

DIGITALES ARCHIV

ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
ZBW – Leibniz Information Centre for Economics

Haubrich, Frank; Trinkler, Michael; Sandmann, Dirk

Book

Analysen und Bewertung beibrechender Wertminerale aus Kies- und Sandlagerstätten in Deutschland : Auftragsstudie

Provided in Cooperation with:

DERA - Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin

Reference: Haubrich, Frank/Trinkler, Michael et. al. (2022). Analysen und Bewertung beibrechender Wertminerale aus Kies- und Sandlagerstätten in Deutschland : Auftragsstudie. Berlin : DERA.
https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-53.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

This Version is available at:

<http://hdl.handle.net/11159/12720>

Kontakt/Contact

ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft/Leibniz Information Centre for Economics
Düsternbrooker Weg 120
24105 Kiel (Germany)
E-Mail: [rights\[at\]zbw.eu](mailto:rights[at]zbw.eu)
<https://www.zbw.eu/econis-archiv/>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument darf zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen. Sofern für das Dokument eine Open-Content-Lizenz verwendet wurde, so gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

<https://zbw.eu/econis-archiv/termsfuse>

Terms of use:

This document may be saved and copied for your personal and scholarly purposes. You are not to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public. If the document is made available under a Creative Commons Licence you may exercise further usage rights as specified in the licence.

53

DERA Rohstoffinformationen



**Analysen und Bewertung beibrechender Wertminerale
aus Kies- und Sandlagerstätten in Deutschland**

»Auftragsstudie«

Impressum

Editor: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin
Tel.: +49 30 36993 226
dera@bgr.de
www.deutsche-rohstoffagentur.de

Autoren: Dr. Frank Haubrich
G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke

Dr. Michael Trinkler
Erz&Stein – Gesellschaft für Lagerstätten- und Rohstoffberatung bR
Talstraße 29
09627 Bobritzsch-Hilbersdorf

Dr. Dirk Sandmann
ERZLABOR Advanced Solutions GmbH
Chemnitzer Str. 40
09599 Freiberg

Kontakt BGR: Dr. Harald Elsner | harald.elsner@bgr.de

Layout: deckermedia GbR

Datenstand: Januar 2022

Titelbilder: © Erz&Stein
© Perschl 2018

Zitierhinweis: HAUBRICH, F.; TRINKLER, M.; SANDMANN, D. (2022):
Analysen und Bewertung beibrechender Wertminerale aus Kies- und
Sandlagerstätten in Deutschland. – DERA Rohstoffinformationen 53:
189 S., Berlin.

ISBN: 978-3-948532-64-2 (PDF)

ISSN: 2193-5319

Berlin, 2022



Analysen und Bewertung beibrechender Wertminerale aus Kies- und Sandlagerstätten in Deutschland

»Auftragsstudie«

Im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin

Danksagung

Danksagung für die fachliche Unterstützung bei der Auslegung der Aufbereitungstechnik an:

Dr. Dipl.-Ing. Bernd Bohle
Bohle Ing.-Beratung, Oer-Erkenschwick

Dr. Udo Jakobs
Dr. Jakobs GmbH, Simbach am Inn

Eugen Schmidt
Multotec GmbH, Mörlenbach

Vorwort

Seit einigen Jahren wird in Deutschland in verschiedenen Kieswerken wieder kommerziell Gold, sog. Seifengold oder Flussgold, gewonnen. Hierfür legen darauf spezialisierte Dienstleister spezielle Schlingenteppiche in Teilen der Aufbereitungsanlagen aus, in denen sich neben den im Rohkiessand enthaltenen Goldflittern auch ein Großteil der Schwerminerale sammeln.

Bei der Anreicherung des Seifengoldes müssen diese Schwerminerale abgetrennt werden. Sie fallen dabei in zum Teil recht großen Mengen an, so dass schon früh der Gedanke aufkam, nicht nur das Gold, sondern auch die Schwerminerale wirtschaftlich zu nutzen.

