größe nach sortiert und in Klassen eingeteilt. Als Korngrößenklassen wurde die Normsiebreihe nach Kapitel 4.5.1.1 verwendet. Aus der Anzahl von Teilchen pro Klasse konnte eine Korngrößenverteilung – die In situ Korngrößenverteilung – ermittelt werden.

In der Metallurgie wird das Sehnenschnittverfahren nach *Wimmenauer* als Linienschnittverfahren bezeichnet und ist in der ÖNORM EN 623-3 genormt. Dieses Verfahren dient zur Ermittlung einer In situ Korngröße. Die in diesem Verfahren ermittelten Längen der geschnittenen Körner sind statistisch so verteilt, dass sie einer tatsächlichen Korngrößenverteilung entsprechen.

Das Sehnenschnittverfahren nach *Wimmenauer* in der Mineralogie bzw. das Linienschnittverfahren in der Metallurgie nach ÖNORM EN 623-3 sind anerkannte Verfahren zur Ermittlung von In situ Korngrößenverteilungen. Die beiden (identen) Verfahren verwenden Schnittlängen in Dünnschliffen als Basis für eine Korngrößenverteilung.

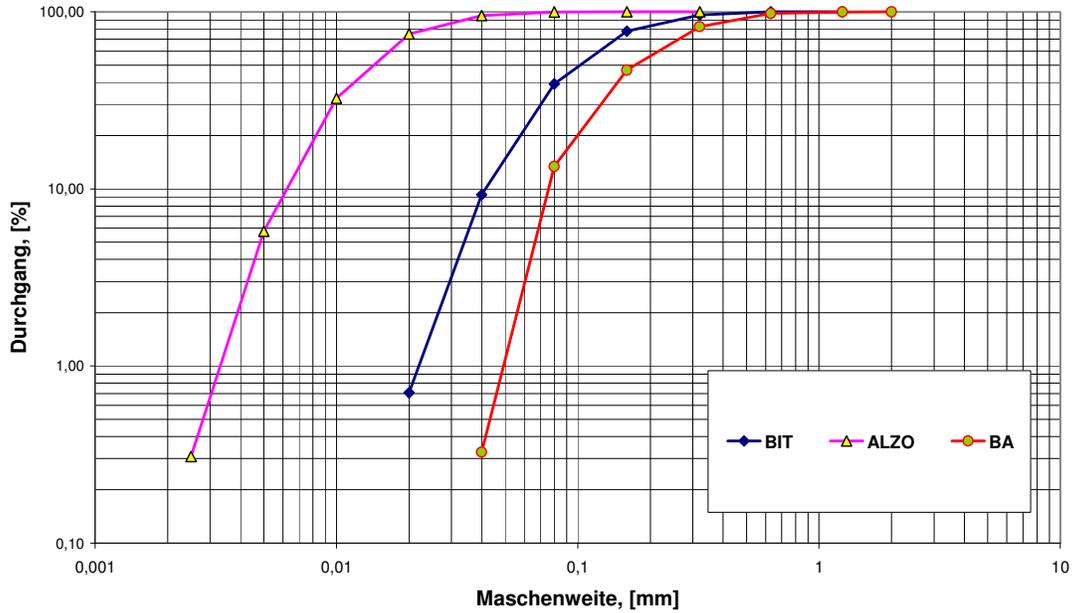


Abbildung 21. Aus den Auszählungen berechnete und gemittelte In Situ Korngrößenverteilungen im log-log Netz (GGS-Netz) dargestellt

	BIT 66 - 1		BIT 66 - 2		BIT 66 - 3		ALZO - 81		ALZO - 82		ALZO - 83		BA 1 - 1		BA 1 - 2	
	[1]	%	[1]	%	[1]	%	[1]	%	[1]	%	[1]	%	[1]	%	[1]	%
0,000-0,00125																
0,00125-0,0025											3	0,92				
0,0025-0,0050							4	1,26	2	0,66	47	14,46				
0,0050-0,010							73	22,96	31	10,23	153	47,08				
0,010-0,020	2	0,60	1	0,30	4	1,22	168	52,83	136	44,88	97	29,85				
0,020-0,040	15	4,48	40	12,08	30	9,15	67	21,07	97	32,01	24	7,38			2	0,65
0,040-0,080	87	25,97	113	34,14	97	29,57	5	1,57	35	11,55	1	0,31	48	15,38	33	10,78
0,080-0,160	140	41,79	112	33,84	132	40,24			2	0,66			100	32,05	107	34,97
0,160-0,320	73	21,79	57	17,22	51	15,55	1	0,31					109	34,94	110	35,95
0,320-0,630	18	5,37	8	2,42	13	3,96							47	15,06	49	16,01
0,630-1,250					1	0,30							6	1,92	5	1,63
1,250-2,000													2	0,64		
	335	100	331	100	328	100	318	100	303	100	325	100	312	100	306	100

Tabelle 6. In situ Korngrößenverteilung am Beispiel von Schliften der Proben BIT 66-1 bis BIT 66-3, ALZO 81 ALZO 82, ALZO 83, BA 1-1 und BA 1-2 (Basis für die KGV sind Sehnenschnittlängen)

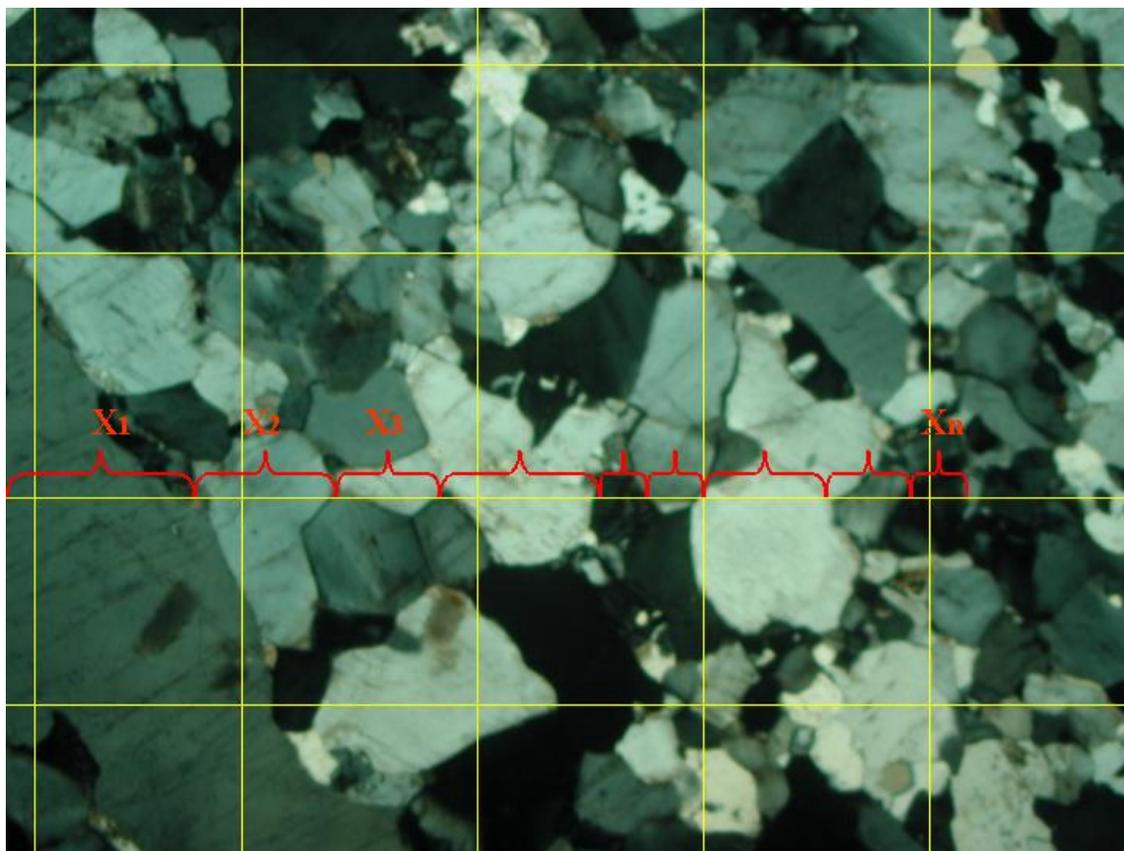


Abbildung 22. Darstellung der Vorgangsweise der In situ Korngrößenbestimmung anhand eines Beispiels am Bärarp Gneis.

Pro Dünnschliff wurden zwischen 306 und 358 Körner vermessen. Da diese Anzahl in etwa 75 % bis 90 % der Anzahl der Körner pro Dünnschliff ist, kann von einer statistisch repräsentativen Anzahl ausgegangen werden. Die erhaltenen In situ Korngrößenverteilungen wurden in Häufigkeits-, Durchgangs- und Rückstandsdiagrammen dargestellt.



4.7. Tabellarische Übersicht über die durchgeführten Zerkleinerungsversuche

4.7.1. Laborsprengversuche

Probe	Bemerkung	Probenmasse	Spezi- fischer Spreng- stoff eintrag	Form	Kopp- lung	Bohr- loch durch- messer	Spreng- stoff dichte	Länge/ Durch- messer	Höhe	Breite	VOD	K ₉₀ - Wert	K ₅₀ - Wert	K ₈₀ - Wert
		[kg]	[g/t]			[mm]	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[mm]	[mm]
MBW_1		17,6	280,0	Prisma	1	5,00	1,27	202	202	204	3951	26,7	37,7	56,8
MBW_2		31,8	166,9	Prisma	1	5,00	1,38	272	200	273	4761	53,1	84,3	100,1
MBW_3_Cu1	Cu Rohr eingegossen	17,5	195,6	Prisma	Cu	4,78	0,97	203	199	203	5086	55,3	78,0	96,6
MBW_4_Cu2		17,2	210,7	Prisma	Cu	4,83	1,01	202	198	202	3706	39,5	57,5	79,5
MBW_5	30 mm BL, 5mm Ladesäule mit Schrumpfschlauch zentriert	17,3	242,0	Prisma	0,17	5,00	1,10	204	199	205	5315	84,8	94,8	111,9
MBW_6	28 mm BL, w.o.	17,9	223,5	Prisma	0,19	5,00	1,04	206	201	206	5106	84,9	100,6	116,5
MBW_7	20 mm BL, 5mm Ladesäule mit Schrumpfschlauch zentriert	17,3	238,0	Prisma	0,25	5,00	1,07	204	200	202	5318	73,9	86,8	125,0
MBW_8		17,2	233,3	Prisma	0,25	5,00	1,05	201	200	203	4814	83,7	91,2	98,8
MBW_9	10 mm BL, w.o.	17,3	239,0	Prisma	0,50	5,00	1,07	203	198	203	5529	36,4	48,9	74,3
MBW_10		17,8	236,0	Prisma	0,50	5,00	1,08	205	200	205	5123	38,7	55,4	80,8
MBW_11		16,7	274,9	Prisma	1	5,00	1,25	204	190	201	-	81,2	89,9	98,6
MBW_12		17,9	241,2	Prisma	1	5,00	1,11	205	201	205	5144	40,7	50,4	65,8
MBW_13		17,6	309,1	Prisma	1	5,00	1,53	202	202	202	4809	29,5	42,8	66,4
MBW_14		17,4	314,9	Prisma	1	5,00	1,40	202	200	202	5023	29,3	41,5	55,5
MBW_15	Doppelstahlrohr 8/1,5 & 18/2	17,5	235,4	Prisma	ST	5,00	1,02	204	197	201	-	109,9	118,3	126,6
MBW_16	D.St.R 8/1,5 & 18/2	17,6	216,6	Prisma	ST	5,00	0,95	204	195	205	-	126,6	134,7	142,6
MBW_17	D.St.R 8/1,5 & 20/3	17,6	233,8	Prisma	ST	5,00	1,04	206	194	205	-	122,1	125,5	128,7
MBW_18	D.St.R 8/1,5 & 19/2,5	17,3	250,0	Prisma	ST	5,00	1,08	200	196	204	-	113,4	125,2	137,0
MBW_19	Stahlrohr 18/2 mit 2x12g/m Sprengschnur	16,6	270,0	Prisma	ST	-	-	202	188	202	-	65,8	83,1	104,1
MBW_60		155,4	34,4	Prisma	1	5,00	1,37	602	201	602	4878	286,3	292,0	297,4
MBC(100_1)	Stahlrohreinspannung	4,8	826,5	Zylinder	1	5,00	1,12	119	201		4000	117,9	120,9	123,6
MBC(100_2)	Stahlrohreinspannung	4,7	915,0	Zylinder	1	5,00	1,26	119	198		4712	117,3	120,5	123,5
MB-WT_1_(20)		17,6	290,4	Prisma	1	4,90	1,54	200	200	201	6475	94,5	109,1	119,6
MB-WT_2_(20)		17,3	266,8	Prisma	1	4,95	1,40	200	198	200	6144	98,6	109,6	119,8
MB 100 UC		4,8	993,7	Zylinder	1	5,00	1,36	119	199		5048	3,3	6,4	13,5
MB Cyl 10_1	Stahlrohreinspannung	-	-	Zylinder	1	5,00	1,16	109	200		5489	0,1	0,8	6,5
MB Cyl 10_2 Ex	Stahlrohreinspannung mit exzentrischem BL	-	-	Zylinder	1	5,00	1,13	109	186		4120	-	-	-
MCC_3_(20)		17,6	291,8	Prisma	1	4,93	1,56	201	202	200	6563	19,4	30,4	45,4
MB FR 1	Stahlrohreinspannung	-	-	Prisma	1	5,00	1,05	90	90	205	4240	0,3	1,4	9,7
MB FR 2	Stahlrohreinspannung	-	-	Prisma	1	5,00	1,07	90	90	200	4340	-	-	-

Tabelle 7. Sprengversuche in Magnetitbeton



Probe	Bemerkung	Probenmasse	Spezi- fischer Spreng- stoff eintrag	Form	Bohr- loch durch- messer	Spreng- stoff dichte	Durch- messer	Höhe	Breite	VOD	k ₃₀ - Wert	k ₅₀ - Wert	k ₈₀ - Wert
		[kg]	[g/t]		[mm]	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[mm]
BIT 2_A (240_5)		36,0	178,2	Zylinder	5,3	1,3	242	275		6027	36,0	49,2	68,5
BIT 2_B (190_4)		17,7	188,8	Zylinder	4,4	1,2	192	210		5501	33,9	46,1	66,9
BIT 21 (240_5)		28,7	188,1	Zylinder	5,3	1,3	241	217		6343	36,6	49,8	60,9
BIT 3 (190_5)		22,1	258,6	Zylinder	5,3	1,1	190	250		4501	23,9	33,1	49,9
BIT 66 (190_4)		19,5	218,2	Zylinder	4,6	1,2	191	234		5823	29,2	39,1	54,0
BIT 7_A (240_5)		5,2	1209,3	Zylinder	5,0	1,8	242	41		6047	85,0	91,0	97,0
BIT 7_B (240_5)		5,7	860,6	Zylinder	5,0	1,5	241	43		5595	102,0	111,2	120,3
BIT 7_E (250_5)		5,2	159,8	Zylinder	5,2	1,5	242	39		6667	40,6	53,8	78,3
BIT 70 (150_5)		6,9	522,8	Zylinder	5,4	1,3	144	147		6255	10,8	17,7	30,3
BIT 73_A (100_5)		4,8	1107,9	Zylinder	5,4	1,2	98	219		6127	2,6	5,5	12,0
BIT 73_B (100_5)		4,1	1048,3	Zylinder	5,4	1,2	98	188		5952	2,7	5,6	12,2
BIT 78 (290_5)		60,6	126,1	Zylinder	5,3	1,2	289	310		5912	52,9	77,4	115,3
BIT 79 (190_5)		27,7	258,0	Zylinder	5,3	1,1	191	330		5449	25,8	37,2	54,4
BIT 8 (290_5)		55,4	121,7	Zylinder	5,3	1,2	289	283		5848	51,1	69,6	99,3
BIT 91_1 (150_12)		-	-	Zylinder	12,0	1,1	150	223		6104	2,0	4,8	11,2
BIT 91_2 (150_10)		11,4	1661,6	Zylinder	10,0	1,0	150	235		5888	2,3	5,9	12,9
BIT 94_1 (150_10)		11,9	1934,0	Zylinder	10,0	1,2	150	257		6027	2,1	5,5	12,1
BIT 94_2 (150_12)		10,8	2451,8	Zylinder	12,0	1,1	150	231		6289	0,8	3,2	9,3

Tabelle 8. Sprengversuche im Amphibolit

Probe	Bemerkung	Probenmasse	Spezi- fischer Spreng- stoff eintrag	Form	Bohr- loch durch- messer	Spreng- stoff dichte	Durch- messer	Höhe	Breite	VOD	k ₃₀ - Wert	k ₅₀ - Wert	k ₈₀ - Wert
		[kg]	[g/t]		[mm]	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[mm]
BA 1_1 (242_5)		43,4	198,9	cylinder	5,3	1,2	243	355		5879	19,1	33,1	57,7
BA 1_2 (192_5)		30,5	319,0	cylinder	5,3	1,2	192	393		5842	9,2	18,8	35,6
BA 10_1 (102_5)		4,8	858,9	cylinder	5,3	1,0	103	217		5135	0,5	2,1	7,9
BA 10_2 (102_5)		4,8	1082,6	cylinder	5,3	1,3	103	218		5339	0,3	1,0	5,5
BA 2_1 (290_5)		61,2	137,7	cylinder	5,3	1,1	290	367		5459	35,3	57,2	92,8
BA 2_2 (192_5)		24,0	317,8	cylinder	5,3	1,2	192	310		5699	10,1	19,9	38,9
BA 9 (289_5)		58,1	133,4	cylinder	5,3	1,2	289	333		5743	34,8	54,5	81,9

Tabelle 9. Sprengversuche in Bårarp Gneis

Die Zerkleinerungsergebnisse und Sieblinien dieser Versuche finden sich im Anhang 2 zu dieser Arbeit.



4.7.2. Knäppersprengversuche

Probe	gesiebte Masse	Probenmasse	Sprengstoffmasse	Form	Bohrlochdurchmesser	Sprengstoffdichte	Vorgabe	Seitenabstand	BL-Anzahl	VOD	k ₃₀ -Wert	k ₅₀ -Wert	k ₉₀ -Wert
		[kg]	[g]		[mm]	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[mm]	[mm]
BIT HS_1	< 400 mm/ 191 kg	> 600	7,4	Block	5,0	1,3	150	-	1	-	169,3	238,7	370,4
BIT HS_2	-	> 600	7,4	Block	5,0	-	150	-	1	-	-	-	-
BIT HS_3	< 200 mm/ 86 kg	> 500	4,7	Block	5,0	1,4	150	300	1	5048	62,7	88,5	115,8
BIT HS_4	< 400 mm/ 309 kg	309,00	22,6	Block	12,0	1,1	300	-	1	-	161,2	266,7	423,9
BIT HS_5	< 300 mm/ 110 kg	> 1000	5,5	Block	5,0	1,0	150	-	1	-	165,0	183,5	202,3

Tabelle 10. Knäppersprengungen in Amphibolit

Die Zerkleinerungsergebnisse und Sieblinien dieser Versuche finden sich im Anhang 3 zu dieser Arbeit.

4.7.3. Großsprengversuche

Probe	gesprengte Masse	gesprengtes Volumen	Spezifischer Sprengstoffeintrag	Bohrlochdurchmesser	Ladesäulenlänge	BL-Länge	Kopplung	Vorgabe	Seitenabstand	Bruchwandhöhe	BL-Anzahl	k ₃₀ -Wert	k ₅₀ -Wert	k ₉₀ -Wert
	[t]	[m ³]	[kg/m ³]	[mm]	[m]	[m]		[m]	[m]	[m]		[mm]	[mm]	[mm]
BA round 1	283,5	94,5	0,55	51	4,2	5,60	1	1,8	2,1	5,0	6	275,2	474,2	887,5
BA round 2	283,5	94,5	0,57	76	4,2	5,50	0,66	1,8	2,1	5,0	6	404,0	689,5	1149,0
BA round 3	413,1	137,7	0,55	76	3,7	5,50	1	2,7	3,4	5,0	4	352,4	548,9	1090,3
BA round 4	309,0	103,0	0,55	51	4,2	5,50	1	1,8	2,2	5,2	6	269,7	455,9	790,2
BA round 5	243,3	81,1	0,52	38	4,2	5,35	1	1,4	1,7	5,2	8	241,7	406,4	937,5
BA round 6	417,0	139,0	0,55	64	4,4	5,60	1	2,3	2,9	5,3	5	240,5	421,4	760,8
BA round 7	401,1	133,7	0,58	76	4,2	5,60	1	2,7	3,3	5,0	4	311,3	518,3	809,3

Tabelle 11. Details der Großsprengungen im Bärarp-Steinbruch (Moser et al. 2003)



Probe	Bemerkung	Probenmasse	Sprengstoffmasse	Form	Bohrloch durchmesser	Sprengstoffdichte	Vorgabe	Seitenabstand	BL-Anzahl	VOD	k ₃₀ -Wert	k ₅₀ -Wert	k ₈₀ -Wert
		[t]	[g]		[mm]	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/s]	[mm]	[mm]	[mm]
BIT_FB_HB		-	-	other	92	-	-	-	-	-	4,0	11,8	30,8
BIT_FULLBLAST	420-4/2003, 3800 t	2000	-	other	92	~0,8	3,2	4,0	5	-	310,7	551,2	934,1

Tabelle 12. Großsprengung 420-4/2003 und eine unrepräsentative Probe einer Großsprengung im Steinbruch Eibenstein

Die Zerkleinerungsergebnisse und Sieblinien dieser Versuche finden sich im Anhang 4 zu dieser Arbeit.

4.7.4. Mechanischen Zerkleinerungsversuche

Probe	Bemerkung	Probenmasse	Form	Kopplung	Bohrloch durchmesser	Sprengstoffdichte	Länge/Durchmesser	Höhe	Breite	k ₃₀ -Wert	k ₅₀ -Wert	k ₈₀ -Wert
		[kg]			[mm]	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Spaltversuche mit Quellzement												
MBW_QZ 1	18mm BL, 100g Quellzement +20 g Wasser	~17	Prisma	-	18	-	-	-	-	-	-	-
MBW_QZ 2		~17	Prisma	-	18	-	-	-	-	-	-	-
MBW_WT1-8QZ		17,04	Prisma	-	18	-	200	200	200	193,1	207,7	222,1
Druckversuche												
MC_2_(50_100)	Druckprobe	0,54	Zylinder	-	-	-	50	100	-	55,3	58,4	61,5
MC_5_(50_100)	Druckprobe	0,56	Zylinder	-	-	-	50	100	-	56,0	58,9	61,6
MBK1	einaxiale Druckbel. 65 Mpa	0,31	Zylinder	-	-	-	44	97	-	43,3	46,0	48,6
MBK2	einaxiale Druckbel. 71 Mpa	0,32	Zylinder	-	-	-	44	98	-	44,6	46,8	48,9
MBK3	einaxiale Druckbel. 69 Mpa	0,31	Zylinder	-	-	-	44	97	-	35,6	40,9	46,8
MBK4	einaxiale Druckbel. 53 Mpa	0,31	Zylinder	-	-	-	44	97	-	28,8	31,7	42,2
MBW_PL1	Point Load	17,2	Prisma	-	-	-	200	200	200	-	-	-
MBW_PL2	Point Load	16,9	Prisma	-	-	-	200	200	200	-	-	-

Tabelle 13. Mechanische Zerkleinerungsversuche in Magnetitbeton

Die Zerkleinerungsergebnisse und Sieblinien dieser Versuche finden sich im Anhang 5 zu dieser Arbeit.



4.7.5. Beprobung von Hauwerk aus Aufbereitungsanlagen

Probe	Bemerkung	Proben masse	k ₃₀ - Wert	k ₅₀ - Wert	k ₈₀ - Wert
		[kg]	[mm]	[mm]	[mm]
BIT Processing Plant Str.15_1	Stream 15, 1. Beprobung	-	17,3	27,7	41,7
BIT Processing Plant Str.4_1	Stream 4, 1. Beprobung	-	12,8	26,7	47,6
BIT Processing Plant Str.4_2	Stream 4, 2. Beprobung	-	10,6	24,4	46,0
BIT Processing Plant Str.7_1	Stream 7, 1. Beprobung	-	0,1	0,6	2,6

Tabelle 14. Daten von Aufbereitungsproben vom Steinbruch Eibenstein

Die Sieblinien der entnommenen Proben finden sich im Anhang 6 zu dieser Arbeit.



5. Verfahren zur Beschreibung der Natürlichen Bruchcharakteristik und Abgrenzung des Begriffes der „Selbstähnlichkeit“

5.1. Einleitung

Die natürliche Bruchcharakteristik (NBC) als Materialparameter beschreibt das Verhalten eines Gesteins hinsichtlich seiner Eigenschaft, beim Zerkleinern in Bruchstücke bestimmter Größenordnung zu zerfallen. Als Ergebnis eines Zerkleinerungsprozesses äußert sich die NBC in Form einer materialcharakteristischen Ausprägung der Verteilung der Größe der Körner in einer Summendurchgangsverteilung in log-log maßstäblicher Darstellung (GGS-Netz).

Zur nachvollziehbaren Beschreibung einer „materialcharakteristischen Ausprägung einer Korngrößenverteilungskurve“ wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen, die schon von *Reichholf (2004)* verwendet wurde, aber auf den Vorschlag des Verfassers dieser Dissertation zurück geht.

5.2. Beschreibung der NBC nach Grasedieck

Die NBC eines Materials ist die Verteilung des Betrages der Neigungen n der Korngrößensummenverteilungskurve im GGS Netz (log Durchgang - log Korngrößennetz). über die einzelnen Korngrößenklassen k .

Sie wird für jede einzelne Korngrößenklasse k der Normsiebreihe wie folgt berechnet:

$$n = \frac{\log \frac{D_o}{D_u}}{\log \frac{k_o}{k_u}}$$

Gleichung 11

wobei D_o und D_u die Durchgangswerte der betrachteten Korngrößenklassen und k_o und k_u die Korngrößenklassengrenzen oben und unten sind.

Die Darstellung der NBC für ein bestimmtes Material besteht nun in Form eines Diagrams, das die klassenweise Neigung der Korngrößensummenverteilungskurve über den einzelnen Korngrößen-

klassen darstellt. Die Abbildung 24 zeigt als Beispiel die NBC für die drei natürlichen Gesteine Amphibolit, Sandstein und Kalkstein. Die NBC in Abbildung 24 wurde aus den Korngrößenverteilungskurven für die drei Materialien (dargestellt in Abbildung 23) abgeleitet.

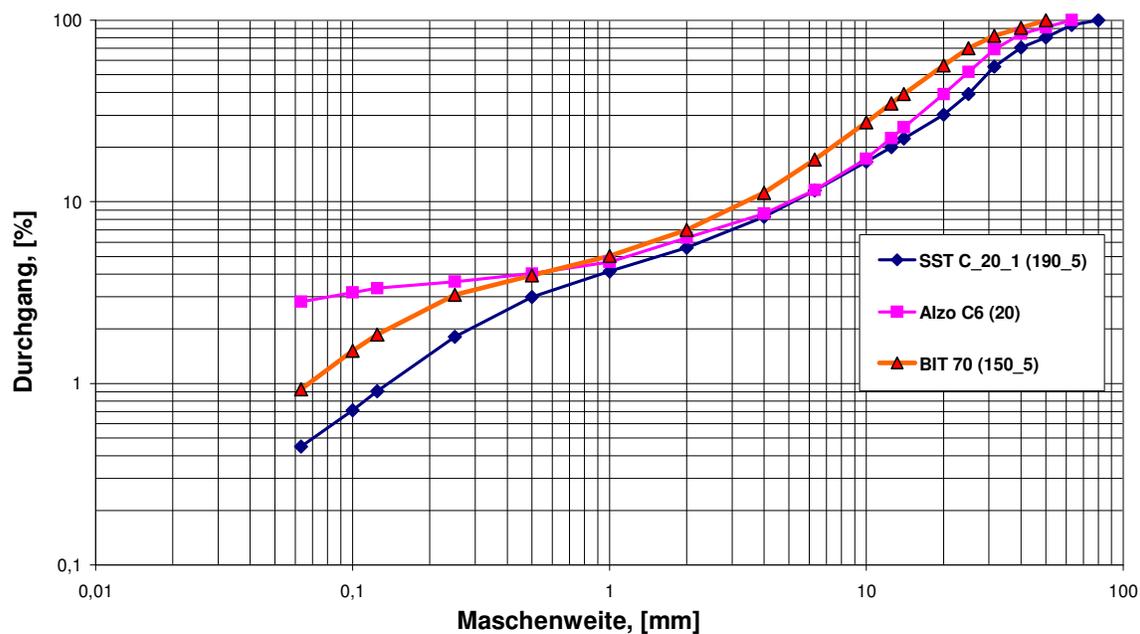


Abbildung 23. Korngrößenverteilungskurven von Amphibolit, Sandstein und Kalkstein (für Sprengversuche im Modellmaßstab).

Der jeweilige n-Wert bezieht sich in diesem Diagramm wie auch in der gesamten Arbeit immer auf den unteren k-Wert (k_w).

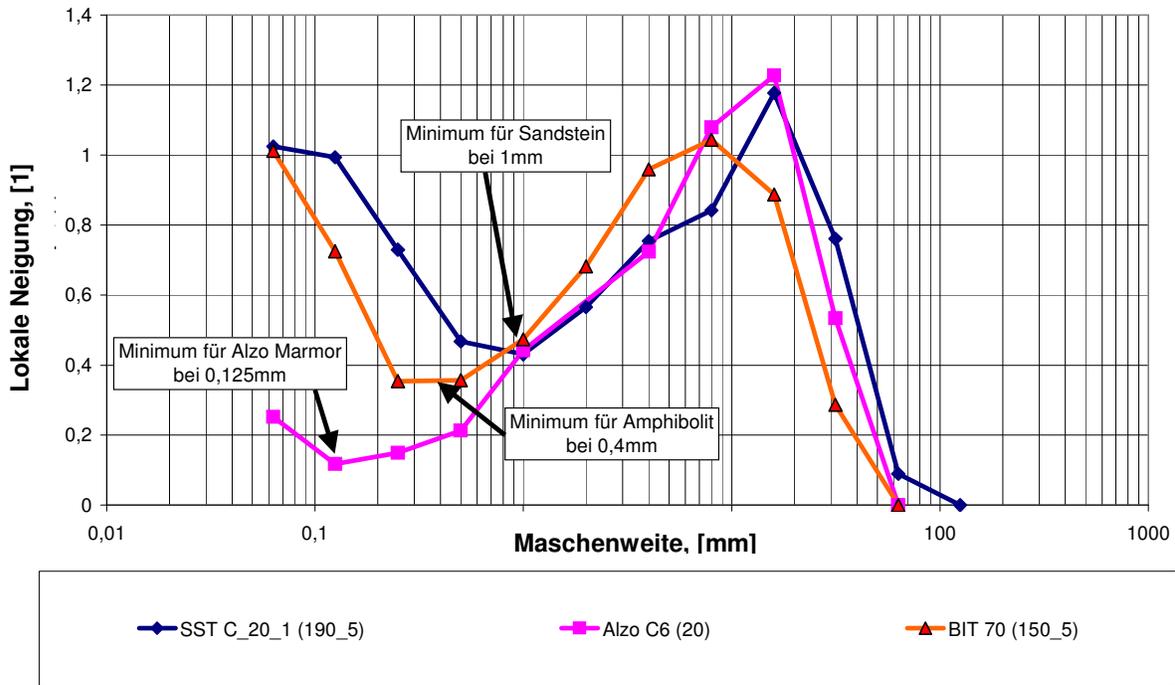


Abbildung 24. NBC Diagramme für Amphibolit, Sandstein und Kalkstein. Die n -Werte wurden anhand der Normsiebreihe ermittelt.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass ein jedes Gestein oder gesteinsähnliche Material (z.B. Beton) eine eigene charakteristische NBC Kurve aufweist, wie diese in Abbildung 24 dargestellt sind. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass die experimentellen Schwankungen der NBC für ein bestimmtes Material geringer sind als die NBC Unterschiede zwischen verschiedenen Materialien. Demnach kann für jedes Material eine eigene spezifische NBC Kurve ermittelt werden. Diese beschreibt den Aufbau einer Korngrößensummenverteilungskurve im GGS Maßstab, unabhängig von der Maximalkorngröße der Summenverteilungskurve.

Als weiteres Ergebnis der Untersuchungen zeigte sich, dass die Korngrößenklasse in der sich das Minimum der Neigung der Korngrößenverteilungskurve befindet für ein bestimmtes Gestein unabhängig von der Art des Zerkleinerungsprozesses und auch unabhängig von der Größe der zerkleinerten Probe ist.

Demnach können die folgenden drei Parameter zur Charakterisierung des Zerkleinerungsverhaltens eines gesteinsähnlichen Materials angegeben werden:

- Neigung der Korngrößensummenverteilungskurve über die einzelnen Kornklassen
- Korngrößenlage des Minimums der Neigung der Korngrößensummenverteilungskurve
- Betrag des Neigungsminimums



Entgegen den bisherigen Erfahrungen in der Zerkleinerung (Steiner 1990, 1998) konnte **kein** homogenes Zerkleinerungsverhalten von Gesteinen über den gesamten Korngrößenbereich gefunden werden wie es durch eine konstante Neigung der Korngrößensummenverteilungskurve über weite Korngrößenbereiche definiert ist. Das heißt, die Verteilung der Neigung der Korngrößensummenverteilung über die einzelnen Kornklassen zeigte bisher für jedes untersuchte Material ein ausgeprägtes Minimum, wobei dies zum Teil erst in den Kornklassen $< 100 \mu\text{m}$ auftritt. Im Hinblick auf das Auftreten der NBC hinsichtlich der Korngrößenbereiche konnte bisher zu kleineren Korngrößen hin keine Grenze für ein materialspezifisches Zerkleinerungsverhalten gefunden werden. Zu größeren Korngrößen hin zeigt sich eine von Material zu Material unterschiedliche maximale Korngröße (in der Größenordnung von mm) bis zu der das Auftreten einer materialcharakteristischen Ausprägung der Summenverteilungskurven beobachtet werden konnte.

Die Basis für das Beobachten einer materialcharakteristischen NBC bildet die Analyse einer großen Zahl von Sieblinien aus Zerkleinerungsversuchen. Dafür war es erforderlich, einen Beurteilungsmaßstab festzulegen, mit dem es objektiv möglich ist zu entscheiden, ob eine Zahl von Korngrößenverteilungskurven als selbstähnlich im Sinne der charakteristischen Ausprägung der Kurven bezeichnet werden konnte.

Der Beobachtungsmaßstab wurde wie folgt festgelegt: **„Die NBC tritt für ein Material bis zu jener Korngrößenklasse auf, bis zu der eine Hochselbstähnlichkeit oder eine Selbstähnlichkeit zwischen den Korngrößensummenverteilungskurven mehrerer experimentell zerkleinerter Proben beobachtet werden kann.“** Die Einführung und Umsetzung dieses Konzepts in die Praxis ist in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben.

5.3. Abgrenzung des Begriffes der Selbstähnlichkeit

Das Vorhandensein einer NBC für gesteinsähnliche Materialien wurde aus der experimentellen Beobachtung einer materialcharakteristischen Verteilung der Größe der Partikel eines zerkleinerten Gutes abgeleitet. Eine NBC ist gegeben, wenn die Zerkleinerungskurven selbstähnlich, das heißt in den einzelnen Korngrößenklassen die gleichen Neigungen aufweisen (zueinander im log-log Maßstab parallel sind).

Dabei stellte sich die Aufgabe nachvollziehbar festzustellen, ob mehrere Summenverteilungskurven in GGS Darstellung für ein bestimmtes Material die gleiche Charakteristik aufweisen, das heißt selbstähnlich sind.



Eine vollkommene Selbstähnlichkeit ist gegeben, wenn die Summenverteilungskurven in den einzelnen Kornklassen die gleichen Neigungen aufweisen. Da bei den experimentellen Untersuchungen aber im wesentlichen natürliche Gesteine verwendet wurden, die auch bei gleicher Art und Herkunft nicht alle exakt dieselben Eigenschaften aufweisen (Klüftigkeit, Festigkeit, etc.), und trotz aller Genauigkeit, Gewissenhaftigkeit und Exaktheit bei der Durchführung von Experimenten es zu einem unvermeidbaren Maß an Schwankungen kommt, wird im folgenden eine Vorgehensweise vorgestellt an Hand der nachvollziehbar beurteilt werden kann, für welche Bereiche der Summenkorngrößenverteilungskurven eine Selbstähnlichkeit mehrerer Kurven gegeben ist und demnach eine NBC abgeleitet werden kann.

5.3.1. Veranschaulichung der Analyse der NBC an Hand von Beispielen

Wie sich verschiedene Formen von Korngrößensummenverteilungskurven in ihrer ersten Ableitung über jeder einzelnen Korngrößenklasse abbilden (NBC Diagramm), sei in diesem Abschnitt an einigen Beispielen erläutert.

Abbildung 23 zeigt die Summenverteilungskurven ausgewählter Proben aus Sandstein, Amphibolit und Kalkstein. Die Summenverteilungskurven von Kalkstein und Sandstein weisen im Bereich der Korngrößen zwischen 4 mm und 10 mm nicht nur dieselbe Neigung, sondern auch vergleichbare Durchgangswerte auf (Abbildung 23). Unter 4 mm verflacht die Kurve des Kalksteins im Vergleich zum Sandstein. Dies zeigt sich auch durch einen deutlichen Abfall der Neigung in der Abbildung 24 für den Bereich < 1 mm.

Die Neigungsminima von Sandstein und Kalkstein liegen bei 1 mm und 0,125 mm, und auch deren Absolutwerte sind deutlich voneinander verschieden (0,12 bei Alzo-Kalkstein und 0,35 bei Sandstein).

Betrachtet man nun die beiden Summenkurven von Amphibolit und Sandstein (Abbildung 23), so sehen diese in der Summenkurve sehr selbstähnlich (parallel) aus. Würden die beiden Kurven in absoluten Durchgangswerten weiter auseinander liegen, würde man sie vermutlich als selbstähnlich einstufen. Das NBC Diagramm zeigt jedoch deutliche Unterschiede in Lage und Position der Minima zwischen Sandstein und Amphibolit (Abbildung 24).



5.3.2. Festlegung und Berechnung der Grenzen der Selbstähnlichkeit

Im folgenden Abschnitt wird die Beurteilung der Selbstähnlichkeit von Korngrößensummenverteilungskurven in GGS-Netz Darstellung, als Basis für das Ableiten des Auftretens der NBC in den verschiedenen Korngrößeklassen beschrieben.

Die Selbstähnlichkeit von Korngrößensummenverteilungskurven bezieht sich auf die „Ähnlichkeit einer einzelnen Korngrößenvorteilungskurve zu einer Mittelkurve für ein bestimmtes Material“. Die Bildung der Mittelkurve für ein bestimmtes Material ist demnach als äußerst kritisch einzustufen.

Zur Beurteilung der Selbstähnlichkeit wurden 4 Begriffe definiert, die im Folgenden erläutert werden:

- *Hochselbstähnlich*: Die kornklassenweisen Neigungen der einzelnen zu beurteilenden Korngrößensummenverteilungskurven unterscheiden sich vom Mittelwert (gebildet aus den einzelnen Kurven eines Materials) um nicht mehr als $\pm 10\%$;
- *Selbstähnlich*: Die kornklassenweisen Neigungen der einzelnen zu beurteilenden Korngrößensummenverteilungskurven unterscheiden sich vom Mittelwert (gebildet aus den einzelnen Kurven eines Materials) um nicht mehr als $\pm 25\%$
- *Schwach Selbstähnlich*: Die kornklassenweisen Neigungen der einzelnen zu beurteilenden Korngrößensummenverteilungskurven unterscheiden sich vom Mittelwert (gebildet aus den einzelnen Kurven eines Materials) um nicht mehr als $\pm 40\%$
- *Nicht selbstähnlich*: Die kornklassenweisen Neigungen der einzelnen zu beurteilenden Korngrößensummenverteilungskurven unterscheiden sich vom Mittelwert (gebildet aus den einzelnen Kurven eines Materials) um mehr als 40% .

Diese Mittelwertbildung wird wie folgt vorgenommen (erläutert an Hand eines Beispiels in Tabelle 15). Die Spalten der Probe (die die Proben enthalten) werden mit der Laufvariablen k bezeichnet, die Anzahl von k ist K. Die Zeilen werden von unten nach oben (beginnend mit der kleinsten Korngrößeklasse) mit dem Index g versehen. Die Anzahl von g ist G.

$$\bar{n}_g = \frac{\sum n_k}{K}$$

Gleichung 12



Nach der Bildung des klassenweisen Mittelwertes \bar{n}_g wird überprüft, ob alle Elemente, die den Mittelwert bilden, folgende Bedingung erfüllen (in Farbe dargestellte Zellen, Tabelle 15).

$$0,7 \cdot \bar{n}_g < n_{k;g} < 1,3 \cdot \bar{n}_g$$

Gleichung 13

wobei k...Zähler in x-Richtung der Tabelle (Spalten die Proben enthalten), k=1 bis K; g ...Zähler in y-Richtung der Tabelle von unten, bei der kleinsten Korngrößenklasse beginnend g=1 bis G.

Nachdem alle klassenweisen Mittelwerte gebildet und Ausreißer nach o.g. Bedingung (Gleichung 13) ausgeschlossen wurden, sind noch alle Tabellenelemente auf folgende Bedingung hin zu überprüfen:

$$0,5 \cdot \bar{n}_g < n_{k;g+1} < 1,5 \cdot \bar{n}_g$$

Gleichung 14

Nachdem alle klassenweisen Mittelwerte gebildet, alle Ausreißer beseitigt und die Mittelwerte neu berechnet wurden, wird auch der Gesamtmittelwert gebildet.

$$\bar{n}_{ges} = \frac{\sum \bar{n}_g}{G}$$

Gleichung 15

Wobei g=1 bis G.

Dieser Gesamtmittelwert \bar{n}_{ges} wird zur Berechnung der Grenzen der Selbstähnlichkeit (10 %, 25 % und 40 %) herangezogen.

Von jedem klassenweisen Mittelwert werden jeweils die 10 %, 25 % und 40 % des Gesamtmittelwertes (\bar{x}_{ges}) für die Untergrenzen abgezogen bzw. für die Obergrenzen dazuaddiert.

$$\begin{aligned} n_{k,U,10\%} &= \bar{n}_g - \bar{n}_{ges} \cdot 0,10 & n_{k,O,10\%} &= \bar{n}_g + \bar{n}_{ges} \cdot 0,10 \\ n_{k,U,25\%} &= \bar{n}_g - \bar{n}_{ges} \cdot 0,25 & n_{k,O,25\%} &= \bar{n}_g + \bar{n}_{ges} \cdot 0,25 \\ n_{k,U,40\%} &= \bar{n}_g - \bar{n}_{ges} \cdot 0,40 & n_{k,O,40\%} &= \bar{n}_g + \bar{n}_{ges} \cdot 0,40 \end{aligned}$$

Gleichung 16



Die erhaltenen Grenzwerte werden in einem logarithmisch-linearen Diagramm dargestellt: x-Achse → Korngrößen / y-Achse → Lokale Neigungen/GGS-Exponenten (Abbildung 25).

	BIT 2_A (240_5)	BIT 2_B (190_4)	BIT 21 (240_5)	BIT 3 (190_5)	BIT 66 (190_4)	BIT 70 (150_5)	BIT 73_A (100_5)	BIT 73_B (100_5)	BIT 78 (290_5)	BIT 79 (190_5)	BIT 8 (290_5)	Mittelwert Modell Sprengr (10 bla n_g)
	BIT	BIT	BIT	BIT	BIT	BIT	BIT	BIT	BIT	BIT	BIT	
1000												
500												
250												
125									0,20		0,14	
63	0,47	0,41	0,22	0,07	0,05				1,19	0,12	1,12	1,16
31,5	1,61	1,53	1,86	1,03	1,49	0,29			1,59	1,15	1,48	1,47
16	1,45	1,38	1,39	1,28	1,40	0,89	0,15	0,16	1,23	1,47	1,26	1,31
8	1,08	1,12	0,97	1,18	1,13	1,04	0,52	0,50	0,97	1,19	1,02	1,08
4	0,90	0,84	0,80	0,90	0,86	0,96	0,70	0,73	0,77	0,85	0,81	0,76
2	0,69	0,57	0,64	0,77	0,59	0,68	0,65	0,63	0,60	0,63	0,55	0,64
1	0,54	0,43	0,51	0,59	0,45	0,47	0,43	0,44	0,48	0,50	0,38	0,48
0,5	0,39	0,30	0,41	0,40	0,33	0,36	0,31	0,33	0,36	0,34	0,30	0,35
0,25	0,39	0,33	0,43	0,41	0,40	0,35	0,44	0,51	0,35	0,40	0,47	0,41
0,125	0,64	0,70	0,68	0,72	0,75	0,73	0,74	0,95	0,58	0,69	0,91	0,74
0,063	1,04	1,09	0,94	1,03	1,01	1,01	1,24	1,30	0,71	0,85	1,10	1,03
											$n_{mittel,ges}$	0,85

Tabelle 15. Bestimmung der Selbstähnlichkeit von 11 Korngrößenverteilungskurven für Amphibolit.

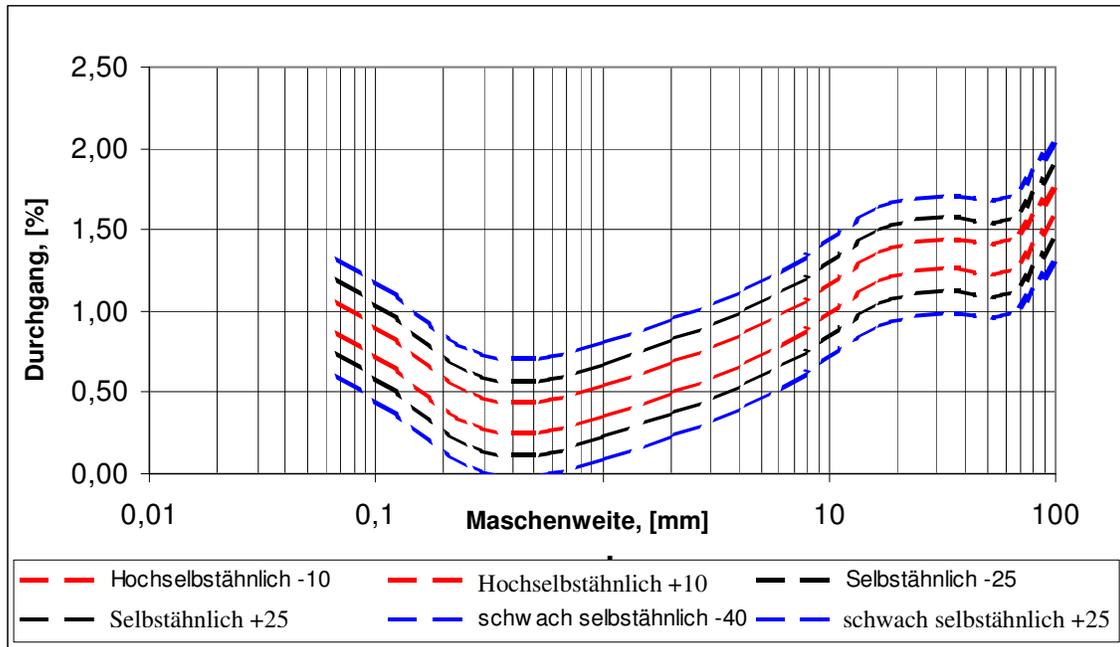


Abbildung 25. Basisdiagramm für die Beurteilung

In dieses Diagramm, das die Selbstähnlichkeitsgrenzen enthält, werden in weiterer Folge die zu beurteilenden Korngrößenverteilungskurven eingetragen. Kommt nur ein einzelner Punkt außerhalb der Grenze zu liegen und folgt der andere Teil der Kurve dem Trend, so ist dieser Punkt als Ausreißer zu sehen. In diesem Fall ist die Kurve trotzdem als selbstähnlich zu betrachten.

Kommen mehrere Punkte in Folge außerhalb der zuvor festgelegten Grenzen zu liegen (das heißt es ist ein Trend erkennbar), so ist ab dem ersten Punkt die Kurve nicht mehr der jeweiligen „Selbstähnlichkeitsstufe“ zugehörig.

Zum Beispiel lautet dann die Beschreibung für BIT 70 in Abbildung 26: „Die Kurve BIT 70 ist – zu allen durchgeführten Modell- und Großsprengungen bis zu einer Korngröße von 1 mm hochselbstähnlich, zwischen 1 mm und 8 mm selbstähnlich und darüber hinaus nicht mehr selbstähnlich.“, während die Kurve BIT 2 zu allen durchgeführten Zerkleinerungsversuchen im Amphibolit bis zu einer Korngröße von 4 mm hochselbstähnlich und von 4 mm bis 32 mm selbstähnlich ist, bevor sie ab 32 mm den Bereich der Selbstähnlichkeit verlässt.