Unter den verschiedenen Schwermineralen besitzen die Titanminerale Rutil und Ilmenit, das sehr widerstandsfähige Mineral Zirkon, das Seltenerdmineral Monazit, sowie das Zinnmineral Kassiterit (Zinnstein) die höchste wirtschaftliche Bedeutung (= Wertminerale). Alle anderen Schwer- bzw. Wertminerale haben keine oder nur untergeordnete wirtschaftliche Bedeutung oder sind in Deutschland aus geologischen Gründen sehr selten.

Im Rahmen einer Auftragsvergabe der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde im Jahr 2017 das Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen beauftragt, über ganz Deutschland verteilt Kieswerke zu beproben und aus dem Probenmaterial Schwermineralkonzentrate abzutrennen.

Nach der Aufbereitung des Probenmaterials zu Vorkonzentraten an der RWTH Aachen wurde in einem zweiten Schritt die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH aus Halsbrücke mit der weiteren Aufbereitung und mineralogischen Analyse der Proben beauftragt.

Der hiermit publizierte Abschlussbericht der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH fasst alle Daten der aufbereitungstechnisch-mineralogischen Untersuchungen zusammen und bewertet die erzielten Ergebnisse. Als Hauptresultat konnte festgestellt werden, dass unter den in den deutschen Kiessandlagerstätten vorkommenden Wertmineralen nur Kassiterit (Zinnstein) wirtschaftlich gewinnbar sein könnte. Die Kiessande mit interessanten Kassiteritgehalten liegen alle im Erzgebirgsvorland und an der Elbe. Die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH empfiehlt für die Abtrennung von Kassiterit eine komplexes Aufbereitungsverfahren, das eine Gewinnung jedoch betriebswirtschaftlich grenzwertig machen würde.

Wir empfehlen interessierten deutschen Kieswerksunternehmern sich alleinig auf Kassiterit als Wertmineral zu konzentrieren und dieses – ähnlich wie Seifengold – durch mechanische Anreicherung unter Vernachlässigung aller anderer Schwerminerale zu gewinnen.

Kassiterit-Konzentrat ist ein weltweit verkaufsfähiger Rohstoff, der in Deutschland nicht nur für die Produktion von Zinn-Metall interessant ist, sondern auch in der Spezialglasherstellung Verwendung findet. Die Gewinnung von Kassiterit als beibrechendes Wertmineral in deutschen Kieswerken würde einen Beitrag zur Erhöhung der Ressourceneffizienz bei der Rohstoffgewinnung in Deutschland leisten.



Dipl.-Geol. Dr. Harald Elsner, EurGeol



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	13
1 Einleitung und Aufgabenstellung	15
2 Probenstandorte	16
3 Probenahme	17
3.1 Probenahme Rohkiesproben	17
3.2 Proben aus Bohrkernen	17
3.3 Proben aus der Aufbereitungsanlage Kieswerk Nr. 41	17
3.4 Reihenproben mittels Wendelscheider	17
3.4.1 Kieswerk 23/24 – Schwarze Elster	18
3.4.2 Kieswerk 08/12 – Zwickauer Mulde	20
4 Aufbereitung im Technikum	21
4.1 Klassierung und Dichtentrennung	21
4.1.1 Rohkiesproben	21
4.1.2 Reihenproben + Kieswerk 41	21
4.1.3 Proben Firma LöKa	22
4.2 Magnetische Separation	22
4.3 Elektrostatische Trennung	24
4.4 Ergänzende Tests zur vereinfachten Herstellung von Schwermineralkonzentraten	24
5 Probenpräparation und Analytik	28
5.1 Begriffe/Bezeichnungen	28
5.1.1 Schwerminerale	28
5.1.2 Leichtminerale	28
5.1.3 Schwergut (SG)	28
5.1.4 Schwermineralkonzentrat (SK)	28
5.1.5 Schwermineralfraktionen (SF)	28
5.1.6 Polymineralische Konzentrate	29
5.1.7 Monomineralische Konzentrate/Fraktionen	29
5.2 Probenbearbeitung/-vorbereitung	30
5.2.1 Dünnschliffherstellung	30
5.2.2 Mineralogische Analysen per QEMSCAN	30
5.2.3 Korngrößen – Kornformanalysen	31
5.2.4 Optische Mikroskopie an Dünnschliffen (Auflicht-/Durchlicht)	31
5.2.5 Auswertung der QEMSCAN-Analysen	31