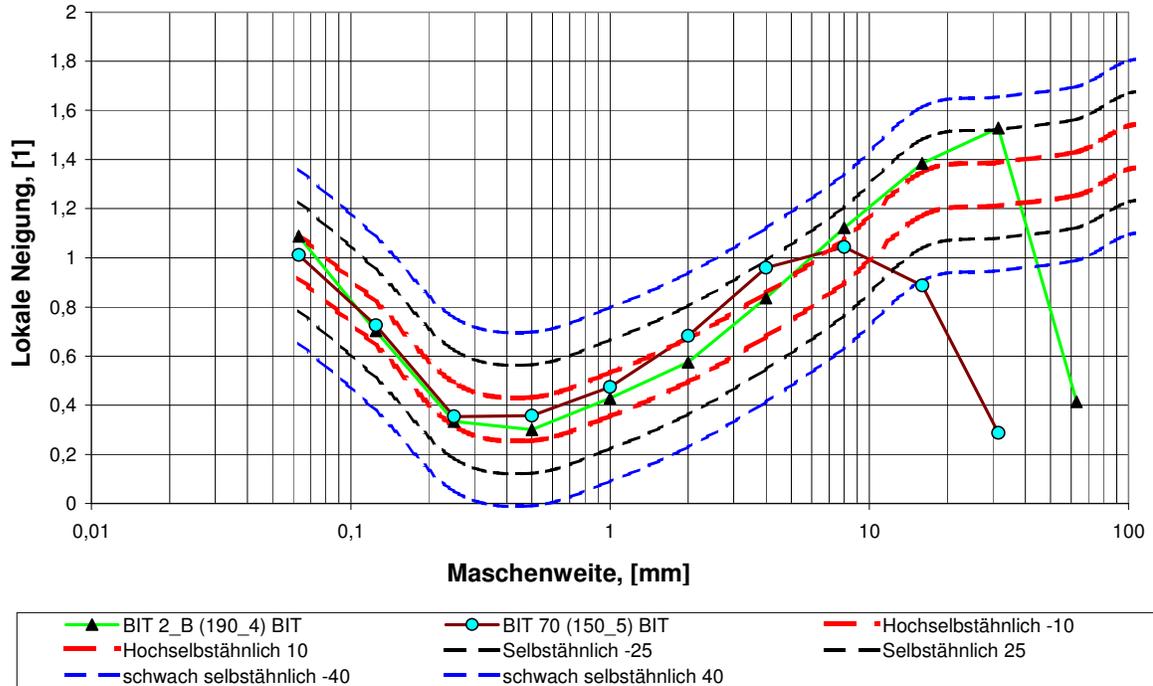


Abbildung 26. Beurteilung der Korngrößenverteilungskurven für 2 Zerkleinerungsversuche in Amphibolit hinsichtlich Ihrer Selbstähnlichkeit

5.3.3. Flussdiagramm zur Beurteilung der Selbstähnlichkeit

In Abbildung 27 wurde ein Ablaufschema ausgearbeitet, das die einzelnen Schritte der Beurteilung der Selbstähnlichkeit von Korngrößenverteilungskurven zusammenfassend erläutert.



6. Untersuchung der Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven von Sprenghauwerk

6.1. Allgemeines

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es herauszufinden, inwieweit die Gesetzmäßigkeiten der NBC auch für gesprengtes Material gelten und wie verschiedene Randbedingungen beim Sprengen (Änderung der freien Fläche, Probengröße, Energieeintrag, etc.) die Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven beeinflussen. Die Untersuchungen wurden an BBK-Beton, Amphibolit aus dem Steinbruch Eibenstein und Bårarp-Gneis durchgeführt. In Ergänzung dazu wurden auch noch einige Analysen an weiteren Gesteinen zur Bestätigung des vorher Beobachteten herangezogen.

6.2. Untersuchungen in Magnetitbeton

6.2.1. Einleitung

Zahlreiche Zerkleinerungsversuche mit unterschiedlichster Anordnung wurden in Magnetitbeton durchgeführt, einerseits um mit einem möglichst homogenen Werkstoff zu arbeiten und andererseits, um reproduzierbare Proben einfach herstellen zu können. Alle Proben wurden nach einer Rezeptur gemäß Tabelle 1 erstellt und danach 28–31 Tage ausgehärtet. Die Zugabe von feinkörnigem Magnetit zur Betonmischung hatte zwei Gründe: Zum einen sollte die Dichte erhöht werden, zum anderen sollte der Magnetitbeton nach der Sprengung einfach durch Magnetscheidung von anderen Materialien/ Gesteinen getrennt werden können. Detaillierte Beschreibungen der durchgeführten Versuche sind in Kapitel 4 und die jeweiligen Probendetails in Tabelle 7 dargestellt.

Die Abbildung 28 zeigt nun die Korngrößenverteilungskurven (Zerkleinerungskurven) aller gesprengten Magnetitbetonproben. Die dazugehörigen Siebergebnisse sind tabellarisch im Anhang zu dieser Arbeit wiedergegeben. Die Abbildung 29 zeigt die Charakteristiken dieser Zerkleinerungskurven in Form der lokalen Neigungen. Auf die einzelnen Versuchsanordnungen und die jeweiligen Charakteristiken der Zerkleinerungsergebnisse wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

Betrachtet man die Zerkleinerungskurven in Abbildung 28 im Allgemeinen, so zeigt sich eine deutliche Parallelität (Selbstähnlichkeit) der Kurven bis zu einer Korngröße von ca. 10–15 mm. Auch im Diagramm, das die Lokalen Neigungen darstellt (Abbildung 29), ist eine deutliche Selbstähnlichkeit bis zu einer Korngröße von 10 mm erkennbar. Einige Proben verlassen bei 10 mm den Bereich



der Selbstähnlichkeit. Die Zerkleinerungscharakteristik von Magnetitbeton ist geprägt durch ein sehr klares Minimum der Lokalen Neigungen in der Korngrößenklasse 0,5/1 mm.

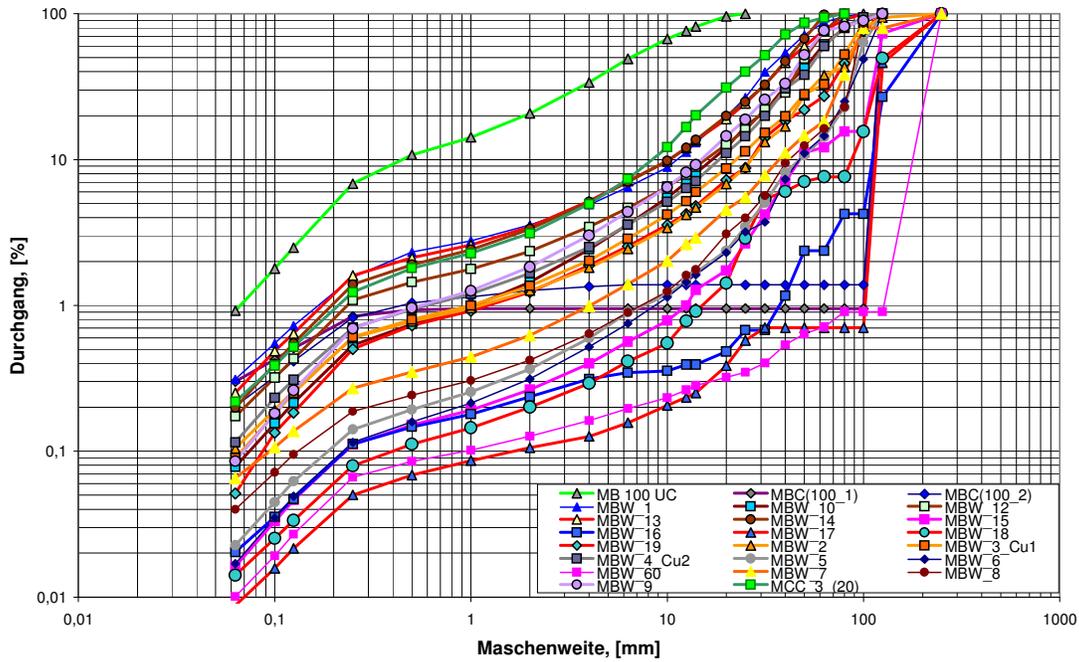


Abbildung 28. Zerkleinerungskurven aller Versuche im BBK-Beton im Überblick

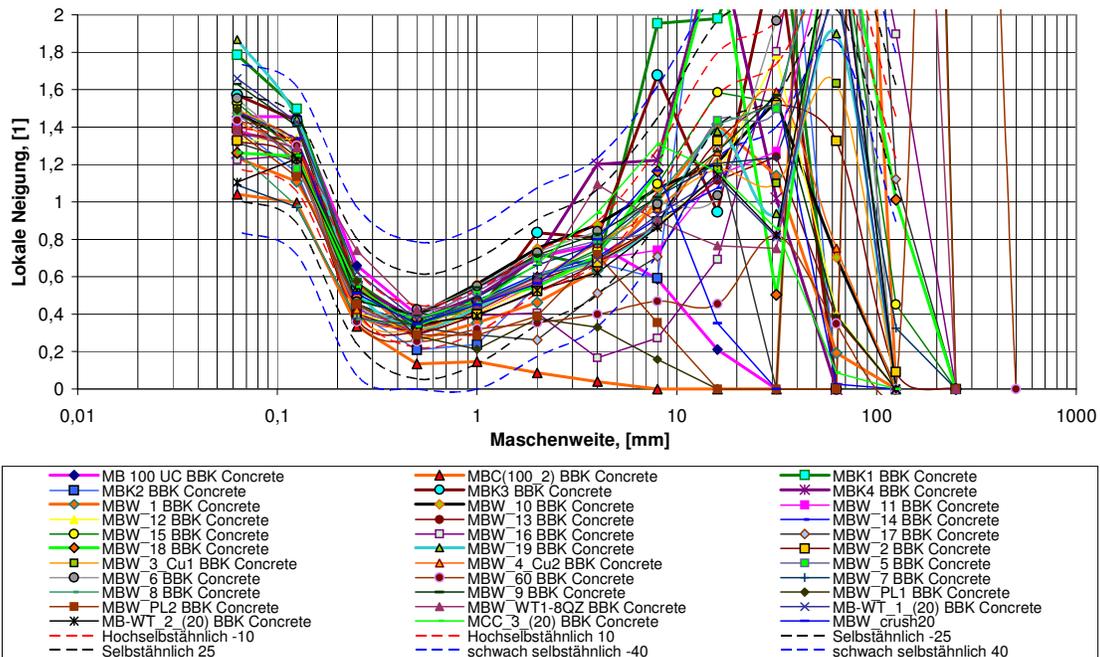


Abbildung 29. Lokale Neigungen aller BBK-Beton-Versuche im Überblick



6.2.2. Sprengungen von Proben aus Magnetitbeton im Labormaßstab

Zu Beginn der Testserie und als Referenzproben wurden Magnetitbetonquader mit einer Größe zwischen 200 x 200 x 200 mm und 270 x 270 x 200 mm mit einer jeweils zentral eingebrachten Nitropentaladesäule von 5 mm Durchmesser gesprengt. Die Charakteristik der Ergebnisse der resultierenden Zerkleinerungskurven sind in Abbildung 30 dargestellt. Die Zerkleinerungsergebnisse sind zueinander hochselbstähnlich, mit Ausnahme des Ergebnisses des Versuchs MBW 60, eines 600 mm x 600 mm x 200 mm Quaders, der bereits bei 1 mm Korngröße den Bereich der Hochselbstähnlichkeit verlässt. Das Ergebnis des MBW 60 Versuches ist auch dadurch gekennzeichnet, dass sich das Zerkleinerungsergebnis als sehr grob darstellte und der gewählte spezifische Sprengstoffeintrag von 34,36 g/t an der unteren Grenze für einen Zerkleinerungserfolg lag.

Mit Ausnahme des eben erwähnten Versuches MBW 60 stellen sich die anderen Ergebnisse hinsichtlich der Selbstähnlichkeit der Zerkleinerungskurven wie erwartet dar und weisen die hohe Selbstähnlichkeit auf, wie sie schon von *Reichholf 2004* im Rahmen von umfangreichen Versuchen beobachtet wurde.

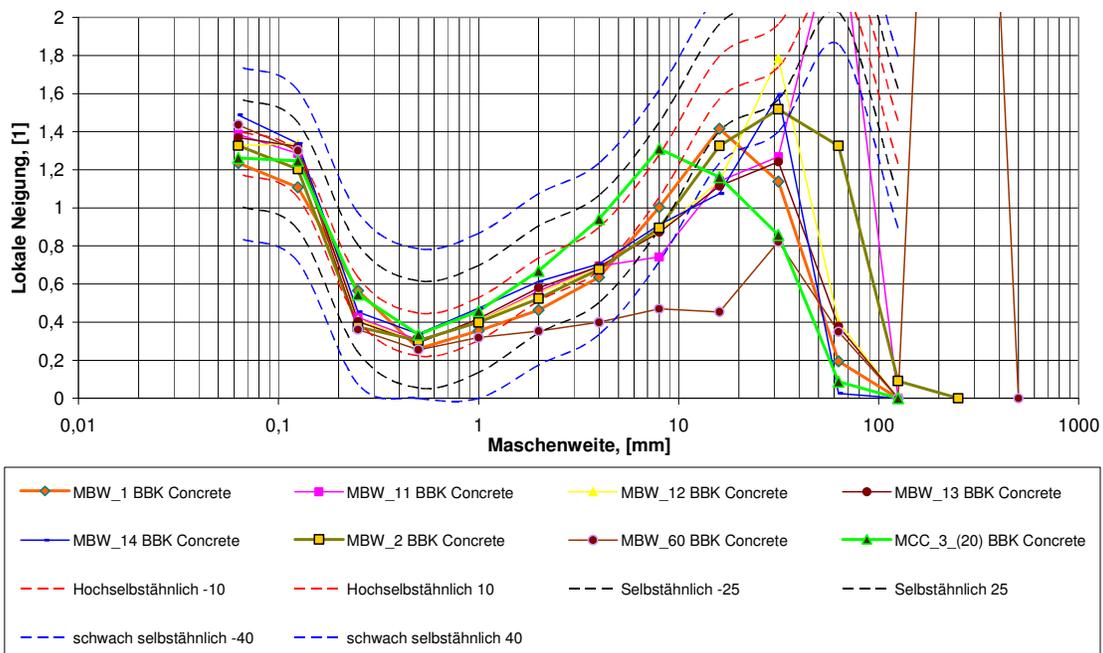


Abbildung 30. Lokale Neigungen aller normal gesprengten BBK-Beton-Würfel



6.2.3. Sprengversuche im Labormaßstab mit besonderer Anordnung

Um ein besseres Verständnis für das Zustandekommen der Charakteristik einer Zerkleinerungskurve zu entwickeln und insbesondere auch die Ausbildung der Zermalmungszone rund um eine Sprengladung untersuchen zu können, wurden Sprengversuche mit besonderer Anordnung der zu zerkleinernden Proben durchgeführt.

6.2.3.1 Sprengversuche mit entkoppelten Sprengstoffladungen

Um zu zeigen, dass der Großteil des Feinmaterials beim Sprengen **nicht** aus der Zermalmungszone kommt, wurden Versuche mit entkoppelten Sprengladungen durchgeführt. Die Entkopplung des Sprengstoffes von der Bohrlochwandung war dazu ausgelegt, die Zermalmung des Betons am Kontakt zum Sprengstoff zu reduzieren bzw. überhaupt zu vermeiden. Der Aufbau dieser Versuche ist in Kapitel 4.2.4 dieser Arbeit im Detail beschrieben. Verwendete Entkopplungsmedien waren Luft, Zweikomponentenkunstharze und Stahlrohrkombinationen. Es wurden anfangs verschiedene Entkopplungsverhältnisse mit Luft getestet. Das Entkopplungsverhältnis errechnet sich aus Bohrlochdurchmesser : Sprengstoffdurchmesser. Für diese Sprengversuche wurden Magnetitbetonwürfel mit einer Kantenlänge von etwa 200 mm verwendet, die getesteten Entkopplungsverhältnisse lagen zwischen 1 und 5,88.

Die Zerkleinerungsergebnisse wurden mit verschiedenen Entkopplungsverhältnissen (Tabelle 7), beginnend mit 1 (keine Entkopplung) über 2, 4 bis zu 6 getestet. Die energetischen Betrachtungen dieser Versuche sind in der Arbeit von *Wallner (2003)* detailliert erläutert. Ab einem Entkopplungsverhältnis von 4 (20 mm Bohrloch, 5 mm Sprengladung) bleibt die Bohrlochwandung weitgehend intakt und ist bei einem Entkopplungsverhältnis von 6 (30 mm Bohrloch) völlig unbeschädigt.

Wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, wurden auch Versuche mit entkoppelten Ladungen auch mit verschiedenen Stahlrohr-Kombinationen durchgeführt. Da die Stahlrohre beim Sprengen intakt blieben, war damit sichergestellt, dass der Einfluss des Gasdrucks auf die Zerkleinerung rund um das Bohrloch ausgeschaltet worden war.

Wie in Abbildung 31 (MBW_10 bis MBW_19) dargestellt, weichen die Lokalen Neigungen der Proben, bei denen die Ausbildung einer Zermalmungszone durch Stahlrohrkombinationen bzw. durch große Luftentkopplungsverhältnisse unterbunden wurde, nicht von üblich gesprengten (ohne Ladungsentkopplung) Proben ab.

Eine Hochselbstähnlichkeit aller Zerkleinerungskurven mit entkoppelten Ladungen bis zu einer Korngröße von 10 mm kann für alle Proben mit Ausnahme von MBW 16 und MBW 17 (hier nur bis 1 mm) beobachtet werden. Die Besonderheit der Versuche MBW 16 und MBW 17 liegt darin, dass sich die beiden Proben von den anderen Sprengversuchen mit doppelten Stahlrohren im Zentrum durch ihren geringeren spezifischen Sprengstoffeintrag auszeichnen. Der geringere Sprengstoffeintrag im Vergleich zu den anderen Proben war ungewollt und entstand durch die Schwankungsbreite der Versuche. Durch den geringeren Sprengstoffeintrag und durch die doppelten Stahlrohre wurde die Zerkleinerungswirkung des Sprengstoffes so abgeschwächt, dass die Würfel augenscheinlich nur mehr in grobe Blöcke und dazugehörigem Feinmaterial zerfielen.

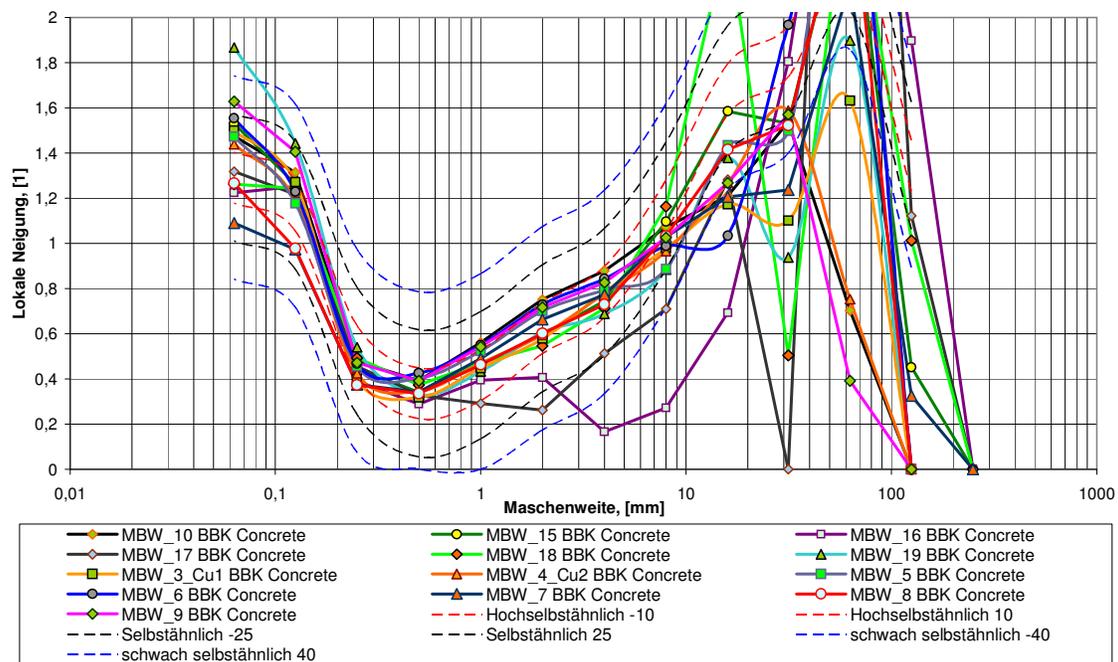


Abbildung 31. Proben, die mit entkoppelten Ladungen gesprengt wurden (Die Grenzen der Selbstähnlichkeit wurden aus allen Sprengungen im Labormaßstab von BBK Beton ermittelt)

Aus der Abbildung 31 ist abzulesen, dass durch die Entkoppelung der Ladungen kein Einfluss auf die Charakteristik der Verteilung insbesondere des Feingutes gegeben ist. Die Sprengergebnisse sind durch die Entkoppelung der Ladung naturgemäß gröber. Es wird weniger Sprengenergie in die Proben eingeleitet. Die Charakteristik der Korngrößenverteilungsergebnisse ist davon aber nicht beeinflusst.

Dies zeigt die Abbildung 32 sehr deutlich, in der die Charakteristik einer Durchschnittsprobe aus allen normalen Zerkleinerungsversuchen (ohne MBW 60) im Vergleich zur Charakteristik der entkoppelten Versuche (ohne MBW 16 & 17) aufgetragen ist.

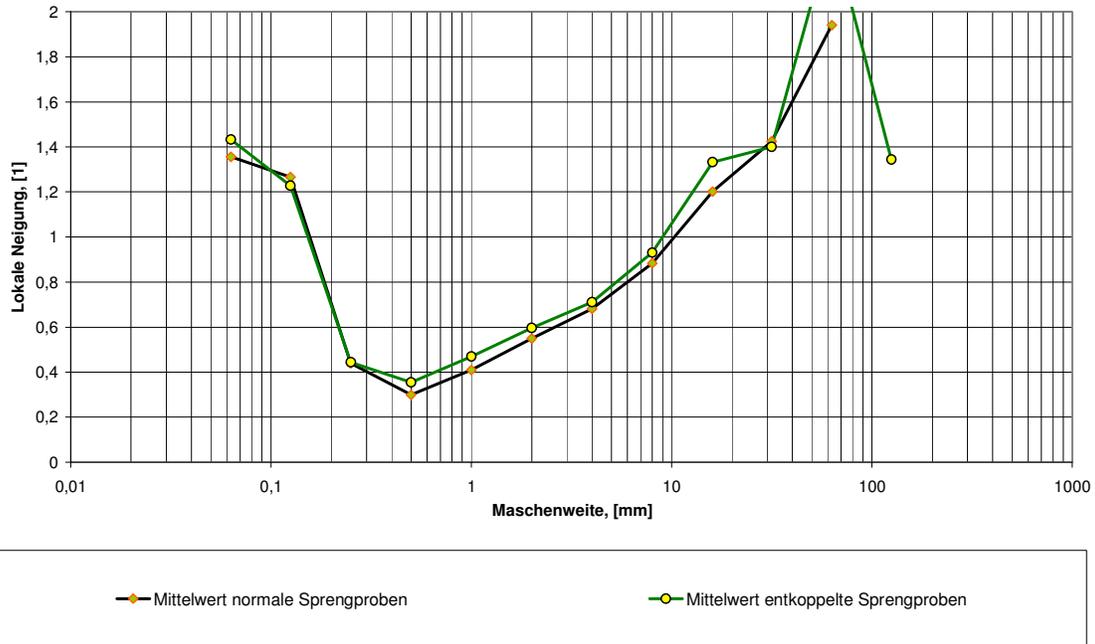


Abbildung 32. Vergleich der Charakteristik von entkoppelten (Mittelwert aus 11 entkoppelten) und nicht entkoppelten (Mittelwert aus 6 normalen) Sprengproben.

Die Charakteristik der Korngrößenverteilung ist gleich bis zu einer Korngröße von 30 mm. Wobei hier besonders darauf hinzuweisen ist, dass im Gegensatz zu den normal gesprengten Proben, bei den entkoppelten Versuchen keine Zermalmungszone rund um das Sprengloch herum ausgebildet wird. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Feingut von gesprengtem Hauwerk in der Zermalmungszone keine andere Verteilungscharakteristik aufweist als das Feingut, welches aus der Rissbildung über die ganze Sprengprobe stammt.

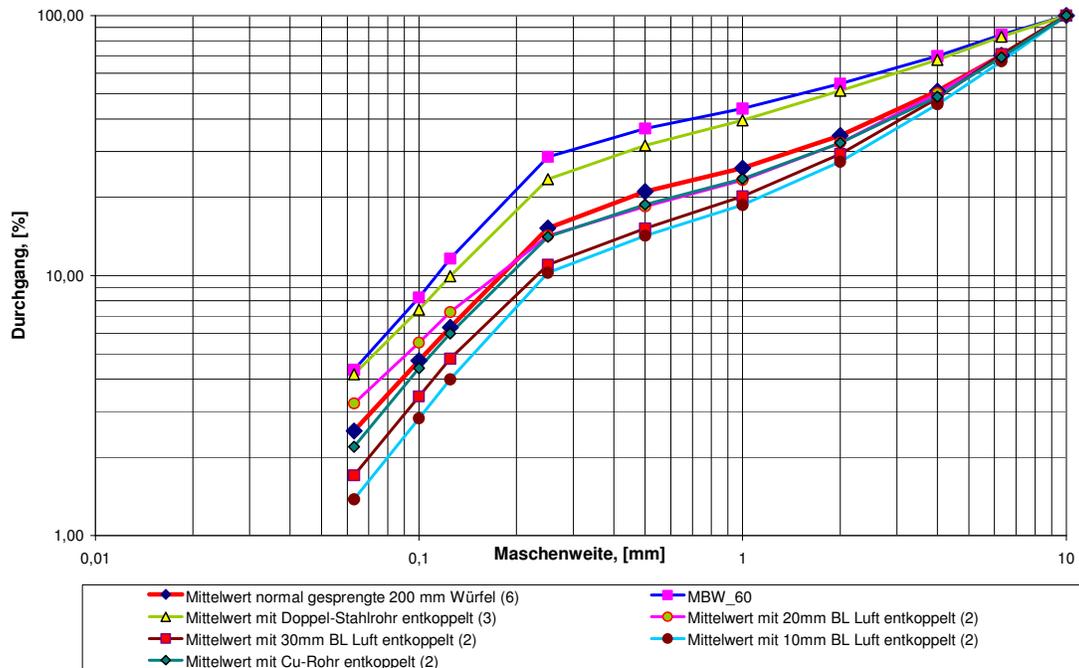


Abbildung 33. Darstellung der Zerkleinerungskurven < 10 mm von entkoppelten und nicht entkoppelten Sprengproben.

Im Hinblick auf den Anfall von Feingut (< 1 mm) im Vergleich von normal gesprengten Proben und solchen mit entkoppelten Ladungen gesprengten Proben zeigt sich folgender Umstand:

- Beim Anteil an Feinmaterial ergibt sich kein systematischer Zusammenhang zwischen entkoppelten und nicht entkoppelten Sprengproben: In Abbildung 33 wurde k_{\max} auf 10 mm gesetzt, um verschiedene Probengrößen vergleichbar zu machen. Es kann beobachtet werden, dass die 3 Sprengproben (MBW 60, und die Mittelwerte aus den Stahlrohr – entkoppelten Sprengproben) die in Abbildung 33 absolut gesehen die feinsten Kurven darstellen, in Abbildung 28 (Überblick über alle gesprengten Betonproben) zu den größten Zerkleinerungskurven zugehörig sind.
- Es ist eine 97 %-ige lineare Korrelation zwischen dem Entkoppelungsverhältnis und dem Anteil an Feinmaterial < 1 mm bezogen auf die Gesamtprobe zu beobachten (Abbildung 34).
- Die spezifischen Oberflächen der entkoppelten Sprengproben und die dazugehörigen spezifischen Energieeinträge korrelieren nicht mit denen der normalen Sprengversuche (Abbildung 35, Wallner 2003).

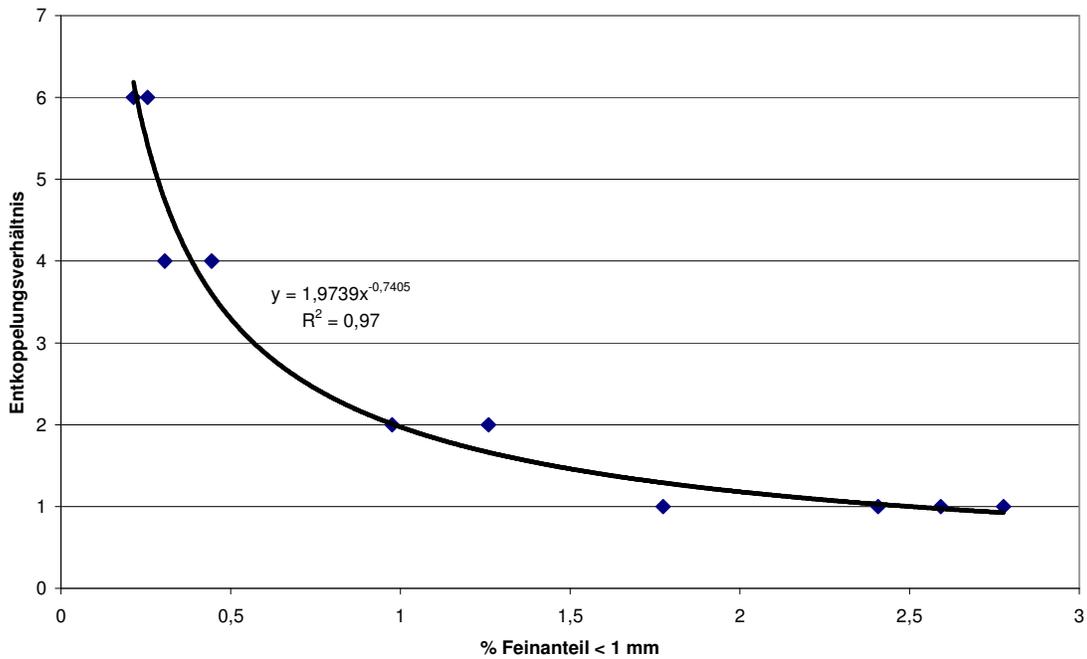


Abbildung 34. Zusammenhang zwischen Entkoppelungsverhältnis und dem Feinanteil <math>< 1 \text{ mm}</math> (aus der Gesamtkurve)

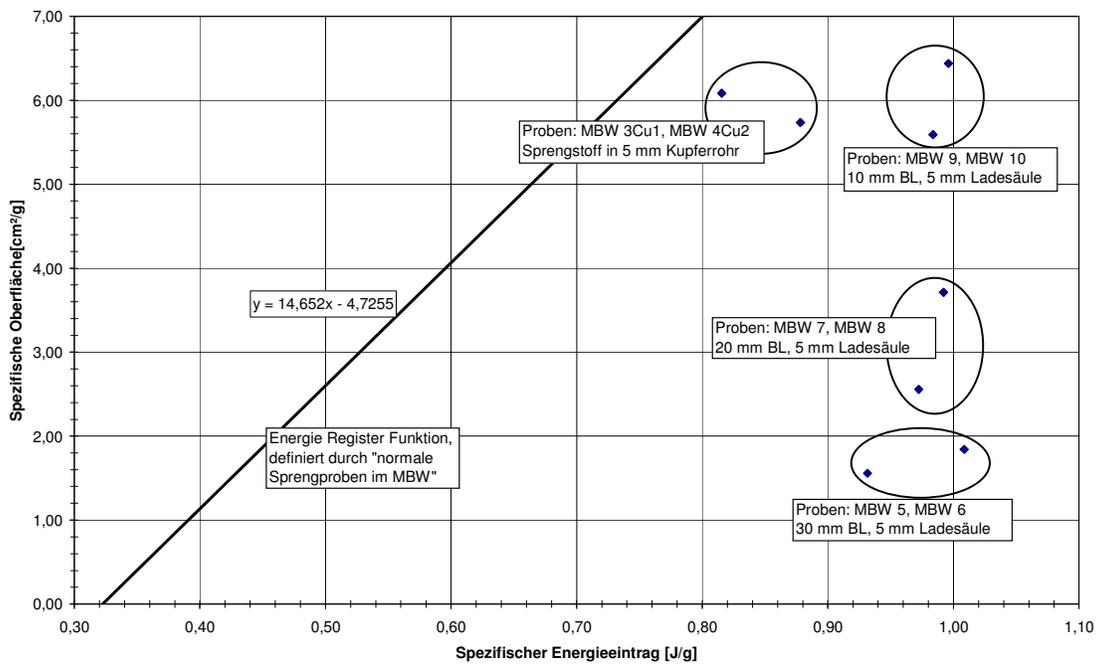


Abbildung 35. Zusammenhang zwischen spezifischem Energieeintrag und spezifischer Oberfläche (Wallner 2003)



6.2.3.2 Sprengversuche an Betonzylindern mit Stahlummantelung

Zur Untersuchung des Zerkleinerungsverhaltens von Betonproben mit großer Einspannung wurde Beton in dickwandige Stahlrohre mit 10 mm Wandstärke eingegossen und mit einer Stahlplatte vor dem Sprengen an der Ober und Unterseite verspannt: Eine detaillierte Versuchsbeschreibung findet sich in Kapitel 4.2.4. Insgesamt wurden 4 Sprengversuche an stahlummantelten Proben durchgeführt.

Probe	MC 10 22.07.2002 Probe aus Stahlzylinderversuch nach Sprengung			MC 11 22.07.2002 Probe aus Stahlzylinderversuch nach Sprengung			MBC 1/3* Magnetitbeton Probe aus jungfräulichem Beton			MBC 1/4* Magnetitbeton Probe aus jungfräulichem Beton		
	L=80,9	Ø=45,2		L=79,5	Ø=45,3		L=90	Ø=44,3		L=85,7	Ø=44,3	
Abmessungen [mm]												
Laufzeit [µs]	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y
	20	11	11	20	11	11	22	11	11	22	11	11
	20	11	11	19	11	11	22	11	11	22	11	11
Durchschnitt	20	11	11	19,7	11	11	22	11	11	22	11	11
P-Wellen Geschw. [m/s]	4045	4109	4109	4042	4118	4118	4091	4027	4027	3985	4036	4036

Tabelle 16. Darstellung der p-Wellengeschwindigkeiten von im Stahlrohr gesprengten und völlig unbeanspruchten Proben (Miklantsch 2002). *Die Proben MBC 1/3 und MBC 1/4 wurden aus einen unbeanspruchten Betonwürfel MBC 20 ausgebohrt.

Die Proben blieben nach der Sprengung intakt, lediglich der ursprüngliche Bohrlochdurchmesser von 5 mm wurde auf ca. 10 mm aufgeweitet. Das Fehlen von Mikrorissen wurde einerseits durch Dünnschliffanalysen (Abbildung 36) und andererseits durch Messungen von p-Wellengeschwindigkeiten vor und nach der Sprengung (Miklantsch 2003) bestätigt (Tabelle 16).

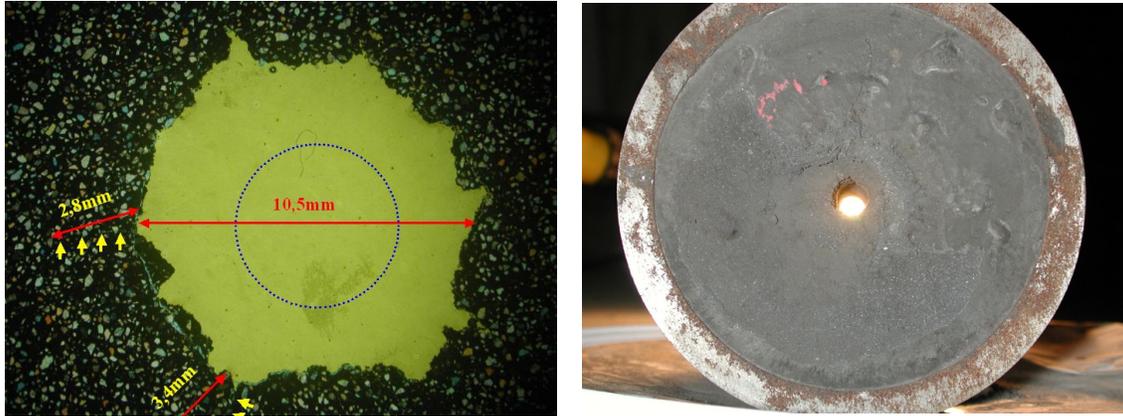


Abbildung 36. Dünnschliffuntersuchungen von eingespannten Sprengproben bezüglich Mikrorisse und Foto der Probe nach der Sprengung (MBC 100).

Das bedeutet, Feingut kommt bei allen in diesem Abschnitt beschriebenen Versuchen ausschließlich aus Zermalmungszone rund um das Bohrloch. Wie auch immer der Zerkleinerungsmechanismus in diesen Proben wirkt, jedenfalls kommt das gesamte Feingut aus der Zone im unmittelbaren Kontakt zum detonierenden Sprengstoff.

Das entstandene Feinmaterial wurde wie bei allen anderen Proben aufgesammelt und abgesiebt. Es zeigte sich, dass auch dieses Feingut der Charakteristik der Korngrößenverteilung von normal gesprengten Betonproben folgt, allerdings mit folgenden Einschränkungen:

- Bei beiden in Abbildung 37 dargestellten Proben (ausgeprägter bei der Probe MBC 100-1) wird das Lokale Minimum nicht erreicht, da die Maximalkorngröße des Zerkleinerungsversuches im Bereich des Lokalen Minimums liegt, und es dort bereits zu einer relativen Anreicherung von Material kommt.
- die Kurve der Lokalen Neigungen der MBC 100-1 Probe liegt nur mehr im „schwachselbständigen“ Bereich (Abbildung 37). Das Phänomen, dass Lokale Neigungs-Kurven exakt dem Trend folgen, jedoch in der Lage (vertikale Lage) verschoben sind wurde auch bei den Großsprengungen im Bärarp-Gneis beobachtet und konnte aber bis dato noch nicht erklärt werden (siehe Kapitel 6.3).

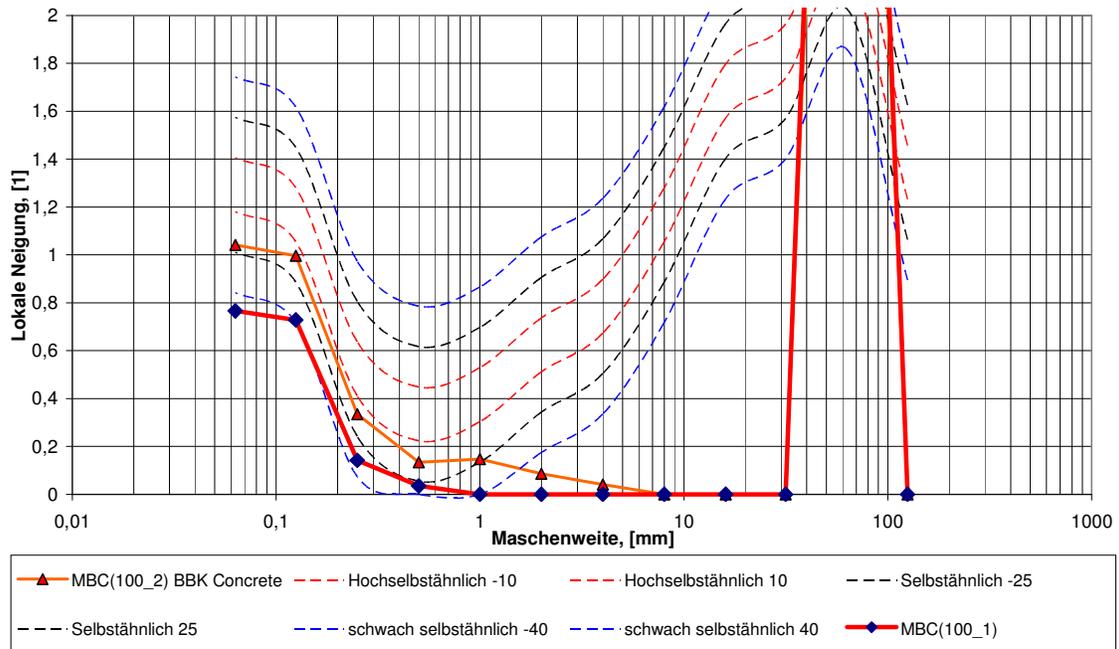


Abbildung 37. Lokale Neigungen der in Stahlrohre eingespannten Proben

An der der Zündung gegenüberliegenden Seite kam es bei jedem der Versuche zur Bildung eines kleinen Kraters und zum Ausbrechen von etwas größerem Material. Durch vorheriges Lackieren der Außenflächen konnte beim Wiederausbauen festgestellt werden, dass praktisch nur Material < 1 mm (fallweise auch < 2 mm) direkt aus der Zermalmungszone kommt. Daher kann schlussgefolgert werden, dass das gesamte Material > 2 mm aus der Kraterbildung stammt.

6.2.3.3 Wave Trap Versuche

Neben zwei Wave Trap Versuchen (siehe dazu Kapitel 4.2.4.2) in der Sprengkammer am Steirischen Erzberg wurden auch noch zwei Wave Trap Versuche im Freien durchgeführt. Der Versuchsaufbau umfasste 3 Messlatten, durch die die Potentielle Energie bestimmen werden konnte. Auch High Speed Videos mit 1000 fps (frames per second) wurden zur genauen Analyse der Wurfhöhe und um Aufschlüsse vom Zerkleinerungsvorgang zu erhalten aufgenommen. Eine Videosequenz mit einer normalen Videokamera ist in Abbildung 38 dargestellt.

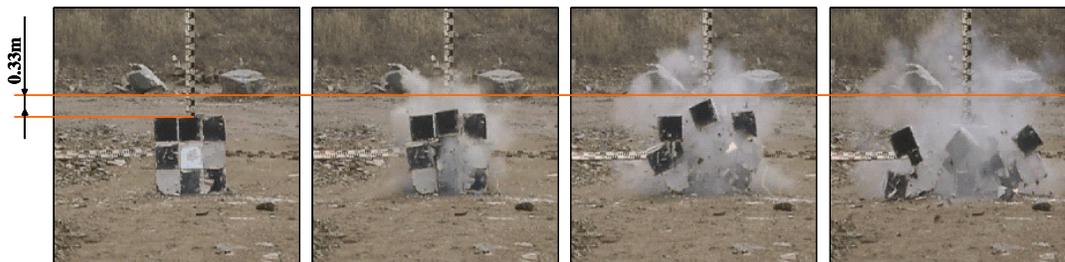


Abbildung 38. Sequenz eines Wave-trap Versuches aus einer normalen Videoaufnahme.

Aus den Messungen über die Wurfhöhe der den Sprengblock umgebenden Würfel wurde die in diese Wave Trap Würfel eingebrachte Energie wie folgt abgeleitet:

Potentielle Energie $=m \cdot g \cdot h = 54$ Joule pro Würfel

Basierend auf der Annahme, dass die unteren und seitlichen Blöcke ebenso hoch geflogen wären, wären sie nicht durch den Boden behindert worden wurde abgeleitet, dass insgesamt $8 \cdot 54$ Joule, also insgesamt 432 Joule an Energie während des Sprengens in die Wave Trap Würfel eingeleitet wurde.

Der Sprengstoffenergieeintrag beim Sprengen des zentralen Würfels betrug 17 505 Joule (PETN 4168J/g).

Damit haben die Wave Trap Würfel nur 2,46% der Sprengstoffenergie aufgenommen.

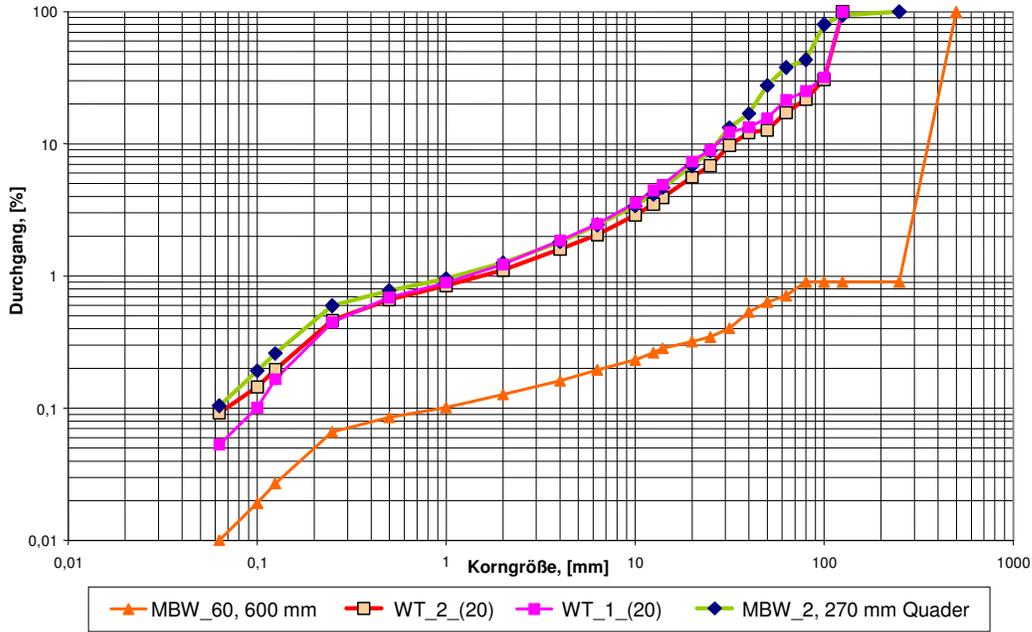


Abbildung 39. Korngrößenverteilungen aus den Wave Trap Versuchen (WT_1 und WT_2) und im Vergleich dazu die Korngrößenverteilungen normal gesprengter Proben. Kurven eines 270 mm Prismas (MBW 2) und eines 600 mm Prismas (MBW 60)

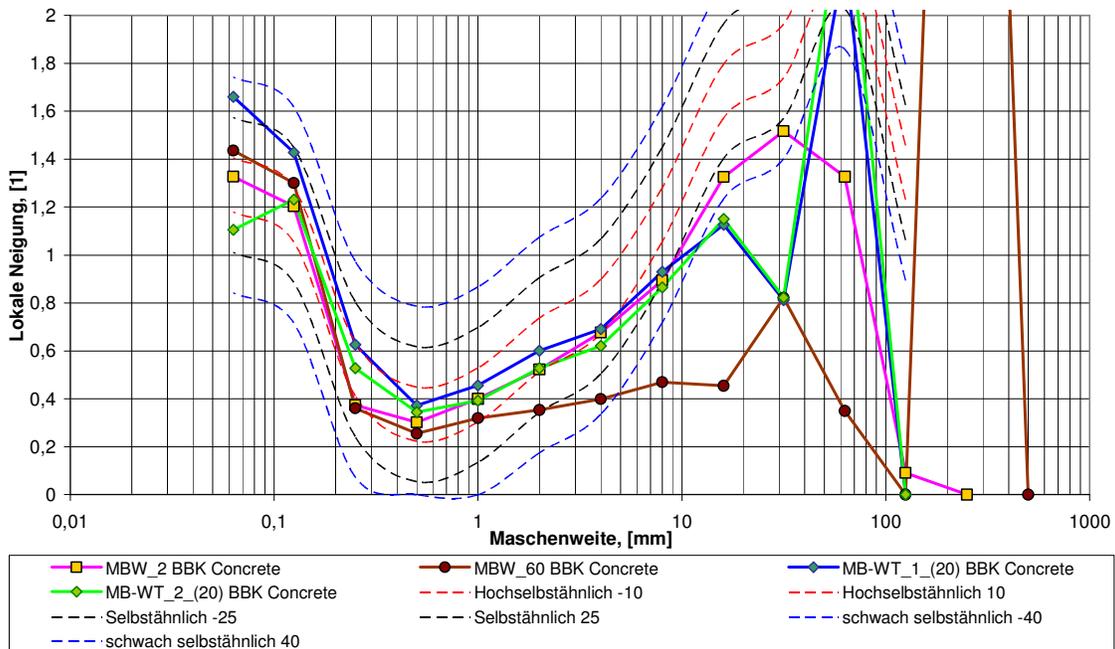


Abbildung 40. Lokale Neigungen der Wave Trap Versuche und eines 270 mm (MBW 2) und eines 600 mm Prismas (MBW 60).



In der Abbildung 39 sind Zerkleinerungskurven der Wave Trap Versuche und im Vergleich dazu zwei normal gesprengte Magnetitbeton Prismen dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Korngrößenverteilungskurven aus den Wave Trap Versuchen eine Körnung ergeben, wie sie der Zerkleinerung eines größeren 270 mm Prismas entspricht. Die Wellenfallen und die damit abgeführte Energie von 432 Joule (2,46% der Sprengstoffenergie) führen dazu, dass der eingeschlossene Würfel viel gröber zerkleinert wird als im Vergleich dazu ein freiliegender 200 mm Würfel.

Die „statische Einspannung“ des zentralen Würfels durch die Wave Trap Würfel betrug nur 17 kg/Wave Trap Würfel

Zur Erklärung des Vergleiches der Zerkleinerungsergebnisse des von Wave Trap Würfeln umgebenen 200 mm Würfels mit einem Prisma von 270 mm Kantenlänge in Abbildung 39 ist anzuführen, dass *Miklantsch 2002* in seiner Diplomarbeit mittels Energieregisterfunktion eine Prognose erstellte, wonach ein Quader mit der Größe von 270 x 270 x 200 mm dasselbe Zerkleinerungsergebnis zeigen sollte wie die Wave Trap Versuche.

Wallner 2003 führt dieses Experiment in seiner Meldearbeit durch und stellt fest, dass die energetischen Berechnungen und die Prognose von *Miklantsch* vollständig zutrafen. In Abbildung 39 und Abbildung 40 ist zu erkennen, dass die beiden Zerkleinerungskurven tatsächlich in Lage und Form übereinstimmen. In Abbildung 41 ist in der Energieregisterfunktion wie oben beschrieben der Zusammenhang zwischen Oberfläche und Energie dargestellt (*Wallner 2003, Miklantsch 2002*).

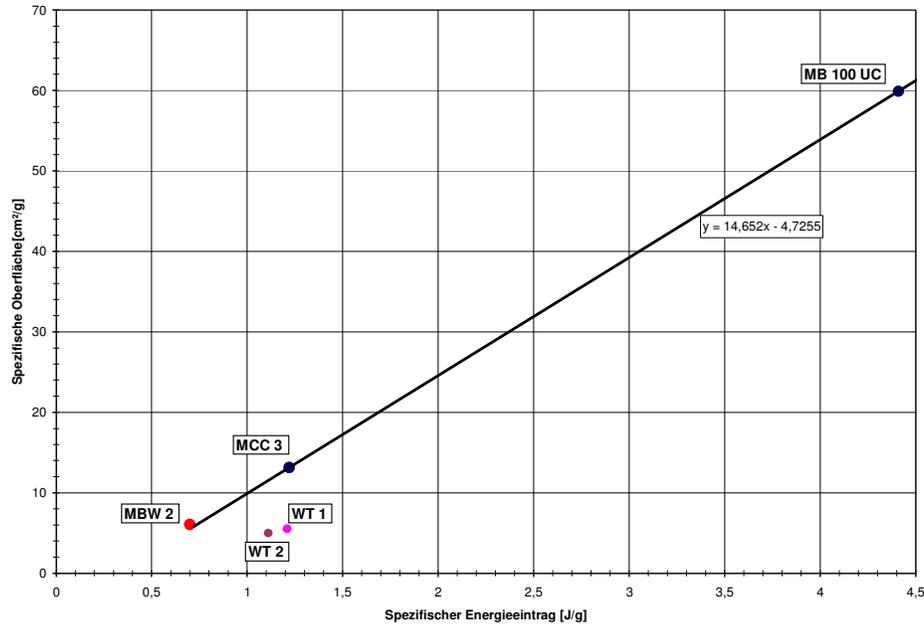


Abbildung 41. Darstellung der Energierasterfunktion mit MBW 2 (270 mm Prisma)

Die Ausgleichsgerade der Energierasterfunktion schneidet den absoluten Nullpunkt ($x = 0$ und $y = 0$) nicht, da für jede Zerkleinerung ein Minimum an Energie erforderlich ist.

6.2.4. Abhängigkeit der Lokalen Neigung von der Probengröße

Die Zerkleinerung von Betonprismen mit unterschiedlichen Kantenlängen bzw. Betonzylindern unterschiedlicher Durchmesser (von 100 mm bis 600 mm) bot die Möglichkeit, den Einfluss der Probengröße auf die Charakteristik der Korngrößenverteilungskurven zu untersuchen. Es muss hier jedoch darauf hingewiesen werden, dass gleichzeitig mit der Größe der Prismen bzw. Zylinder auch die beim Sprengen verwendete spezifische Sprengstoffmenge geändert wurde, da stets ein Bohrloch mit 5mm Durchmesser mit Nitropenta geladen wurde. Damit ergab sich bei allen Versuchen eine konstante Sprengstoffladungemenge je mm Bohrlochlänge, jedoch eine variierende spezifische Lademenge je mm Probenhöhe.

Die Charakteristiken der Korngrößenverteilungskurven (KGV-Kurven) von gesprengten Betonproben verschiedener Größen sind in Abbildung 42 miteinander verglichen. Die Korngrößenverteilungskurven von 100 mm bis 300 mm Proben verhalten sich bis zu einer Korngröße von 4 mm hochselbstähnlich. Die 600 mm Probe verlässt jedoch schon bei einer Korngröße über 1 mm den Bereich der Hochselbstähnlichkeit.

Insgesamt ist die Tendenz zu beobachten, dass die Korngrößenverteilungskurven größerer Proben in Richtung größerer Korngrößenklassen eine flachere Ausbildung aufweisen. Die Abflachung der Kurven beginnt charakteristischerweise beim Lokalen Neigungsminimum der Korngrößenverteilungskurven. Neben der Abflachung der Kurven ist zudem zu beobachten, dass auch im Feinstkornbereich die Neigungskurven mit größerer Probengröße tendenziell zu geringeren Neigungen hin verschoben sind. Offensichtlich beeinflusst die Probengröße auch die Charakteristik von KGV-Kurven, insbesondere auch das für ein Material charakteristische Neigungsminimum von KGV-Kurven. Ob dies eine Folge der „größeren Geometrie“ oder des spezifisch geringeren Energieeintrages ist, kann anhand der vorliegenden experimentellen Daten nicht geklärt werden.

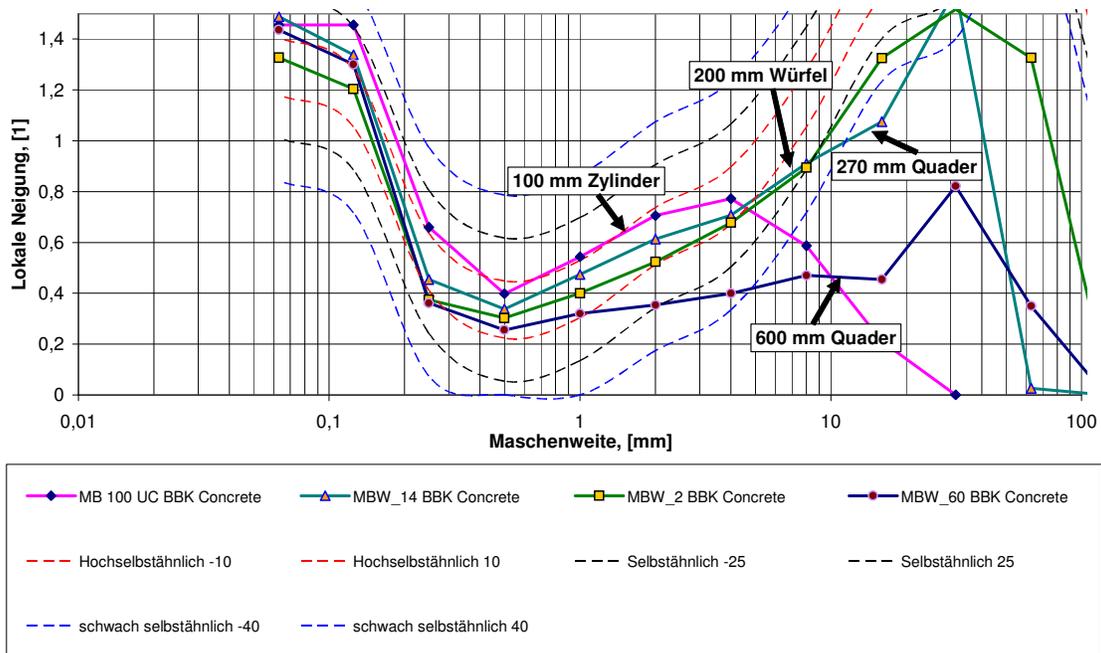


Abbildung 42. Abhängigkeit der Lokalen Neigung von der Probengröße



6.3. Untersuchungen in Amphibolit

6.3.1. Einleitung

Neben Magnetitbeton wurde als Hauptuntersuchungsmaterial für die gegenständliche Dissertation Amphibolit aus dem Steinbruch Eibenstein der Firma Hengl-Bitustein verwendet. Dazu wurden 50 – 500 kg schwere Gesteinsblöcke aus dem Sprenghauwerk auf verschiedenen Etagen des Betriebes entnommen. Aus diesen wurden dann die Proben für die Zerkleinerungsversuche herauspräpariert.

Die Tabelle 8 im Kapitel 4.7 gibt einen Überblick über alle Sprengversuche in Amphibolit.

Neben dem Sprengen von Blöcken im Labor wurden für Amphibolit auch Zerkleinerungsversuche an Knäppern mit bis zu mehreren 100 kg Masse durchgeführt. Details der Versuche finden sich in der Tabelle 10 in Kapitel 4.7.

In Ergänzung zu den Einzelblocksprengversuchen wurde im Steinbruch Eibenstein auch das Zerkleinerungsergebnis einer Großsprengung analysiert und in Vergleich zu den Einzelblocksprengungen gesetzt. Auch die Details dieser Sprengung finden sich in Tabelle 12 in Kapitel 4.7

6.3.2. Amphibolit Sprengungen im Labormaßstab

Aus den auf den einzelnen Etagen entnommenen Blockproben wurden Zylinder mit 100 bis 300 mm Durchmesser ausgebohrt und jeweils mit einer 5 mm mittig angeordneten Sprengladung zerkleinert. Ziel dieser Versuche war es, im Vergleich zu Beton auch an einem natürlichen Gestein das charakteristische Verhalten der Zerkleinerungskurven zu beobachten. Insgesamt wurden 11 Proben gesprengt. Die Randbedingungen der Modellsprengversuche sind in Kapitel 4 beschrieben und die Siebergebnisse sind im Anhang angeführt.

Die Korngrößenkurven aller gesprengten Modellproben sind in Abbildung 43 dargestellt. Darin ist die hohe Parallelität und damit die Selbstähnlichkeit der einzelnen Proben bis zu einer Korngröße von 10 mm zu erkennen.

Die Lage der einzelnen Kurven im Korngrößenverteilungsdiagramm ist im Wesentlichen vom Energieeintrag abhängig.

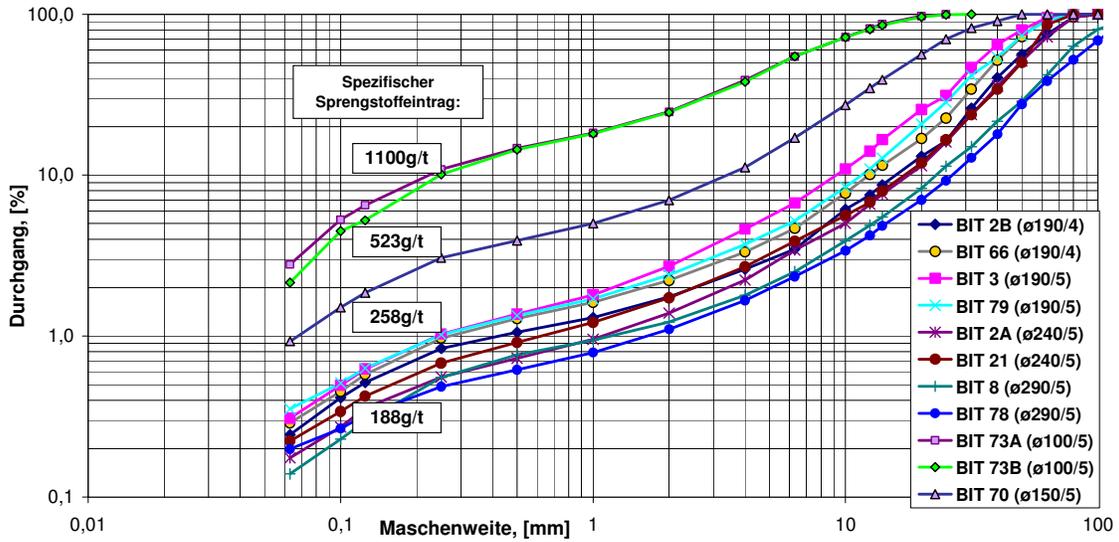


Abbildung 43. Summenkurven aller Modellsprengungen.

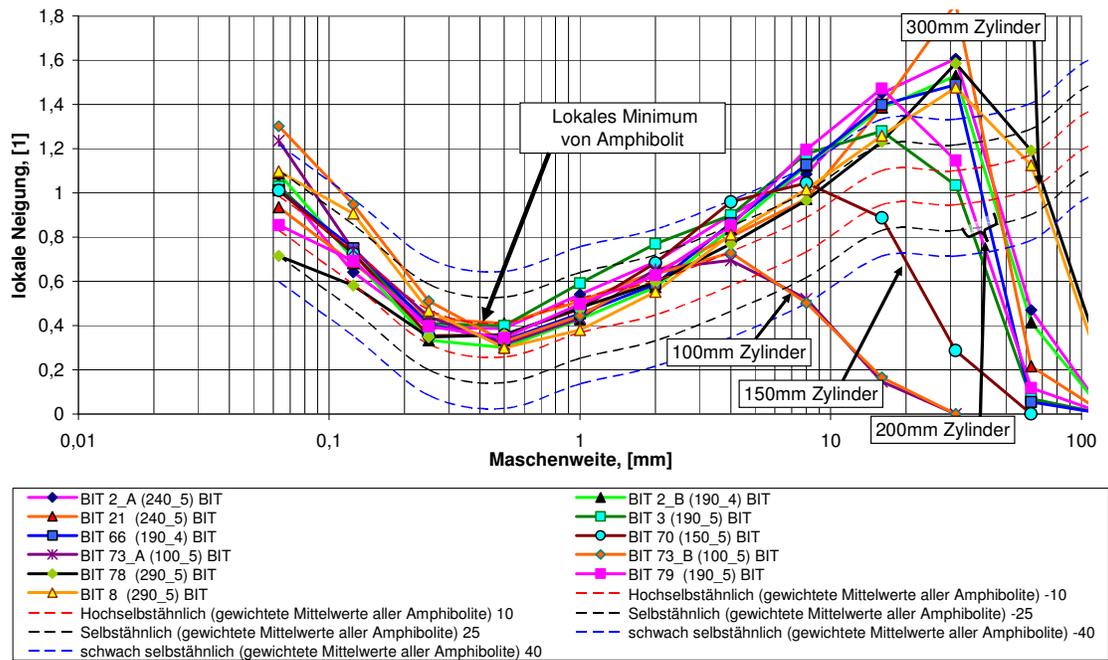


Abbildung 44. Darstellung der Lokalen Neigungen aller Modellsprengungen im Amphibolit

Wie aus Abbildung 44 zu ersehen, ist der Großteil der gesprengten Zylinder zueinander hochselbstähnlich, alle sind zumindest selbstähnlich. Auf die Probengröße ist zurückzuführen, dass die Loka-



len Neigungen kleiner Zylinder bei zunehmender Korngröße früher in Richtung Null gehen als die Lokalen Neigungen größerer Zylinder.

Jedes Zerkleinerungsprodukt tendiert bei Annäherung zu seiner Maximalkorngröße in Richtung Null, da die Summenkurve bei Überschreiten der Maximalkorngröße konstant 100 % hat und somit die Lokale Neigung gleich Null ist.

6.3.3. Knäppersprengungen

Die Knäppersprengungen wurden in einem verschließbaren Metallcontainer im Steinbruch Hengl-Bitustein in Eibenstein durchgeführt. Diese Versuche sollten weitere Aussagen über den Einfluss der Geometrie (Variation der Bohrl Lochdurchmesser von 5 bis 12 mm, Ein- oder Mehrbohrlochsprengungen) auf die Charakteristik des Sprengergebnisses erbringen.

Die sprengtechnischen Details der Knäppersprengungen sind in Kapitel 4, Tabelle 10 dargestellt. Es wurde der Bohrl Lochdurchmesser von 5 bis 12 mm, die Lochanzahl von 1 bis 2 und das Gewicht der Blöcke von 309 kg bis > 1000 kg variiert.

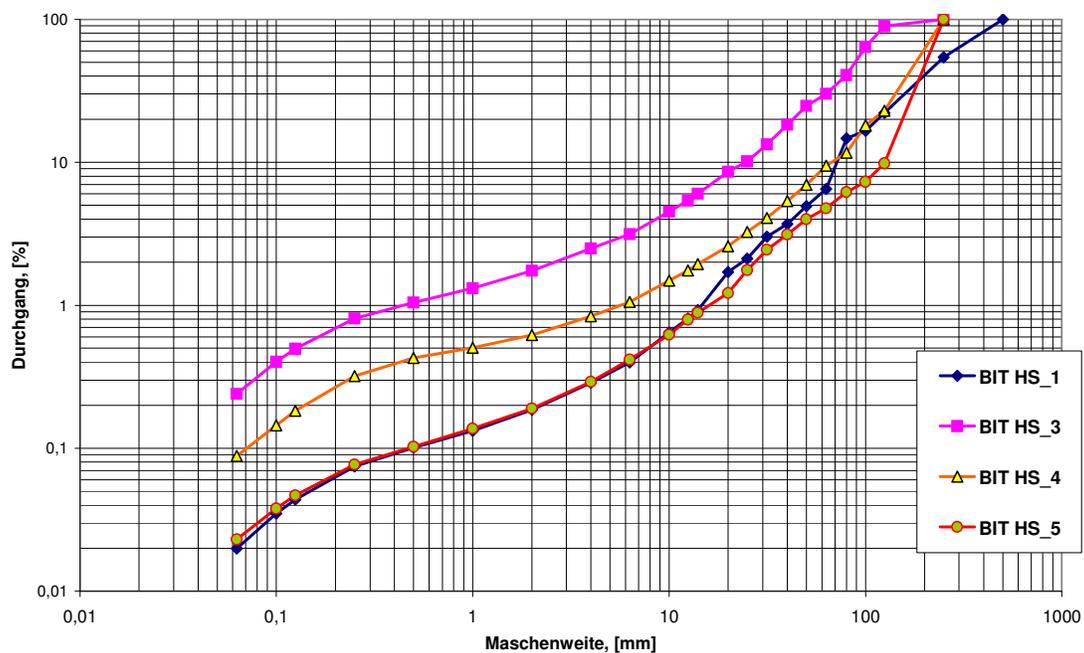


Abbildung 45. Summenkurven der Knäppersprengungen im Amphibolit

Obwohl die Blöcke aufgrund von vorhandenen Schwächezonen (verheilte Risse und Klüfte) anders als erwartet brachen, entsprechen die Korngrößenverteilungskurven aus den sauberlich aufgesammelten Bruchstücken und Fragmenten der erwarteten Charakteristik (Abbildung 45.) Die Abbildung 46 zeigt wieder zusammengebaute Blöcke und die Konfiguration einer Zweiloch-Sprengung.

Die Zerkleinerungskurven für die Knäppersprengungen des Eibensteiner Amphibolits zeigen trotz schwieriger experimenteller Randbedingungen (Aufsammeln des Feingutes im Großcontainer) eine sehr gute Parallelität der Kurven bis zu etwa 8 mm Korngröße. Über einer Korngröße von 8 mm unterscheiden sich zwei der vier Zerkleinerungskurven deutlich. Vermutet wird hier ein Einfluss der Makrostruktur des Amphibolits und der Geometrie der Versuchsanordnung.

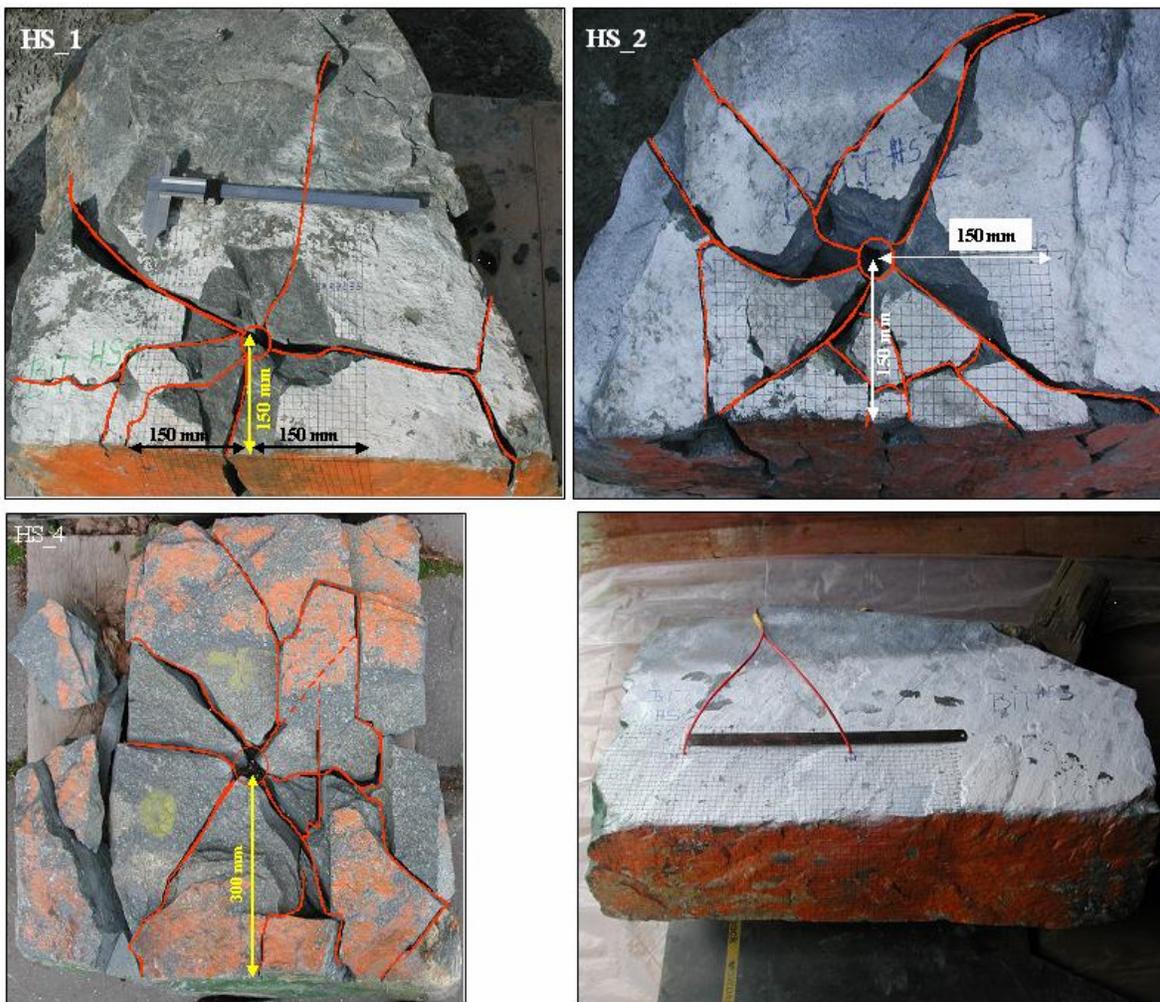


Abbildung 46. Knäpper (HS1, HS 2 und HS4), wieder zusammgefügt nach der Sprengung, und ein Knäpper (HS3) mit zwei simultan gezündeten Bohrlöchern vor der Sprengung



Die lokalen Neigungen der Korngrößenverteilungskurven sind in Abbildung 47 dargestellt. Alle Knäppersprengergebnisse weisen bis zu 0,5 mm eine Hochselbstähnlichkeit auf und zeigen bis 8 mm eine Selbstähnlichkeit.

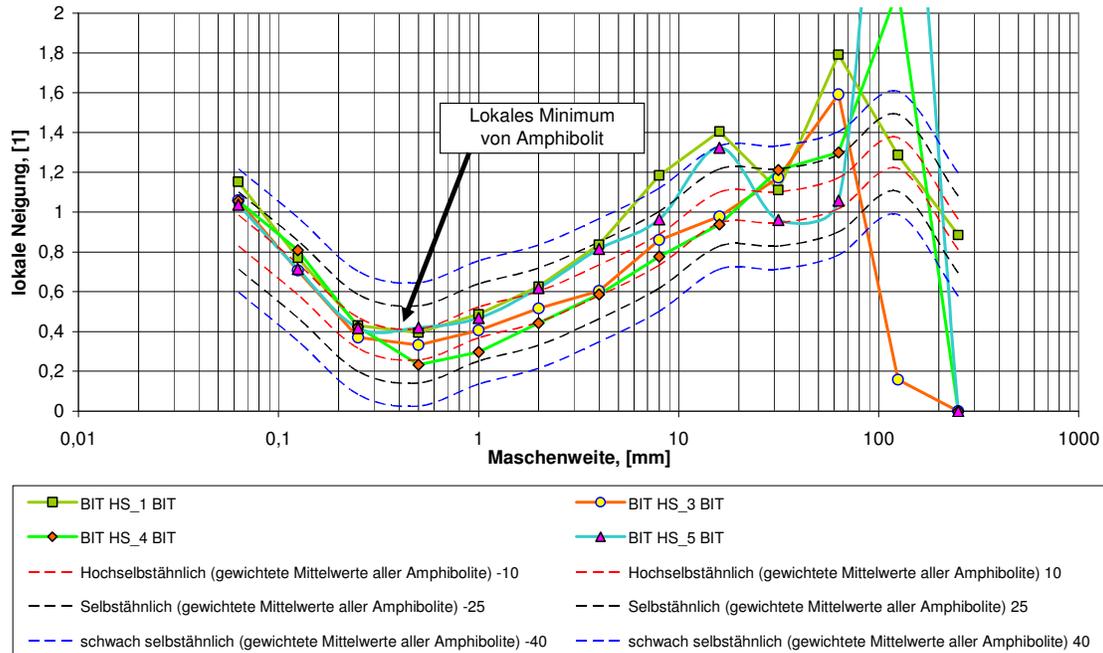


Abbildung 47. Lokale Neigungen der Knäppersprengungen in Amphibolit

Insgesamt zeigt sich auch bei den Knäppersprengungen die hohe Regelmäßigkeit der Charakteristik der Korngrößenverteilungskurven obwohl die sprengtechnische Anordnung dieser Versuche recht unterschiedlich erfolgte.

6.3.4. Großsprengungen

Um die Gültigkeit der NBC über den Bereich von Modell- und Knäppersprengungen hinaus zu überprüfen, wurde zunächst eine unrepräsentative Probe Feinmaterial (BIT FB_BH) einer Sprengung (Einschaufeln von etwa 30 kg Feinmaterial in 2 Kübel) genommen und abgesiebt. Die Sieblinie ist in Abbildung 48 dargestellt.

Zusätzlich wurde eine Großsprengung (BIT FULLBLAST) mit 2000 t Masse unter Einhaltung aller Regeln für Probenahme abgesiebt. Aus dem 2000 t-Abschlag wurde die Maximalkorngröße ermit-

telt (1200 mm). Anschließend wurde das gesamte Material mit einem Radlader über einen Schwingrost mit einem Rostabstand von 100 mm geschickt. Das Material < 100 mm wurde entsprechend den Vorgaben des Aufbereitungsinstitutes der Montanuniversität Leoben geteilt und entsprechend dem Siebstandard abgesiebt. Die sich ergebenden 8 Einzelkurven wurden daraufhin entsprechend gewichtet zu einer Gesamtsieblinie zusammengeführt. Die beiden Fraktionen < 100 mm und > 100 mm wurden zur Gänze mit LKWs auf einer Brückenwaage gewogen. Auf Grund dieser Wiegedaten konnte eine vollständige Summenkurve ermittelt werden (Abbildung 48). Anschließend wurden die lokalen Neigungen dieser Sieblinie berechnet und in ein Diagramm (Abbildung 49) eingetragen.

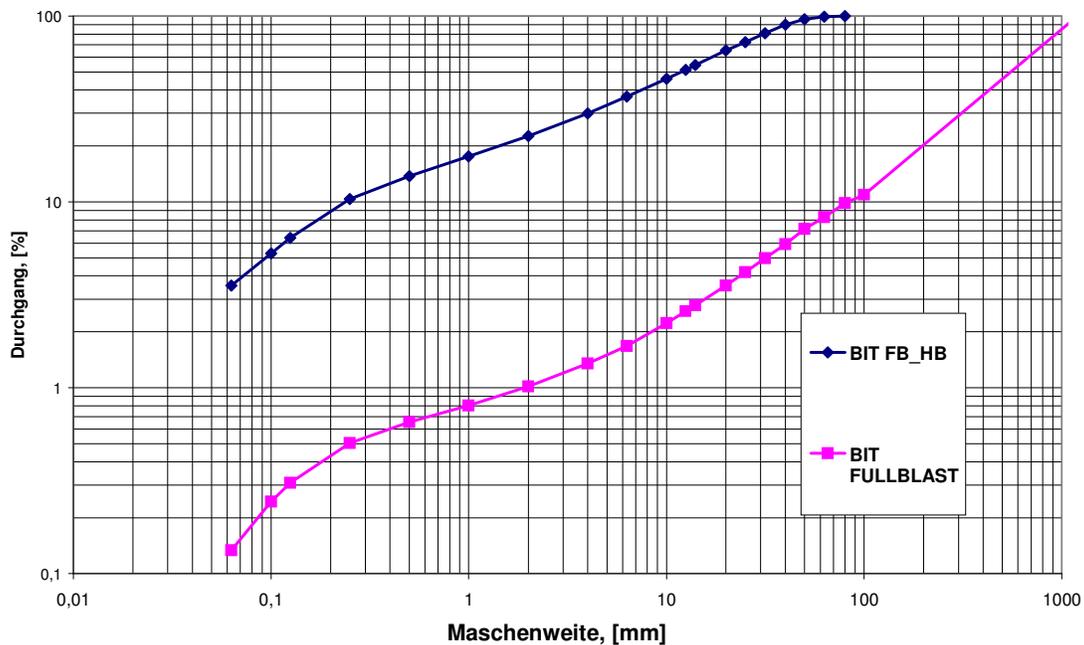


Abbildung 48. Darstellung der Summenkurven der Grob Sprengung 420-4/2003 der Firma Hengl Bistustein und einer unrepräsentativen Feinmaterialprobe einer Grob Sprengung aus demselben Steinbruch.

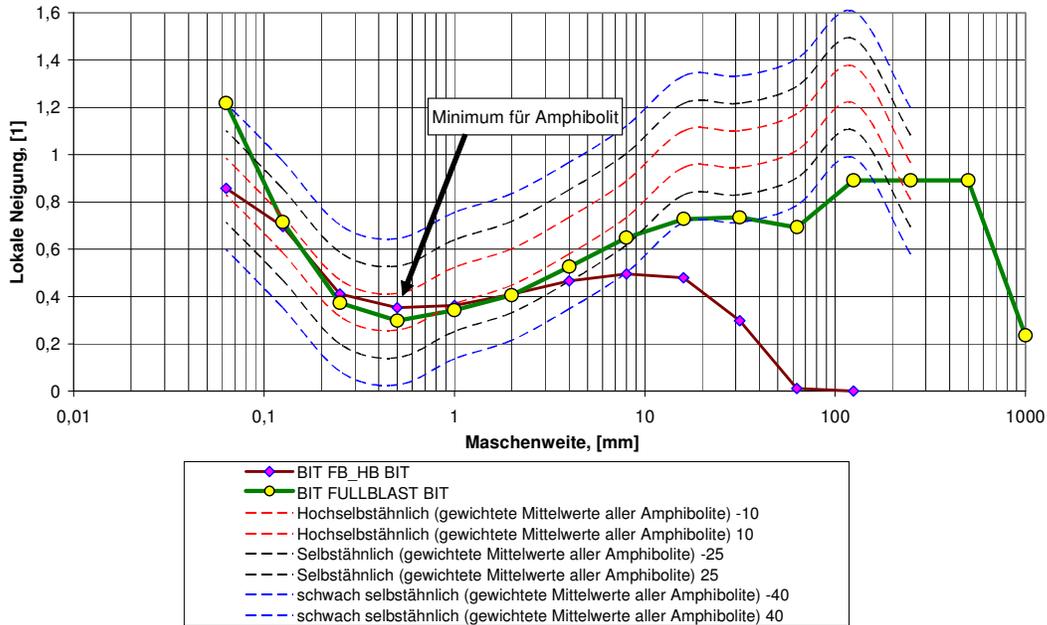


Abbildung 49. Darstellung der lokalen Neigungen einer repräsentativ abgesiebten Grob Sprengung und einer unrepräsentativen Feingutprobe des Sprenghauwerks einer Grob Sprengung

Beide Korngrößenverteilungskurven sind im Vergleich zueinander bis zu einer Größe von 1 mm und selbstähnlich bis zu 4 mm Korngröße. Das starke Abflachen der Kurve für die unrepräsentative Feingutprobe ist dadurch bedingt, dass diese Probe praktisch nur Gut < 4 mm beinhaltet hat. Überraschenderweise zeigt jedoch die Feingutprobe eine hohe Übereinstimmung hinsichtlich der Charakteristik der Verteilung mit der vollständig abgesiebten Grob Sprengung.

6.3.5. Vergleich der Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven für Labor-, Knäpper- und Großsprengungen

In der Abbildung 50 sind zunächst die Sieblinien der Labor-Knäpper und Großsprengungen im Vergleich dargestellt.

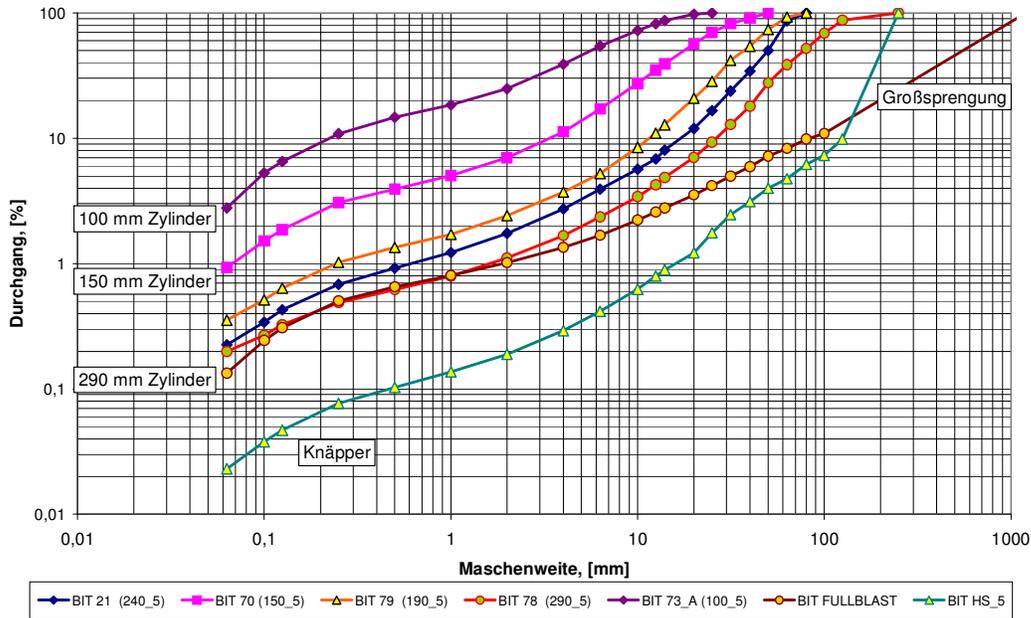


Abbildung 50. Sieblinien ausgewählter Sprengversuche von Labor über Knäpper bis zu Großsprengungen im BIT Amphibolit

Die Lokalen Neigungen der verschiedenen Sprengversuche finden sich in Abbildung 51. Hier ist zu erkennen, dass die Laborproben nach dem materialcharakteristischen Minimum steiler ansteigen als größere. Den flachsten Trend weist die Großsprengung, gefolgt von einer Knäppersprengung auf. Die steilsten lokalen Neigungen werden durch den 150-mm-Zylinder abgebildet.

Alle in Abbildung 51 dargestellten Proben sind zueinander bis zu einer Korngröße von 4 mm selbstähnlich. Die Großsprengung verlässt bei 4 mm den Bereich der Selbstähnlichkeit, während die anderen Proben sogar bis zu einer Korngröße von etwa knapp 20 mm selbstähnlich sind.

Dieser beobachtete Trend kann einerseits durch den Randeinfluss der limitierten Probengröße und deren Zerkleinerungsmechanismus verursacht sein, andererseits aber könnte er auch auf den geringeren Energieeintrag zurückgeführt werden.



Anhand der experimentellen Daten kann diese Frage, wie auch die Beobachtungen im Magnetitbe-
ton gezeigt haben, nicht beantwortet werden.

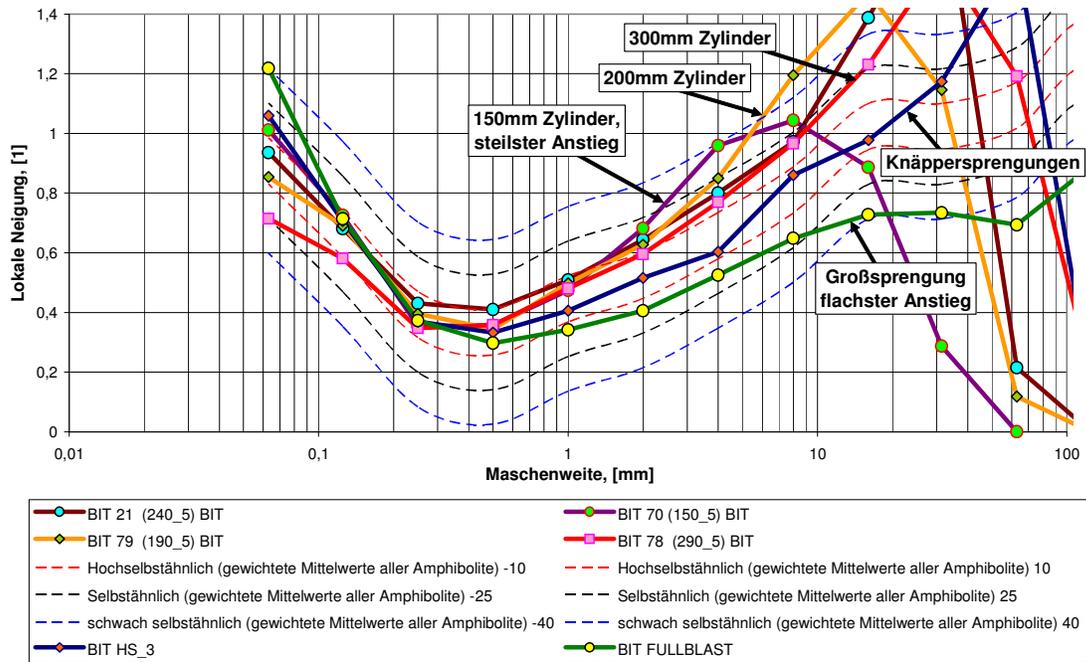


Abbildung 51. Lokale Neigungen für unterschiedliche Größen von Sprengversuchen im Amphibolit



6.4. Untersuchungen in Bårarp-Gneis

6.4.1. Einleitung

Aus einer Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Bergbaukunde der Montanuniversität Leoben und der Swebrec, dem sprengtechnischen Forschungszentrum der Technischen Universität Lulea in Stockholm, konnten Korngrößenverteilungskurven aus Labor- und Großsprengungen ähnlich wie für Amphibolit miteinander verglichen werden. Wie auch für Amphibolit wurden für die gegenständliche Dissertation auch am granitischen Gneis von Bårarp/Schweden Aufbereitungsversuche und Modellsprengungen durchgeführt, deren Siebkurven und NBC bestimmt und die Lokalen Neigungen berechnet und analysiert. Die Zerkleinerungsversuche an der Montanuniversität Leoben wurden an Gesteinsblöcken durchgeführt, welche aus dem Hauwerk von Großsprengungen in Schweden entnommen und nach Leoben transportiert wurden.

Die Großsprengungen wurden von Swebrec geplant und durchgeführt. Auch die Siebung erfolgte unter Kontrolle von Swebrec. Details der Versuche finden sich in Tabelle 11 in Kapitel 4.7.

6.4.2. Modellsprengungen im Labormaßstab

Aus den Blöcken von Bårarp Gneis wurden Zylinder mit Durchmessern von 100 bis 300 mm ausgebohrt. Die einzelnen Proben wurden jeweils mit einer 5 mm mittig angeordneten Sprengladung zerkleinert. Insgesamt wurden 7 Proben gesprengt. Die Randbedingungen der Modellsprengversuche sind in Kapitel 4 beschrieben und die Siebergebnisse sind im Anhang angeführt. Abbildung 52 zeigt die Zerkleinerungsergebnisse der Laborsprengungen in Form von Sieblinien.

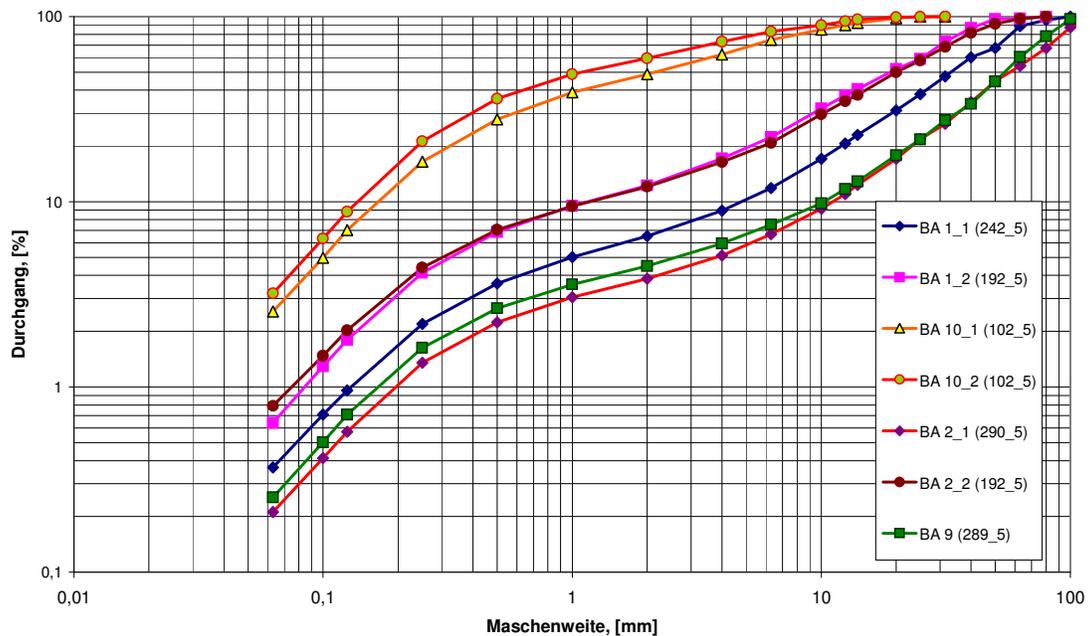


Abbildung 52. Modellsprengungen des Bårarp-Gneises

In der Abbildung 53 ist die Charakteristik dieser Sieblinien in Form der lokalen Neigungen dargestellt. Die Modellsprengungen untereinander zeigen bis zu 20 mm eine Hochselbstähnlichkeit, wobei die probengrößenbedingte Abfall der Neigungen bei den zwei 100 mm-Zylindern bereits bei 2 mm die Hochselbstähnlichkeit beendet. Dies lässt sich jedoch wie folgt erklären:

- Bei den 100 mm Zylindern liegt das maximal auftretende Größtkorn bei etwa 30 mm.
- Durch den grobkristallinen Aufbau des Gneises liegt das Lokale Minimum bei 1 mm.
- Wie in Abbildung 52 dargestellt beginnt bei den 100 mm Zylindern eine relative Abreicherung in den einzelnen Kornklassen bereits schon ab einer Korngröße von 2 mm. Dadurch überprägt eine Abreicherung (und somit ein Abfall in den Lokalen Neigungen) den Anstieg, und somit wird das Lokale Minimum bei den 100 mm Proben nicht vollständig ausgebildet.

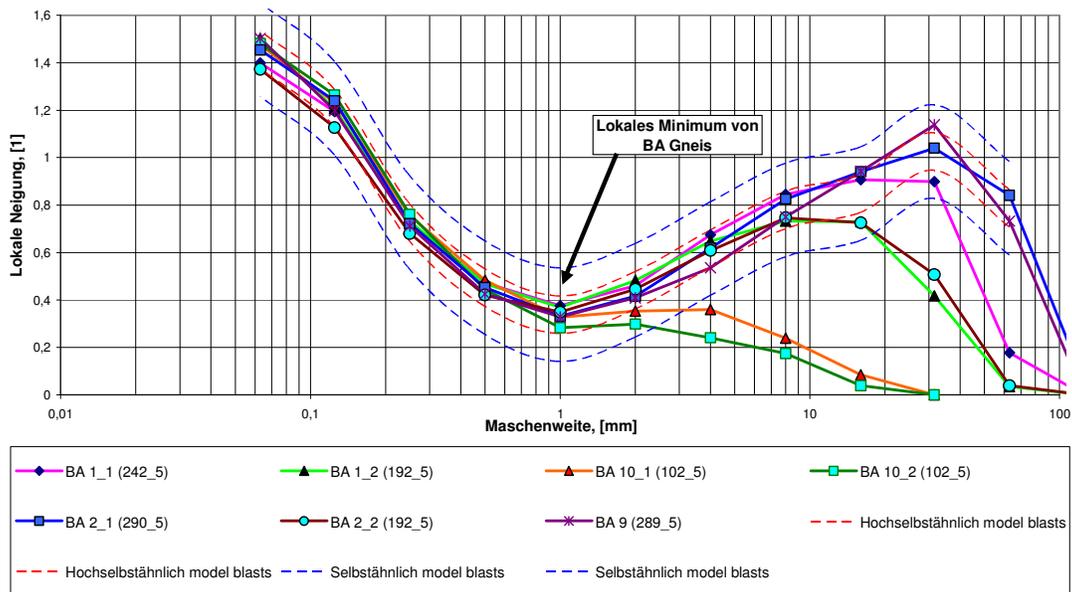


Abbildung 53. Lokale Neigungen der Modellsprengungen im granitischen Gneis von Bärarp

Das materialcharakteristische Neigungsminimum liegt für Bärarp Gneis in der Klasse 1 – 2 mm und zeigt lokale Neigungswerte im Bereich von 0,23 bis 0,41.

6.4.3. Großsprengungen im Bärarp-Gneis

Im schwedischen Gneis-Steinbruch Bärarp wurden von der Swebrec sieben Großsprengungen durchgeführt und abgeiebt. Detailangaben zu diesem Sprengprojekt finden sich bei *Olsson & Bergquist 2002* und *Moser et al. 2003*. Die geometrische Auslegung der einzelnen Sprengungen ist in Kapitel 4 in der Tabelle 11 zusammengefasst. Generell wurde versucht, während der Großsprengversuche den spezifischen Sprengstoffeintrag konstant zu halten, die Geometrie der Sprengungen jedoch zu variieren.

Die Abbildung 54 zeigt die Korngrößenverteilungskurven der sieben Großsprengungen und die Abbildung 55 die lokalen Neigungen. Die Neigungsverläufe der Großsprengungen zeigen – mit Ausnahme der Sprengung 3 (diese wurde durch Sprengung 7 wiederholt und ersetzt) – eine Hochselbstähnlichkeit bis 2 mm und eine Selbstähnlichkeit bis 4 mm. Zwischen 4 mm und 60 mm variieren die Korngrößenverteilungskurven stark, während von 60 mm bis 250 mm wieder eine Selbstähnlichkeit auftritt (Abbildung 55). Der starke Einbruch der Lokalen Neigungen zwischen 60 mm und 200 mm kann auf das Ändern des Siebsystems (Hercules Rotary Sieb 500–200 mm, Extex Sizer < 200 mm) zurückgeführt werden.

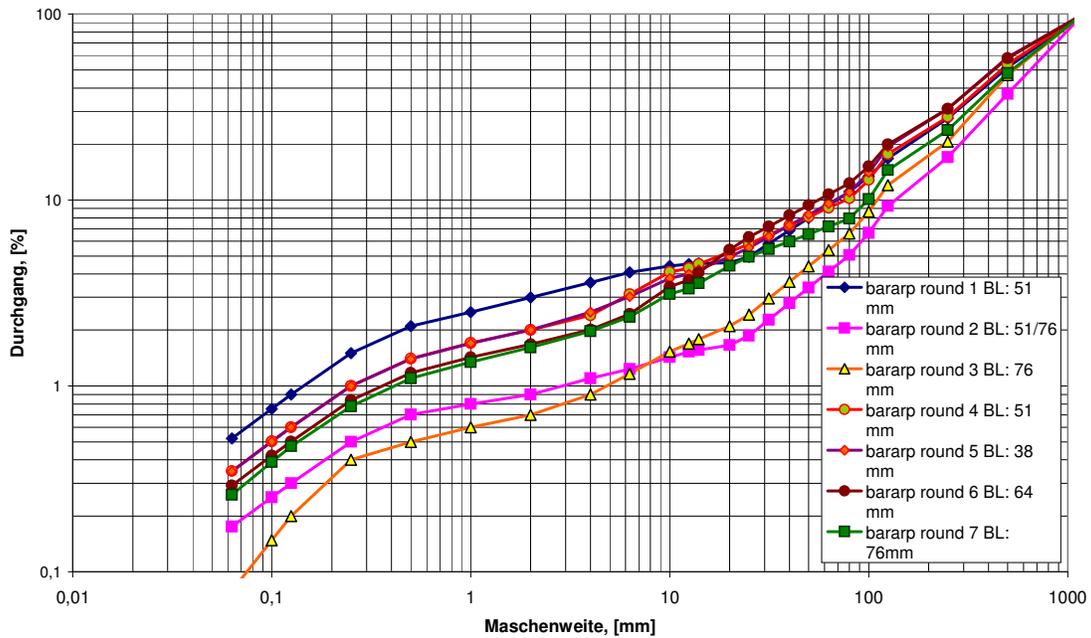


Abbildung 54. Summenkurven der Großsprengungen

Alle Kurven der Lokalen Neigungen von den Großsprengungen im Bärarp Gneis weisen zwar dieselben Tendenzen auf, sind jedoch im Vergleich zu den Laborsprengversuchen nach unten verschoben. Das hier beobachtete Phänomen konnte nach dem Abschluss der Feldarbeiten für die hier vorliegende Arbeit auch beim Vändle Granit (*Ouchterlony & Moser, 2006*) beobachtet werden.