6	Ergebnisse	33
6.1	Regionalgeologische Einordnung der Kies- und Sandlagerstätten	33
6.1.1	Einzugsgebiet Elbe	33
6.1.1.1	01 (Elbe)	34
6.1.1.2	05 (Bode)	35
6.1.1.3	08/12 (Zwickauer Mulde)	36
6.1.1.4	19 und 65 (Saale)	37
6.1.1.5	21 (Weiße Elster)	40
6.1.1.6	22 (Vereinigte Mulde)	40
6.1.1.7	23/24 (Schwarze Elster)	41
6.1.1.8	31 (Vereinigte Mulde)	43
6.1.1.9	33 (Neiße)	44
6.1.1.10	38 (Elbe)	45
6.1.1.11	35KL und 68KL (Elbe)	46
6.1.1.12	41 (Pleiße)	48
6.1.1.13	42 (Unstrut)	50
6.1.1.14	44 (Weiße Elster)	50
6.1.1.15	47 (Elbe)	52
6.1.1.16	49 (Saale/Weiße Elster)	53
6.1.1.17	60 (Weiße Elster/Saale)	54
6.1.1.18	64 (Helme)	55
6.1.1.19	67 (Saale)	56
6.1.2	Einzugsgebiet Donau, Isar und Inn	60
6.1.2.1	02 (Isar)	61
6.1.2.2	03KL und 63KL (Donau)	61
6.1.2.3	06 (Donau)	63
6.1.2.4	17KL	64
6.1.2.5	34KL (Isar)	65
6.1.2.6	39 (Inn)	66
6.1.2.7	46 (Isar)	67
6.1.3	Einzugsgebiet Main	68
6.1.3.1	04 und 20KL	68
6.1.4	Einzugsgebiet Oberrhein	72
6.1.4.1	18 und 32 (Oberrhein)	73
6.1.4.2	45 (Oberrhein)	75
6.1.4.3	40 (Oberrhein)	76
6.1.5	Einzugsgebiet Nieder- und Mittelrhein	78
6.1.5.1	43 (Mittelrhein)	78
6.1.5.2	48 (Niederrhein)	79
6.1.5.3	66 (Mittelrhein)	80

6.1.6 Einzugsgebiet Weser	83
6.1.6.1 07 und 16 (Eder/Oberlauf Weser)	83
6.1.6.2 62 (Unterlauf Weser)	85
6.2 Mineralogische und mikroskopische Charakterisierung der Schwerminerale	87
6.3 Korngrößen und Kornformen der Wertminerale	106
6.3.1 Korngrößenverteilungen der Wertminerale	106
6.3.2 Kornformen – Formfaktoren Kreisförmigkeit und Seitenverhältnisse	110
6.4 Ergebnisse der Aufbereitungsversuche an der RWTH	112
6.4.1 Probe 08	113
6.4.2 Probe 23/24	115
6.4.3 Probe 38	117
6.4.4 Probe 41	119
6.4.5 Probe 43	121
6.4.6 Probe 48	123
6.4.7 Probe 60	125
6.4.8 Probe 64	127
6.5 Bewertung der Lagerstätten	129
6.5.1 Gehalte an Schwermineralen	129
6.6 Aufbereitungsstrategien	134
6.6.1 Aufbereitungsschemata	134
6.6.2 Auslegung der Aufbereitungstechnik	137
6.7 Lagerstättenspezifische Aufbereitung	137
6.7.1 Lagerstätte 38	140
6.7.2 Lagerstätte 08	141
6.7.3 Lagerstätte 60	141
6.7.4 Lagerstätte 41	141
6.8 Ökonomische Bewertung	142
7 Zusammenfassung	147
8 Literatur	148
Anhang	157
Anlage 1: Beprobte Lagerstätten, Bundesland, Flusseinzugsgebiet	158
Anlage 2: Probeliste mit Kürzeln für Schliffe und Fraktionen	159
Anlage 3: QEMSCAN-Mineral-Datenbank	171