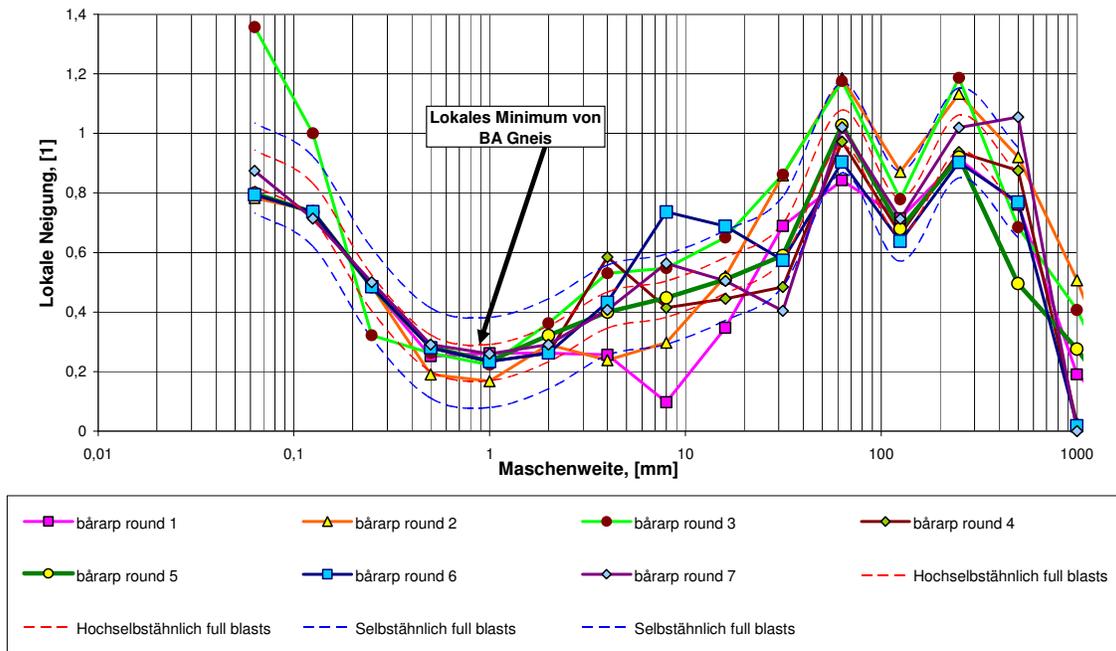


Abbildung 55. Lokale Neigungen der Großsprengungen im Bärarp-Gneis

6.4.4. Vergleich der Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven für Labor- und Großsprengungen

Abbildung 56 zeigt die Verläufe der lokalen Neigungen für die Sprengexperimente in Bärarp Gneis in Abhängigkeit von der Probengröße. Mit zunehmender Probengröße zeigen die Lokalen Neigungen rechts vom Lokalen Minimum immer flachere Werte. Die 100 mm- Zylinder erreichen nur knapp das Minimum, bevor der Größeneffekt einsetzt, das heißt bevor die Lokalen Neigungen beginnen Richtung Null zu gehen.

Die Tendenz der 100 mm Bärarp-Gesteinsproben entspricht den Ergebnissen, welche im Magnetitbeton und im Amphibolit erzielt wurden. Dort „ziehen“ die 100 mm Proben nach dem Neigungsminimum mit den größeren Proben nach oben, bevor sie dann probengrößenbedingt abfallen.

Die Großsprengungen zeigen wie in diesem Kapitel bereits beschrieben (Abschnitt 6.4.3.) über das gesamte Spektrum geringere Werte der Lokalen Neigungen als die dazugehörigen Laborsprengun-



gen. Wie auch schon im Amphibolit beobachtet zeigen die Lokalen Neigungen im Grobbereich (rechts vom Lokalen Minimum) größenbedingt geringere Werte (Abbildung 56).

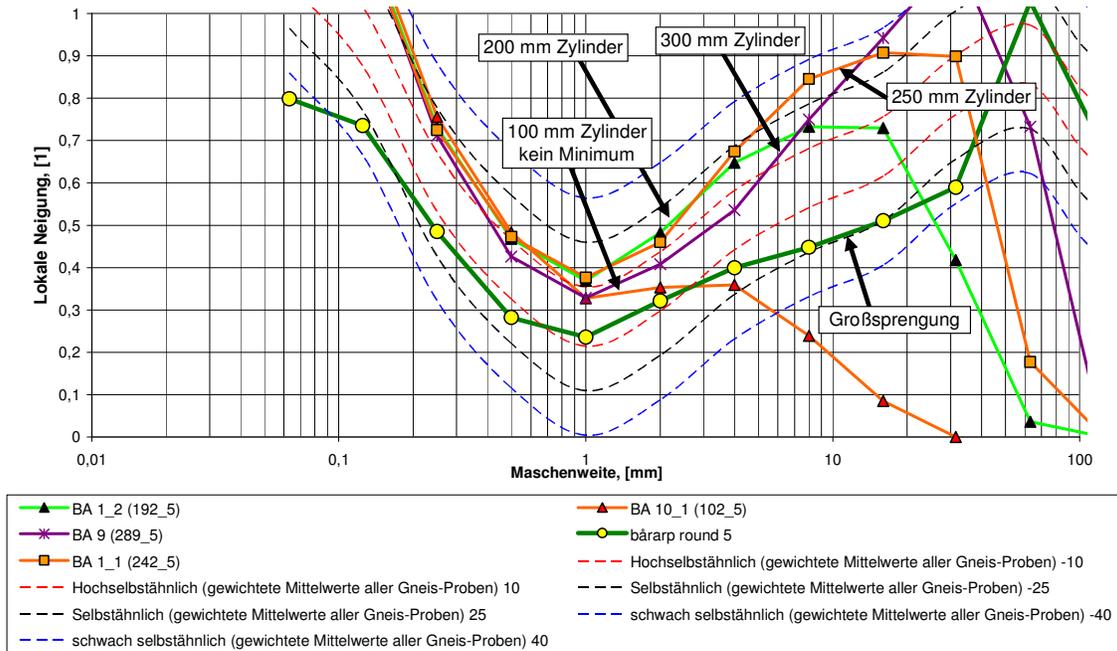


Abbildung 56. Verläufe der Charakteristik der Korngrößenverteilungskurven abhängig von der Probengröße



6.5. Die Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven für Sprenghauwerk

6.5.1. Allgemeine Betrachtungen

Anhand der Ergebnisse von Untersuchungen im Magnetitbeton, Amphibolit und Bårarp-Gneis wurden Analysen durchgeführt, wie sich die Charakteristik von KGV-Kurven verhält.

Um die Analyse auf eine möglichst breite Basis zu stellen, wurden auch noch zusätzlich weitere Gesteine in die Analysen miteinbezogen. Dies betraf folgende Gesteine:

- Aus dem EU-Projekt Less Fines (*Moser et al. 2002*)
 - Nordkalk Reef Typ (NK R)
 - Nordkalk Krinoid Typ (NK K)
 - Nordkalk Fragmentory Typ (NK F)
 - Nordkalk Stromatoporoid Typ (NK S)
- Aus dem EU-Projekt Blast Control (*Reichholf 2004*)
 - Kalkstein aus dem Steinbruch ALZO der Firma Calcinor, San Sebastian, Spanien (ALZO)
 - Dolomit aus dem Steinbruch der Firma Marche les Dames Lhoist, Belgien (DMD)
- Aus sonstigen Arbeiten vom Institut Bergbaukunde (*Reichholf 2004*)
 - Sandstein aus dem Steinbruch Imberg, Deutschland (SST Sandstein)
 - Magnesit aus dem Bergbau Breitenau, Österreich (BR Magnesit)

Im Zuge der Analysen zeigte sich, dass es auch erforderlich war, den Feinstbereich der zerkleinerten Gesteine ($< 63 \mu\text{m}$) zu analysieren, um die Charakteristik der KGV-Kurven umfassend beurteilen zu können. Dazu wurde Feinstmaterial aus den Zerkleinerungsversuchen mit Hilfe der LUMOS-SED-Methode (siehe Kapitel 4.5.2) untersucht.

6.5.2. Die natürliche Bruchcharakteristik im Vergleich verschiedener Materialien

Während der Untersuchungen über die NBC und bei zahlreichen Diskussionen mit den Projektpartnern des Less Fines-Projektes tauchten immer wieder Zweifel auf, ob die Unterschiede der einzelnen Materialien in ihrem Zerkleinerungsverhalten größer sind als die Schwankungsbreite innerhalb eines Materials.

Wie die vorhergehenden Analysen gezeigt haben, ist die Selbstähnlichkeit innerhalb eines Materials bei allen untersuchten Materialien immer gegeben. Abbildung 57 zeigt den Exponentenverlauf von verschiedenen Durchschnittsproben von Materialien. Natürlich gibt es abschnittsweise eine Überdeckung von manchen Materialien, aber kein untersuchtes Gestein gleicht im gesamten Verlauf innerhalb der Selbstähnlichkeitsgrenze einem anderen.

Somit kann gefolgert werden: Die Schwankungsbreite der Lokalen Neigungen innerhalb eines Materials ist kleiner als die Unterschiede im Zerkleinerungsverhalten verschiedener Gesteine. Dadurch ist jedes untersuchte Gestein durch eine eigene NBC gekennzeichnet.

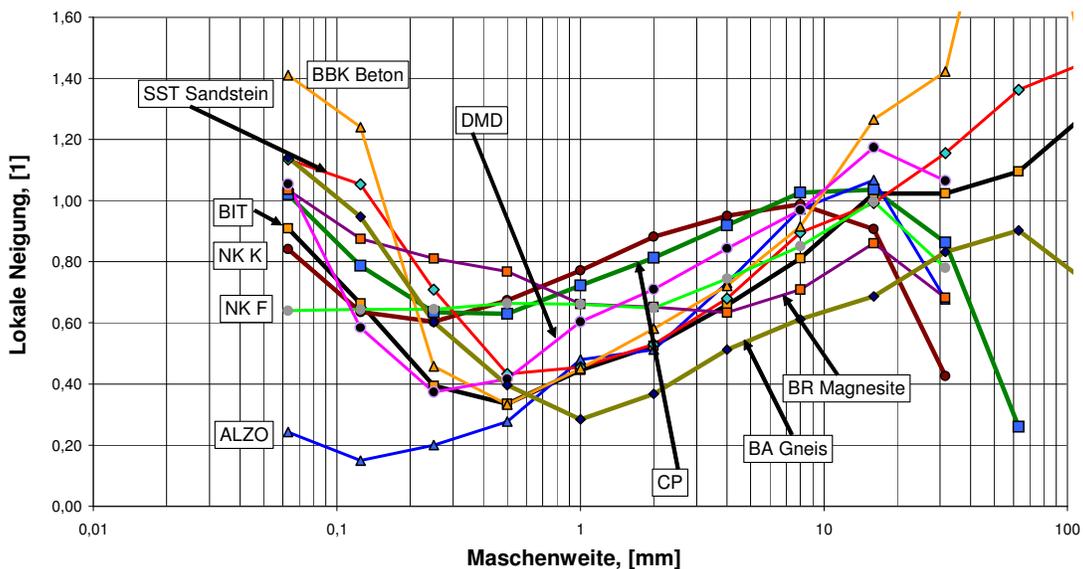


Abbildung 57. NBC-Charakteristik aus Durchschnittsproben verschiedener Materialien

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben und erläutert wurde, ist die Natürliche Bruchcharakteristik durch die Lage und die Position des Lokalen Minimums gekennzeichnet. Die Lage dieses Minimums ist für ein Gestein charakteristisch und von der Art der Zerkleinerung unabhängig.



Abbildung 57 zeigt die gemittelten Exponentenverläufe von Proben verschiedener Materialien. Durch die grobe Korngröße von Bärarp Gneis wird das Lokale Minimum bei einer Korngröße von 1 mm beobachtet während es bei dem sehr feinkörnigen ALZO Kalk bei 0,125 mm gefunden werden kann. Die Lokalen Neigungswerte schwanken zwischen etwa 0,15 bei ALZO Kalkstein und 0,65 beim BR Magnesit.

Für sehr feinkörnige Gesteine wie z.B. NK F Typ kann kein Minimum definiert werden, da dieses unterhalb der kleinsten Siebmaschenweite liegt (siehe Abschnitt 6.5.3). Für sehr grobkörnige Gesteine gestaltet sich die Bestimmung des lokalen Minimums schwierig, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass das Lokale Minimum durch die Maximalkorngröße des Zerkleinerungsproduktes überprägt ist. (Abschnitt 6.5.4).

6.5.3. Materialien mit Lokalem Minimum < 63 μm

Bei den, in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels untersuchten Materialien (MBW, BIT, BA) war überall ein eindeutiges Lokales Minimum im Bereich von 0,063 mm bis 1 mm erkennbar (Abbildung 29, Abbildung 44, Abbildung 53). Bei einigen anderen Materialien konnte kein oder nur ein schwach definiertes Minimum der Lokalen Neigungen beobachtet. Dieses Phänomen ist in Abbildung 58 anhand von ausgewählten Beispielen dargestellt.

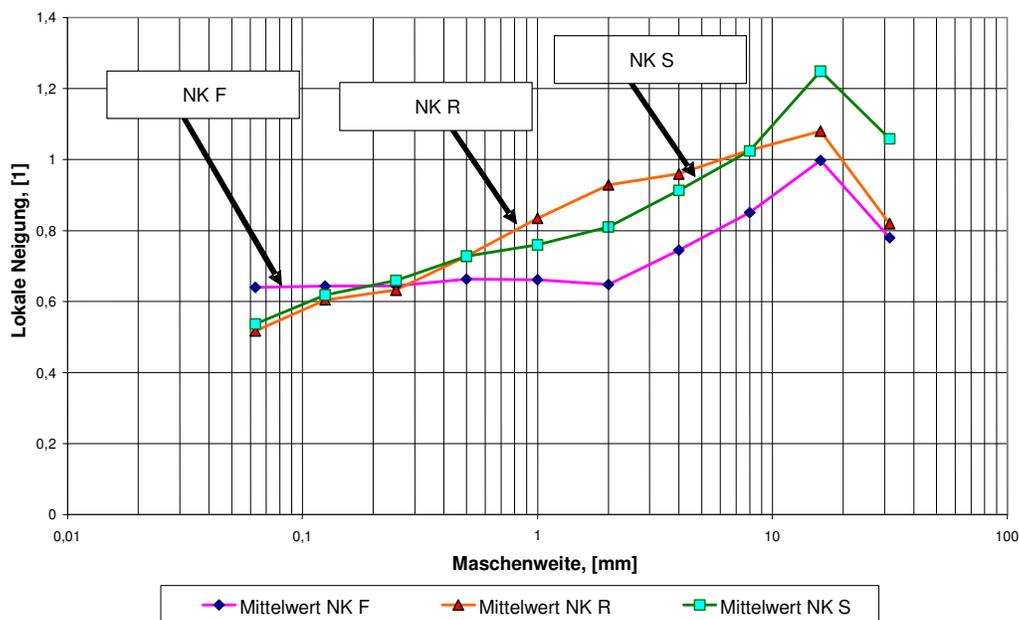


Abbildung 58. Gesteine ohne Neigungsminima im gesiebten Bereich.

Dies wurde für 3 von 4 Kalksteintypen (Reef-Type, Fragmentary-Type, Stromatolite-Type) von Nordkalk festgestellt (Abbildung 58). Bei diesen 3 Gesteinsarten weisen die Lokalen Neigungen konstante Zunahme der Exponenten auf (bzw. der F-Typ zeigt gleiche/konstante Exponenten über einen größeren Bereich).

Durch Untersuchungen im Feinbereich (LUMOSSED, Aerometermessungen - *Gruber-Pretzler 2003*), die eine Korngrößenverteilung $< 100 \mu\text{m}$ aufgrund von Fallgeschwindigkeits-Unterschieden von verschiedenen großen Körnern ermitteln, wurde festgestellt, dass bei Proben, bei denen zwischen $63 \mu\text{m}$ und Maximalkorngröße kein Lokales Minimum gefunden werden konnte, dieses bei Untersuchungen im Feinstbereich ($< 63 \mu\text{m}$) sehr wohl ausgewiesen werden kann.

Abbildung 59 zeigt die zusammengesetzten Zerkleinerungskurven vom Institut für Aufbereitung zur Ermittlung der NBC (OZK) kombiniert mit den Ergebnissen der LUMOSSED-Analyse. Im Bereich der Überlappung bzw. Zusammenführung (Abbildung 59) der beiden Kurven kommt es zum Teil zu unerwarteten Biegungen der Kurven die mit sehr großer Wahrscheinlichkeit auf die zwei verschiedenen Korngrößenmessverfahren zurückzuführen sind, mit denen die Kurven bestimmt wurden: Sieben und Lichtabsorption bei der Sedimentation. Diese Biegungen konnten auch bei der Zusammenfügung verschiedener Siebkurven bei den Großsprengungen im Bårarp Gneis beobachtet werden (Abbildung 55).

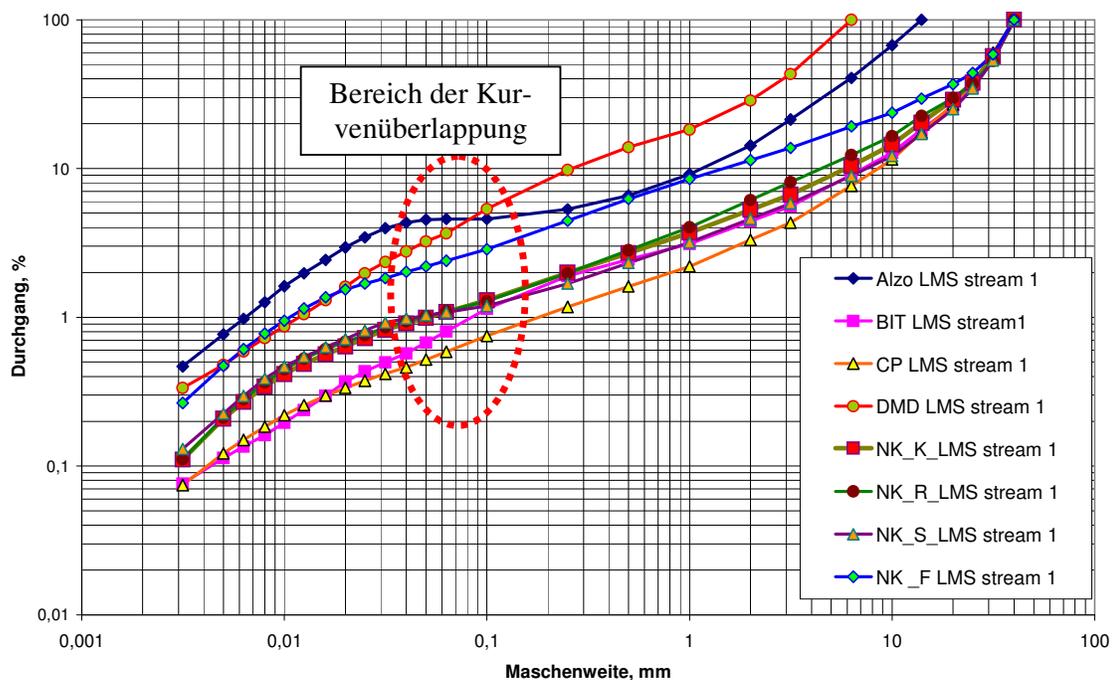


Abbildung 59. Kombinierte Zerkleinerungskurven aus der NBC-Ermittlung mit den LUMOSSED-Ergebnissen.



In Abbildung 60 ist der Verlauf der Lokalen Neigungen im Feinbereich aus den zusammengesetzten Kurven dargestellt.

Die beiden Kalktypen NK R und NK S, für die in Abbildung 58 kein klares Minimum festgestellt werden konnte, zeigen im Feinbereich (bei 0,04 mm) ein Minimum (Abbildung 60). Für den F-Typ konnte auch im Feinbereich kein exakt definierter Wert ermittelt werden, jedoch liegt der niedrigste Punkt der Lokalen Neigungen bei 0,04 mm.

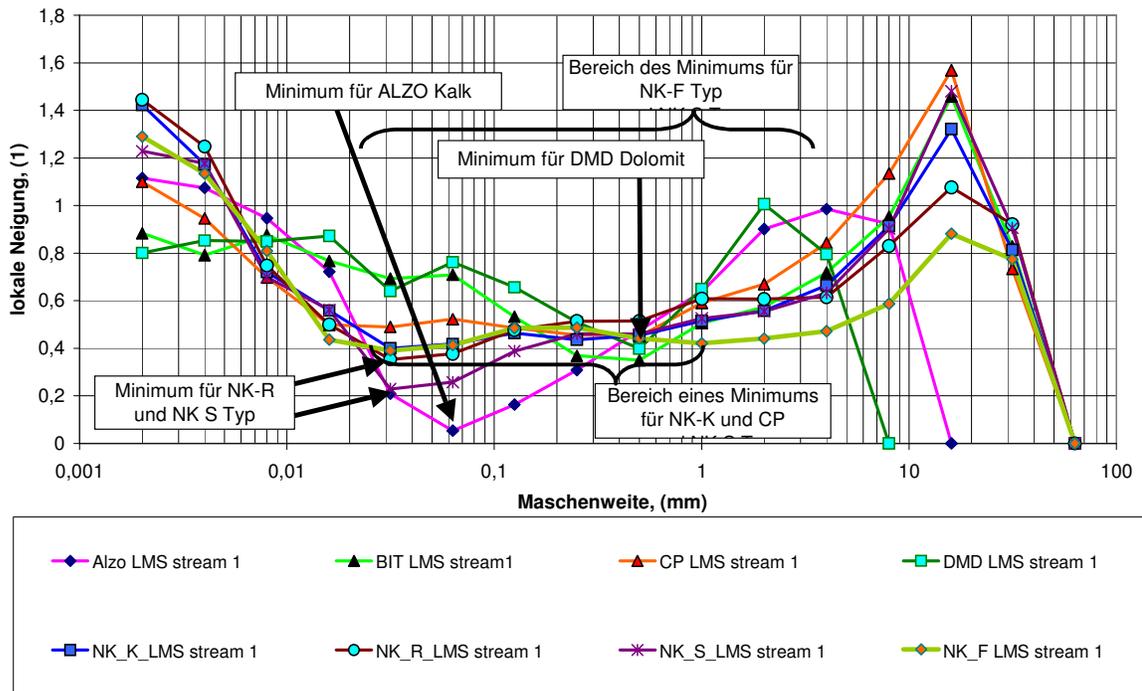


Abbildung 60. Verlauf der Lokalen Neigungen im Feinbereich $< 100 \mu\text{m}$ anhand der Proben vom Institut für Aufbereitung

6.5.4. Grobkörnige Materialien mit unklarem Lokalem Minimum

Auch beim Magnesit war es schwierig, ein Lokales Minimum zu ermitteln (Abbildung 61). Die Lokalen Neigungen der Magnesite gehen mit zunehmender Korngröße nach unten. Zwischen 4 mm und 16 mm beginnen die Neigungen zu steigen bevor sie Richtung Null gehen. Somit könnte das Lokale Minimum bei 4 mm liegen, aber es könnte auch sein, dass das Minimum der Lokalen Neigungen bei 4 mm noch nicht erreicht ist. Der Anstieg der Lokalen Neigungen vor dem Abfall Richtung Null konnte bei vielen Proben beobachtet werden, am besten am Beispiel des Bitustein Amphibolit (stream 5, Abbildung 67) und am Bärarp Gneis (Abbildung 72), bei den Kurven der



Lokalen Neigungen aus der mechanischen Zerkleinerung vor Erreichen des Lokalen Minimums ansteigen und gegen Null Abfallen.

Diese Vermutung kann aber nur mit Untersuchungen von größeren Blöcken (Knäppern) aus Magnesit bestätigt werden. Es wurde ein nicht genau definiertes Minimum bei einer Korngröße von 4 mm aus den Mittelwerten aller gesprengten Magnesitproben angenommen.

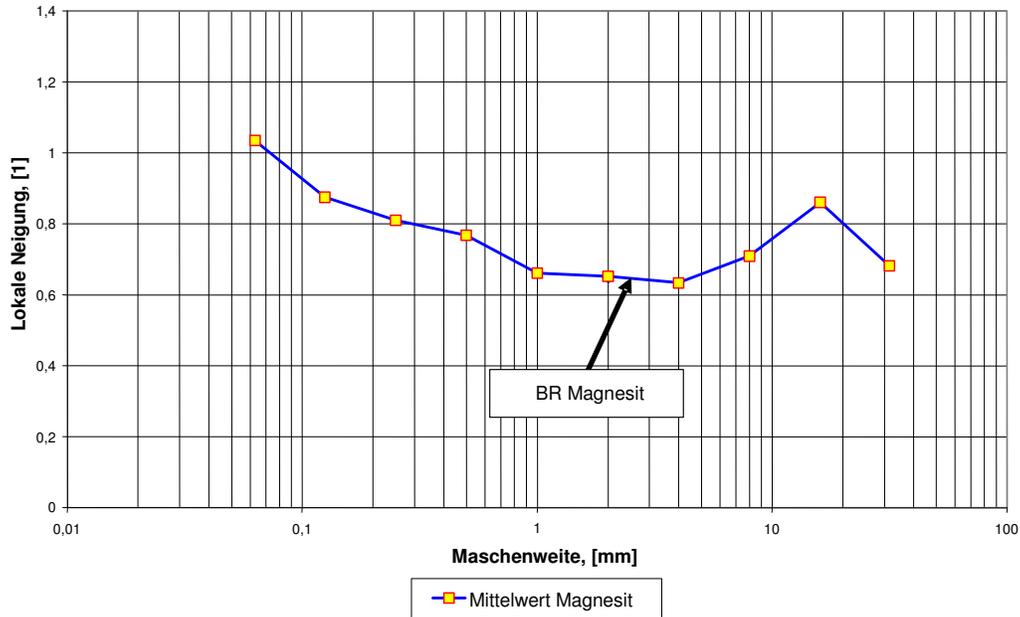


Abbildung 61. Durchschnitt aller Magnesitsprengproben ohne klares Neigungsminimum im gesiebten Bereich.

7. Charakteristik von Korngrößenverteilungskurven aus mechanischen Zerkleinerungsprozessen

7.1. Untersuchungen im BBK-Beton

7.1.1. Mechanische Zerkleinerungen

Es wurden 2 mechanische Zerkleinerungsversuche durchgeführt: Zum einen wurde ein halber Magnetitbetonwürfel in einem Laborbackenbrecher im Durchlauf zerkleinert und gesiebt, zum anderen wurde die zweite Hälfte des Würfels am selben Backenbrecher aufgegeben und im Kreislauf (< 20 mm) zerkleinert. Das bedeutet: Gut, welches nach dem ersten Brecherdurchlauf noch > 20 mm war, wurde solange aufgegeben, bis es < 20 mm war. Die Zerkleinerungskurven sind in Abbildung 62 dargestellt. Die Korngrößenverteilung des im Kreislauf zerkleinerten Betons ist feiner und erreicht die 100 % in einer geraden Linie in einem spitzen Winkel, während – wie auch bei Sprengproben immer beobachtet werden kann – sich die im Durchlauf zerkleinerte Probe asymptotisch (100 %) annähert, was ein eindeutiges Indiz für eine Durchlauf-Zerkleinerung darstellt.

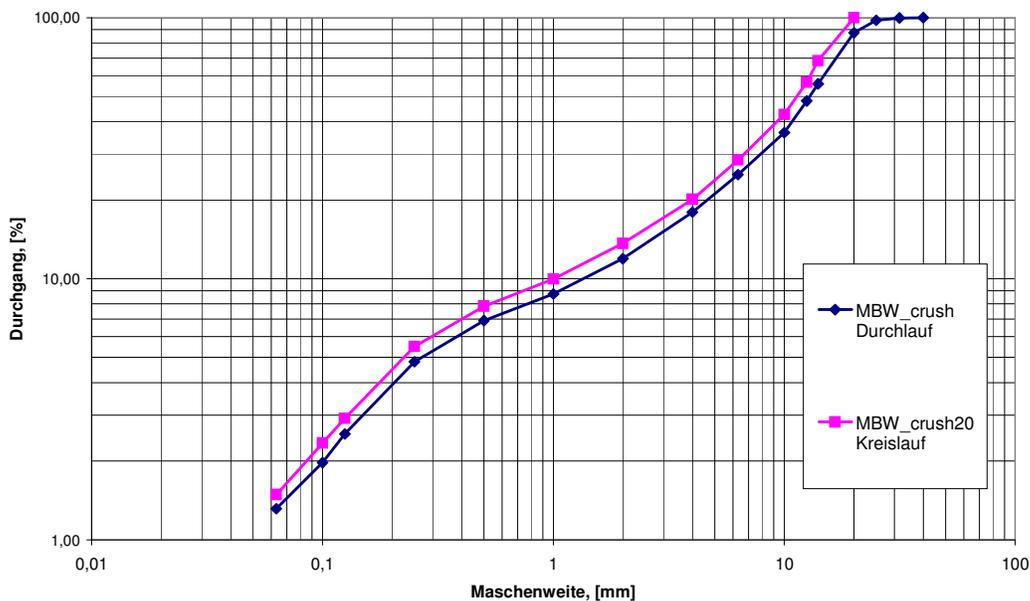


Abbildung 62. Zerkleinerungskurven der im Brecher gebrochenen Magnetitbeton-Hälften im Durchlauf und im Kreislauf

Wie aufgrund der absolut parallelen Zerkleinerungskurven erwartet werden kann, sind die Exponentenverläufe der beiden Kurven im Feinbereich identisch und weichen erst im Grobbereich voneinander ab (Abbildung 63).

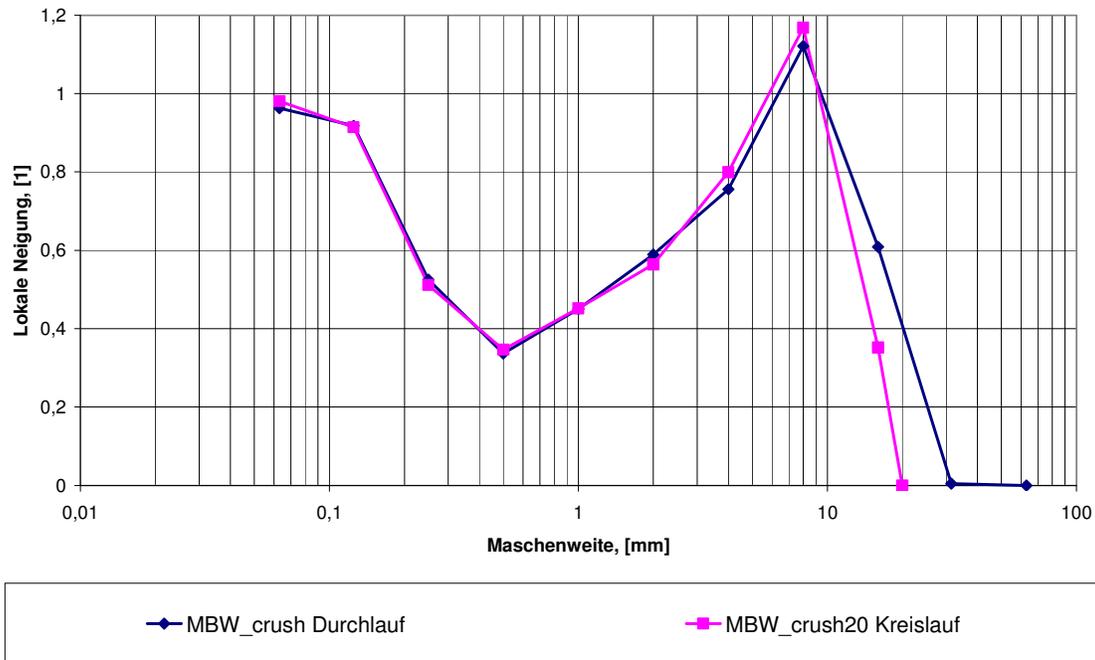


Abbildung 63. Exponentenverlauf der im Brecher zerkleinerten Magnetitbeton-Hälften

7.1.2. Spezielle mechanische Versuche mit definiert aufgebrachtener Kraft

Für den Nachweis der NBC auch in Sonderfällen der mechanischen Zerkleinerung wurden die in Kapitel 4.3.2 ausführlich beschriebenen Versuche durchgeführt:

- Abdrücken von Kernen in einer hydraulischen Presse;
- Abdrücken von 200 mm-Würfeln mit einer punktförmigen Last;
- Zerkleinerung von 200 mm-Würfeln mittels Quellszement.

Die Verläufe der Lokalen Neigungen der oben beschriebenen Versuche sind in Abbildung 64 dargestellt und weisen untereinander und zu allen untersuchten Proben aus BBK-Beton eine Selbstähnlichkeit bis zu einer Maschenweite von 2 mm auf.



Da beim Großteil dieser Versuche die Last besonders konzentriert aufgebracht wurde, haben sich nur wenige Bruchflächen ausgebildet. Bei diesen speziellen Bruchvorgängen entsteht ein größerer Teil an Feinmaterial durch die Rissbildung und es verbleibt eine größere Anzahl an großen Bruchstücken. Die Anzahl der Bruchstücke im Mittelkornbereich ist verhältnismäßig gering. Dadurch kommt es zum Teil zu einer schwachen Ausbildung des lokalen Minimums.

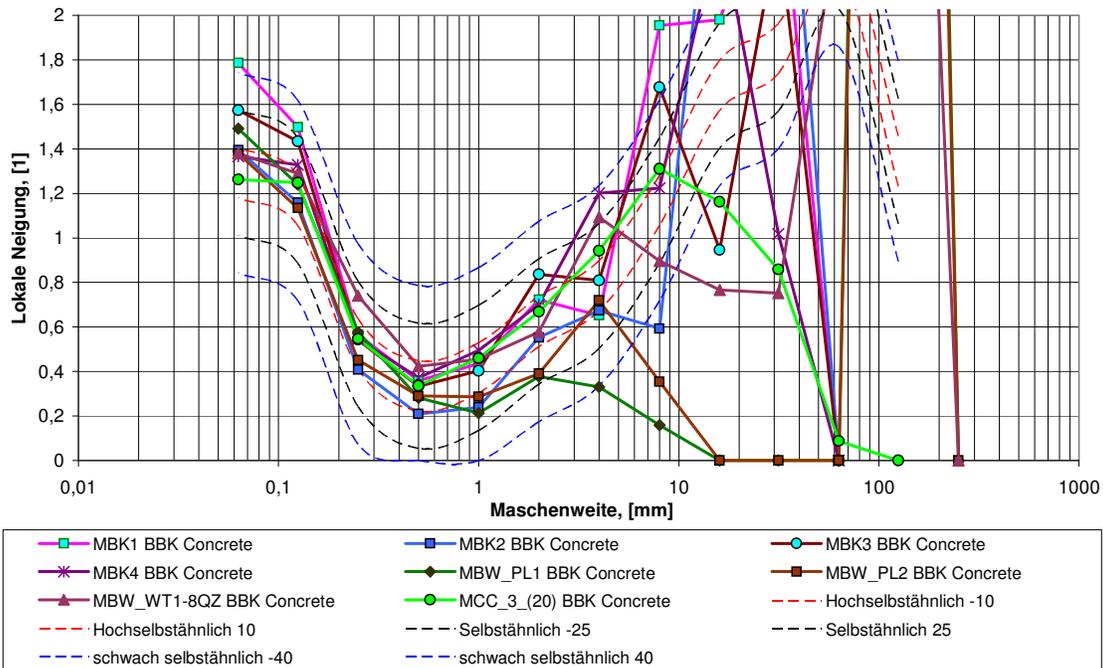


Abbildung 64. Lokale Neigungen der mechanisch zerkleinerten Proben

Diese Versuche zeigen, dass die Art der Zerkleinerung bzw. Krafteinwirkung keinen Einfluss auf die charakteristische Verteilung des Feinmaterials hat. Die Krafteinwirkung reicht von Scherung in den Druckproben über Punktlast/Flächenpressung bis zu reinem Zug in den Versuchen mit Quellszement.

7.1.3. Vergleich der Versuche der mechanischen Zerkleinerung

In Abbildung 65 sind Durchschnittskurven der Lokalen Neigungen in der mechanischen Zerkleinerung dargestellt. Die Kurven der Proben, bei denen die Kraft gleichmäßig und definiert aufgebracht wurde (Quellszement, hydraulische Presse, Point Load) weisen einen steileren Flanke links vom Lokalen Minimum (im Feinkornbereich auf) wie die Durchschnittsprobe aus der Laborbackenbrecherzerkleinerung.



Die relative Anreicherung von Teilchen gegenüber den Proben mit „definiert aufgebrachtener Kraft“ in den Proben der Laborbrecherzerkleinerung, könnte durch den „häufigeren“ Kontakt von Körnern mit dem Brechwerkzeug sein, das bei jedem Kontakt einen „Zermahlungsbereich“ ausbildet und somit mehr Feinmaterial produziert.

Aus Abbildung 64 geht hervor, dass das Lokale Minimum der untersuchten Proben (ausgenommen Point Load Test) immer an derselben Stelle liegt. Bei den Point Load Proben, kann davon ausgegangen werden, dass das Fehlen von Mittelkorn in diesem Versuch das Lokale Minimum nach rechts verschoben hat, da es bei der „Zerkleinerung“ zu 4 großen Bruchstücken plus Feinmaterial kam.

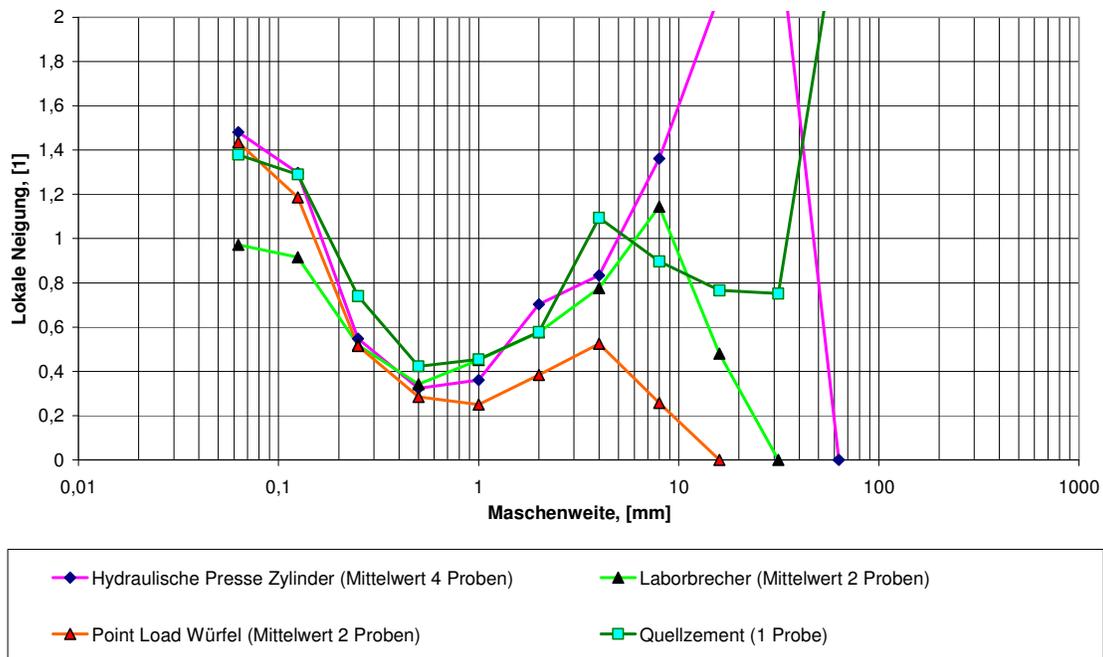


Abbildung 65. Durchschnittskurven der Lokalen Neigung aus der mechanischen Zerkleinerung



7.2. Untersuchungen im Amphibolit

7.2.1. Einleitung

In diesem Kapitel werden mechanische Zerkleinerungsversuche im Amphibolit im Labormaßstab anhand einer energieoptimierten Zerkleinerungskette analysiert und die Ergebnisse von mehreren Beprobungskampagnen der Aufbereitungsanlage im Steinbruch Eibenstein im Hinblick auf die Charakteristik von Korngrößenverteilungen untersucht.

Als eine der Grundlagen des Less Fines-Projekts war die Frage, ob die Anwendbarkeit des Konzepts der NBC auf mechanische Zerkleinerungsmechanismen beschränkt ist oder ob das Zerkleinerungsverhalten eines Gesteines prozessunabhängig ist. Ferner war auch in der Aufbereitung die Obergrenze der Anwendbarkeit der NBC nicht bekannt. Zu diesem Zweck wurde erstmals ein Brecher außerhalb der Laborgrößenordnungen (Spaltweite 40 mm, *Böhm et al. 2002*) eingesetzt.

7.2.2. Optimierte Zerkleinerungskette (OZK)

Als OZK wird eine Abfolge von Zerkleinerungsstufen bezeichnet, bei der in jeder Stufe nur das Material einem Zerkleinerungsprozess zugeführt wird, welches eine bestimmte Maximalkorngröße noch nicht unterschreitet. D.h. es wird eine Kreislaufzerkleinerung durchgeführt und nur Material welches die Maximalkorngröße noch nicht unterschreitet wieder aufgegeben. Die Energie der Brech- bzw. Mahlanlagen wird gemessen. Aus der spezifischen Oberfläche des Zerkleinerten Gutes und der Aufgewendeten Energie kann die Energieregisterfunktion ermittelt werden. Hieraus kann der Rittinger Koeffizient bestimmt werden, der eine Aussage darüber gibt, wie viel Energie notwendig ist, um eine spezifische Oberfläche von 1 cm^2 zu schaffen. Die Einheit des Rittinger Koeffizienten ist J/cm^2 und stellt die Steigung der Energieregisterfunktion dar.

Für die im Less Fines-Projekt bearbeiteten Materialien wurden pro Gestein 5 NBC-Kurven ermittelt. Abbildung 66 zeigt die erhaltenen Summenkurven der verschiedenen Zerkleinerungsstufen im Amphibolit. Es ist zu erkennen, dass die charakteristischen Biegungen der Kurven alle an derselben Stelle liegen.

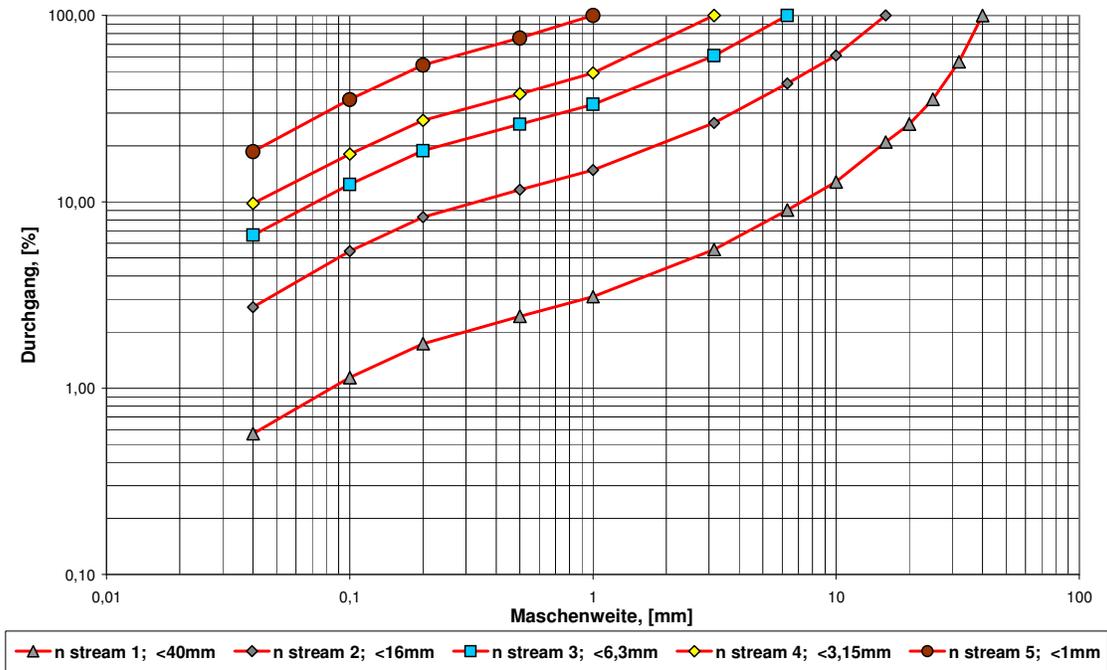


Abbildung 66. Siebkurven der mechanischen Zerkleinerung von Amphibolit

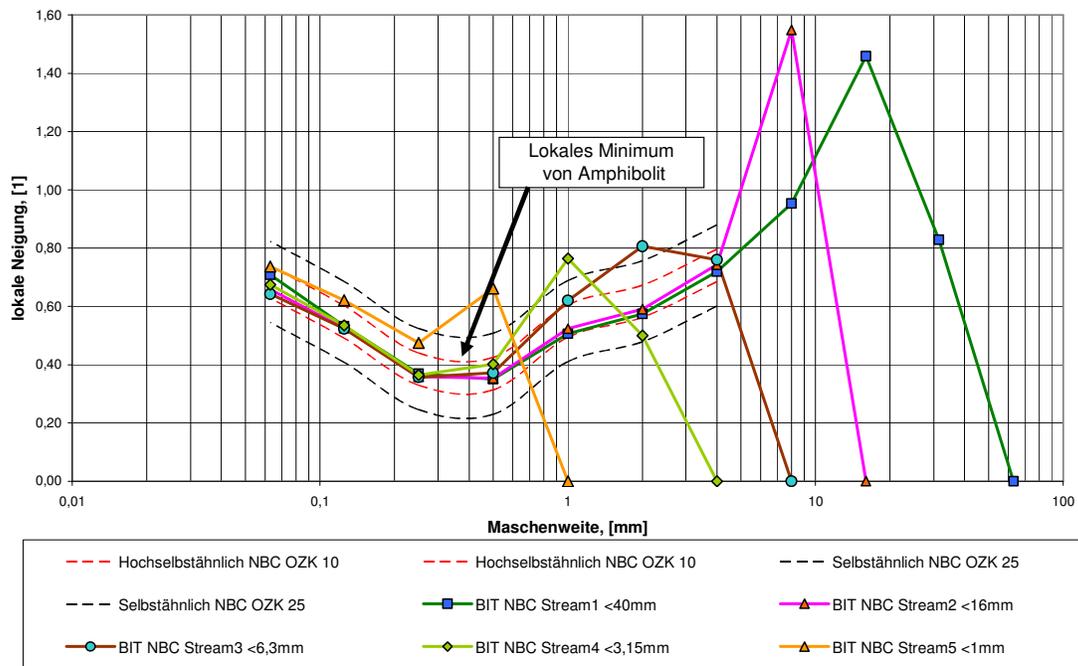


Abbildung 67. Darstellung der NBC-Kurven aus der Aufbereitung, ihre Selbstähnlichkeitsgrenzen und die Grenzen der Selbstähnlichkeit aus den gewichteten Mittelwerten aller durchgeführten Untersuchungen.



In der Abbildung 67 sind die Lokalen Neigungen der einzelnen Ströme der Aufbereitungskurven dargestellt. Die geglätteten durchgezogenen Linien stellen die Grenzen der Selbstähnlichkeit der Aufbereitungskurven untereinander dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich Strom 1–4 zueinander hochselbstähnlich verhalten, Strom 5 ist (< 1 mm) zu allen anderen jedoch nur selbstähnlich. Noch vor Erreichen des Lokalen Minimums steigt er kurz an um dann sofort gegen Null zu gehen. Auch beim Strom 4 ($< 3,15$ mm) ist ein leichter Anstieg im Bereich des Lokalen Minimums zu beobachten.

7.2.3. Ergebnisse aus der Anlagenbeprobung in Eibenstein

Im Zuge des Less Fines-Projektes wurden auch Beprobungen der Aufbereitungsanlage im Steinbruch Eibenstein durchgeführt, die den Einfluss des Aufgabegutes auf das Verhalten der Anlage einerseits, und auf das Zerkleinerungsverhalten andererseits zeigen sollen (Böhm & Öfner 2004). Von diesen Beprobungen wurden für die gegenständliche Untersuchung jene Ströme ausgewählt, die einerseits Feinmaterial enthielten und andererseits auch bis < 1 mm gesiebt wurden. Die Summenkurven aus den Anlagenbeprobungen sind in Abbildung 68 dargestellt.

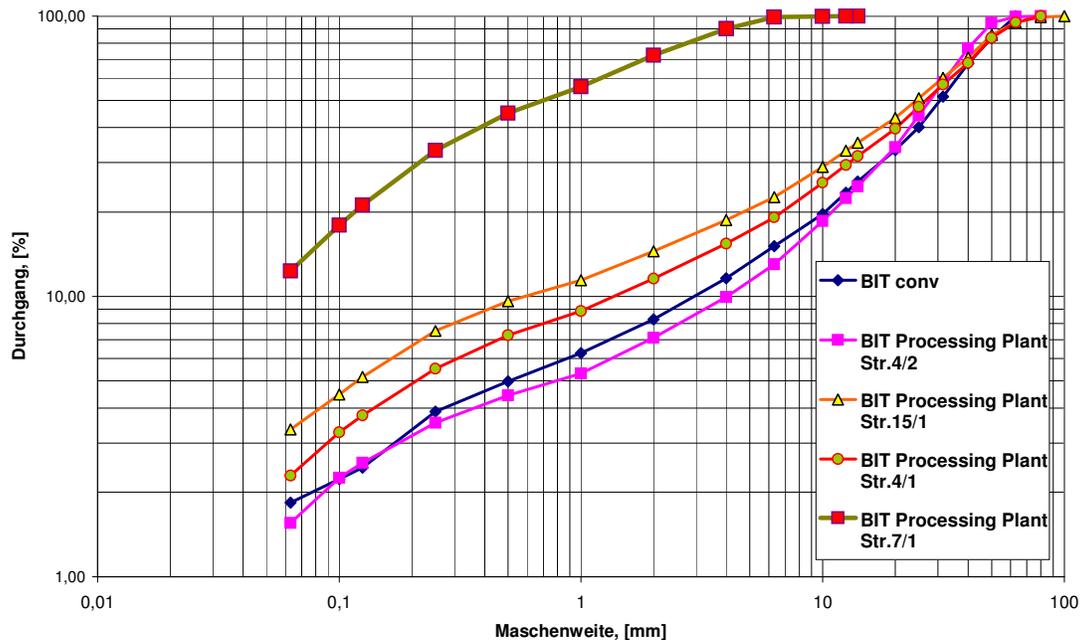


Abbildung 68. Darstellung der Summenkurven aus der Anlagenbeprobung



In Abbildung 69 sind die Lokalen Neigungen (GGs-Exponenten) der Massenströme 4, 7 und 15 (Proben von Strom 4 wurden in zwei verschiedenen Beprobungs-Kampagnen genommen) und von Material einer nicht repräsentativen Probe (BIT conv) aus einer früheren Probenahme dargestellt. Die Probenahmestellen wurden in Kapitel 4 genau erläutert.

Die einzelnen Massenströme (ausgenommen Probe BIT conv.) sind untereinander bis zu einer Korngröße von 1 mm hochselbstähnlich. Berücksichtigt man den siebgrößenbedingten Abfall der GGS-Exponenten in der Probe des Stromes 7, so sind alle Proben aus der Aufbereitungsanlage als selbstähnlich bis zu einer Korngröße von 10 mm einzustufen.

Verglichen mit den Grenzen aus den gewichteten Mittelwerten aller untersuchten Proben (gewichtete Mittelwerte aus allen Laborsprengproben, Knäppersprengungen, Großsprengungen sowie aus allen mechanischen Zerkleinerungsversuchen, Abbildung 69, strichlierte Linien) sind die Kurven aus der Aufbereitungsanlage schwach selbstähnlich.

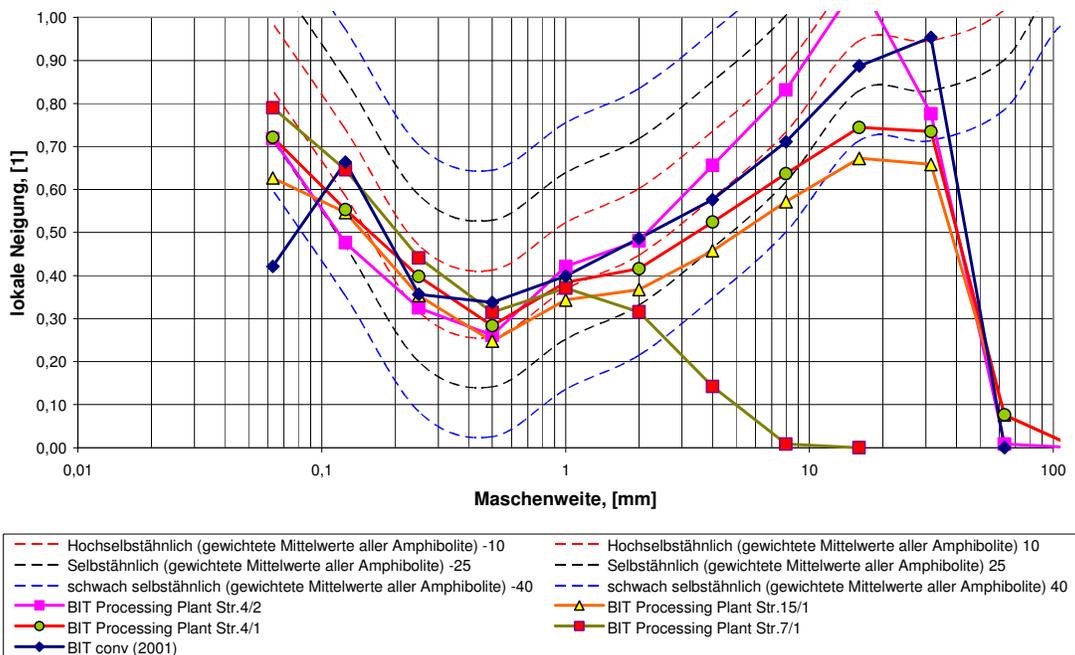


Abbildung 69. Lokale Neigungen verschiedener Proben aus der Aufbereitungsanlage



7.2.4. Vergleich von OZK Versuchen mit der Anlagenbeprobung

In Abbildung 70 sind die Durchschnittskurven der Lokalen Neigungen aus der OZK und der Anlagenbeprobung einander gegenübergestellt. Die linken Flanken (links neben dem Lokalen Minimum) der beiden Kurven zeigen die exakt gleiche Neigung und denselben Verlauf. Auch das Lokale Minimum liegt bei derselben Korngröße. Im Grobbereich trennen sich die beiden Kurven jedoch, wobei die Laborprobe eine steilere Tendenz aufweist, während die Neigungen der Proben aus der Aufbereitungsanlage flacher ausfallen (Abbildung 70). Eine Mögliche Erklärung ist in Kapitel 8 angegeben.

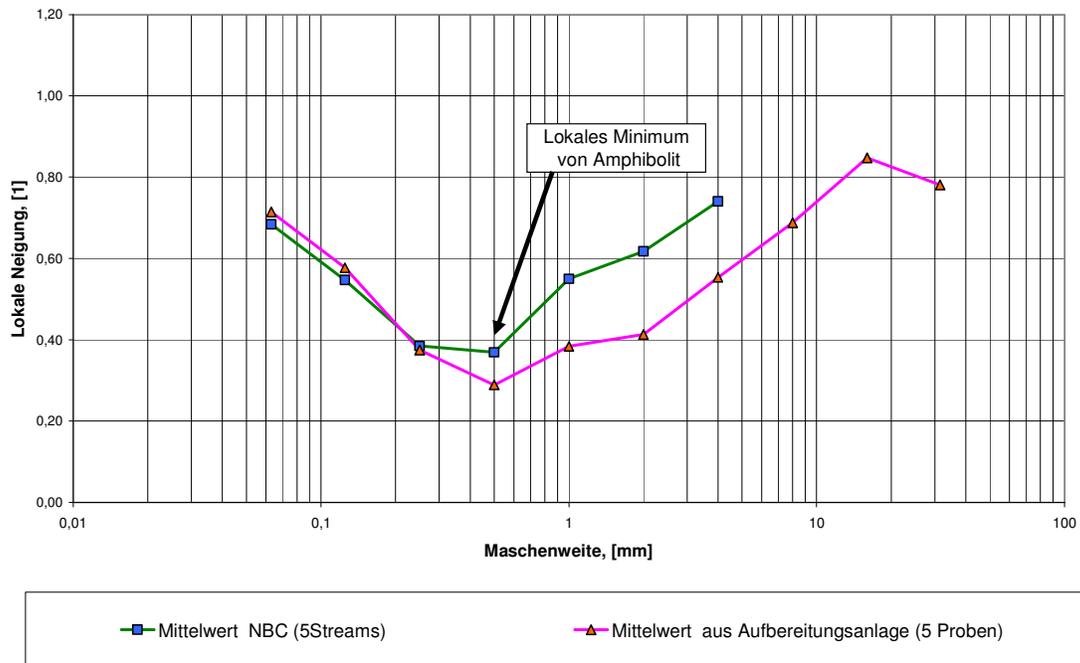


Abbildung 70. Vergleich der Lokalen Neigungen aus der OZK mit der Anlagenbeprobung

7.3. Untersuchungen im Bårarp-Gneis

7.3.1. Einleitung

Auch beim Bårarp-Gneis wurden neben Labor-Sprengversuchen auch Labor- Zerkleinerungsversuche durchgeführt. Diese Zerkleinerungskurven sowie eine Energieregisterfunktion wurden vom Institut für Aufbereitung und Veredelung im Zuge einer Übung für Studenten bestimmt.

Als Proben dienten Reststücke von den ausgebohrten Sprengzylindern, die zuerst mit einem Hammer vorzerkleinert wurden und anschließend in einem Laborbackenbrecher für die weiter Zerkleinerung vorbereitet wurden.

7.3.2. OZK Versuche

Vom Institut für Aufbereitung wurde die NBC und die Energieregisterfunktion im Labormaßstab an 2 Punkten ohne den Großbrecher ermittelt. Die erhaltenen Sieblinien sind in Abbildung 71 dargestellt. Die Kurve BA NBC Stream 1 stellt die Sieblinie des gesiebten „Startproduktes“ dar, das durch einen Laborbackenbrecher vorbereitet wurde.

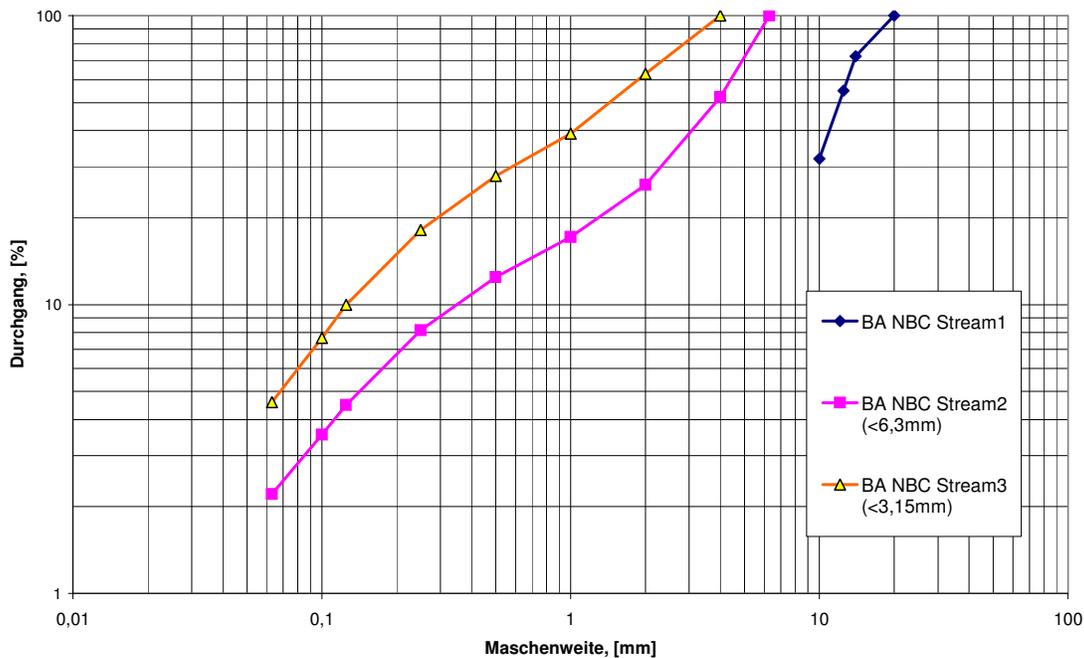


Abbildung 71. NBC durch mechanische Zerkleinerung



Abbildung 72 zeigt die Lokalen Neigungen der mechanischen Laborzerkleinerung. Die Kurven der beiden Ströme ($< 6,3$ mm und $< 3,15$ mm) sind zueinander hochselbstähnlich, zu allen anderen Bärarp-Proben aus gewichteten Mittelwerten (alle Laborsprengproben sowie alle Großsprengungen) selbstähnlich bis zu einer Korngröße von 0,5 mm.

Ab einer Korngröße von 0,5 mm bis zu einer Korngröße von 2 mm steigen die Lokalen Neigungen, um anschließend gegen Null abzusinken. Das Lokale Minimum des Bärarp-Gneis liegt wie die Untersuchungen in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt haben bei 1 mm, in diesem Fall jedoch bei 0,5 mm.

Zur Abweichung gibt es folgende Vermutung:

Da beim Bärarp-Gneis im Gegensatz zu anderen Materialien das Lokale Minimum bei etwa 1 mm liegt (beim Amphibolit liegt es etwa bei 0,4 mm) und es auch keine NBC-Kurven für Grobmaterial gibt, weichen die Lokalen Neigungen der NBC-Kurven vor dem Erreichen des Minimums nach oben hin ab. Somit wird das Lokale Minimum durch fehlendes grobkörniges Gut verwischt und überprägt. Eine NBC mit größerem Maximalkorn bzw. einem größeren Backenbrecher sollte zur Bestätigung durchgeführt werden. Dasselbe Phänomen kann beim Bitustein Amphibolit für Stream 5 in Abbildung 67 beobachtet werden.

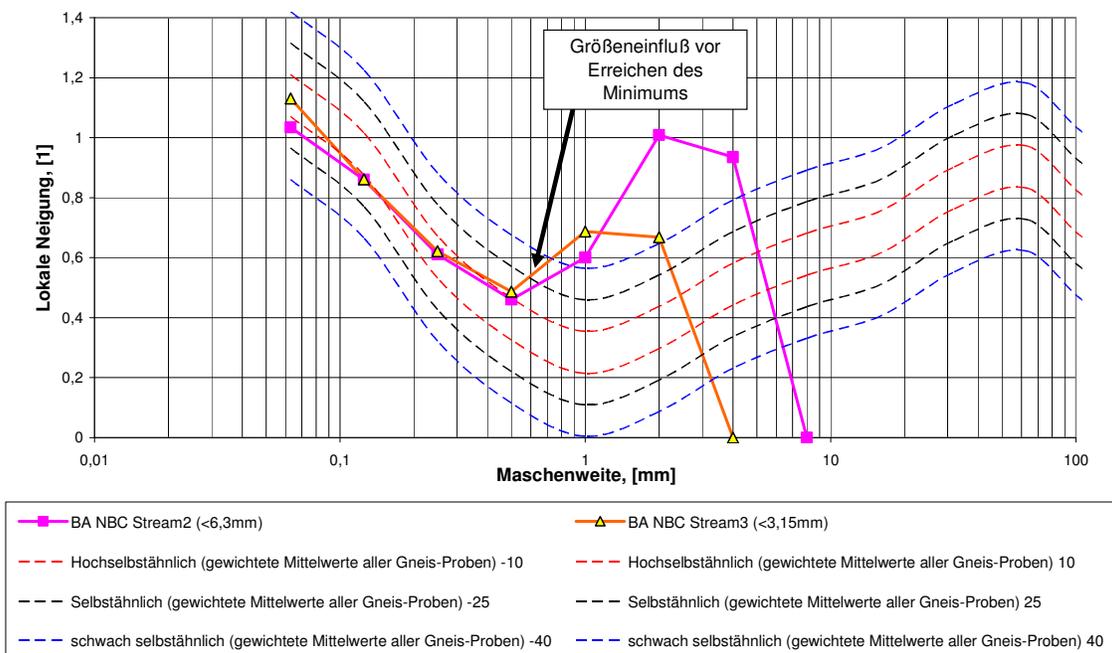


Abbildung 72. Darstellung des GGS-Exponentenverlaufes aus der mechanischen Zerkleinerung zur Bestimmung der NBC



8. Vergleich der Charakteristik von Zerkleinerungsergebnissen aus sprengender und mechanischer Zerkleinerung

8.1. Allgemeines

In diesem Kapitel wird eine vergleichende Analyse der Charakteristik von Sieblinien aus Sprengarbeit und mechanischer Zerkleinerung durchgeführt. Dazu wurden hier Durchschnittskurven von unterschiedlichen Zerkleinerungsverfahren gebildet und miteinander verglichen.

8.2. NBC im Vergleich Sprengen - Mechanische Zerkleinerung

8.2.1. Beobachtungen im BBK-Beton

Im BBK Beton wurden Labor Sprengversuche, Mechanische Versuche mit definiert aufgebrachtener Kraft (hydraulische Presse) und mechanische Zerkleinerungsversuche mit einem Laborbackenbrecher durchgeführt.

Die Mittelwerte der Durchgangskurven sind in Abbildung 73 und Abbildung 74 dargestellt. Die Durchschnittskurven aller „normal“ gesprengten Sprengproben sind in blau dargestellt (MBW 1, MBW 2, MBW 3Cu, MBW 4Cu, MBW 5, MBW 10, MBW 11, MBW 12, MBW 14, MBW 60), die Durchschnittskurven aus den Brechversuchen in rot (MBW crush, MBW crush20) und die Durchschnittskurven aus den Proben mit definiert aufgebrachtener Kraft in grün (MBW PL1, MBW PL2, MBW WT1-8QZ, MBK1, MBK2, MBK3, MBK4). In Abbildung 73 sind die Durchgangskurven mit $k_{\max} = 10$ mm dargestellt und in Abbildung 74 mit $k_{\max} = 1$ mm.

Während in Abbildung 73 bei einem k_{\max} von 10 mm ein Unterschied im Feinanteil ($< 63 \mu\text{m}$) zwischen den Mittelwertskurven aus den Brechversuchen (MBW crush, MBW crush20) und denen aus den Sprengproben bzw. den durch mit mechanisch definierter Kraft zerkleinerten Proben von etwa 1,3 % festgestellt wurde, variiert der Feinanteil $< 63 \mu\text{m}$ bei $k_{\max} = 1$ mm (Abbildung 74) um etwa 7 %.

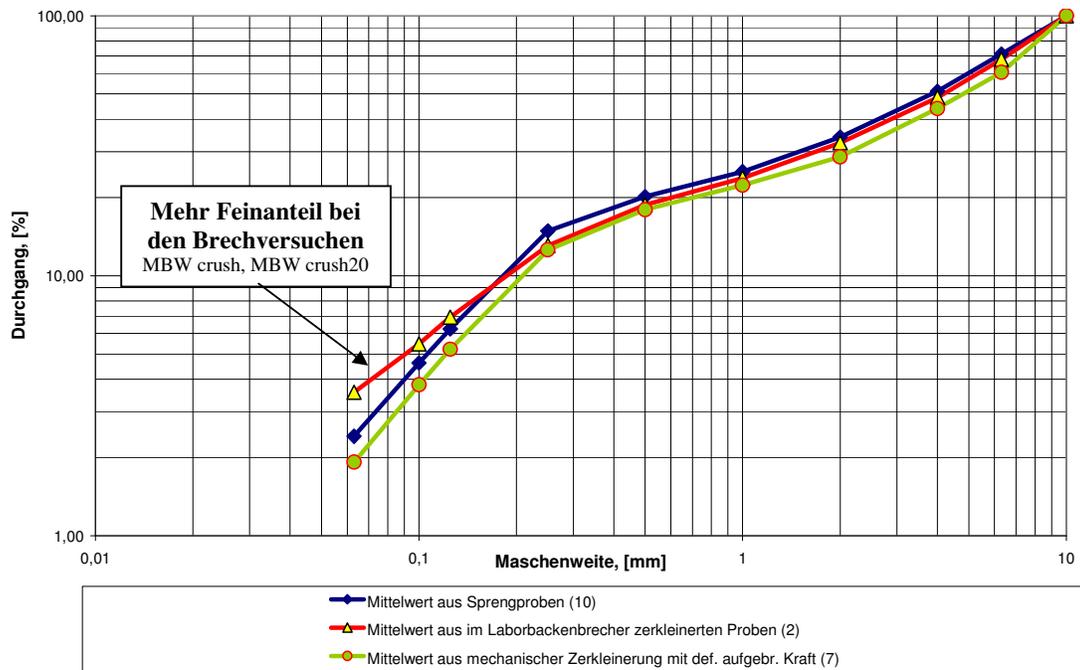


Abbildung 73. Darstellung der Durchgangskurven im BBK Beton mit $k_{max} = 10 \text{ mm}$

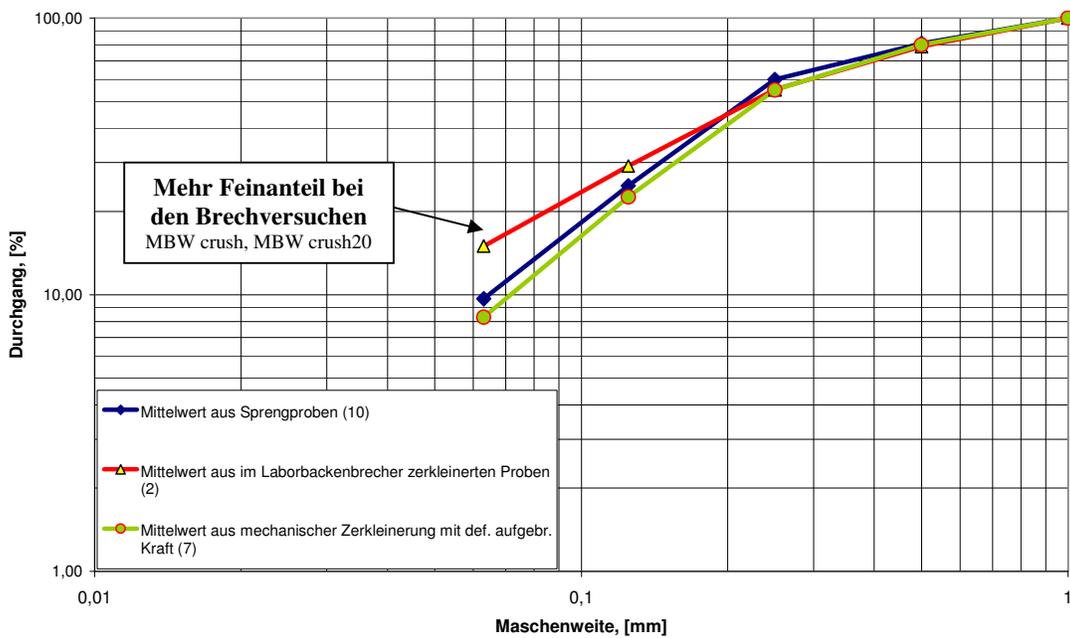


Abbildung 74. Darstellung der Durchgangskurven im BBK Beton mit $k_{max} = 1 \text{ mm}$

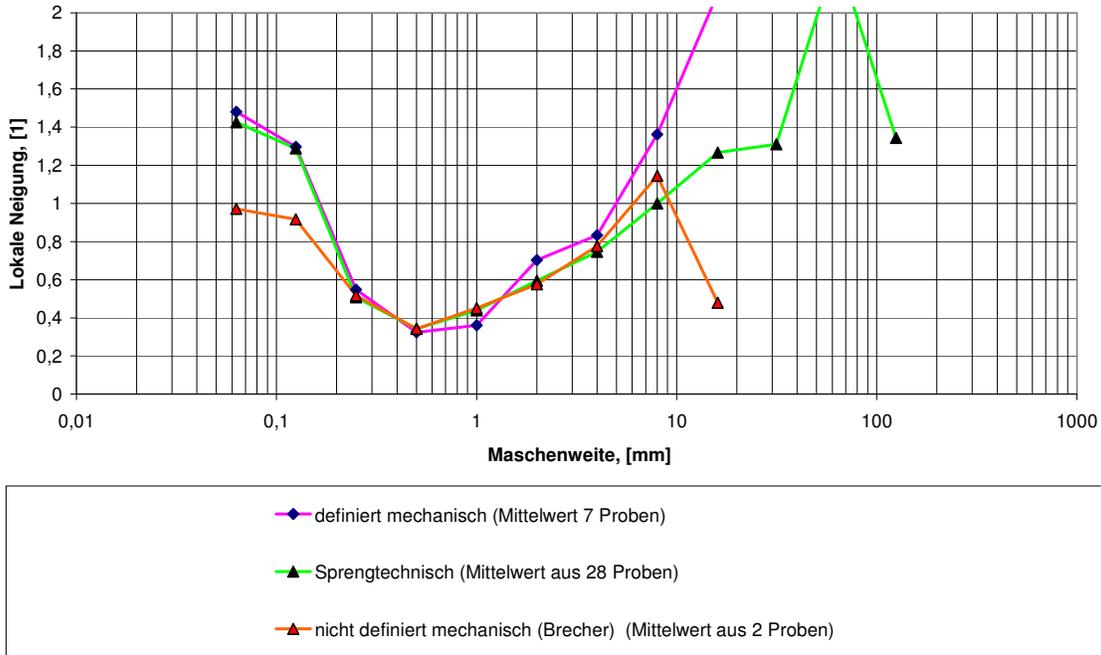


Abbildung 75. Exponentenverlauf von Durchschnittsproben aus BBK Beton

Aus allen Sprengproben, allen mechanisch zerkleinerten Proben und den beiden Brechproben wurden jeweils die klassenweisen Lokalen Neigungen aus den Gesamtproben ermittelt und für die jeweiligen Zerkleinerungsgruppen gemittelt. Die Durchschnittskurven sind in Abbildung 75 dargestellt.

Bei allen 3 Kurven liegt das Lokale Minimum der Lokalen Neigungen an derselben Stelle. Die Kurven der in der Presse Zerkleinerten Proben und der Sprengtechnisch zerkleinerten Proben sind bis zu einer Korngröße von 4 mm hochselbstständig.

Die Durchschnittsprobe aus der Laborbackenbrecherzerkleinerung weist im Feinbereich (links vom Lokalen Minimum) einen flacheren Verlauf auf, als die beiden anderen (Abbildung 75). Dies weist auf einen höheren Anteil an Feinmaterial in der Brecherzerkleinerung hin (siehe auch Abbildung 74).



8.2.2. Beobachtungen im Amphibolit

Einige zufällig gewählte Durchgangskurven des Bitustein Amphibolit sind in Abbildung 76 dargestellt. Die Durchgangskurven der Sprengproben sind in blauen Farbtönen dargestellt (BIT 21, BIT 3, BIT 70, BIT 73, BIT 78 und BIT 91), die Durchgangskurven der Großsprengung in Grün (BIT fullblast), die Durchgangskurven von den Knäppersprengungen in Violett und Lila (BIT HS1, BIT HS3, BIT HS4, BIT HS5), die Summenkurven aus der Anlagenbeprobung in Orangetönen (BIT Processing Plant 15_1, BIT Processing Plant 4_1, BIT Processing Plant 4_2) und die Kurven aus den OZK-Brechversuchen in rot (BIT NBC Stream1 bis Stream5). Die Kurven sind mit einem $k_{\max} = 1 \text{ mm}$ abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass die Aufbereitungskurven, sowohl von den Laborproben als auch von der Aufbereitungsanlagenbeprobung, mehr Feinmaterial aufweisen, als die Sprengproben (Abbildung 76).

Abbildung 77 zeigt die Mittelwerte der Lokalen Neigungen verschiedener Zerkleinerungsprozesse und Mittelwerte verschiedener Probenmaßstäbe. Die Mittelwerte wurden pro Zerkleinerungsart und Zerkleinerungsmaßstab gebildet, das heißt es wird ein Mittelwert von Knäppern mit einem Mittelwert aller Modellversuche mit einem Mittelwert von mechanischer Zerkleinerung verglichen. Die einzelnen Mittelwerte verhalten sich zueinander laut Definition bis zu einer Größe von 8 mm selbstähnlich, im Bereich des Minimums sogar hochselbstähnlich. Wie schon eingangs erwähnt, ist die Lage und Position des Minimums der Lokalen Neigungen innerhalb eines Materials konstant und unabhängig von der Art der Zerkleinerung und des Maßstabs, vorausgesetzt, dass der Größeneinfluss der Probe oberhalb des Minimums liegt.

Da alle fünf NBC-Kurven aus der mechanischen Zerkleinerung bis zu $< 0,25 \text{ mm}$ eine geringere Lokale Neigung (flachere Tendenz) aufweisen, ist auf diese Tatsache in weiterer Folge ein Augenmerk zu legen. Das Minimum der Lokalen Neigungen liegt jedoch an derselben Stelle mit den Mittelwerten.

Wie bereits bei der Beschreibung der NBC aus den Aufbereitungsversuchen im Labormaßstab festgestellt wurde, zeigen auch hier die Kurven der Proben, die mechanisch zerkleinert wurden, eine geringere Neigung im Feinkornbereich. Diese geringere Neigung stellt in der Summenkurve – die ja Grundlage zur Berechnung der Lokalen Neigung ist – einen erhöhten Feinkornanteil (im Gegensatz zu den Sprengproben) dar.

Zum Unterschied zu den gesprengten Proben scheinen die Enden des gesamten Kurvenbündels aus den Aufbereitungsversuchen nach unten gebogen zu sein, während sowohl die Lage als auch die vertikale Position des Minimums der Kurven erhalten bleibt (Abbildung 77).

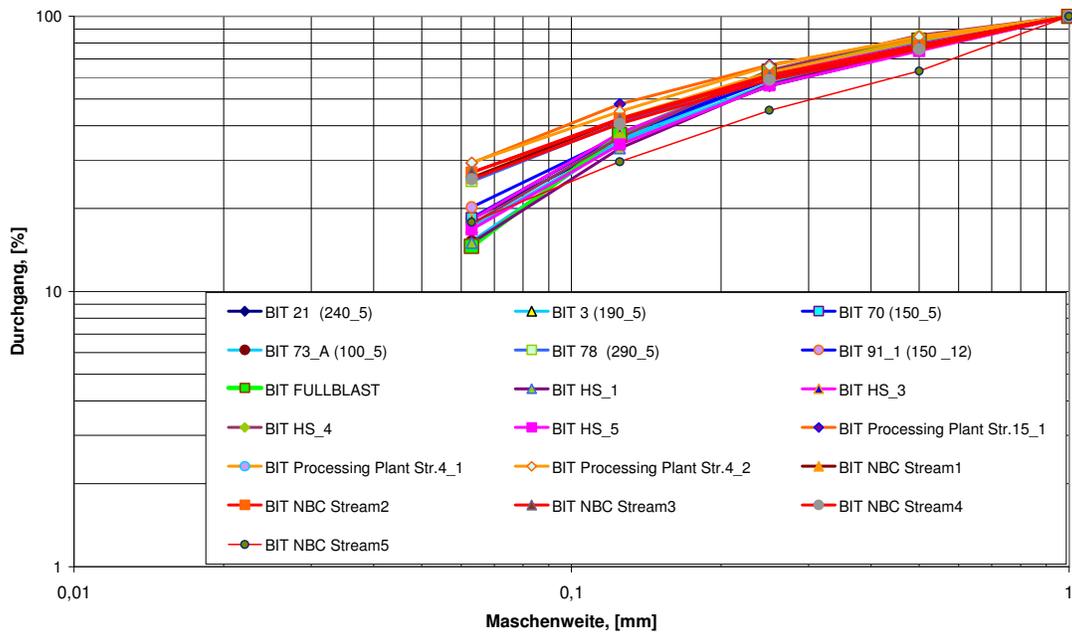


Abbildung 76. Darstellung der Durchgangskurven im Bitustein Amphibolit mit $k_{max} = 1 \text{ mm}$

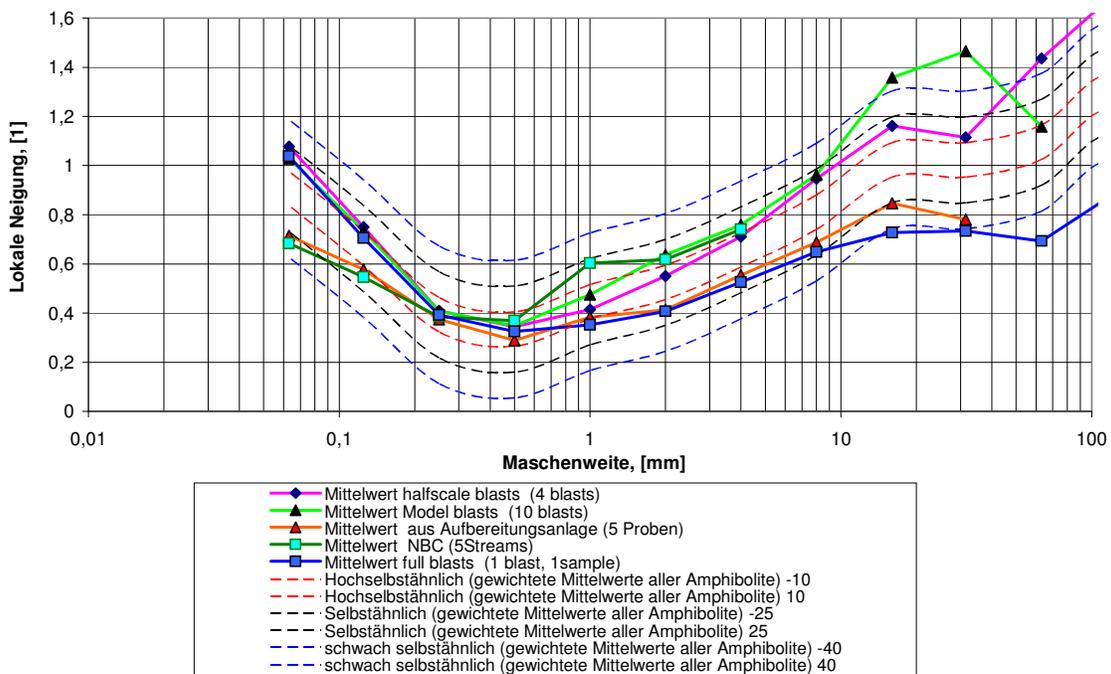


Abbildung 77. Vergleich von mechanischer mit sprengtechnischer Zerkleinerung und Labor mit Großmaßstab



Dabei ist zu erkennen, dass die linke Flanke der GGS-Exponenten-Verläufe (Lokale Neigungen) vom Zerkleinerungsprozess abhängig ist. Die Kurven der mechanisch zerkleinerten Proben weisen beide einen flacheren Verlauf auf als die Mittelwerte der sprengtechnisch Zerkleinerten.

Der in Abbildung 77 dargestellte rechte Teil der Flanke scheint nicht vom Zerkleinerungsprozess, sondern vom Maßstab bzw. der maximalen Probengröße gesteuert/geregelt zu werden. Während sich die Werte der im Labor zerkleinerten Proben im oberen Bereich befinden, sind die Werte der Proben aus der Aufbereitungsanlage und aus der Großsprengung im unteren Bereich anzutreffen (Abbildung 77). Die Neigungswerte der Proben aus den Knäppersprengungen befinden sich genau zwischen den reinen Laborsprengungen und den Großsprengungen.

8.2.3. Beobachtungen im Bärarp-Gneis

Wie auch schon beim Amphibolit beobachtet werden konnte, zeigt die Seite links vom Lokalen Minimum beim Bärarp Gneis bei der mechanischen Zerkleinerung eine flachere Tendenz als die der Sprengversuche.

Die flacheren Neigungen in den Großsprengungen im Feinbereich, die auf einen größeren Feinkornanteil hinweisen, sind nur spekulativ. Es wird angenommen, dass im Feinbereich nicht repräsentative Proben lange Zeit nach Versuchsende nachgesiebt wurden und somit Fehler aufgetreten sind (Abbildung 54, Abbildung 55). Eine exakte Beurteilung ist deshalb nicht mehr möglich.

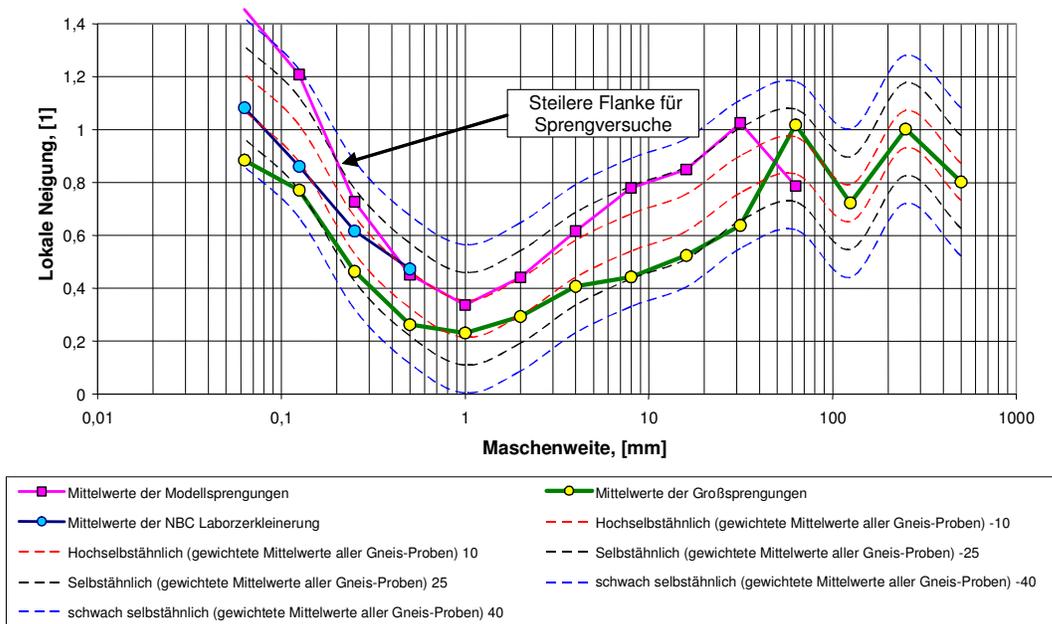


Abbildung 78. Verläufe der Lokalen Neigungen, abhängig von Prozessen und Maßstäben

Wie auch schon für Amphibolit beobachtet wurde (Abschnitt 6.3), zeigen auch hier beim Gneis die Aufbereitungsproben eindeutig flachere Tendenzen im Feinbereich, was auf einen höheren Feinkornanteil bei der mechanischen Zerkleinerung schließen lässt (Abbildung 78).

8.3. Vergleich der mechanische Zerkleinerung mit der Sprengtechnik hinsichtlich des Feinmaterialanteils

Die Beobachtung, dass eine technisch-mechanische Zerkleinerung mehr Feinmaterial produziert als sprengtechnische Zerkleinerung, wurde an drei verschiedenen Gesteinen gemacht.

Eine mögliche Erklärung dazu ist der gegenüber der mechanischen Zerkleinerung auftretende stärkere Verlust von Feinmaterial beim sprengenden Zerkleinern. Da die Gesamt-Verluste (von der Sprengprobe bis hin zum fertig gesiebten Gut) beim Sprengen in der Sprengkammer inklusive Siebverluste meist $< 0,5\%$ liegen, wird diese Erklärung nicht weiterverfolgt. Wenn der Gesamtverlust von $0,5\%$ gleichmäßig auf das Material < 10 mm aufgeteilt wird, bleibt immer noch ein Unterschied zwischen mechanischen Versuchen und der Sprengtechnik erhalten (Reichhoff, 2004).



Die mögliche zweite Erklärung besteht darin, dass Feinmaterial, das zwar hauptsächlich während der Ausbildung von Makrorissen entsteht, auch am Kontakt der Zerkleinerungskräfteeinleitung entsteht. Beim Sprengen betrifft dies die intensive Zerstörungszone Zermalmungszone. Bei der mechanischen Zerkleinerung kommt es zur Ausbildung von zahlreichen „Zermalmungszonen“ bei jedem Brecher-Gesteins und jedem Gesteins-Gesteins-Kontakt. Diese Energiespitzen zerstören lokal das Gestein stark und führen zur Bildung von Feinmaterial.

Diese Erklärung wird die Versuche im Magnetitbeton unterstützt, wo „definiert aufgebrachte Kraft“ zu denselben Resultaten bezüglich Lokaler Neigungen führte wie die Sprengtechnische Zerkleinerung (Abbildung 75).

Ferner kann durch ein „Abrunden“ der Kanten und Ecken der zu großen Bruchstücke („bis sie gerade durch das Sieb passen“) bei der Kreislaufzerkleinerung die etwas feinere Zerkleinerungskurve im Vergleich zur Durchlaufzerkleinerung erklärt werden.

8.4. Zusammenfassung

Die NBC wird durch die Lage und Position des Minimums der Lokalen Neigungen fixiert und dargestellt. Dieses Minimum ist prozess- und maßstabsunabhängig.

Die Flanken der Lokalen Neigungen sind prozess- und maßstabsabhängig. Die linke Seite (Feinbereich) wird durch die Art des Zerkleinerungsprozesses gesteuert. Mechanische Zerkleinerung bildet flachere Neigungen (mehr Feinmaterial) als sprengtechnische Zerkleinerung.

Die Lokalen Neigungen der mechanisch zerkleinerten NBC-Proben aus der OZK erreichen das Minimum bei manchen grobkörnigen Gesteinen (zum Beispiel Gneis, Magnesit) nicht, da der Größeneinfluss vor Erreichen des Minimums eintritt. Das Minimum der Lokalen Neigungen bei Gneis liegt bei etwa 1 mm.

Das „Mehr“ an Feinmaterial in den mechanischen Zerkleinerungen lässt sich **nicht** alleine nur durch einen Verlust an Feinmaterial in den Modellsprengungen erklären, da auch bei den Großsprengungen und bei der unrepräsentativen Probe einer Großsprengung dieser geringere Feinkornanteil beobachtet wurde.



Die Natürliche Bruchcharakteristik (NBC) ist eine gesteinsabhängige Zerkleinerungseigenschaft. Die NBC wird mittels der Exponentenverläufe dargestellt und durch die Lage der Lokalen Minima fixiert (Tabelle 17). Die Lage des Minimums ist prozess- und maßstabsgrößenunabhängig. Bei technisch-mechanischer Zerkleinerung (Brecher, Mühle, ...) ist die dargestellte linke Flanke der Lokalen Neigungen flacher als bei sprengender Zerkleinerung oder Zerkleinerung mit definiert aufgebrachtener Kraft.

Gestein:	Lage	Position
Sandstein	0,7 mm	0,44
Magnesit	4,0 mm	0,63
DMD Dolomit	0,25 mm	0,37
Alzo Kalk	0,125 mm	0,12
CP Kalk	0,25 mm	0,50
BIT Amphibolit	0,4 mm	0,35
BA Gneis	1,0 mm	0,30
BBK Beton	0,5 mm	0,33
NK K Typ	0,25 mm	0,60

Tabelle 17. Lage und Position der Minima der Lokalen Neigungen



9. Untersuchung der Zahl und des Aufbaus von Körnern in den einzelnen Korngrößenklasse

9.1. Allgemeines

Die NBC von Gesteinen stellt sich als eine materialspezifische Ausprägung von Korngrößenverteilungskurven dar. Diese materialspezifische Ausprägung ist durch eine relative Häufigkeit von Partikeln in der einzelnen Kornklasse bedingt. Im Hinblick auf das entwickeln eines besseren Verständnisses für das Zustandekommen der NBC wurde in einem weiteren Schritt sowohl die Zahl als auch der Aufbau der Körner in den einzelnen Kornklassen untersucht. Dazu wurden die Anteile von Einzelkörnern und verschiedenen Kornaggregaten in Streupräparaten von gesprengten Proben ermittelt. Die Verteilungsfunktionen der Einzelkörner und der Aggregate über der Korngröße wurden detailliert untersucht und mit den Lokalen Minima der NBC in Verbindung gebracht.

Die praktische Vorgehensweise bei der Ermittlung der Kornanzahlen und der Zusammensetzung des zerkleinerten Gutes wurde in Kapitel 4.6 ausführlich erläutert.

9.2. Die Anzahl der Körner in einem Zerkleinerungsprodukt

9.2.1. Vorgehensweise beim Berechnen der Anzahl von Teilchen

Neben dem Zählen der Teilchen in den einzelnen Korngrößenklassen wurde auch versucht, die Anzahl der Teilchen pro Klasse zu berechnen. In erster Näherung wurde dazu ein einfaches Kugelmodell benutzt.

Für jede Korngrößenklasse wurde durch einen einfachen volumetrischen Ansatz die Anzahl der Körner berechnet. Dazu wurde für jede Korngrößenklasse ein mittlerer Korndurchmesser bestimmt (geometrischen Mittelwert).

$$k_m = \sqrt{k_o \times k_u}$$

Gleichung 17

Wobei k_m der mittlere Korndurchmesser ist, k_o und k_u die Korngrößenklassenober- bzw. untergrenze darstellen.



Um auch in der kleinsten Kornklasse (0 mm – 0,063 mm) ein Kugelvolumen bestimmen zu können, wurde nur in dieser Klasse der mittlere Korndurchmesser nach folgender Formel ermittelt (arithmetischer Mittelwert):

$$k_m = \frac{k_o + k_u}{2}$$

Gleichung 18

Aus dem mittleren Korndurchmesser kann ein mittleres Kugelvolumen berechnet werden:

$$V_m = \frac{4 \cdot \left(\frac{k_m}{2}\right)^3 \cdot \pi}{3}$$

Gleichung 19

V_m beschreibt das mittlere Kugelvolumen.

Wird nun die Masse pro Klasse durch die mittlere Teilchenmasse ($m_m = V_m \cdot \rho$) dividiert, erhält man die Anzahl der Kugeln und somit die Anzahl der Teilchen pro Klasse (n).

$$n_{100\% \text{ Kugel}} = \frac{m_{kl}}{m_m}$$

Gleichung 20

nAnzahl der Teilchen; m_{kl} Masse pro Klasse; m_mMittlere Teilchenmasse ($m_m = V_m \cdot \rho$);
 ρ Gesteinsdichte.

Die jeweilige Anzahl der gezählten Teilchen wurde mit der jeweiligen errechneten Anzahl verglichen. Diese wurde wie oben beschrieben ermittelt, die Vorgangsweise des Auszählens ist in Kapitel 4.6.2 detailliert erläutert.



9.2.2. Kugel-Würfel Mischtyp und Korrelation mit dem Kornformfaktor

Zusätzlich wurde versucht, einen Teil der Kugeln durch Würfel zu ersetzen. Da die Bruchstücke und Fragmente nicht kugelförmig, aber auch nicht würfelförmig sind, wurde ein Mischtyp eingeführt.

$$n_{ges} = n_{100\% Kugel} \cdot X_{Kugel} + n_{100\% Kugel} \cdot \frac{6}{\pi} \cdot (1 - X_{Kugel})$$

Gleichung 21

Wobei X_{Kugel} der Anteil an Kugeln in %/100 ist, n die Anzahl von Partikeln, $6/\pi$ eine Konstante, um das Kugelvolumen auf das Würfelvolumen zu konvertieren. Mittels eines Visual Basic- Programms wurde der Kugelanteil (X_{Kugel}) so lange variiert, bis die Abweichung (Abw, Gleichung 21) zwischen den Berechneten und den Gezählten ein Minimum wurde.

Die Korngrößen-Werte, bei denen durch die Variation der Kugelanteile keinerlei Übereinstimmung gefunden werden konnte, wurden von der Berechnung des Minima ausgeschlossen und sind in der Tabelle 19-farbig dargestellt. Bei den Bärarp-Gneisen und beim ALZO-Kalk wurde ein Cut-Off von $< 500 \mu\text{m}$ festgestellt, während bei BIT und MBW der Cut-Off bei $< 125 \mu\text{m}$ liegt. Als Abweichungskriterium wurden die Absolutwerte der Differenz der Logarithmen gebildet:

$$Abw = \Sigma abs(\log(n_{rechn}) - \log(n_{gez}))$$

Gleichung 22

Es wurde festgestellt, dass verschiedene Materialien bei verschiedenen Kugelanteilen ihr Minimum zeigen.

Der Anteil an Kugeln, bei dem die Abweichung ein Minimum ist, und die Kornformfaktoren von den Aufbereitungsversuchen sind in Tabelle 18 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Kugelanteil zwischen den verschiedenen Materialien variiert, beim ALZO-Kalk mit 62,5 % am niedrigsten und beim Bitustein-Amphibolit mit 93,25 % am höchsten.