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Lage der Probenahmestandorte in Bezug zum geologischen Umfeld	16
Abb. 2:	Aufbereitungsanlage zur Gewinnung von Schwermineralen im Kieswerk 41	17
Abb. 3:	Aufbau der Probenahme mittels Sortierspirale im Kieswerk 23/24	19
Abb. 4:	Aufbau der Probenahme mittels Sortierspirale im Kieswerk 23/24	19
Abb. 5:	Versuchsaufbau der Reihenprobenahme im Kieswerk 08/12	20
Abb. 6:	Probenaufbereitung im Technikum des AMR (Institut für Aufbereitung mineralischer Rohstoffe – RWTH Aachen)	21
Abb. 7:	Probenaufbereitung mittels Schütteltisch (c) und Mozley-Scheider (d) im Technikum des AMR	22
Abb. 8:	Probenaufbereitung mittels Frantz-Magnetabscheider (e) und Korona-Walzenscheider (f) am Institut für Aufbereitung und Recycling der RWTH Aachen (IAR)	24
Abb. 9:	Flussdiagramm zur Aufbereitung der Rohkiesproben und der mittels Sortierspiralen (Wendelscheider) gewonnenen Reihenproben an der RWTH	25
Abb. 10:	Tests zur Anreicherung von Kassiterit aus der Probe 35 mit Mikrosetzherd, a) Mikrosetzherd mit Probematerial und Trennungserfolg, b) Gegenüberstellung von Ausgangsprobe, Konzentrat, Mittelgut und leichter Schwerfraktion (GEOS)	26
Abb. 11:	Anreicherungs-tests mit der Probe 08/12 auf a/b) Bandmagnetscheider, c) Frantz-Magnetscheider (Labor TU Bergakademie Freiberg), d) Resultate der Bandmagnetscheidung	26
Abb. 12:	Darstellung der Begriffszusammenhänge von Rohgut, Schwergut, Konzentraten und Fraktionen	30
Abb. 13:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 01	34
Abb. 14:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 05	35
Abb. 15:	Schwermineralzusammensetzung der Proben 08 und 12	36
Abb. 16:	Schwermineralzusammensetzungen der Proben 19 und 65	38
Abb. 17:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 21	40
Abb. 18:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 22	41
Abb. 19:	Schwermineralzusammensetzung der Proben 23 und 24	42
Abb. 20:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 31	43
Abb. 21:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 33	44
Abb. 22:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 38	46
Abb. 23:	Schwermineralzusammensetzung der Proben 35KL und 68KL	47
Abb. 24:	Schwermineralzusammensetzung der Stichprobe eines Vorkonzentrates aus dem Wendelscheider der Lagerstätte 41	49
Abb. 25:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 42	50
Abb. 26:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 44	51
Abb. 27:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 47	52
Abb. 28:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 49	53
Abb. 29:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 60 Beckensande (BS)	54
Abb. 30:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 64	55
Abb. 31:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 67	57
Abb. 32:	Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten im Einzugsbereich der Elbe	58