Es konnte keine plausible Korrelation zwischen den Kornformfaktoren aus der Aufbereitung und dem %-Kugelanteil gefunden werden. Der Kornformfaktor aus der Aufbereitung wird durch das Blaine-Verfahren ermittelt, welches sich auf die spezifische Oberfläche einer Probe durch den Druckabfall beim Durchströmen der Probe bezieht. Dieser Kornformfaktor stellt Oberflächenrau-



higkeiten der Körner dar, und weniger die Kornform selbst. Der „Kugelanteil-Faktor“ ist eine Beschreibung des gebrochenen Gutes bezüglich Maschenweite (aus dem mittleren Korndurchmesser k_m) und dem dazugehörigen Partikelvolumen ohne Berücksichtigung von Rauigkeiten.

	BA 1_1 (242_5)	BA 2_2 (192_5)	BIT 66 (190_4)	BIT 79 (190_5)	Alzo 15_1 (15)	ALZO 25_1	MBW 1	MBW 5
Minimum	0,91	0,78	1,22	1,20	0,32	1,09	1,01	1,10
%Kugel:	86,00	91,50	99,00	87,50	64,00	61,00	82,50	82,50
Mittelwerte:	BA		BIT		ALZO		MBW	
%Kugel:	88,75		93,25		62,50		82,50	
Kornformfaktor (Aufbereitung)	8,66		10,1		10,5		13,1	
Dichte	2,71		3,06		2,65		2,02	
Rittinger Koeff.	-		34,5		89,4		76,4	

Tabelle 18. Darstellung der Kugelanteile als „Kornfaktor“

Es wurden auch die Kugelanteile innerhalb einer Probe für alle Korngrößenklassen variiert und ein klassenweises Minimum ermittelt. Ziel war es, einen Trend zu finden, der zum Beispiel im Grobkorn mehr Würfel und im Feinkorn einen höheren Kugelanteil zeigt. Alle Untersuchungen diesbezüglich lieferten keinen Trend und kein verwertbares Ergebnis.

Da auch die Kugel-Würfel Mischform keinen haltbaren physikalischen Hintergrund hat, wird im Weiteren ausschließlich mit 100 % Kugeln gerechnet.



Korngröße mm	gerechnet	gezählt	gerechnet	gezählt	gerechnet	gezählt	gerechnet	gezählt	gerechnet	gezählt	gerechnet	gezählt	gerechnet	gezählt	gerechnet	gezählt
	BA1_1(242_5)	BA1-1	BA2_2(192_5)	BA2-2	BIT66(190_4)	BIT66	BIT79(190_5)	BIT79	Alzo15_1(15)	ALZO15_1	Alzo25_1(25)	ALZO25_1	MBW_1	MBW1	MBW_5	MBW5
125-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	3
100-80	2	3	-	-	1	1	-	-	-	-	1	2	1	1	9	5
80-63	6	8	1	2	-	-	4	2	-	-	6	8	4	4	4	3
63-50	36	35	6	7	16	12	18	19	-	-	24	19	14	13	3	4
50-40	25	25	18	21	28	26	38	31	-	-	52	43	31	25	4	4
40-31,5	87	81	49	51	48	44	48	46	5	4	102	80	50	39	11	6
31,5-25	130	116	81	76	65	65	104	95	28	28	144	122	94	73	11	11
25-20	188	171	117	118	62	65	117	111	79	70	194	162	97	82	15	14
20-14	535	463	438	404	140	139	295	270	339	278	507	406	229	184	23	20
14-12,5	299	253	202	182	72	73	138	118	227	184	283	241	126	99	15	14
12,5-10	772	664	624	550	207	197	308	277	615	506	585	519	265	213	32	29
10-6,3	3.178	2.959	2.962	2.735	748	612	1.125	986	2.347	1.939	1.963	1.642	761	639	90	82
6,3-4	6.895	6.397	5.782	5.209	1.295	1.175	2.049	1.881	5.113	4.160	4.645	3.352	1.960	1.587	373	307
4-2	32.826	30.406	32.052	27.924	6.016	5.802	10.029	9.171	27.906	21.644	20.786	15.805	9.405	8.194	1.597	1.249
2-1	160.520	124.799	152.546	139.674	25.874	23.976	42.973	35.686	94.904	55.928	84.213	43.338	43.398	36.345	6.225	4.111
1-0,5	1.205.312	1.164.339	1.126.497	861.274	115.800	141.656	177.058	197.275	383.233	280.695	420.638	408.718	206.542	204.102	27.754	22.530
0,5-0,25	9.822.726	5.772.594	10.013.299	6.387.399	868.500	990.460	1.263.014	2.100.124	1.561.855	1.025.383	1.887.744	1.832.007	2.698.821	2.700.497	186.755	162.582
0,25-0,125	67.767.800	16.597.046	72.095.766	13.478.909	8.708.162	6.289.433	12.181.589	8.135.050	7.867.125	1.297.021	10.724.563	2.474.563	24.108.412	22.232.670	2.241.056	1.503.496
0,125-0,1	54.145.095	10.853.287	65.088.814	14.014.815	10.985.759	6.396.000	14.930.846	10.362.350	12.804.822	541.542	6.056.076	606.379	20.154.168	21.917.000	1.968.567	1.512.410
0,1-0,063	207.077.551	35.224.951	228.618.783	25.555.799	39.914.215	15.628.000	55.290.982	15.217.050	148.261.752	5.970.344	181.346.537	9.432.379	75.103.094	49.646.042	6.968.941	-
<0,063	3.567.770.507	21.515.200	4.208.156.420	71.399.769	1.129.772.950	45.131.425	1.952.735.998	37.604.100	29.445.087.116	256.730.208	14.351.623.128	638.680.947	1.579.798.097	82.911.575	114.426.604	-

Tabelle 19. Vergleich von gezählten und gerechneten Teilchenanzahlen mit 100 % Kugelanteil. Die farbige markierten Felder zeigen den Bereich in dem die Zählung und die Berechnung der Teilchenzahlen laut der Definition des Cut-Offs **nicht** mehr übereinstimmen.



9.2.3. Vergleich gezählter und gerechneter Teilchenzahlen

In Abbildung 79 wurden die gerechneten gegen die gezählten Teilchenanzahlen (Tabelle 19) aufgetragen und eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Die Korrelation liegt zwischen 98,42 % und 99,95 %.

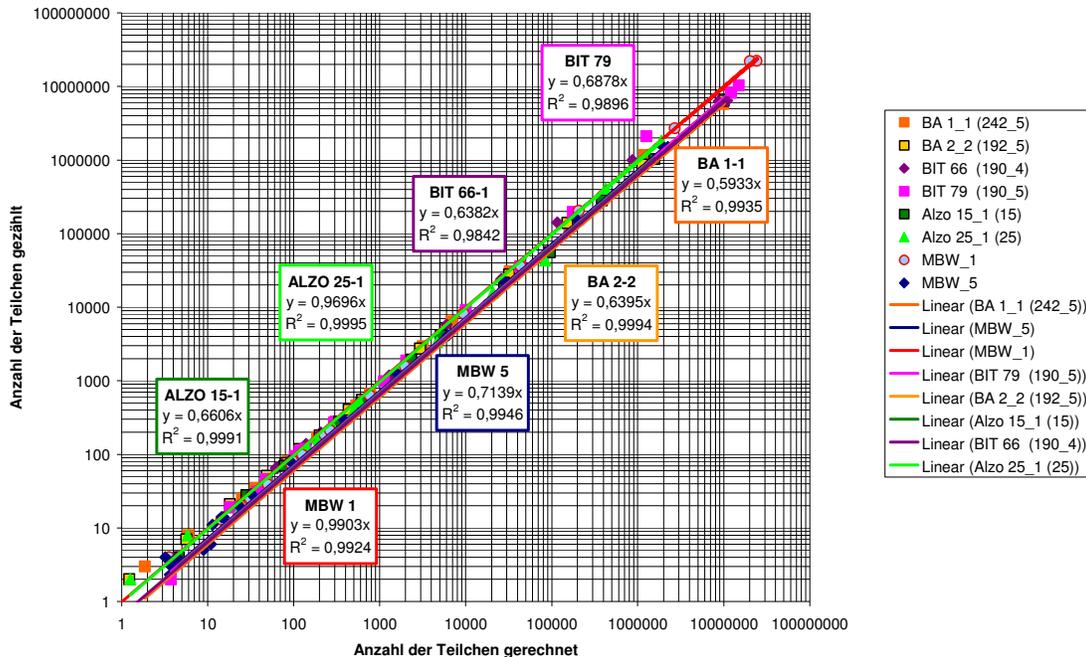


Abbildung 79. Korrelation von gezählten und gerechneten Teilchenanzahlen.

Ein Vergleich der tatsächlich gezählten und der errechneten Teilchenanzahlen sind in der Abbildung 80 bis Abbildung 83 dargestellt. Wie in diesen Abbildungen zu erkennen ist, sind die Abweichungen bis zum materialbedingten Cut-Off (von 0,5 für Bärarp-Gneis und ALZO-Kalkstein und 0,125 für Bitustein-Amphipolit und BBK-Magnetitbeton) minimal.

Als Cut-Off wird jene Korngröße bezeichnet, ab der ein verlässliches Zählen nicht mehr möglich ist. Definiert wird der Cut-Off als Korngröße bei der die Abweichung zwischen gezählten und gerechneten Teilchen (in mindestens 2 aufeinander folgenden Korngrößenklassen) 50% übersteigt.

Für Analysen $< 0,5$ mm werden nur mehr die gerechneten Werte herangezogen, da die Auszählung $< 250 \mu\text{m}$ nicht mehr vertrauenswürdig ist (Krische 2004) und sich auch in der rasch zunehmenden Abweichung darstellt. Während bei den errechneten Proben die jeweilige Teilchenanzahl unterhalb



des Cut-Offs weiterhin konstant steigt, kommt es bei allen ausgezählten Proben zu einer Ausflachung zu kleineren Korngrößen hin, da in diesen Klassen ein verlässliches Zählen der Teilchen nicht mehr möglich ist.

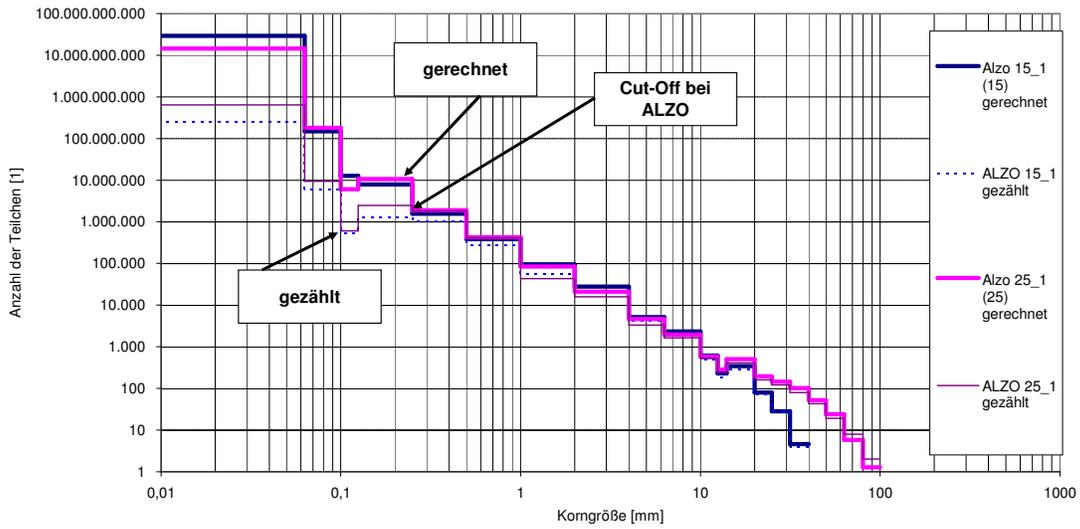


Abbildung 80. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off für ALZO Kalkstein

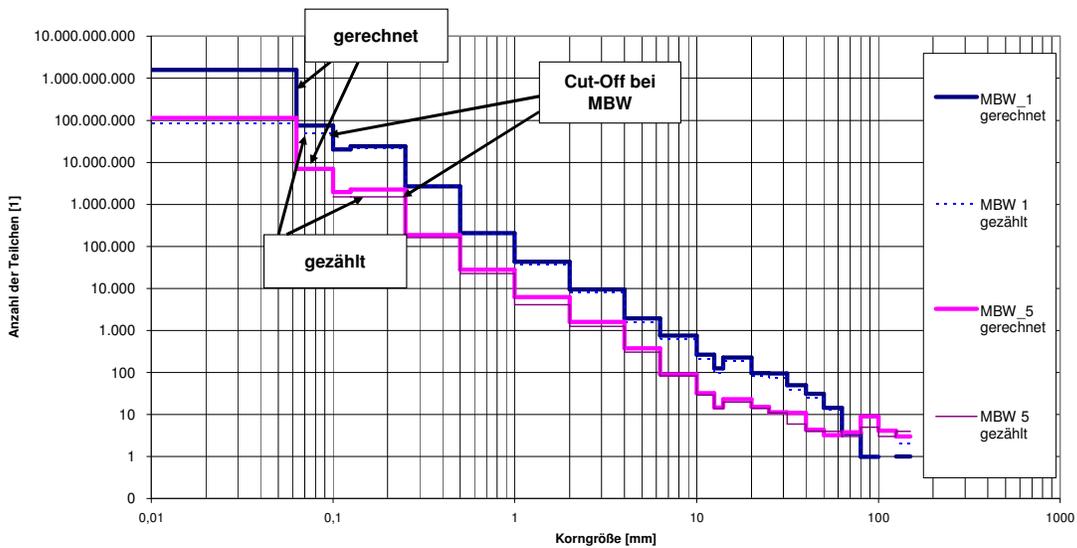


Abbildung 81. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off BBK Beton

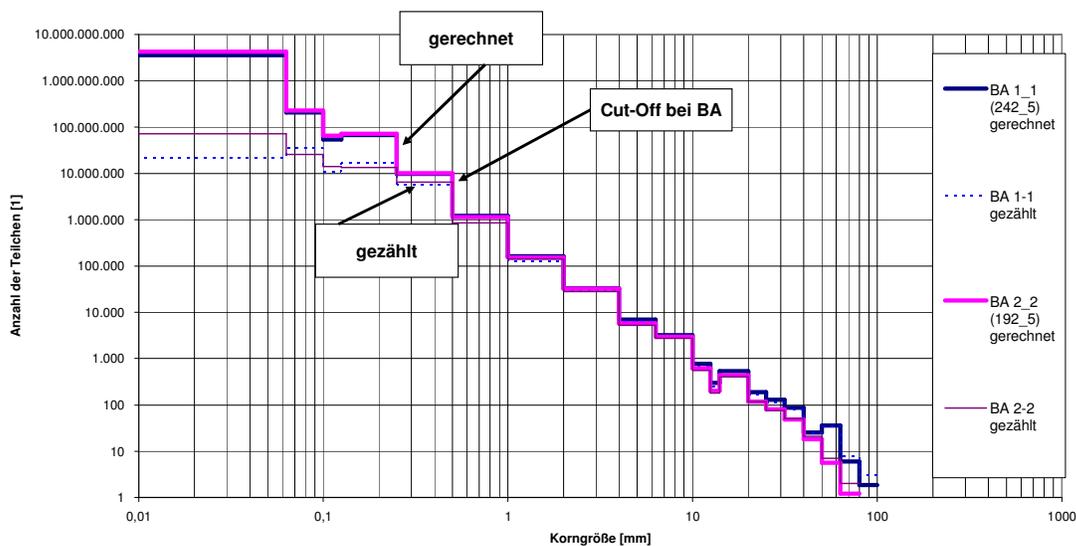


Abbildung 82. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off für Bärarp Gneis

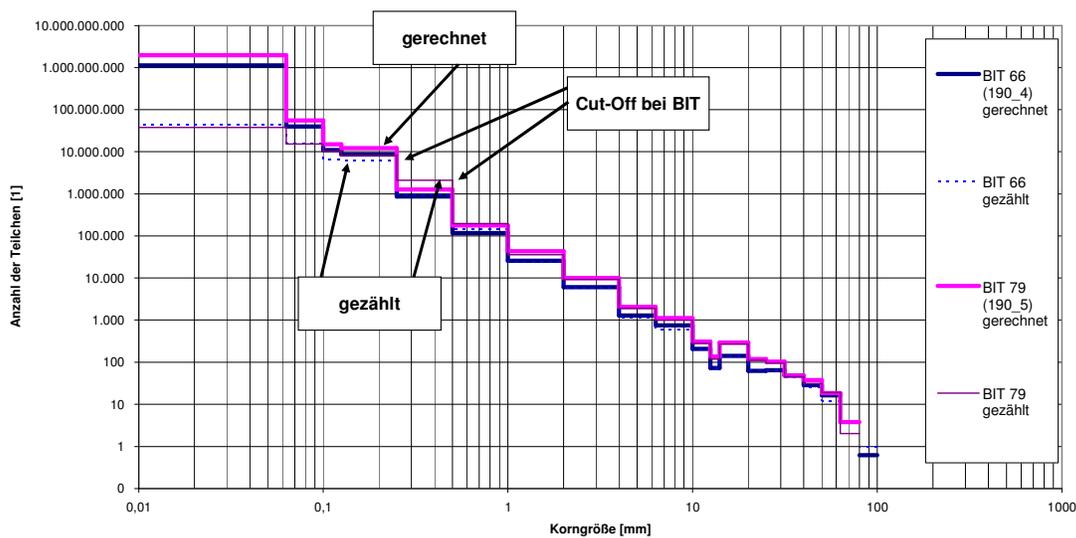


Abbildung 83. Vergleich von gerechneten und gezählten Teilchenanzahlen mit Cut-Off für Bitustein Amphibolit



9.2.4. Zusammenhang zwischen Partikelanzahlen und Siebkurven

Eine Verbindung zwischen den Teilchenanzahlen und der Durchgangskurve der NBC bzw. kann wie folgt hergestellt werden:

Betrachtet man die Korngröße k und die Klassenbreite Δk und angenommen es befinden sich ΔN Partikel in dieser Klasse, so kann das Volumen ΔV eines jeden Partikels berechnet werden:

$$\Delta V = \alpha \cdot k^3 \cdot \Delta N$$

Gleichung 23

wobei α einem Kornformfaktor entspricht. Wird das Volumen ΔV nun mit der Gesteinsdichte ρ multipliziert, erhält man die Masse des Teilchens ΔM und durch die Division durch die Gesamtmasse M_{tot} den klassenweisen Anteil im konventionellen Histogramm ($\Delta M / M_{tot}$, Abbildung 11).

Sei nun $N'(k) = \Delta N / \Delta k$, so ergibt sich

$$\frac{dV}{dk} \approx \frac{\Delta V}{\Delta k} = \frac{\Delta N}{\Delta k} \cdot \alpha \cdot k^3$$

Gleichung 24

Wobei dV/dk auch die konventionelle Dichtefunktion darstellt. Wird dV/dk mit der Dichte ρ multipliziert, so erhält man dM/dk und somit auch die Ableitung des Durchgangs:

$$D'(k) = \frac{1}{M_{tot}} \cdot \frac{dM}{dk} = \frac{1}{\rho \cdot M_{tot}} \cdot \frac{dV}{dk}$$

Gleichung 25



Für ΔN ergibt sich somit:

$$\Delta N(k) \approx N'(k) \cdot \Delta k = \frac{M_{tot}}{\alpha} \cdot \frac{D'(k)}{k^3} \cdot \Delta k$$

Gleichung 26

Mit den hier dargestellten Formeln (Gleichung 23 bis Gleichung 26) kann eine Siebkurve in eine Anzahl von Partikeln pro Korngrößenklasse transformiert bzw. auch eine Partikelanzahl in eine Siebkurve umgerechnet werden.

9.2.5. Teilchenzahlen und Korngrößenklassen

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert wurde, können die errechneten Teilchenanzahlen als repräsentativ für die tatsächlichen Teilchenzahlen angenommen werden. Um – wie auch bei der Beurteilung der NBC – Unregelmäßigkeiten, die durch zu enge Siebschritte zustande kommen, auszugleichen, wurde auch hier auf die DIN-Reihe der Siebschritte zurückgegriffen und gegebenenfalls Siebklassen zusammengefasst.

Aus verschiedenen Materialien (Bitustein-Amphibolit, ALZO-Kalk, Bärarp-Gneis, DMD-Dolomit, CP-Kalk, BR-Magnesit; BBK-Beton) von verschiedenen Proben (Modellsprengungen, Knäppersprengungen, Aufbereitungsversuche) wurde die jeweilige Partikel-Gesamtanzahl ermittelt (errechnet, mit der jeweiligen Materialdichte und einem Kugelfaktor von 100 %). Diese Gesamtanzahl je Probe vom selben Material wurden pro Klasse gemittelt und auf die Klasse 31,5/63 mit Eins normiert (Abbildung 84). Das heißt es wird die Teilchenanzahl jeder Klasse durch die Teilchenanzahl der Klasse 31,5/63 dividiert. Relativ betrachtet, befindet sich somit für jedes Gestein – unabhängig von der Gesamt-Probengröße – immer genau ein Teilchen in der Klasse 31,5/63.

Die verschiedenen Materialien stellen sich mit unterschiedlichen Linearitätsbereichen und deren Winkeln im Diagramm der Partikelanzahlen dar (Abbildung 84, Tabelle 20).



Linearitätsbereiche	BIT (Spreng proben)	ALZO	BA	DMD	CP	BR	MBW	BIT (alle Proben)
k1 max	63	16	31,5	31,5	8	8	31,5	63
k2 min	0,5	0,5	1	0,5	0,063	0,063	0,5	0,5
dazu y								
N1 max	0,19	1	1	1	33,0	34,4	1	0,19
N2 min	11.294	6.507	1.888	4.905	3.160.260	2.540.044	3.298	11.301
a-Werte	2,3	2,5	2,2	2,1	2,4	2,3	2,0	2,3
α (Winkel)	-66,2	-68,5	-65,4	-64,0	-67,1	-66,6	-62,9	-66,2

Tabelle 20. Linearitätsbereiche mit k , N und dazugehörigen Steigungswerten (a -Werte)

Der Abfall der Linearität $> 31,5$ mm ist vermutlich durch die limitierte Probengröße der Laborsprengproben gegeben. Wegen der Ergebnisse von Knäppersprengungen und Großsprengungen für Bitustein-Amphibolit kann hier der Linearitätsbereich bis 63 mm – eventuell sogar bis 250 mm – ausgeweitet werden (Detailbild, rechts oben in Abbildung 84).

Die nachgezeichneten Geraden der linearen Bereiche sind lediglich zu Illustrationszwecken – um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten – entlang der N (y) -Achse verschoben worden (Abbildung 84).

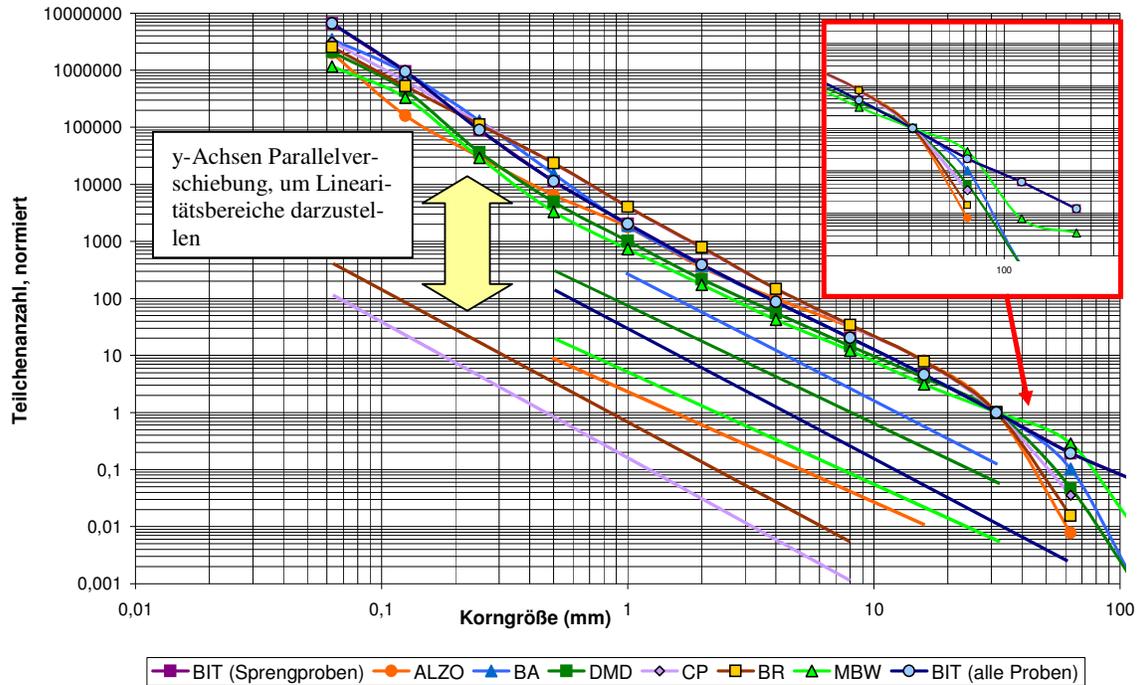


Abbildung 84. Linearitätsbereiche der verschiedenen Gesteine (In diesem Diagramm werden die Teilchen pro Klasse dargestellt normiert auf 1 Teilchen in der Klasse 31,5 mm - 63 mm. Verbindungslinien zwischen den im Diagramm dargestellten Punkten dienen nur dazu, die Teilchenzahl der einzelnen Korngrößenklassen besser zum Ausdruck zu bringen)

Die Abbildung 84 zielt darauf ab darzustellen, dass im Korngrößenbereich 0,5 mm bis rund 30 mm (abhängig vom Gestein, gültiger Korngrößenbereich siehe Tabelle 20 und Abbildung 84) die Zahl der Partikel je Klasse als Annäherung einer exponentiellen Funktion folgender Form

$$\Delta N(k) = c' \cdot k^{-(a+1)} \cdot \Delta k$$

Gleichung 27

gehört. Wobei N.....Anzahl der Teilchen, c'.... eine Konstante, k die Korngröße und a der Exponent ist.



Durch eine Integration erhält man die Summe der Partikel:

$$N(k) = c \cdot k^{-a}$$

Gleichung 28

wobei c einer Konstante entspricht.

Wird dieser Zusammenhang logarithmiert, so kann daraus a berechnet werden.

$$\log N(k) = c - a \cdot \log k$$

Gleichung 29

Über einer bestimmten materialabhängigen Korngröße nimmt die Zahl der Partikel im Vergleich zu den kleinen Kornklassen dramatisch ab und gehorcht nicht mehr einer exponentiellen Verteilung. Dieser Punkt kann als Ende der NBC hin zu größeren Korngrößen gesehen und möglicherweise durch den Rand bzw. Größeneinfluss erklärt werden.

$$M(k) = N(k) \cdot \alpha \cdot \rho \cdot k^3$$

Gleichung 30

Wobei M....die Masse pro Korngrößenklasse, N....Anzahl der Teilchen pro Klasse, α eine Formfaktor, k die Korngröße und ρ die Dichte ist. Setzt man nun Gleichung 27 in Gleichung 30 ein, so erhält man:

$$D(k) = M(k) / M_{tot} = c \cdot k^{-a} \cdot \alpha \cdot \rho \cdot k^3 / M_{tot}$$

Gleichung 31

Ist $a > 3$, so kommt es zu einem dramatischen Abfall von Partikeln pro Klasse bei einer gleichzeitigen Massenzunahme in der jeweiligen Klasse.

Wichtiger Hinweis: Die oben dargestellten Zusammenhänge (Gleichung 27 bis Gleichung 31) haben nur einen eingeschränkten für jedes Gestein unterschiedlichen Gültigkeitsbereich! Der Gültigkeitsbereich der verschiedenen Gesteine ist in Tabelle 20 und Abbildung 84 dargestellt. Die Exponentialfunktion ist nur eine Näherung, geringe Änderungen in der Exponentialfunktion haben eine große Auswirkung auf die Durchgangskurven.



9.3. Aufbau der Körner in einem Zerkleinerungsprodukt

9.3.1. Ergebnisse der Auszählungen von Streupräparaten

Die einzelnen Proben wurden mikroskopisch untersucht und die einzelnen Kornarten ausgewiesen und ausgezählt. Kornarten sind Aggregate oder Einzelkörner, wobei die Aggregate in Untertypen unterteilt wurden, zum Beispiel: Aggregate mit mehr als 7 Körnern, Aggregate mit 3–7 Körnern und Aggregate mit genau 2 Körnern (Tabelle 21).

Beim Auszählen wurden immer mindestens 100 aber auch bis zu 330 Partikel ausgezählt. Bei den Fraktionen $< 63 \mu\text{m}$ (bei ALZO $< 125 \mu\text{m}$) war das Auszählen nicht möglich; so wurden die %-Anteile anhand von Vergleichstabellen abgeschätzt.

Die einzelnen Partikelgruppen wurden in Diagramme gezeichnet und sind in den Abbildung 85 bis Abbildung 89 dargestellt. Abhängig vom Material zeigt sich ein deutlicher Anstieg von Einzelkörnern in einer bestimmten Fraktion.

In der Abbildung 85 ist der Bärarp Gneis dargestellt. Hier zeigt sich, dass der Anteil der Mineral-Einzelkörner zwischen der Korngrößenklasse $500/1000 \mu\text{m}$ und $1000/2000 \mu\text{m}$ von 61 % auf 13 % abnimmt während in denselben Korngrößenklassen die Anteile der Aggregate zunehmen.

Ebenso deutlich ist dasselbe ist für ALZO Kalkstein (Abbildung 87) und im SST Sandstein (Abbildung 88) bei jeweils anderen Korngrößen zu beobachten.

Da es im BBK Beton (Abbildung 86) und im Bitustein Amphibolit (Abbildung 89) eine gleichmäßige Aufteilung von Matrix und Mineralkörnern gibt, ist das oben Beobachtete auf die Summe von Matrix und Mineralkörnern zu beziehen.



BA 9	Einzelkorn Mineral	Einzelkorn Matrix	Kornaggregat von 2 Körnern	Kornaggregat von 3- 7 Körner	Kornaggregat von 8-10 Körner	Kornaggregat von > 10 Körner
1000 - 2000 µm	13	0		10	41	36
500 - 1000 µm	61	1		30	8	0
250 - 500 µm	77	9	10	4		0
125 - 250 µm	86	8	6	0	0	0
100 - 125 µm	88	10	2	0	0	0
63 - 100 µm	90	9	1	0	0	0
< 63 µm	75	25	0	0	0	0
MBW 5	Einzelkorn Mineral	Einzelkorn Matrix	Kornaggregat von 2 Körnern	Kornaggregat von 3- 7 Körner	Kornaggregat von 8-15 Körner	Kornaggregat von 16-30 Körner
1000 - 2000 µm	0,4		0	0	0,4	99,2
500 - 1000 µm	5	12		62	21	0
250 - 500 µm	24	13	21	17	25	0
125 - 250 µm	58	18	20	4	0	0
100 - 125 µm	40	43	17	0	0	0
63 - 100 µm	34	63	3	0	0	0
< 63 µm	30	70	0	0	0	0
ALZO 25 - 1	Einzelkorn Mineral	Einzelkorn Matrix			Kornaggregat von kleinen Kalzitkristallen	Kornaggregat von großen Kalzitkristallen
1000 - 2000 µm	0				0	100
500 - 1000 µm	0				81	19
250 - 500 µm	10				70	20
125 - 250 µm	28				62	10
100 - 125 µm	70				10	20
63 - 100 µm	90				10	0
< 63 µm	95				5	0
BIT 3	Einzelkorn Mineral (Quarz)	Einzelkorn Matrix (Amphibol)	Kornaggregat von 2 Körnern	Kornaggregat von 3- 7 Körner	Kornaggregat von 8-15 Körner	Kornaggregat von 16-50 Körner
1000 - 2000 µm	0	0	0	0	0	100
500 - 1000 µm	4	7	0	34	32	23
250 - 500 µm	12	29	19	32	8	0
125 - 250 µm	34	47	11	8	0	0
100 - 125 µm	34	54	9	3	0	0
63 - 100 µm	34	63	3	0	0	0
< 63 µm	45	50	4	1	0	0
SST Cyl 20-1	Einzelkorn Mineral (Quarz)	Einzelkorn Matrix (Glimmer)	Kornaggregat von 2 Körnern	Kornaggregat von 3- 7 Körner	Kornaggregat von 8-15 Körner	Kornaggregat von 16-30 Körner
1000 - 2000 µm	0	0	0	0	0	100
500 - 1000 µm	18	0	10	53	19	0
250 - 500 µm	64	0	2	34	0	0
125 - 250 µm	91	0	9	0	0	0
100 - 125 µm	88	10	2	0	0	0
63 - 100 µm	92	8	0	0	0	0
< 63 µm	95	5	0	0	0	0

Tabelle 21. Ergebnisse der Dünnschliffauszählungen (Angaben in %).

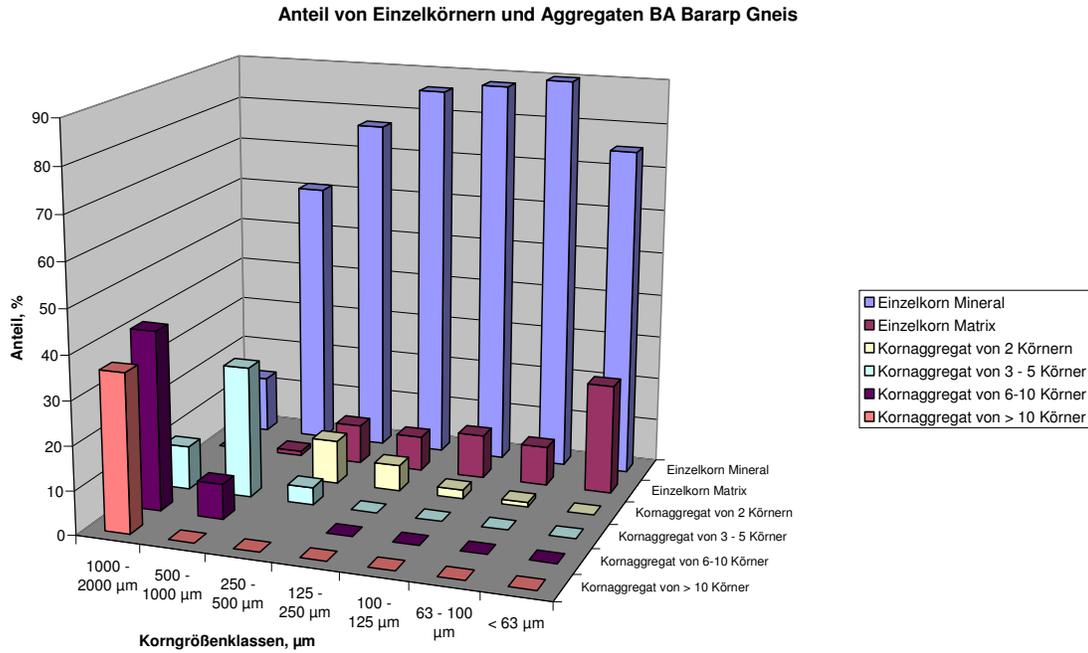


Abbildung 85. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im Bärarp Gneis

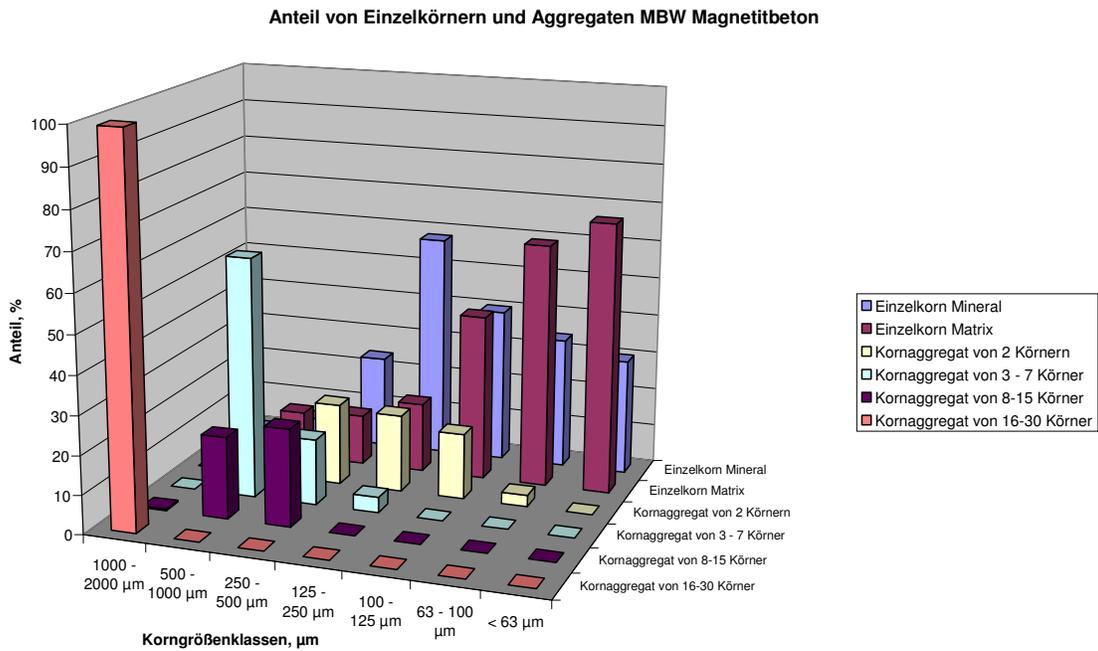


Abbildung 86. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im BBK Beton



Anteil von Einzelkörnern und Aggregaten ALZO Kalk

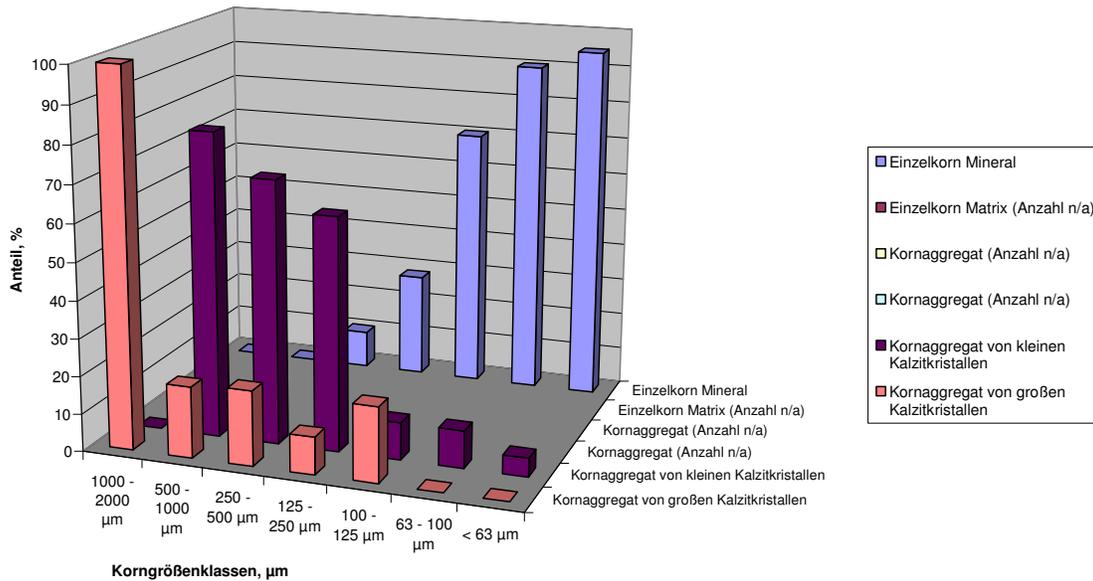


Abbildung 87. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im ALZO Kalkstein

Anteil von Einzelkörnern und Aggregaten SST Sandstein

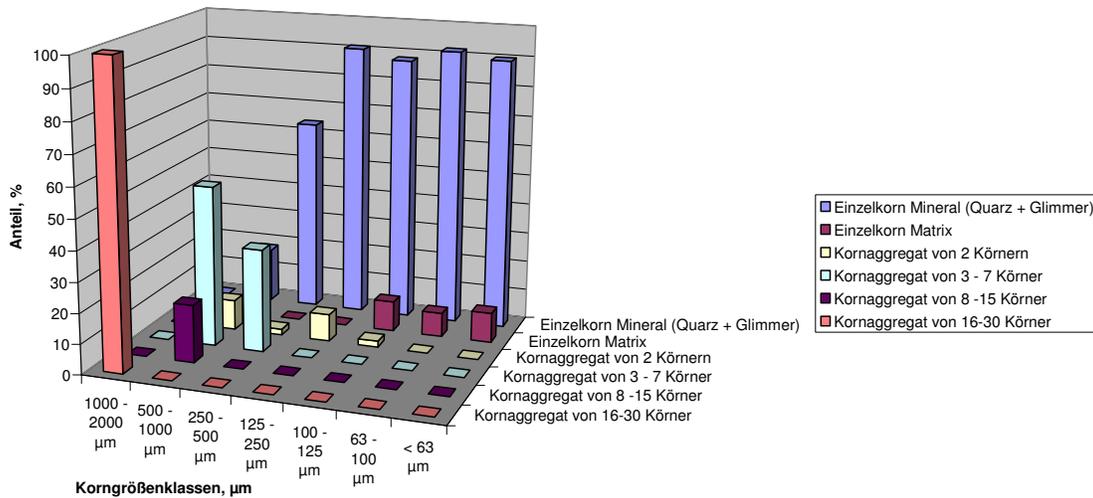


Abbildung 88. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im SST Sandstein

Anteil von Einzelkörnern und Aggregaten BIT Amphibolit

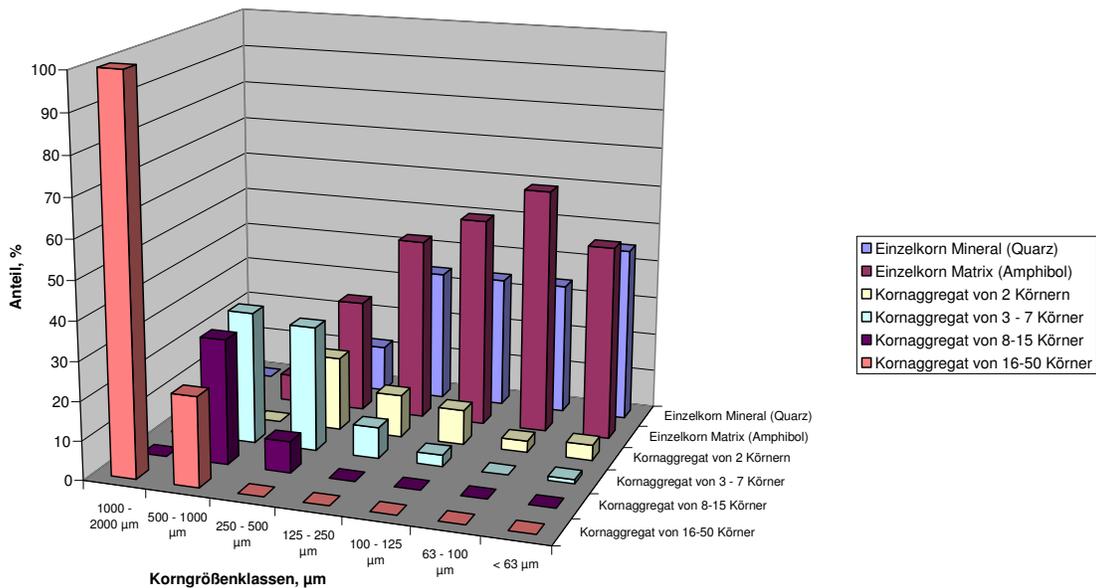


Abbildung 89. Darstellung der Partikelverteilungen in den einzelnen Korngrößenklassen im Bitustein Amphibolit

9.3.2. Auswertung der Auszählungen

In den Abbildung 90 bis Abbildung 94 sind die Verläufe der Partikelverteilungen abhängig von der Korngröße im logarithmischen Maßstab dargestellt. Auch die Summenkurven (Summe aus Einzelkörnern und Summe aus Aggregaten) sind in Abbildung 90 bis Abbildung 94 zu sehen.

Bei der Beurteilung von Einzelkörnern zeigt sich bei allen Materialien (außer ALZO), dass die Einzelkörner, bestehend aus Einzelmineralien, auf die Matrix-Einzelkörner zulaufen. Bei der BBK-Probe überschneiden sie sich, während sie sich bei den Bitustein- und Bärarp-Proben stark annähern, beim SST dagegen nur noch ein Trend erkennbar ist. Beim ALZO-Kalk konnte nicht zwischen Mineralien und Matrix unterschieden werden.

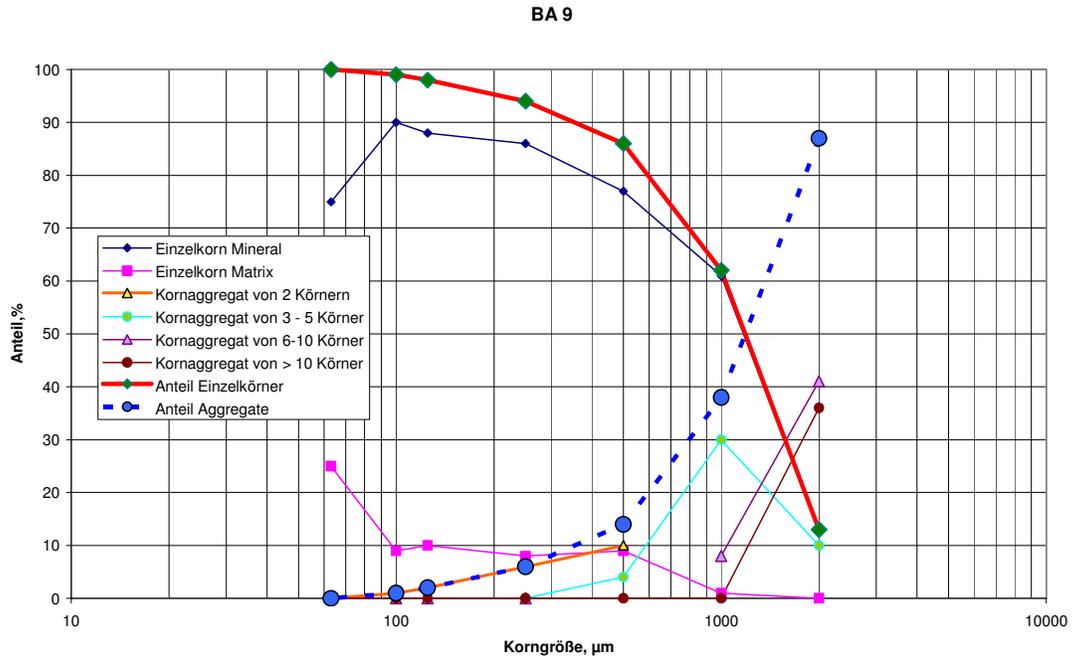


Abbildung 90. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im Bärarp Gneis.

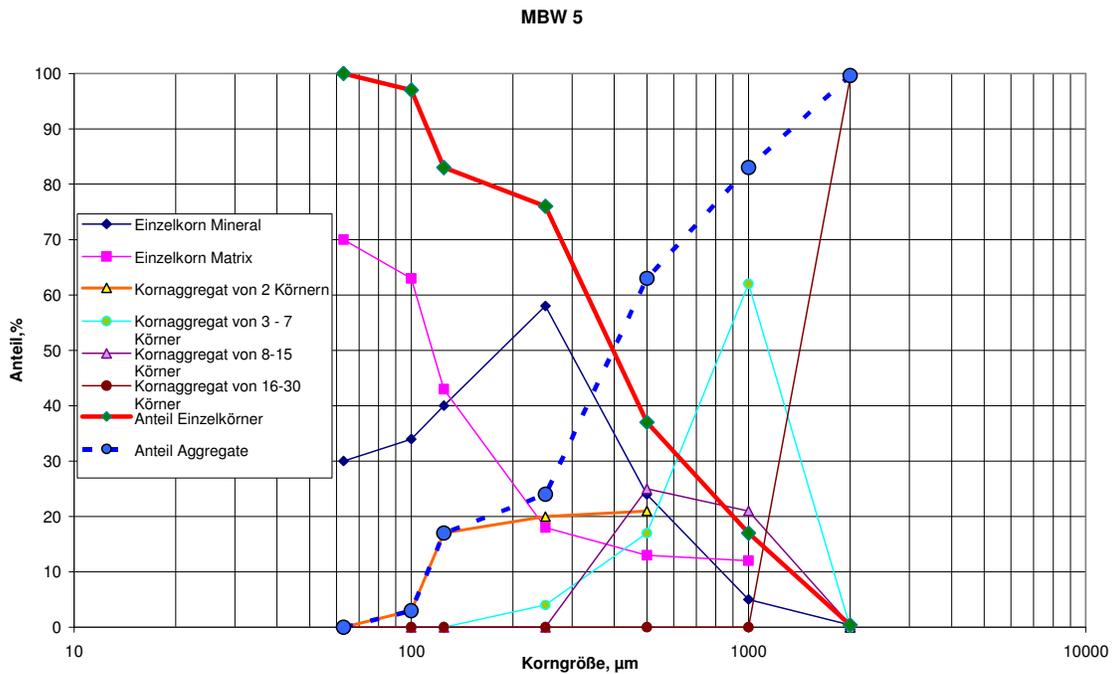


Abbildung 91. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im BBK Beton.