Abb. 33:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 02	61
Abb. 34:	Schwermineralzusammensetzungen der Proben 03KL und 63KL	62
Abb. 35:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 06	63
Abb. 36:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 17KL	64
Abb. 37:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 34KL	65
Abb. 38:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 39	66
Abb. 39:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 46	67
Abb. 40:	Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten in den Einzugsgebieten von Donau, Isar und Inn	69
Abb. 41:	Schwermineralzusammensetzung der Proben 04 und 20KL	70
Abb. 42:	Schwermineralzusammensetzung der beiden Kiessandlagerstätten am Main	72
Abb. 43:	Schwermineralzusammensetzungen der Proben 18 und 32	73
Abb. 44:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 45	75
Abb. 45:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 40	76
Abb. 46:	Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten im Einzugsgebiet des Oberrheins	77
Abb. 47:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 43	78
Abb. 48:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 48	80
Abb. 49:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 66	81
Abb. 50:	Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten in den Einzugsgebieten von Mittel- und Niederrhein	82
Abb. 51:	Schwermineralzusammensetzung der Proben 07 und 16	83
Abb. 52:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 62	85
Abb. 53:	Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten im Einzugsgebiet der Weser	86
Abb. 54:	a) Magnetit im Auflicht (43A_HF-A), b) teilweise martitisierter Magnetit im Auflicht (22_HF-A) mit hellgrauen Hämatitleisten	88
Abb. 55:	Verschiedene Umwandlungsstadien von Magnetit in Hämatit, a) Magnetit mit schwacher Martitisierung (16_HF-A_Mgt-Hem), b) idiomorphes Magnetitkorn wird pseudomorph von Hämatit verdrängt (35_HF-A_Mgt-Hem), c) völlig „zerfressenes“ Magnetitkorn (65_HF-A_Mgt-Hem), d) Pseudomorphose von Hämatit nach Magnetit mit Spuren von Magnetit im Korn (65_HF-A_Hem)	89
Abb. 56:	a) Hämatit im Auflicht (06_HF-A), b) dito im Auflicht (Nic-A)	89
Abb. 57:	Feinkristallines Hämatitaggregat im Auflicht (18_HF-A), b) dito im Auflicht (Nic-A) mit Anisotropieeffekten und roten Innenreflexen, c) teilweise martitisierter Magnetit (23_HF-A) mit d) sichtbaren roten Innenreflexen des Hämatits (Nic-A)	89
Abb. 58:	a) Chromit (Varietät Magnesiochromit) im Auflicht (07_HF-A), b) dito Chromit mit Titanitkorn im Auflicht (Nic-A), c) Chromit im Auflicht (43A_HF-A), d) Chromit mit Ilmenit im Auflicht (43A_HF-A)	90
Abb. 59:	a) Konzentrische Limonit/Fe-Hydroxid-Körner mit Ti-Oxid-Kernen in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen (04), a) Auflicht (Nic-A), b) dito im Auflicht (HF-A)	90
Abb. 60:	Verschiedene Limonit/Fe-Oxid/Hydroxid-Partikel im Auflicht bei gekreuzten Nicols, a) Pseudomorphosen nach framboidalem Pyrit (06), b) konzentrisches Limonitaggregat neben Ti-Oxid (07), c) Fe-Oxid-Partikel mit feinschuppiger Textur (04), d) Konzentrisches Limonit-Hämatit-Aggregat (65)	90