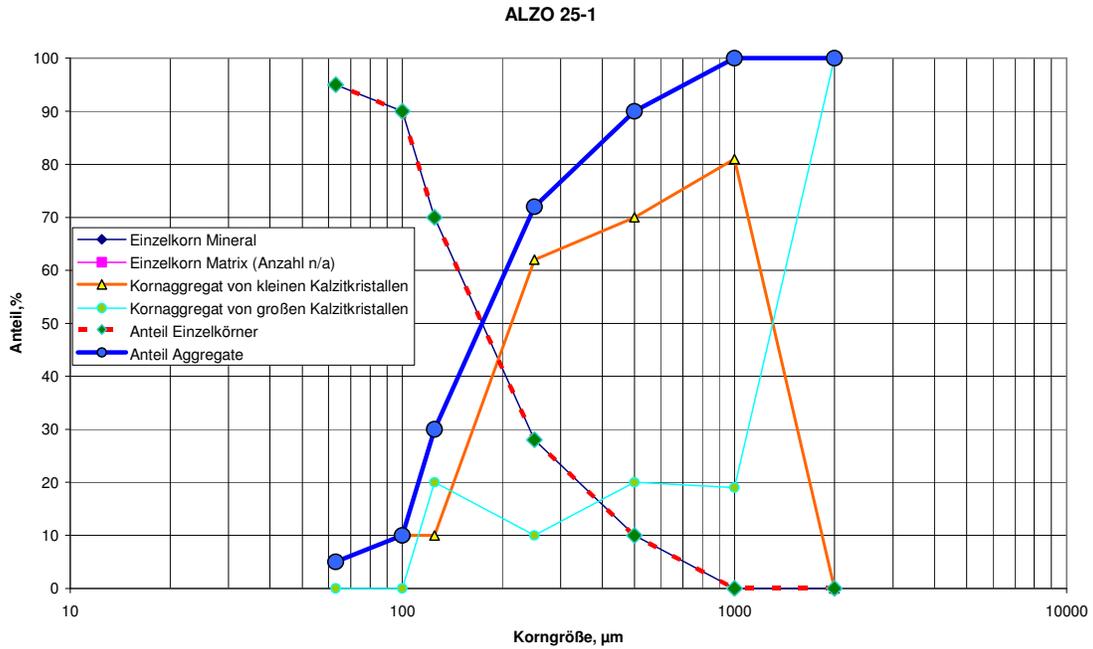


Abbildung 92. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im ALZO Kalkstein.

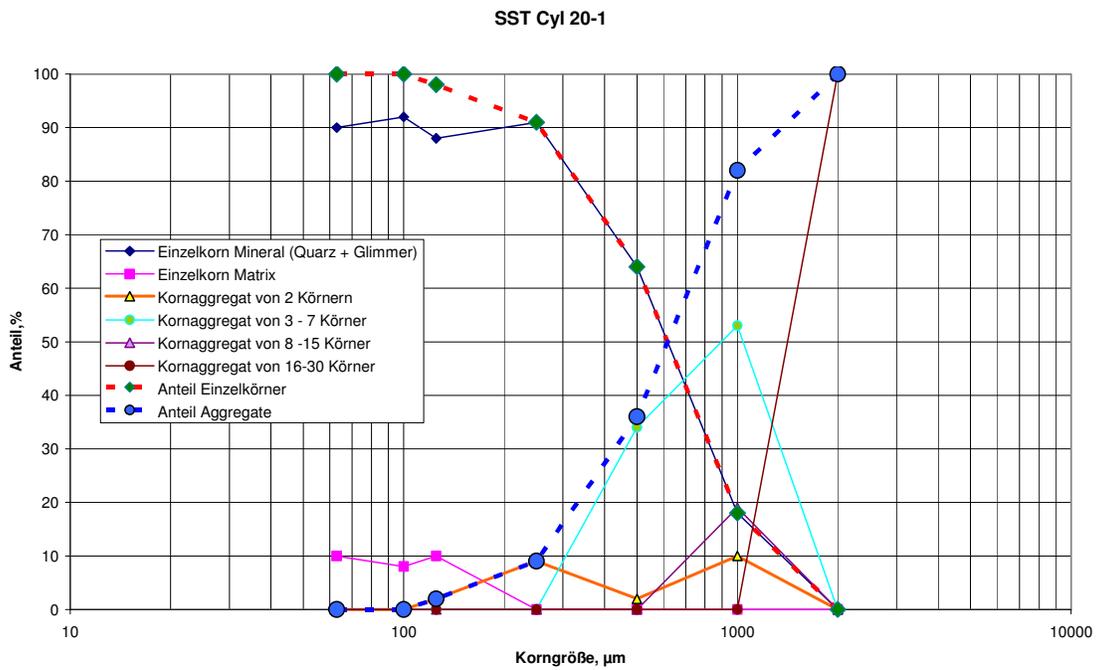


Abbildung 93. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im SST Sandstein.

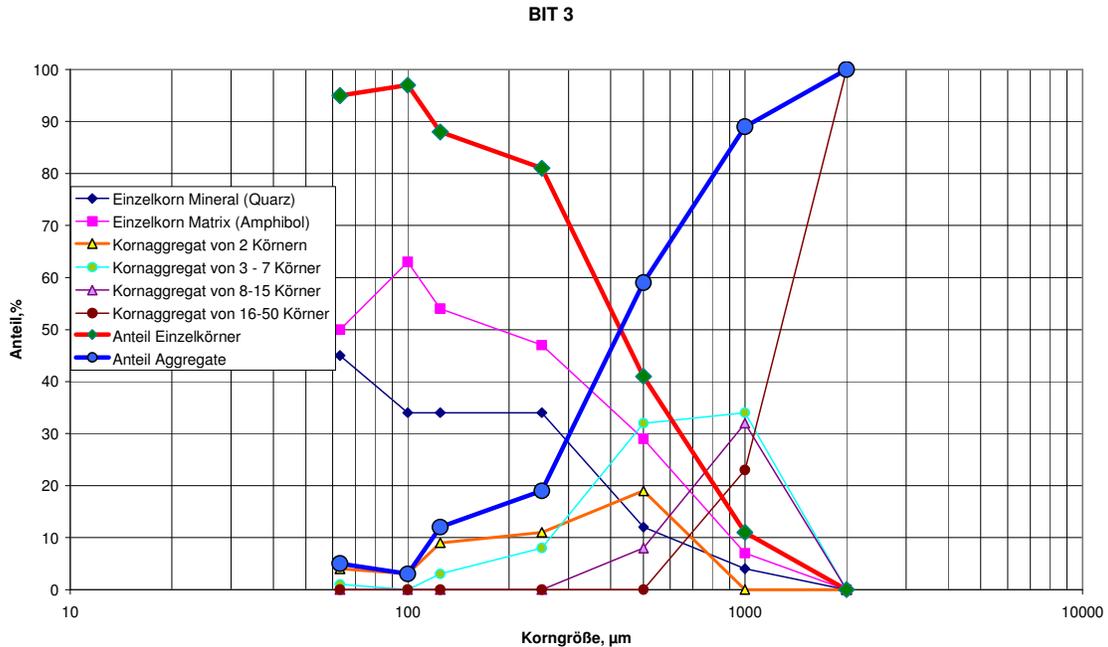


Abbildung 94. Darstellung der Verläufe der einzelnen Partikeltypen in den einzelnen Klassen im Bitstein Amphibolit.

Die Aggregate von mehr als 15 Teilchen sind fast ausschließlich in den 1000–2000 μm -Fraktionen zu finden, laufen gegen Null und werden durch Fraktionen mit geringeren Partikelanzahlen pro Aggregat ersetzt.

Körner, die im Mikroskop als Einzelkörner erkannt werden, können sowohl ganze Einzelkörner als auch Bruchstücke von Einzelkörnern sein, denn auch Bruchteile von Körnern können nur als Einzelkörner identifiziert werden. (weggebrochene Teile können nicht mehr als zu einem anderen Korn gehörend ausgewiesen werden).

Beim Beton, bei dem die Komponenten klar definiert sind, ist klar zu erkennen, dass ab einer Korngröße von $< 250 \mu\text{m}$ die Anzahl der Quarz-Einzelkörner stark abnimmt (Abbildung 91). Der Grund dafür ist die Zusammensetzung des Quarzsandes, der eine Korngrößenverteilung zwischen 0,1 mm und 0,3 mm (selten 0,5 mm) hat. Das heißt, dass um Einzelkörner kleiner Größe zu erzeugen, die Quarzkörner gebrochen werden müssen. Dazu ist jedoch viel Energie notwendig. Daher ist es einfacher, Matrix zu zerbrechen. Eine starke Zunahme der Matrix-Einzelkörner ist ab einer Korngröße $< 250 \mu\text{m}$ deutlich erkennbar. Das Minimum der Lokalen Neigungen für Magnetitbeton liegt an der Obergrenze der Korngrößenverteilung des Quarzsandes, das heißt in etwa beim Doppelten der mittleren Korngröße und beim Fünffachen der Minimalkorngröße.



Aus der Summenkurve von Einzelkörnern wurde der Schnittpunkt mit der 50 %-Linie mittels Geradengleichung ermittelt. Dieser Schnittpunkt ergibt eine bestimmte Korngröße und stellt eine Zusammensetzung der Partikelverteilung von 50 % Einzelkörnern und 50 % Aggregaten dar. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 95 dargestellt.

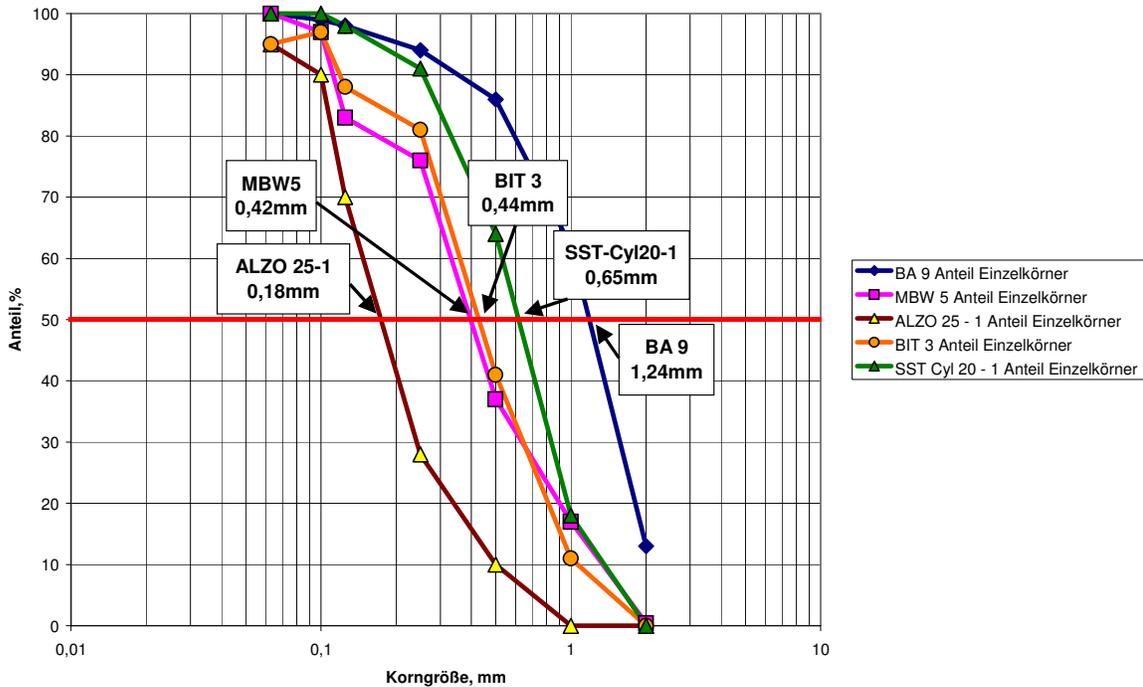


Abbildung 95. Berechnung der 50%-Anteile aus der Summe der Einzelkörner

Zu den in den Dünnschliffen untersuchten Proben (ALZO 25-1, MBW 5, BIT 3, SST Cyl 20-1, BA 9) wurden die Minima aus den Verläufen der Lokalen Neigungen ermittelt. Bei nicht exakt definierten Minima (BIT 3 und SST Cyl 20-1) wurde zwischen 2 Siebschritten gemittelt (Abbildung 96, Tabelle 22).



Probe	Minimum aus Schlifflen (Aggregat & Einzelkörner) (berechnet)	Minimum aus GGS Netz:	Bemerkungen
BA 9	1,24	1,00	
MBW 5	0,42	0,50	
ALZO 25 - 1	0,18	0,125	
BIT 3	0,44	0,38	Da die Werte der lokalen Neigungen für BIT Amphibolit bei 0,25 und 0,5 mm etwa gleich groß sind wurde der Mittelwert (0,25 und 0,5) angenommen
SST Cyl 20 - 1	0,65	0,75	Da die Werte der lokalen Neigungen für SST Sandstein bei 0,5 und 1 mm etwa gleich groß sind wurde der Mittelwert (0,5 und 1) angenommen

Tabelle 22. Berechnetes 50 %-Einzelkörner-Minimum und Lokale Minima aus den GGS-Plots der untersuchten Proben

Die so erhaltenen Minima wurden gegeneinander aufgetragen und korreliert (Abbildung 97). Es ergibt sich eine sehr gute Korrelation (89,6 %) zwischen den Minima aus den Lokalen Neigungen und den 50 % Einzelkornanteilen aus den Schliffluntersuchungen.

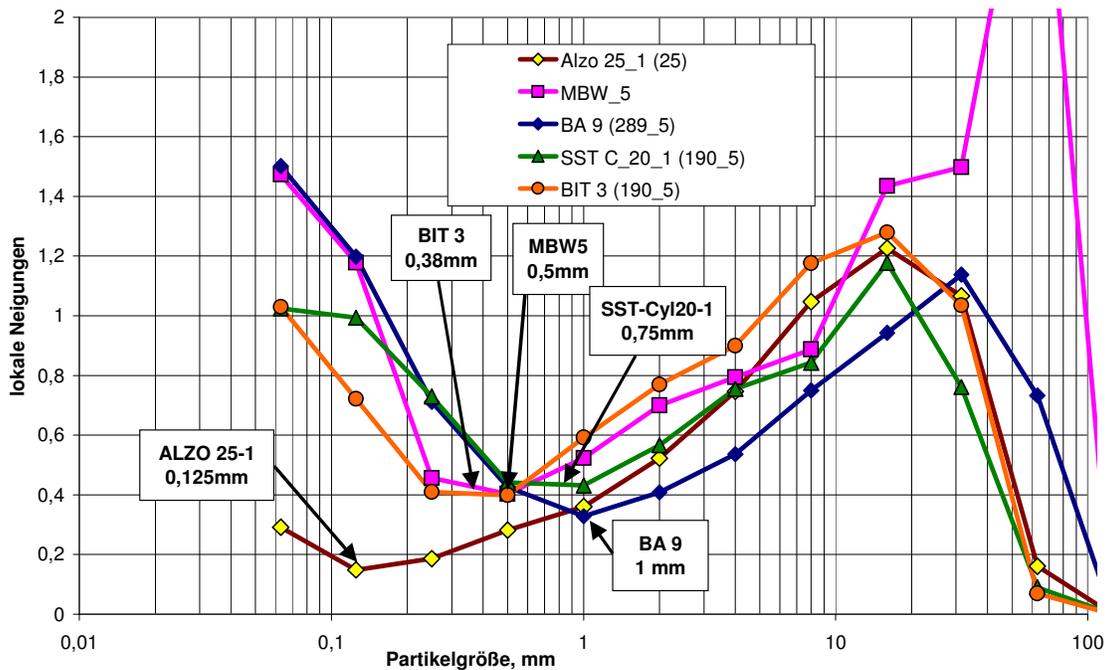


Abbildung 96. Darstellung der Lokalen Neigungen und der Lokalen Minima aus den Siebergebnissen



Die Lokalen Minima aus den Verteilungen der Lokalen Neigungen korrelieren mit 87 % (R^2) mit den Korngrößen, bei denen aus den Schlifffanalysen 50 % Einzelkornanteile vorhanden sind (Abbildung 97).

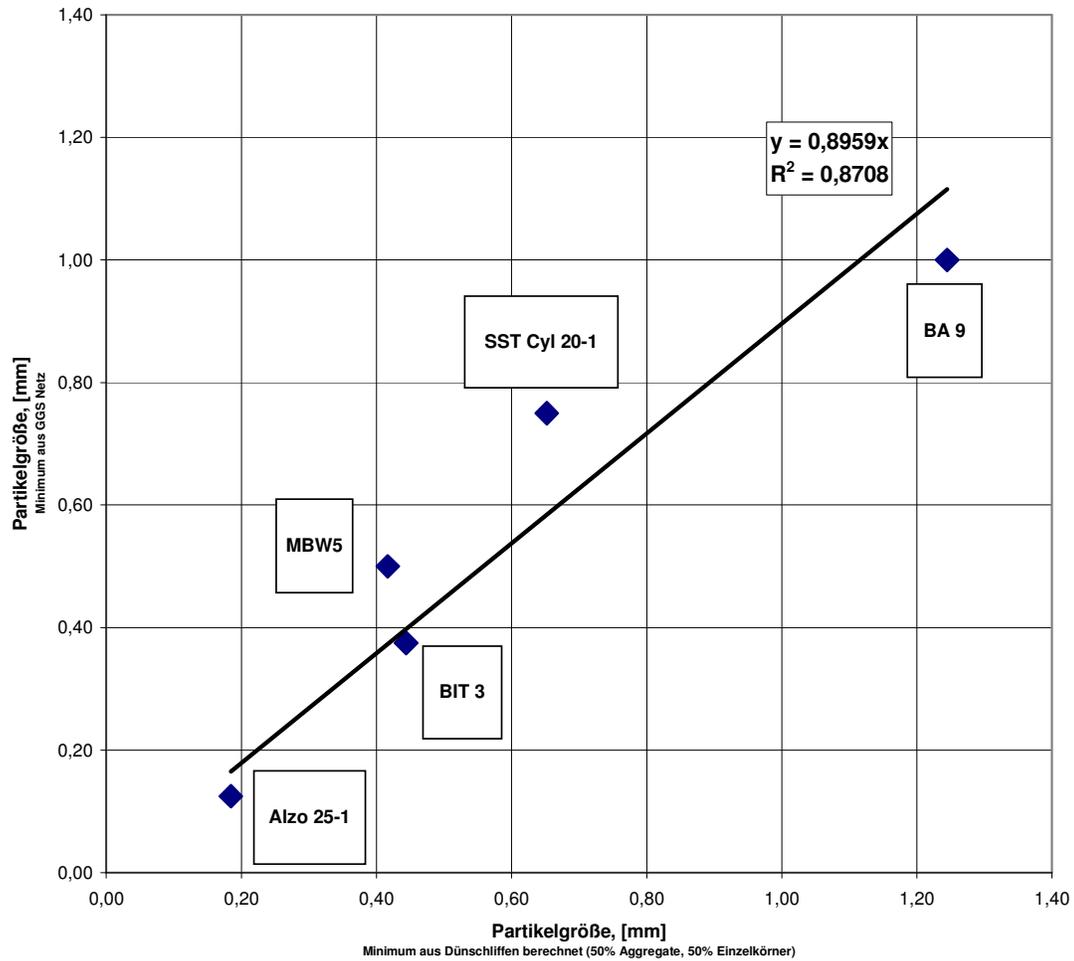


Abbildung 97. Korrelation zwischen Minima aus GGS-Netz und 50 % Einzelkörnern



9.3.3. Kombination von absoluten Teilchenzahlen mit deren Zusammensetzung

Im folgenden Abschnitt wurden die absoluten, (nach Gleichung 17 bis Gleichung 21) berechneten Teilchenanzahlen der Proben BA 9, BIT 3, ALZO 25-1, SST CYL 20-1 und MBW 5 in ihre Komponenten aufgeteilt. Die Komponenten wurden durch die Auszählung der Streupräparate (Kapitel 4.6) ermittelt. Es konnte ein %-Anteil an Einzelkörnern, 3 bis 7 Aggregaten und > 7 Aggregaten in den verschiedenen Korngrößenklassen angegeben werden. Dieser Anteil wurde nun auf die Gesamtpartikelanzahl umgelegt (Abbildung 98 bis Abbildung 102).

Wird nun der Schnittpunkt der „> 7 Körner pro Aggregat“-Kurve mit der Summenkurve aus Einzelkörnern plus „2–7 Aggregate“ ermittelt, so erhält man das jeweilige materialspezifische Minimum. Die dadurch erhaltenen Minima entsprechen in etwa denen aus den Lokalen Neigungen und denen aus dem Verschnitt der Einzelkörner mit der 50 %-Linie (Tabelle 23).

Bei der Analyse der Streupräparate war die größte untersuchte Korngrößenklasse 1–2 mm. Da beim Bärarp Gneis in dieser Klasse noch 13 % Einzelkörner zu finden waren, konnte die Klasse, in der es keine Einzelkörner beim Gneis mehr gibt, nicht bestimmt werden. Weiters wurde bei Gneis die willkürliche Grenze nicht bei 7 Körnern pro Aggregat sondern bei 5 Körnern pro Aggregat festgelegt. Deshalb ist auch beim Bärarp Gneis das Minimum aus den absoluten Anzahlen der Teilchen und deren Zusammensetzung zu kleineren Korngrößen hin verschoben und sollte daher bei weiteren Untersuchungen und Analysen ausgeklammert werden.

Probe	Minimum aus Schliffen (Aggregate & Einzelkörner) (berechnet)	Minimum aus GGS Netz:	Minimum aus der Schnittpunkt Einzelkörner mit Aggregaten
BA 9	1,24	1,00	(0,80)
MBW 5	0,42	0,50	0,55
ALZO 25 - 1	0,18	0,125	0,098
BIT 3	0,44	0,38	0,45
SST Cyl 20 - 1	0,65	0,75	0,50

Tabelle 23. Berechnetes 50 %-Einzelkörner-Minimum und Lokale Minima aus den GGS-Plots der untersuchten Proben und die Minima aus dem Kurven-Schnittpunkt „Einzelkörner plus 2–7 Aggregate“ mit „> 7 Aggregate“.

Hinweis: In Abbildung 98 bis Abbildung 102 werden die Teilchen pro Klasse dargestellt. Verbindungslinien zwischen den im Diagramm dargestellten Punkten dienen nur dazu, die Teilchenzahl der einzelnen Korngrößenklassen besser zum Ausdruck zu bringen)

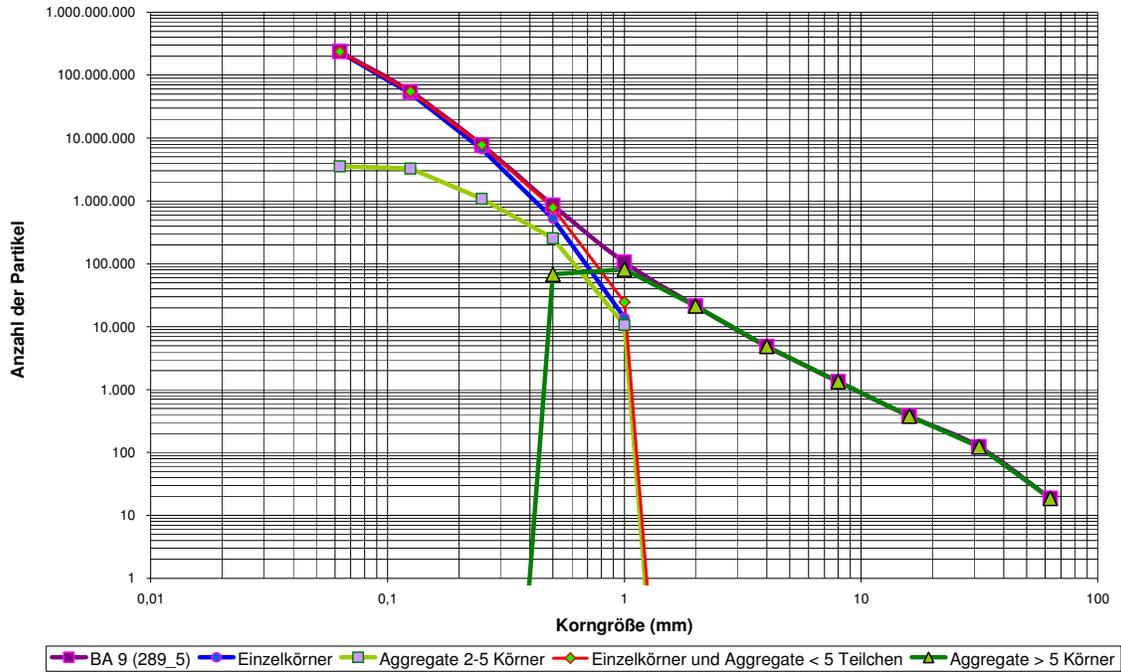


Abbildung 98. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für BA Gneis

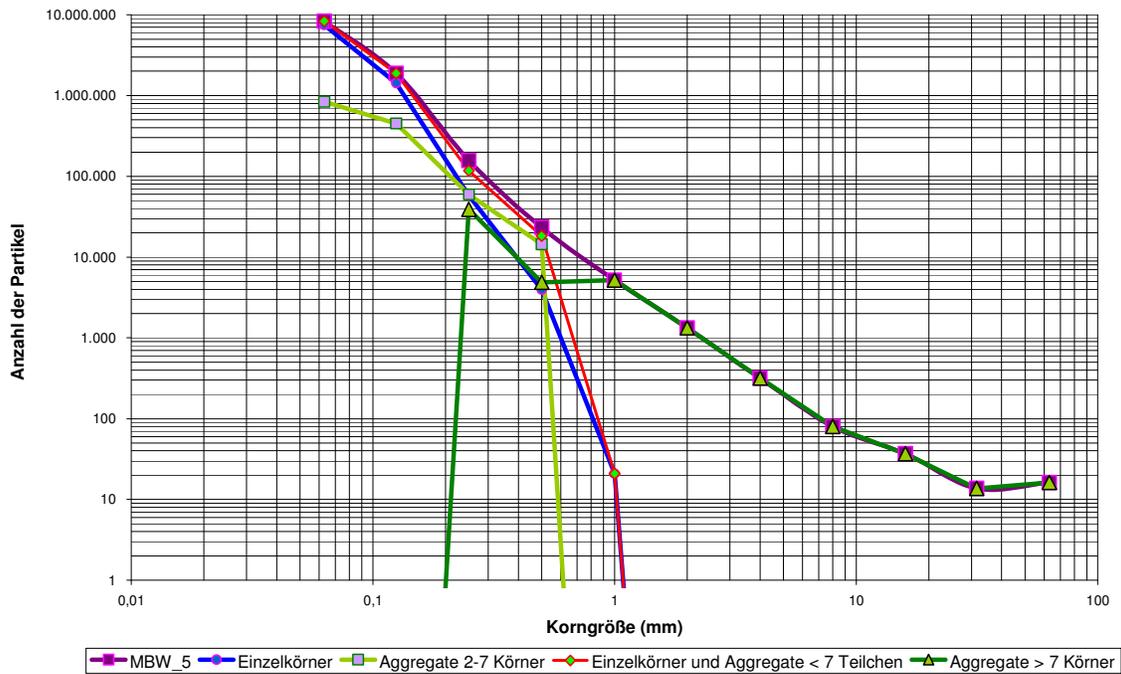


Abbildung 99. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für BBK Beton

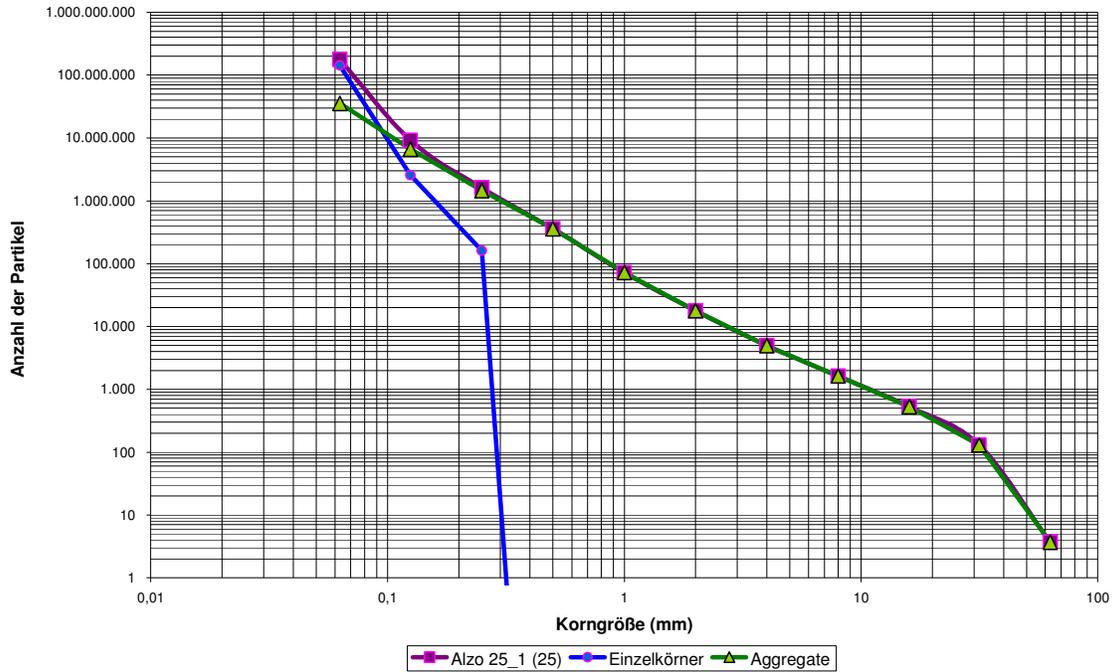


Abbildung 100. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für ALZO Kalkstein

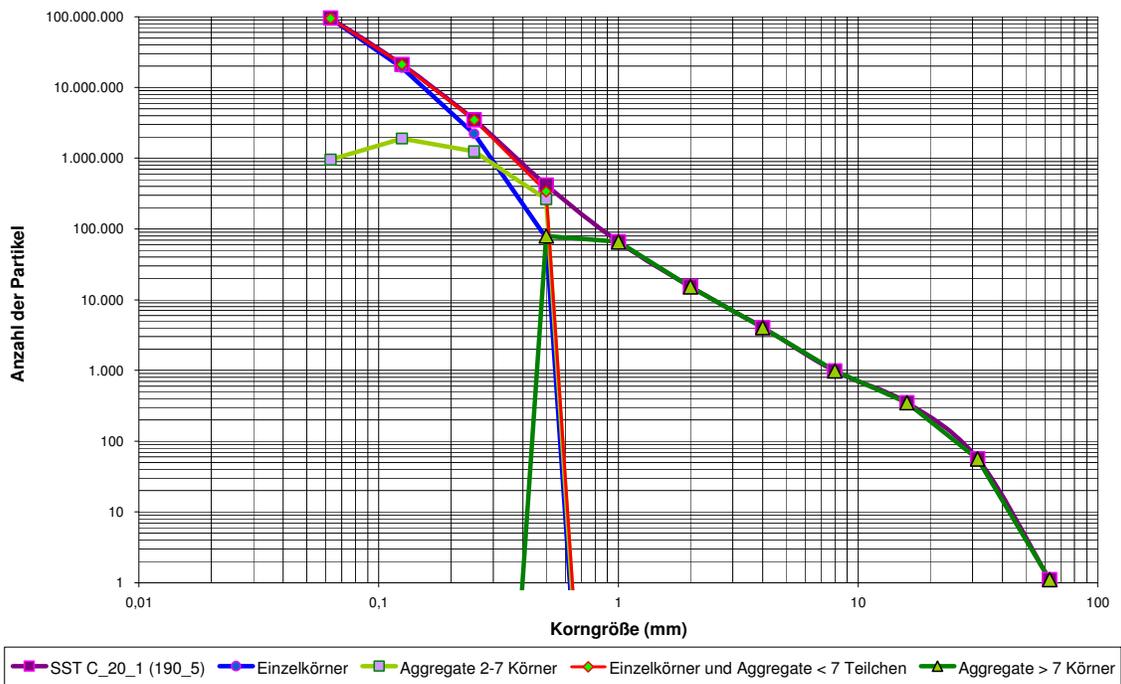


Abbildung 101. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für SST Sandstein

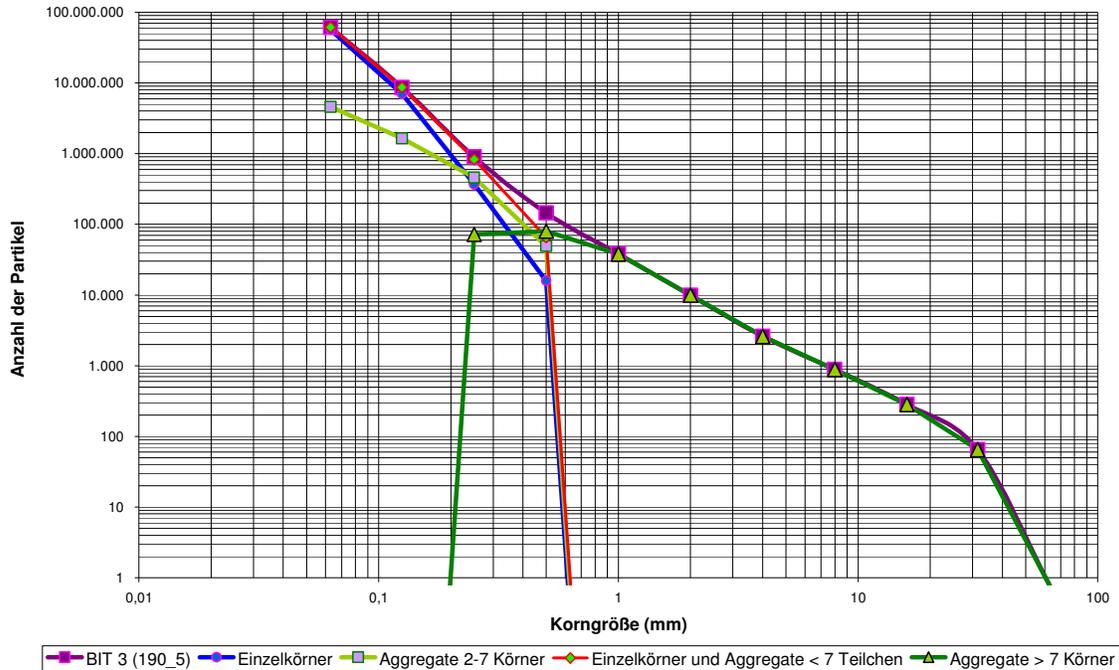


Abbildung 102. Kombinierte Kurven von absoluten Teilchenanzahlen und deren Zusammensetzung bezüglich Einzelkörnern und Aggregaten für Bitustein Amphibolit

Die physikalische Erklärung des Minimums aus dem Kurven-Schnittpunkt von „Einzelkörner“ plus „Aggregate mit maximal 7 Teilchen pro Aggregat“ mit „Aggregate > 7 Teilchen“ lässt sich wie folgt beschreiben: Sobald mit zunehmender Korngröße die Anzahl der Einzelkörner abnimmt, nimmt die Anzahl von Aggregaten zu. Beim Auszählen der Schliffe wurde 7 Teilchen (5 Teilchen beim Bärarp Gneis) pro Aggregat als willkürliche Grenze angenommen. Das Minimum könnte ebenso bei 5 oder 10 Teilchen anzusetzen sein. Durch diese willkürliche Grenze hat sich jedoch gezeigt, dass beim Schnittpunkt der absoluten Anzahl von Teilchen von Aggregaten „> 7 Teilchen pro Aggregat“ mit „< 7 Teilchen pro Aggregat“ sich ein materialspezifisches Minimum abbildet, das mit den vorher bestimmten Minima übereinstimmt. Dieses Minimum ließe sich auch als Schnittpunkt von Einzelkörnern mit > 7 Körnern pro Aggregat abbilden, allerdings ist es dann bei allen Gesteinen zu kleineren Korngrößen hin verschoben (Abbildung 98 bis Abbildung 102).



10. In situ Mineralkörnergrößenverteilungen

10.1. Allgemeines

Um Zusammenhänge der Lokalen Minima und den Minima aus den Streupräparaten mit der In situ-Mineralkorngröße zu untersuchen, wurde die In situ-Korngröße – wie in Kapitel 4.6.4 erläutert – anhand von Dünnschliffen ermittelt. Die in diesem Abschnitt verwendeten Daten wurden im Zuge eines Forschungsprojektes zur Ermittlung der In situ KGV von *Popović (2004)* ermittelt.

Das Sehnenschnittverfahren nach Wimmenauer in der Mineralogie bzw. das Linienschnittverfahren in der Metallurgie nach ÖNORM EN 623-3 sind anerkannte Verfahren zur Ermittlung von In situ Korngrößenverteilungen. Die beiden (identen) Verfahren verwenden Schnittlängen in Dünnschliffen als Basis für eine Korngrößenverteilung.

Die zusammengefassten Ergebnisse der Auszählungen sind in Tabelle 6, die daraus ermittelten Summenkurven in Tabelle 24 und die Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 103 dargestellt. Die Darstellung der Häufigkeiten ist in diesem Falle eine zulässige Darstellung, da die gewählten Klassenbreiten im logarithmischen Maßstab konstant sind und somit der Anteil pro Klasse „relativ“ zueinander betrachtet unabhängig ist (Kapitel 4.5.1.1).

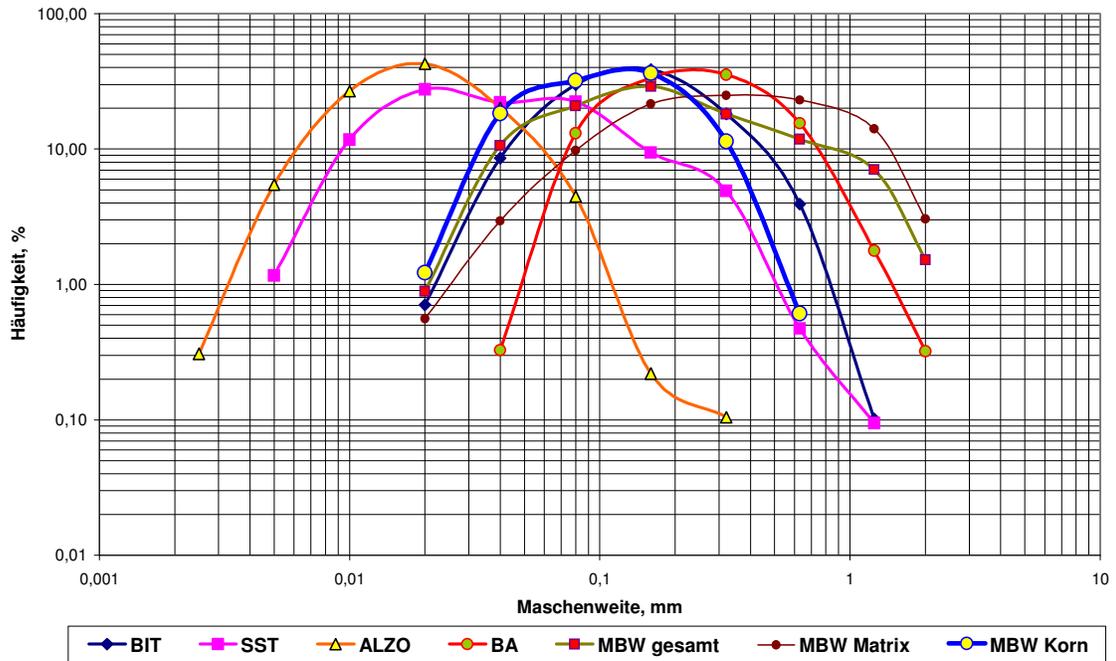


Abbildung 103. Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der In situ-Korngrößen verschiedener Gesteine.

	BIT	SST	ALZO	BA	MBW gesamt	MBW Matrix	MBW Korn
Maschenweite, mm	%	%	%	%	%	%	%
1,250 -2,000				100,00	100,00	100,00	
0,630 -1,250	100,00	100,00		99,68	98,85	96,96	
0,320 -0,630	99,90	99,91		97,90	93,53	82,83	100,00
0,160 -0,320	95,98	99,43	100,00	82,36	84,45	59,76	99,39
0,080 -0,160	77,79	94,52	99,90	46,92	67,95	34,83	87,98
0,040 -0,080	39,17	85,10	99,68	13,41	37,15	13,29	51,58
0,020 -0,040	9,28	62,66	95,20	0,33	13,52	3,51	19,58
0,010 -0,020	0,71	40,53	75,04		0,97	0,56	1,22
0,0050 -0,010		12,91	32,52				
0,0025 -0,0050		1,17	5,77				
0,00125 - 0,0025			0,31				
0,000 -0,00125							

Tabelle 24. Summenkurven der In situ-Korngrößenverteilungen der untersuchten Gesteine. (Basis für die Summenkurven sind Sebnenschnittlängen)

Die Summenkurven der In situ-Korngrößenverteilung sind in Abbildung 104 dargestellt. Sie zeigen in ihren jeweils feinsten Anteilen sehr große Neigungen (GGs-Exponenten).

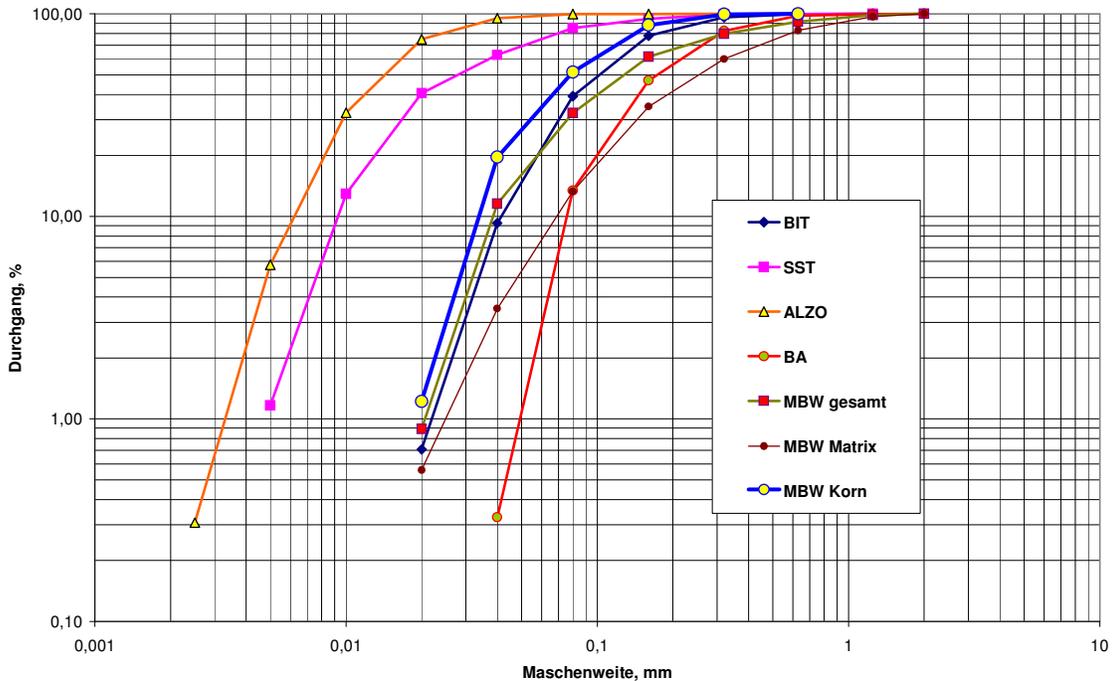


Abbildung 104. Summenkurven der In situ-Korngrößenverteilungen

Um den Grobbereich der In situ-Korngrößen besser darstellen zu können, wurden die Rückstandswerte (100 % minus Durchgang) berechnet und in einem log-log-Diagramm dargestellt. Die Korngrößen, bei denen der Rückstand gerade noch nicht Null ist (die letzte Siebmaschenweite, bevor der gesamte Rest durchfällt) wurde für jedes Gestein ermittelt und in Abbildung 105 eingetragen. Diese Werte werden im nächsten Abschnitt mit den aus der Analyse der Sieblinien abgeleiteten lokalen Minima verglichen.

Wichtig zu bemerken ist, dass bei der In situ-Korngrößenbestimmung beim Magnetitbeton zwischen Matrix und Quarzkörnern unterschieden wurde. Es konnten somit für den Beton zwei verschiedene Korngrößenverteilungskurven ermittelt werden. Aus diesen beiden Kurven wurde eine Durchschnittskurve aus dem gewichteten Mittel gebildet. Die Gewichtung wurde aus der Betonrezeptur abgeleitet. Demnach besteht der Beton aus 38 % Matrixkomponenten (Zement und Fe-Pigment, Wasser wurde vernachlässigt) und 62 % Quarzkörnern.

Für alle weiteren Betrachtungen bezüglich der Minima wurden nur die In situ-Kurven der Quarzkörner verwendet, da die Matrix ein unterschiedliches Zerkleinerungsverhalten aufweist.

Die Korngrößen, bei denen der Rückstand gerade noch nicht Null ist, stellen physikalisch gesehen jenen Korngrößenbereich dar, in dem in etwa das Maximalkorn der In situ-Korngröße des jeweiligen Materials zu finden ist.

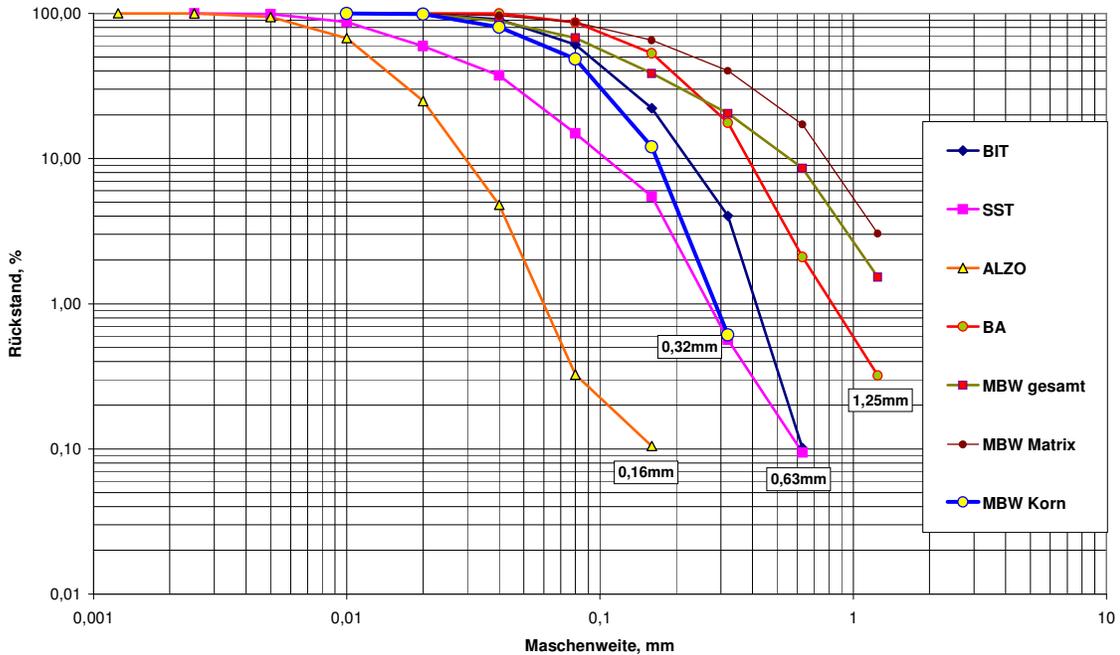


Abbildung 105. Rückstandskurven der In situ-Korngrößenverteilungen

10.1.1. Vergleich der Lokalen Minima mit der In situ-Korngrößenverteilung

In diesem Abschnitt werden die Minima der aus den verschiedenen, vorangegangenen Analysen zusammengefasst dargestellt und miteinander verglichen. Tabelle 25 zeigt die Gegenüberstellung von den 50 %-Einzelkornwerten, den Lokalen Minima aus den Lokalen Neigungen (GGs-Exponentenverläufen) und den Minima aus der In situ-Korngrößenbestimmung.

Probe	Minimum aus Schliffen (Aggregate & Einzelkörner) (berechnet)	Minimum aus GGS Netz:	Minimum aus der Schnittpunkt Einzelkörner mit Aggregaten	Minimum aus der Rückstandskurve der In situ KGV
BA 9	1,24	1,00	(0,80)	1,25
MBW 5	0,42	0,50	0,55	0,32
ALZO 25 - 1	0,18	0,125	0,098	0,16
BIT 3	0,44	0,38	0,45	0,63
SST Cyl 20 - 1	0,65	0,75	0,50	0,63

Tabelle 25. Berechnetes 50 %-Einzelkörner-Minimum und Lokale Minima aus den GGS-Plots der untersuchten Proben, verglichen mit den Rückstandswerten aus der In situ-Korngrößenverteilung.



Die Werte aus der Tabelle 25 wurden in Abbildung 106 dargestellt und eine Regressionsgerade eingetragen. Die Übereinstimmung der Minima aus der In situ-Korngröße und den aus den Lokalen Neigungen beträgt etwa 68 %, die Übereinstimmung zwischen den Minima aus der In situ-Korngröße und den Minima aus den 50 %-Einzelkörnern zeigt eine Korrelation von etwa 93 %. In diesem Diagramm wird gezeigt, dass alle ermittelten Minima einem gemeinsamen Trend folgen obwohl eine Korrelation von 68 % nicht als ausreichend angesehen werden sollte, um weitere Schlussfolgerungen darauf aufzubauen.

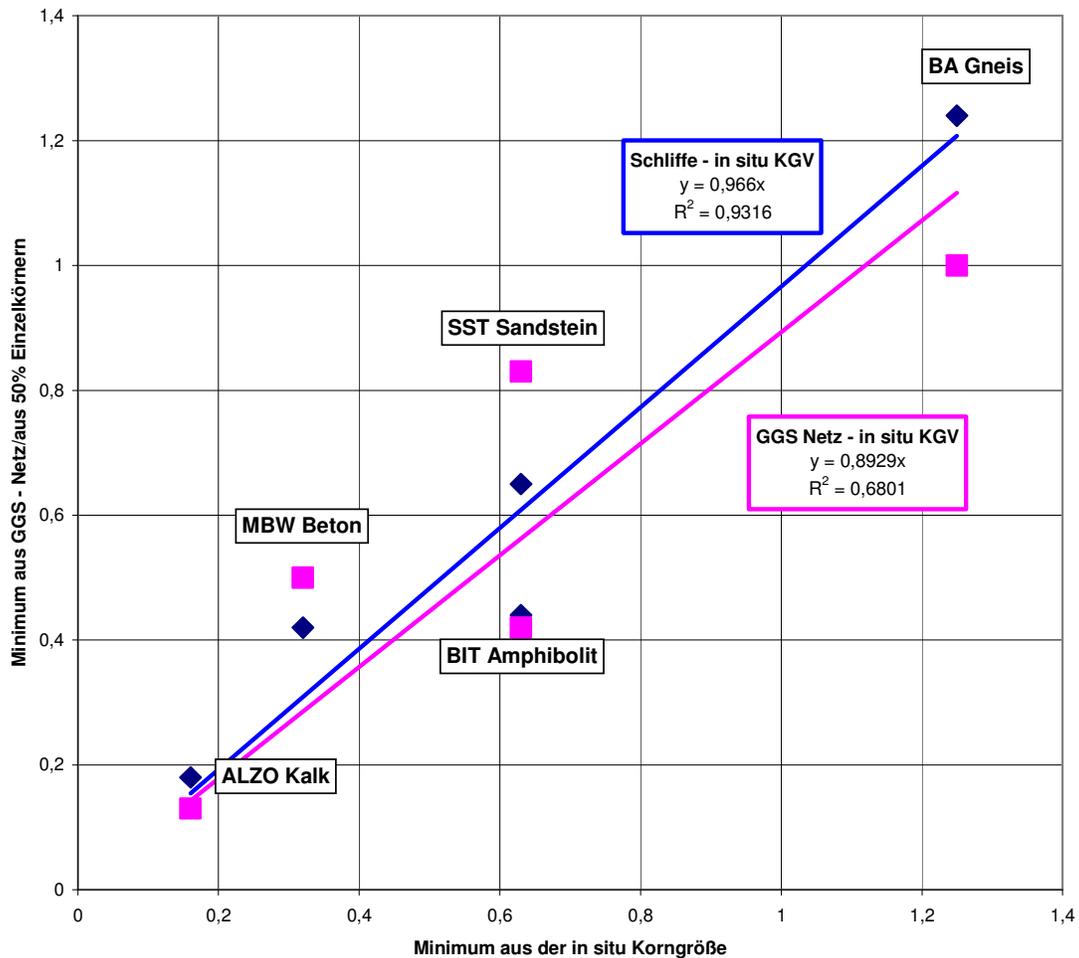


Abbildung 106. Zusammenhänge zwischen lokalen Minima und In situ-Korngröße



10.2. Zusammenfassung

Die absoluten Teilchenanzahlen gehorchen in einem materialabhängig - limitierten Bereich einer Potentialfunktion. Verschiedene Gesteine zeigen im log-log-Diagramm an verschiedenen Stellen verschieden große „Linearitätsbereiche“, die sich als Geraden darstellen.

Das Lokale Minimum eines Materials liegt an derselben Korngröße wie die 50 % Einzelkornanteile.

Die Einzelkorn-Summenkurven weisen an der 50 %-Linie ihre größte Steigung auf. Die Maximalsteigungen sind bei allen untersuchten Materialien nahezu ident.

Die Anzahl der Mineral-Einzelkörner nimmt ab einer gewissen Korngröße rasch zu, verringert sich aber dann auf Kosten der Anzahl von Matrix-Einzelkörnern. Eine Kreuzung der beiden Linien wird angenommen.

Aus der Kombination der absoluten Anzahl von Körnern mit deren Zusammensetzung kann ein Kurven-Schnittpunkt zwischen Einzelkörnern und Aggregaten gebildet werden, der wiederum mit den Lokalen Minima übereinstimmt, tendenzmäßig jedoch kleinere Werte aufweist. Bildet man den Schnittpunkt der Summenkurve von „Einzelkörner“ plus „Aggregate mit < 7 Körner pro Aggregat“ mit der Kurve „Aggregate > 7 Körner“, so erhält man mit den Lokalen Minima sehr gut übereinstimmende Werte.

Betrachtet man die In situ-Korn-/Mineral-Größenverteilung der einzelnen Materialien, so korrelieren die auftretenden Größtkörner in dem jeweiligen Material mit allen vorher bestimmten Minima.

11. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

11.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die natürliche Bruchcharakteristik (NBC) als Materialparameter beschreibt das Verhalten eines Gesteins hinsichtlich seiner Eigenschaft, beim Zerkleinern in Bruchstücke bestimmter Größenordnung zu zerfallen. Als Ergebnis eines Zerkleinerungsprozesses äußert sich die NBC in Form einer materialcharakteristischen Ausprägung der Verteilung der Größe der Körner in einer Summendurchgangsverteiung in log-log maßstäblicher Darstellung (GGS-Netz).

Die Darstellung der NBC für ein bestimmtes Material besteht in Form eines Diagramms, das die klassenweise Neigung der Korngrößensummenverteilungskurve über den einzelnen Korngrößeklassen darstellt. Die Abbildung 107 zeigt als Beispiel die NBC für die drei natürlichen Gesteine Amphibolit, Sandstein und Kalkstein. Die NBC in Abbildung 107 wurde aus den Korngrößenverteilungskurven für die drei Materialien (dargestellt in Abbildung 23) abgeleitet.

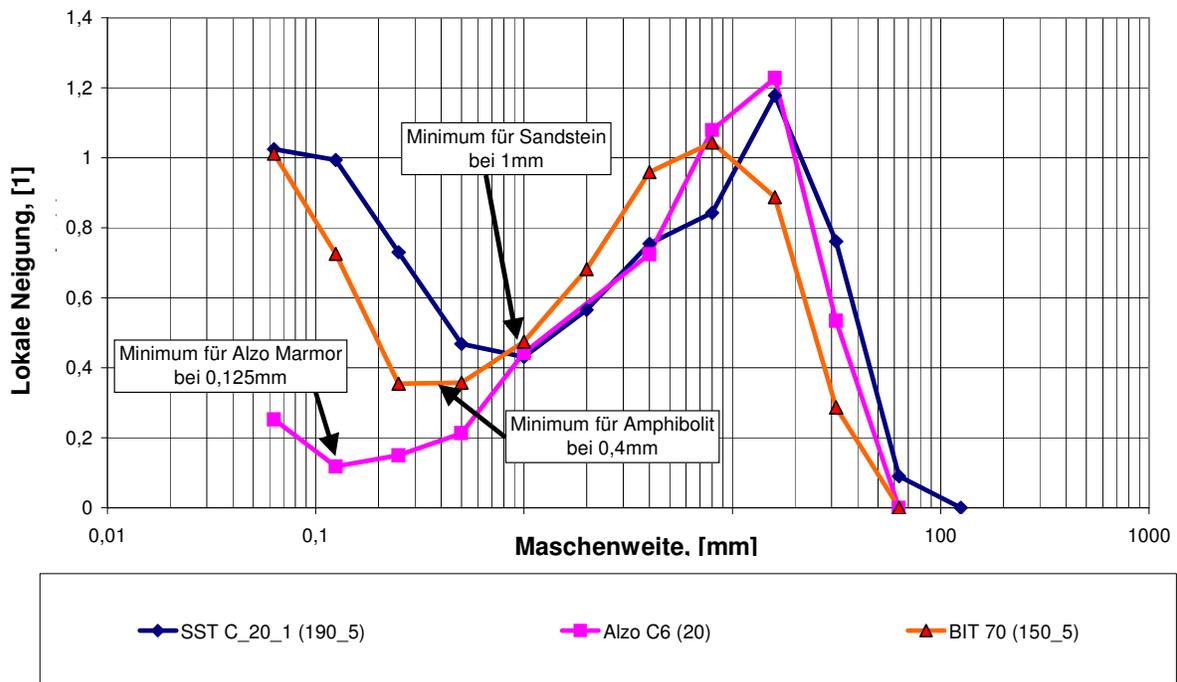


Abbildung 107. NBC Diagramme für Amphibolit, Sandstein und Alzo Kalkstein

Für die Beurteilung, ob mehrere Summenverteilungskurven in GGS Darstellung für ein bestimmtes Material dieselbe Charakteristik aufweisen, wurde der Begriff der Selbstähnlichkeit herangezogen und als Beobachtungsmaßstab eingesetzt. Der Beobachtungsmaßstab wurde wie folgt festgelegt: „Die NBC tritt für ein Material bis zu jener Korngrößenklasse auf, bis zu der eine Hochselbstähnlichkeit oder eine Selbstähnlichkeit zwischen den Korngrößensummenverteilungskurven mehrerer experimentell zerkleinerter Proben beobachtet werden kann.“

Zur Beurteilung der Selbstähnlichkeit wurden 4 Begriffe definiert:

- *Hochselbstähnlich*
- *Selbstähnlich*
- *Schwach Selbstähnlich*
- *Nicht selbstähnlich*

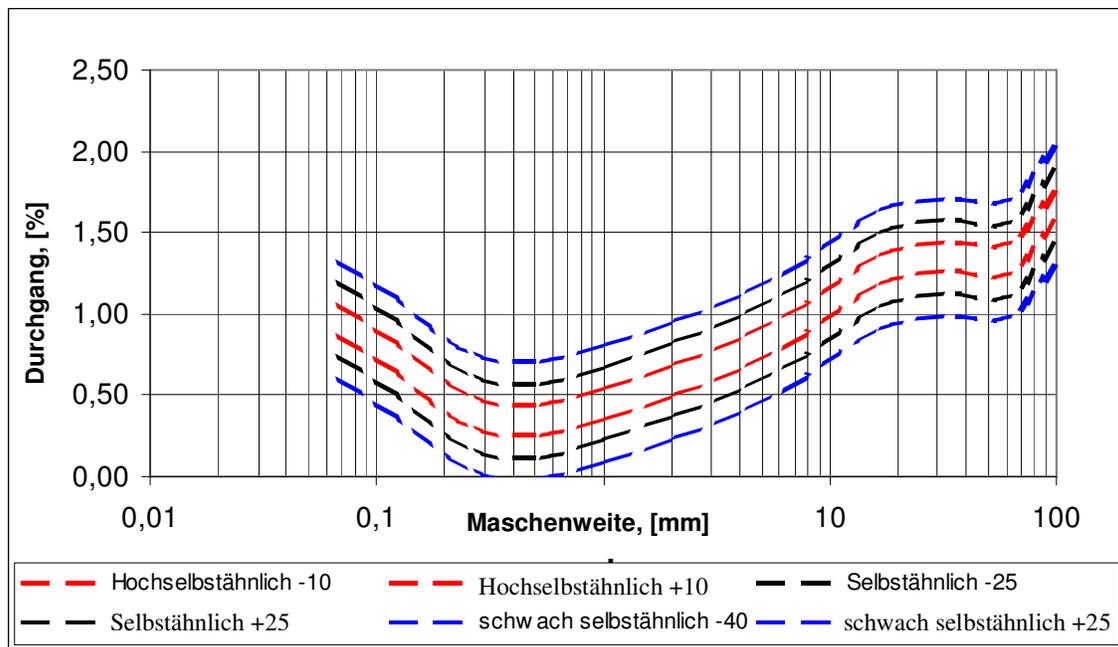


Abbildung 108. Basisdiagramm für die Beurteilung der Selbstähnlichkeit

Diese Begriffe wurden in der vorliegenden Arbeit definiert und eine ausführliche Anleitung zur Ermittlung und Berechnung der verschiedenen Grenzen der Selbstähnlichkeit wurde erstellt. Als Beispiele für die verschiedenen Grenzen der Selbstähnlichkeit sind in der Abbildung 108 jene für Amphibolit dargestellt.



Die Natürliche Bruchcharakteristik (NBC) ist eine gesteinsabhängige Zerkleinerungseigenschaft. Die NBC wird mittels der Exponentenverläufe dargestellt und durch die Lage der Lokalen Minima fixiert (Tabelle 17). Die Lage des Minimums ist prozess- und maßstabsgrößenunabhängig. Bei technisch-mechanischer Zerkleinerung (Brecher, Mühle, ...) ist die dargestellte linke Flanke der Lokalen Neigungen flacher als bei sprengender Zerkleinerung oder Zerkleinerung mit definiert aufgebrachtener Kraft (Point Load Test, Druckversuch in der hydraulischen Presse, ...). Die rechte Flanke der Lokalen Neigungen ist durch die Größe/den Maßstab der untersuchten Probe bestimmt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Unterschied zwischen verschiedenen untersuchten Gesteinen größer ist als die Schwankungsbreite innerhalb eines Gesteines. Die Lage und Position des Minimums der Lokalen Neigungen ist ein Gesteinsparameter und dient als Definition der NBC.

Wie die vorhergehenden Analysen gezeigt haben, ist die Selbstähnlichkeit innerhalb eines Materials immer gegeben. Abbildung 109 zeigt den Exponentenverlauf von verschiedenen Durchschnittsproben von Materialien. Natürlich gibt es abschnittsweise eine Überdeckung von manchen Materialien, aber kein untersuchtes Gestein gleicht im gesamten Verlauf innerhalb der Selbstähnlichkeitsgrenze einem anderen.

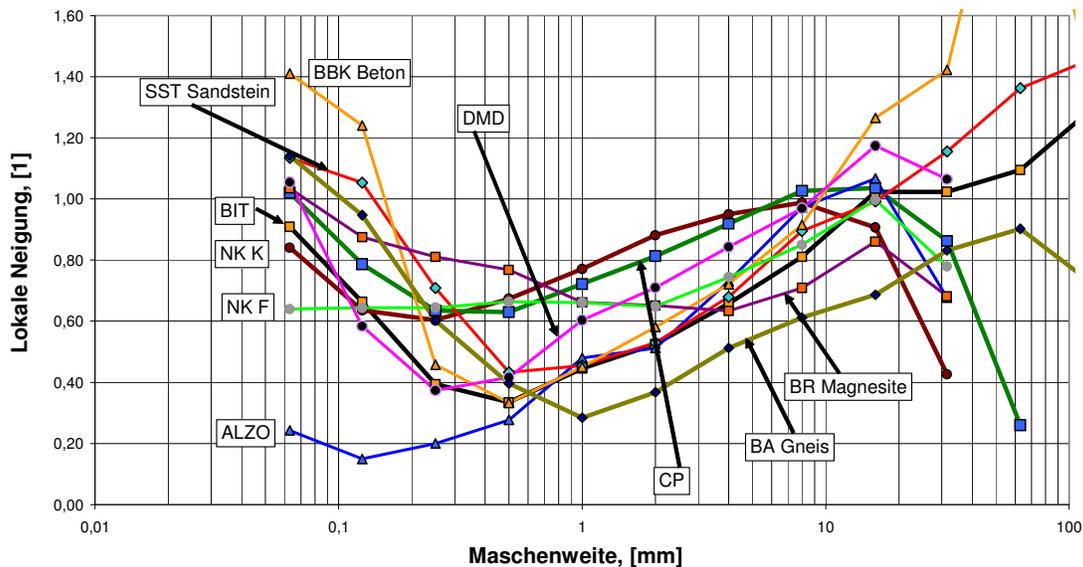


Abbildung 109. NBC-Charakteristik aus Durchschnittsproben verschiedener Materialien

Somit kann gefolgert werden: Für alle untersuchten Gesteine ist die Schwankungsbreite der Lokalen Neigungen für ein Materials (unabhängig von der Art der Zerkleinerung) ist kleiner als die Unterschiede im Zerkleinerungsverhalten verschiedener Gesteine. Dadurch ist jedes untersuchte Gestein eindeutig durch die NBC definiert.



Entgegen den bisherigen Erfahrungen in der Zerkleinerung konnte **kein** homogenes Zerkleinerungsverhalten von Gesteinen über den gesamten Korngrößenbereich gefunden werden wie es durch eine konstante Neigung der Korngrößensummenverteilungskurve über den gesamten Korngrößenbereich definiert ist (Steiner 1990). Das heißt, die Verteilung der Neigung der Korngrößensummenverteilung über die einzelnen Kornklassen zeigte bisher für jedes untersuchte Material ein ausgeprägtes Minimum, wobei dies zum Teil erst in den Kornklassen $< 100 \mu\text{m}$ auftritt. Hierfür wurden Untersuchungen im Feinbereich ($< 100 \mu\text{m}$) mit der LUMOSSED Methode durchgeführt. Für jedes Gestein, das in der Zerkleinerungskurve $> 100 \mu\text{m}$ ein scheinbar homogenes Zerkleinerungsverhalten vorwies konnte unter $100 \mu\text{m}$ ein Lokales Minimum festgestellt werden (Abbildung 110).

Im Hinblick auf das Auftreten der NBC hinsichtlich der Korngrößenbereiche konnte bisher zu kleineren Korngrößen hin keine Grenze für ein materialspezifisches Zerkleinerungsverhalten gefunden werden. Zu größeren Korngrößen hin zeigt sich eine von Material zu Material unterschiedliche maximale Korngröße (in der Größenordnung von mm) bis zu der das Auftreten einer materialcharakteristischen Ausprägung der Summenverteilungskurven beobachtet werden konnte.

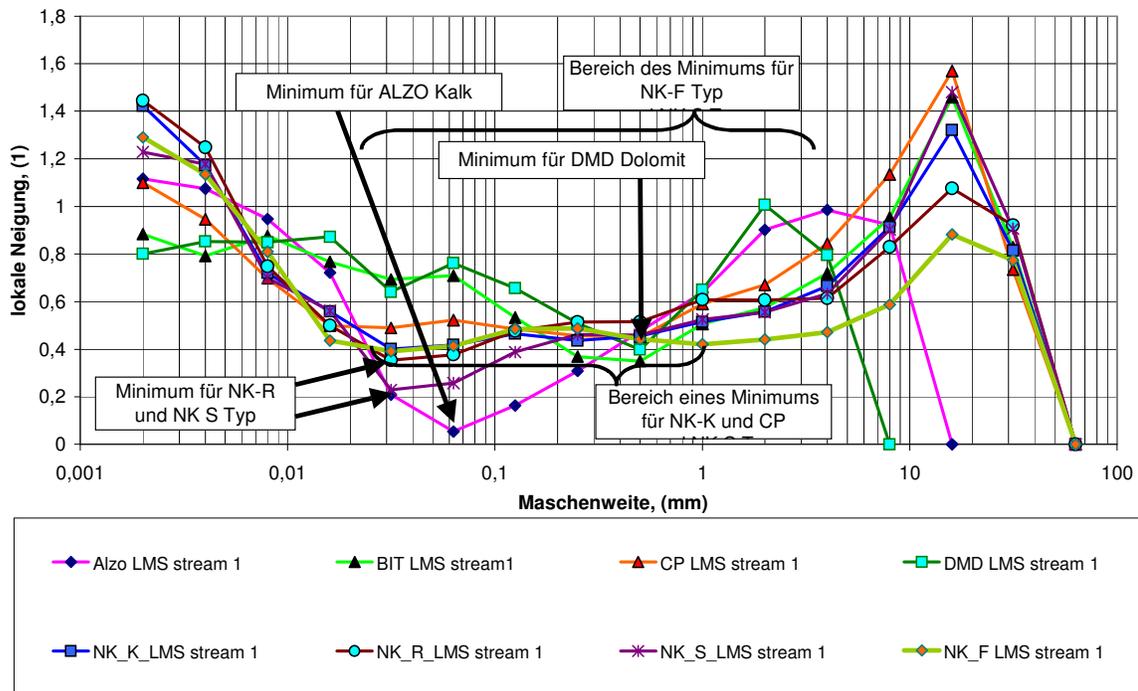


Abbildung 110. Verlauf der Lokalen Neigungen im Feinbereich $< 100 \mu\text{m}$ anhand der Proben vom Institut für Aufbereitung



Die NBC von Gesteinen stellt sich als eine materialspezifische Ausprägung von Korngrößenverteilungskurven dar. Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass diese materialspezifische Ausprägung durch eine relative Häufigkeit von Partikeln in der einzelnen Kornklasse bedingt ist. Im Hinblick auf das Entwickeln eines besseren Verständnisses für das Zustandekommen der NBC wurde in einem weitren Schritt sowohl die Zahl als auch der Aufbau der Körner in den einzelnen Kornklassen untersucht. Dazu wurden die Anteile von Einzelkörnern und verschiedenen Kornaggregaten in Streupräparaten von gesprengten Proben ermittelt. Die Verteilungsfunktionen der Einzelkörner und der Aggregate über der Korngröße wurden detailliert untersucht und mit den Lokalen Minima der NBC in Verbindung gebracht.

Für jede Korngrößenklasse wurde durch einen einfachen volumetrischen Ansatz die Anzahl der Körner berechnet. Die ermittelte Korrelation zwischen gezählten und errechneten Teilchenanzahlen liegt über 98,42 %

Die absoluten Teilchenanzahlen gehorchen einer Potentialfunktion. Verschiedene Gesteine zeigen im log-log-Diagramm an verschiedenen Stellen verschieden große „Linearitätsbereiche“, die sich als Geraden darstellen.

Um festzustellen, ob die NBC auch direkt mit der Struktur der Körner korreliert, wurden einzelne Proben mikroskopisch untersucht und die einzelnen Korntypen ausgewiesen und ausgezählt. Korn-typen sind Aggregate oder Einzelkörner, wobei die Aggregate in Untertypen unterteilt wurden, zum Beispiel: Aggregate mit mehr als 7 Körnern, Aggregate mit 3–7 Körnern und Aggregate mit genau 2 Körnern. Bei der Auswertung konnte für jedes Material eine bestimmte Korngrößenklasse festgestellt werden, bei der es zu einem deutlicher Anstieg von Einzelkörnern kam bzw. umgekehrt zu einer Abnahme von Kornaggregaten.

Der Verlauf der Einzelkörner je Kornklasse ist in Abbildung 111 dargestellt. Der Schnittpunkt mit der 50 %-Linie wurde mittels Geradengleichung ermittelt. Dieser Schnittpunkt ergibt eine bestimmte Korngröße und stellt eine Zusammensetzung der Partikelverteilung von 50 % Einzelkörnern und 50 % Aggregaten dar. Diese ermittelten Korngrößen weisen eine gute Korrelation mit den aus den Analysen der Sieblinien abgeleiteten Lokalen Minima auf.

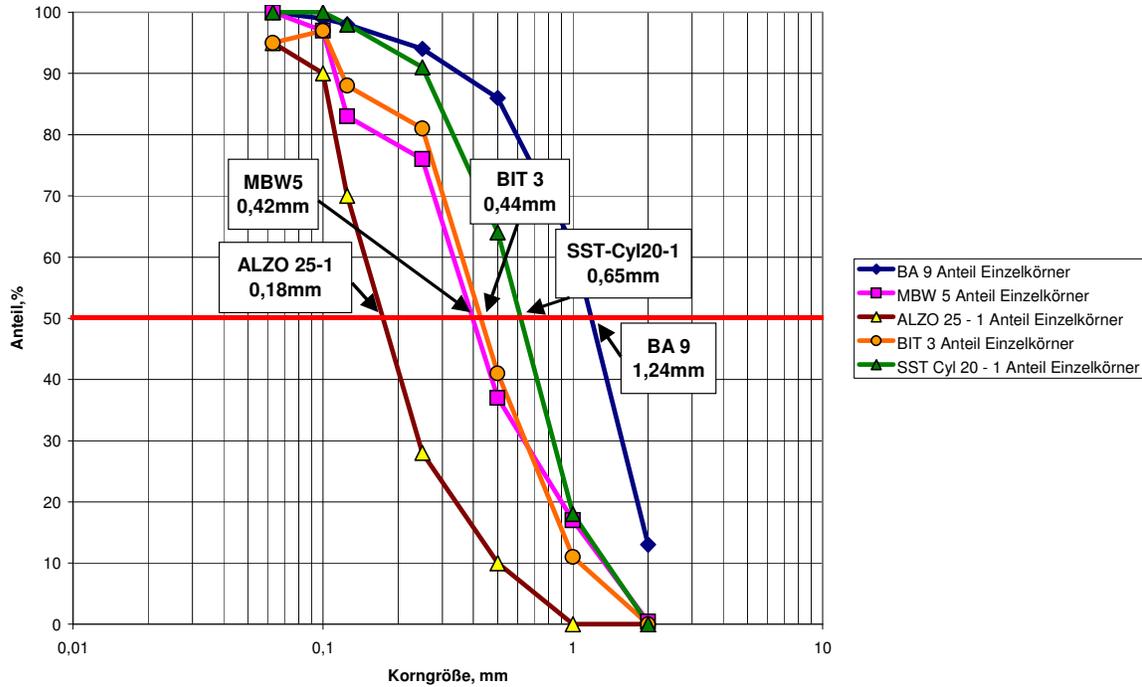


Abbildung 111. Berechnung der 50%-Anteile aus der Summe der Einzelkörner

Um Zusammenhänge der Lokalen Minima und den Minima aus den Streupräparaten mit der In situ-Mineral Korngröße zu untersuchen, wurde die In situ-Korngröße anhand von Dünnschliffen ermittelt (Popović 2004). Die Ergebnisse der Auszählungen – Häufigkeitsverteilungen der In situ KGV – wurden mit dem Lokalen Minimum aus dem GGS Netz in Verbindung gebracht.

Die Korngrößen, bei denen der Rückstand gerade noch nicht Null ist, stellen physikalisch gesehen jenen Korngrößenbereich dar, in dem in etwa das Maximalkorn der In situ-Korngröße des jeweiligen Materials zu finden ist (Abbildung 112).

Betrachtet man die In situ-Korn-/Mineral-Größenverteilung der einzelnen Materialien, so korrelieren die auftretenden Größtkörner in dem jeweiligen Material mit allen vorher bestimmten Minima.

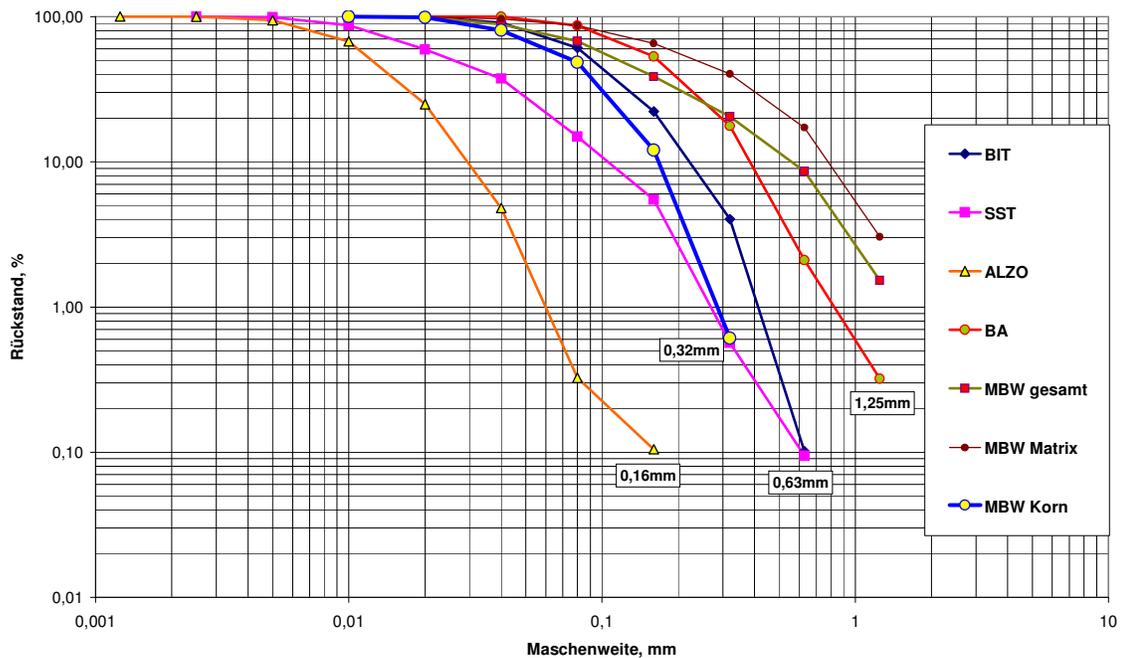


Abbildung 112. Rückstandskurven der In situ-Korngrößenverteilungen

11.2. Diskussion weiterer zu behandelnder Fragen

Im folgenden Abschnitt werden wichtige Fragen die im Rahmen der bisherigen Arbeit nicht vollständig geklärt wurden diskutiert:

11.2.1. Welche Parameter beeinflussen die Charakteristik der Grobflanke?

Die Abhängigkeit der rechten Flanke der Lokalen Neigungen von der Probengröße wird wie folgt erklärt:

Die theoretisch maximale Korngröße entspricht der Probengröße selbst. Wird durch einen zu geringen Energieeintrag die Probe nicht zerkleinert so entspricht k_{\max} den Abmessungen der Probe. Aber auch bei einer richtig dimensionierten „Sprengprobe“ bzw. Sprengung beeinflussen/limitieren die Parameter Vorgabe und Seitenabstand k_{\max} . Durch diesen Umstand wird k_{\max} auch bei gleich bleibendem spezifischem Sprengstoffeintag (q) und gleich bleibendem k_{50} von der Probengröße



beeinflusst. Das Kuz-Ram Modell beschreibt die geringe Abhängigkeit von k_{50} durch die Probengröße. Das heißt der Unterschied zwischen k_{50} und k_{\max} wächst mit zunehmender Probengröße und somit sinkt der Wert der Lokalen Neigungen (n) mit zunehmender Probengröße.

Wie weit die Grobkornflanke bei zunehmender Probengröße nach unten gehen kann, sei wie folgt erklärt:

Die Zerkleinerungskurven von Gesteinen in der Sprengtechnik bzw. auch in der mechanischen Zerkleinerung bei der Durchlaufzerkleinerung nähern sich asymptotisch an 100 %. Da, wie oben beschrieben wurde, k_{50} von k_{\max} nur bedingt abhängig ist, so verflacht sich diese asymptotische Annäherung mit zunehmender Probengröße. In einem homogenen Block aus Granit oder Beton mit unendlicher Größe könnten die Lokalen Neigungen somit Null erreichen. Dies ist jedoch in der Praxis nicht möglich, da es in jedem Gestein Klüfte, Störungen und Diskontinuitäten gibt, das Sprengergebnis beeinflussen. Die Klüftung eines Gebirges liegt meist weit unterhalb der Größe des Sprengrasters und ist somit ausschlaggebend für k_{\max} . Bei einer Großsprengung hat die im Gebirge vorhandene In situ Korngrößenverteilung einen wesentlichen Einfluss auf k_{\max} . In weiterführenden Untersuchungen sollte die In situ KGV mit dem Zerkleinerungsergebnis in Verbindung gebracht werden.

Zusammenhang zwischen den Partikelanzahlen und dem Verlauf der Grobkornflanke:

Wie man in Abbildung 80 bis Abbildung 83 sehen kann nimmt die Anzahl der Partikel mit zunehmender Korngröße dramatisch ab. Die Masse in der größten Korngröße ist dabei nicht vernachlässigbar groß im Vergleich zu den Massenanteilen in den kleineren Klassen

Ein weiterer Aspekt ist, dass es sich um statistische Verteilungen handelt. Da aber die Anzahl der Partikel in den großen Korngrößenklassen sehr gering ist, kann man in diesem Bereich nicht mehr von einer statistischen Verteilung ausgehen. Vielmehr beeinflussen Schwankungen, Unsicherheiten und Zufälle die Anteile in den groben Kornklassen und somit den größten Teil der rechten Flanke.



11.2.2. Warum produziert mechanische Zerkleinerung relativ mehr Feinmaterial als sprengende Zerkleinerung bzw. mechanische Zerkleinerung mit definiert aufgebraachter Kraft?

Eine mögliche Erklärung dazu ist der gegenüber der mechanischen Zerkleinerung auftretende stärkere Verlust von Feinmaterial beim sprengenden Zerkleinern. Da die Gesamt-Verluste (von der Sprengprobe bis hin zum fertig gesiebten Gut) beim Sprengen in der Sprengkammer inklusive Siebverluste meist $< 0,5\%$ liegen, wird diese Erklärung nicht weiterverfolgt. Wenn der Gesamtverlust von $0,5\%$ gleichmäßig auf das Material $< 10\text{ mm}$ aufgeteilt wird, bleibt immer noch ein Unterschied zwischen mechanischen Versuchen und der Sprengtechnik erhalten (*Reichhoff, 2004*).

Die mögliche zweite Erklärung besteht darin, dass Feinmaterial, das zwar hauptsächlich während der Ausbildung von Makrorissen entsteht, auch am Kontakt der Zerkleinerungskräfteeinleitung entsteht. Beim Sprengen betrifft dies die intensive Zerstörungszone Zermalmungszone. Bei der mechanischen Zerkleinerung kommt es zur Ausbildung von zahlreichen „Zermalmungszonen“ bei jedem Brecher-Gesteins und jedem Gesteins-Gesteins-Kontakt. Diese Energiespitzen zerstören lokal das Gestein stark und führen zur Bildung von Feinmaterial.

Diese Erklärung wird die Versuche im Magnetitbeton unterstützt, wo „definiert aufgebraachte Kraft“ zu denselben Resultaten bezüglich Lokaler Neigungen führte wie die Sprengtechnische Zerkleinerung.

Ferner kann durch ein „Abrunden“ der Kanten und Ecken der zu großen Bruchstücke („bis sie gerade durch das Sieb passen“) bei der Kreislaufzerkleinerung die etwas feinere Zerkleinerungskurve im Vergleich zur Durchlaufzerkleinerung erklärt werden.

11.2.3. Was bedeutet das Lokale Minimum physikalisch?

Das Lokale Minimum bedeutet physikalisch eine „relative Abreicherung“ von Material in einer bestimmten Kornklasse im Vergleich zu anderen Kornklassen. Der Grund für dieses geringere Auftreten von Partikeln in einer bestimmten Kornklasse kann dadurch erklärt werden, dass sich die Körner, die sich in dieser Klasse bilden würden nicht besonders stabil sind.

Betrachtet man Gestein als ein polykristallines oder als ein Polykorn-Gemisch, so sind die Korngrenzen immer instabiler als die Körner selbst. Daraus folgt, dass der instabilste Zustand eine 2-Korn Zusammensetzung ist. Jede 2-Korn Zusammensetzung zerfällt bei Beanspruchung viel leichter als jede andere Zusammensetzung oder gar Einzelkörner.



Je größer die Anzahl der Körner in einem Aggregat, umso runder bzw. kubischer wird das Gesamt-
aggregat. (Ausgenommen sind Mineralogisch bedingte längliche oder plattige Körner). Je runder ein
Aggregat sich ausbildet, umso stabiler werden die Aggregatgrenzen gegen den Angriff von Biegung
welche Zugkräfte auslösen kann.

11.3. Empfehlung für weiterführende Untersuchungen

Um weitere Fragen die in der vorliegenden Arbeit nicht oder nur teilweise beantwortet werden
konnten werden folgende weiterführende Untersuchungen vorgeschlagen:

- Untersuchungen zu Stabilität/Form/Aufbau von Bruchstücken für den Bereich der NBC
- Abklärung des Einflusses des Gebirgsgefüges/Klüftung auf die NBC und Vergleich der In
situ KGV mit dem Sprengergebnis
- Abklärung des Einflusses der Energiedichte auf die NBC
- Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen k_{\max} und k_{50} NBC-Verhalten über das Lo-
kale Minimum
- Untersuchungen zum Unterschied des Feinmaterialanfalls zwischen aufbereitungstechni-
scher und sprengtechnischer Zerkleinerung, d. h. des Prozesseinflusses auf die NBC
- Untersuchungen, bis zu welcher Maximalkorngröße die NBC beobachtet werden kann. Ist
sie bis ca. 30 mm limitiert (wenn ja warum) oder geht sie bis zu größeren Korngrößen.



12. Danksagung

Seitens der MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN im Besonderen des Institutes für Bergbaukunde und Bergwirtschaft bedanke ich mich bei Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Peter Moser für die Initiation, die Betreuung und die fachliche Unterstützung bei der vorliegenden Arbeit.

Bei Herrn Univ. Prof. Dr. Ing. Finn Ouchterlony vom Swedish Blasting Research Center (Swebrec, früher SveBeFo) an der Luleå Technical University, möchte ich mich für die Betreuung bei der Erstellung der Arbeit und den zahlreichen „fruitful discussions“ recht herzlich bedanken.

Ich möchte mich bei allen Mitgliedern des Institutes für Bergbaukunde und Bergwirtschaft einerseits für fachliche, aber auch für freundschaftliche Unterstützung andererseits bedanken. (Horst Wagner, Peter Moser, Günter B.L. Fettweis, Gerhard Mayer, Reinfried Pilgram, Bahman Randjbar, Thomas Oberndorfer, Günter Tiess, Thomas Huber, Johann Gasser, Klaus Lackner, Brigitte Tomschi, Albert Eisner, Heidemarie Kutschera, Brigitte Tomschi, Elke Reichenpfader, Sandra Tatzler, Gerold Wölfler, Vladana Arsic, Hannes Blaha, Hannes Hasewend)

Besonderer Dank geht an alle Mitglieder des Less Fines Projektes, einerseits für die zur Verfügungsstellung der Daten und andererseits für die nächtelangen fachlichen Diskussionen und Anregungen die vorliegende Arbeit besonders positiv beeinflusst haben (Peter Moser, Vladana Arsic, Andreas Böhm, Roland Mayerhofer, Björn Petterson, Jan Kristiansen, Ingvar Bergqvist, Jesús A. Pascual, Rocío Ortiz López, Tarmo Tuominen, Henrik Grind, Kenneth Fjäder, Monika Kontturi, Alberto Gómez, Javier Quemada, Bernhard Smöch, Tomas Franzén, Finn Ouchterlony, Mats Olsson, Damien Goetz, Jacques Schleifer, Bruno Tessier, Michel Tijani, Ahmed Rouabhi, Jean du Mouza, Essaieb Hamdi, José A. Sanchidrián, Pablo Segarra)

Des weiteren möchte ich mich bei Siegfried Schider vom Institut für Geowissenschaften für seine umfassende Unterstützung bei der Probenbearbeitung der Versuche und seine ausgezeichneten Ideen bei der Lösung zahlreicher Probleme bedanken. Herzlichen Dank dem gesamten Personal des Institutes für Geowissenschaften, für ihre fachlichen Ratschläge und ihre aufmunternden Worte.

Ich möchte allen meinen Freunden danken, die mir in den vergangenen Jahren, auch in schlechten Zeiten, ihre Freundschaft bewiesen haben, und immer zu mir gestanden sind und mich immer motiviert haben. Danke Gary, Dani, Manu, Birgit, Elke, Tom, Vladana, Thomas, Irmis, Nina, Steffen, Ulli, Gerti, Johanna.

Zuletzt möchte ich noch meiner Familie (Hildegard, Fritz, Tobias and Ursula Grasedieck, Barbara Ebner, Centa Martari, Johanna Kretzer) und meinen Verwandten danken, die den Glauben an mich und meine Arbeit niemals aufgegeben haben, und mich immer in allen Belangen über die letzten Jahre hinweg unterstützt haben.



13. Literatur

- BÖHM A., MAYERHOFER R., 2001. *Mechanical fragmentation tests*. Department of Mineral Processing. University of Leoben, Less Fines Technical Project Report Nr 22, EU-PROJECT N°: GRD-2000-25224
- BÖHM, A., MAYERHOFER, R., ÖFNER, W., 2002. *Mechanical fragmentation tests Optimized Comminution Sequence-Energy register function*. Department of Mineral Processing. University of Leoben, Technical Project Report Nr 22, EU-PROJECT N°: GRD-2000-25224
- BÖHM, A., MAYERHOFER, R., ÖFNER, W., 2004. *Influence of the blast fragmentation result upon the fragmentation output of the primary crusher and the crusher performance - pilot study at Hengl*, Institute of Mineral Processing, University of Leoben, Technical Project Report Nr 79, EU-PROJECT N°: GRD-2000-25224
- BOND, F. C., WHITNEY, B.B., 1959. *Work index in blasting*. Quarterly of the Colorado School of Mines, Volume 54, Number 3, July 1959, p. 77 – 81
- BOND, F. C., 1952. *The third theory of comminution*. American Inst. Mining Metal. Engineers Trans., Volume 193, p. 484
- GRASEDIECK, A., HAMDI, E., MOSER, P., 2004. *Characterization of the mechanical properties of the rock*, Technical Project Report Nr 89, EU-PROJECT N°: GRD-2000-25224
- GRASEDIECK, A., MOSER, P., 2004. *Comparison of particle size distribution curves from screening and optical fragmentation measurement*, Technical Project Report Nr 88, EU-PROJECT N°: GRD-2000-25224
- GRUBER-PRETZLER, M., 2003. *Projektarbeit zur Ermittlung der Zusammensetzung der Teilchen nach der Zerkleinerung*. Nicht veröffentlichter Report am Institut für Bergbaukunde. Montanuniversität Leoben



- KREUTZER, I., 2004. *Projektarbeit zur Ermittlung der Korngrößenverteilung < 100 µm mit der LUMO-SED Methode*. Nicht veröffentlichter Report am Institut für Bergbaukunde. Montanuniversität Leoben
- KRISCHE, O., 2004. *Projektarbeit zur Ermittlung der Teilchenanzahlen*, Nicht veröffentlichter Report am Institut für Bergbaukunde. Montanuniversität Leoben
- LOF, P., 1982. *Elsevier's Mineral and Rock Table compiled by P.Lof*. Elsevier scientific Publishing Company, Netherlands. ISBN 0-444-42081-9
- MIKLAUTSCH, A., 2003. *Experimental investigation of the blast fragmentation behavior of rocks and concrete. In the frame of the project Less Fines*. Master Thesis. Institut für Bergbaukunde. Montanuniversität Leoben
- MOSER, P., GRASEDIECK, A., ARSIC, V., REICHHOLF, G., 2003. *Charakteristik der Korngrößenverteilung von Sprengbauwerk im Feinbereich*. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 148. Jg 2003, Heft 6, p. 205-216
- MOSER, P., GRASEDIECK, A., OUCHTERLONY, F., OLSSON, M., 2003. *Comparison of the blast fragmentation from lab-scale and full-scale tests at Bårarp*. Proceedings 2nd EFFE Conference, Prague. p. 449-458
- MOSER, P., GRASEDIECK, A., 2004. *Rock specific breakage energy functions derived from lab-scale blast experiments*. Proceedings of the 30th annual conference on Explosives & Blasting Technique. 1.-4. 2. 2004, New Orleans, USA.
- MOSER, P., BÖHM, A., GRASEDIECK, A., DU MOUZA, J., HAMDI, E., 2002. *The natural breakage characteristics (NBC) and energy-register functions for the rock mass of the quarries Nordkalk, Cementos Portland and Hengl Bitustein*. Less Fines Technical Project Report Nr 34, Deliverable 1 and Milestone 2, EU-PROJECT N^o: GRD-2000-25224
- OLSSON, M., BERGQUIST, I., 2002. *Fragmentation in quarries*. In Proc. Discussion meeting BK p. 33-38. Stockholm Swedish Rock Construction Committee. In Swedish.



- OLSSON, M., SVAHN, V., OUCHTERLONY, F., BERGQUIST, I. 2003. *Fragmentation in quarries*. SveBeFo report 60, Swedish Rock Engineering Research, Stockholm. In Swedish.
- ONEDERRA, I., 2004. *A fragmentation modelling framework for underground ring blasting applications*. Fragblast, 8, Nr. 3, p. 177-200.
- OUCHTERLONY, F., MOSER, P., 2006. *Likenesses and differences in the fragmentation of full-scale and model-scale blasts*. Fragblast, 8, International Symposium, Santiago Chile, p. 207-220,
- POPOVIĆ, M., 2004. *Bestimmung der In situ-Korngröße anhand von Dünnschliffen*, Nicht veröffentlichter Report am Institut für Bergbaukunde. Montanuniversität Leoben
- REICHHOLF, G., 2004. *Experimental investigation into the characteristic of particle size distributions of blasted material*, PhD Thesis, Department of Mining Engineering, University of Leoben.
- SCHUBERT, H., 1989. *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe – Band 1*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, ISBN 3-342-00289-1 (Band 1)
- STEINER, H. J., 1990. *Rahmengesetzmäßigkeiten der natürlichen Bruchcharakteristik von Mineralen und Gesteinen*. Erzmetall 43, Nr. 10, p. 435-440
- STEINER, H. J., 1998. *Zerkleinerungstechnische Eigenschaften von Gesteinen*, Felsbau 16, Nr. 5, p. 320-325
- WALLNER, F., 2003. *Bergmännische Meldearbeit / Senior Project Comparisons of blasting experiments*. Department of Mining Engineering. University of Leoben
- WIMMENAUER, M., 1985. *Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine*, Stuttgart Enke, ISBN 3-432-94671-6, Enke Verlag



14. Anhang

14.1. Anhang 1 (Siebanleitung)

Anleitung zum Sieben (Arbeitsanweisung):

1. Probenumfang feststellen (Summe der Kübel)
2. Kontrollwägung durchführen (Summe der Kübel abzüglich Plastiksäcke, Kübel und deren Deckel [wenn sie vorher mitgewogen wurden]).
 - ▶ Wichtig: Nicht alle Kübel sind gleich schwer (=> lieferungsabhängig!)
3. Die Proben in den Säcken sollen nach dem Sieben wieder dorthin zurückgegeben und mit Korngrößenklasse & Gewicht beschriftet werden
4. Sieben beginnen (die Holzrahmensiebe mit den Holzbalken über die Tröge legen); Kübel schrittweise unter Staubvermeidung hineinleeren.
 - ▶ Um Sekundärzerkleinerung zu vermeiden, unterhalb der Siebe mit einem Plastikdeckel hohe „Stürze“ abfangen.
5. Holzrahmensiebe (vom Institut für Aufbereitung):

a.	> 125
b.	125/100
c.	100/80
d.	80/63
e.	63/50
f.	50/40
g.	40/31,5
h.	31,5/25
i.	25/20
j.	20/14
k.	14/12,5
l.	12,5/10

6. Die Proben müssen gesteckt werden. Das heißt bei jedem Korn wird versucht, ob es durch das Sieb passt. (Tröge mit Pinsel sorgfältig reinigen)



7. Siebe nach Probenteilung

a.	10/6,3 mm
b.	6,3/4,0 mm
c.	4,0/2,0 mm
d.	2,0/1,0
e.	1,0/0,5 mm
f.	500 μm /250 μm
g.	250 μm /125 μm
h.	125 μm /100 μm
i.	100 μm /63 μm
j.	< 63 μm

8. Probenteilung: Mit dem Probenteiler von der Geologie \rightarrow Papier unterlegen, da gelegentlich etwas daneben geht.
- Wichtig: Vor der Probenteilung wiegen! Und nach der Probenteilung die Aufgabemenge (materialabhängig, aber nie weniger als 200 g und nie mehr als 400 g auf einmal aufgeben) und die Rückstellprobe wiegen und beschriften. Probenteiler mit Pinsel sorgfältig reinigen.
9. Beim Verwenden des Siebturmes maximal 20 Minuten sieben (Sekundärzerkleinerung!)
- Wichtig: Händisches Nachsieben über einem zusätzlichen Siebboden \rightarrow Fehler bis 30 %!
10. Alle Klassen (< 10 mm) mit Beschriftung (Klasse, Gewicht, Probenname) einschweißen.
11. Alle Proben werden in die Kübel zurückgepackt und der Kübel mit der Aufschrift: „gesiebt“ versehen.

14.2. Anhang 2 (Probendetails von Sprengproben)