Abb. 61:	a) Ilmenit (Ilm) und Pseudoilmenit-Pseudorutil-Verwachsung (Psi/Psr) im Auflicht (05_HF-A), b) dito im Auflicht (Nic-A) – Pseudorutil mit typischen bräunlichen Innenreflexen	91
Abb. 62:	Verschiedene Erscheinungsformen und Verwachsungen des Ilmenits; a) poikilitische Ilmenitpartikel (06_HF-A) im Auflicht, b) Verwachsung von Ilmenit mit Apatit (43A_HF-A), c) Entmischungen von Ilmenit in Hämatit (06_HF-A), d) Ilmenit als Kern in framboidalem Pyrit (24E_HF-A)	92
Abb. 63:	Randliche Umwandlungen von Ilmenit in Titanit; a) Auflicht (65_HF-A), b) dito Auflicht (Nic-A), c) Randliche Umwandlung von Ilmenit in Titanit und Ti-Oxidphasen, Auflicht (43A_HF-A), d) dito im Auflicht (Nic-A)	92
Abb. 64:	Typische Erscheinungen von primärem und sekundärem (pseudomorphem) Rutil im Dünnschliff, a) im Auflicht (12_Nic-A), b) dito, im Auflicht kaum differenzierbar (HF-A)	94
Abb. 65:	Typisches Erscheinungsbild von Rutil mit unterschiedlichen mikroskopischen Verfahren, a) Auflicht (41I_Nic-A), b) dito im Durchlicht (HF-D), c) dito im Auflicht (HF-A)	94
Abb. 66:	Verschiedene Bildungen von Rutil, a) im Auflicht (07_Nic-A), b) dito im Auflicht mit typischen Innenreflexen (HF-A), c) nadliges Aggregat im Auflicht (47_Nic-A), d) zelliger Rutil mit braunen Innenreflexen im Auflicht (41_Nic-A)	95
Abb. 67:	Rutil und Anatas im a) Auflicht unter gekreuzten Nicols (41), b) dito im Auflicht/Hellfeld (Anatas etwas dunkler und bläulicher)	95
Abb. 68:	a) Gruppe von Zirkonen mit starkem Relief im Durchlicht (54_HF-D), b) dito mit typischen Interferenzfarben des Zirkons (Nic-D)	96
Abb. 69:	a) Metamikter Zirkon im Auflicht (47_Nic-A) mit feingranularem Gefüge, b) dito im Auflicht (HF-A) – Kristallstruktur wurde durch die Strahlung zerstört, c) partiell metamikter Zirkon mit braunen, geringer reflektierenden Metamiktisierungszone im Auflicht (41_Nic-A), d) dito im Auflicht (HF-A)	97
Abb. 70:	a) Gedrungener idiomorpher Zirkon mit Zonierung im Durchlicht (38_HF-D), b) dito im Durchlicht (Nic-D), c) idiomorpher farbloser langgestreckter Zirkon mit Wachstumszonierung im Auflicht (38_Nic-A), d) dito im Auflicht (HF-A)	97
Abb. 71:	a) Gruppe von Almandin betontem Granat im Durchlicht (02_HF-D), b) dito Granat mit erhöhter Reflektanz im Auflicht (HF-A)	98
Abb. 72:	Granat in verschiedenen Ausbildungen; a) durch Einschlüsse zoniertes idiomorphes Granatpartikel (34_HF-D), b) poikilitisches Granatpartikel (34_HF-D), c) Granatpartikel mit Ilmenit-Einschluss (34_HF-A), d) Granatpartikel mit Einschlüssen von Ilmenit-Rutil-Verwachsungen (67_HF-A)	98
Abb. 73:	a) Gruppe von unterschiedlich gefärbten Kassiteriten im Durchlicht (41G_HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito im Hellfeld (HF-A)	100
Abb. 74:	Kassiterit in verschiedenen Ausbildungen; a) nahezu klares Kassiteritpartikel mit Farbzonierung im Durchlicht (41G_HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) intensiv rot gefärbter Kassiterit (41G_HF-D), d) zonierter Kassiterit (41G_HF-D) mit orangebrauner Färbung	100
Abb. 75:	Erscheinungsbild von Apatit, a) im Auflicht/gekreuzte Nicols (38) neben Zirkon, b) dito im Auflicht/Hellfeld	101
Abb. 76:	Gruppe von Epidotkörnern in unterschiedlichen optischen Einstellungen als Vergleich; a) 48C_HF-D, b) dito HF-A, c) dito Nic-A, d) dito Nic-D mit auffälligen Interferenzfarben	101
Abb. 77:	a) Epidot mit typischer pistaziengrüner Färbung im Durchlicht (48C_HF-D), b) Epidot im Durchlicht (24C_HF-D), c) dito Epidot mit typischen Interferenzfarben im Durchlicht (Nic-D)	101

Abb. 78:	Topas in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen als Vergleich; a) 41I_HF-D, b) dito Nic-D, c) dito HF-A, d) dito Nic-A	102
Abb. 79:	a) Gruppe klarer Topaspartikel im Durchlicht (60F_HF-D), b) dito Topaspartikel im Durchlicht (Nic-D)	102
Abb. 80:	Sillimanitpartikel (38E) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A)	102
Abb. 81:	Sillimanitpartikel (24C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito im Durchlicht (Nic-D), d) dito im Auflicht (HF-A)	103
Abb. 82:	Andalusitpartikel im a) Durchlicht (38F_HF-D) und b) im Durchlicht (Nic-D) mit Interferenzfarben 1. Ordnung	103
Abb. 83:	a) Disthen im Durchlicht (18_HF-D), b) dito im Durchlicht (Nic-D). Sichtbar sind die gute, nahezu rechtwinklige Spaltbarkeit in alle drei Richtungen und anomale graugelbe-graublaue Interferenzfarben	104
Abb. 84:	a) Disthenkorn in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen (41I) im a) Durchlicht (HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito in Durchlicht (Nic-D), d) Auflicht (HF-A) – sichtbar die parallelen Spaltrisse längs der C-Achse	104
Abb. 85:	Pyroxenpartikel unterschiedlicher Zusammensetzungen mit blass- und olivgrünlichen Färbungen, a) 38B im Durchlicht (HF-D), b) dito mit polysynthetischer Verzwillingung im polarisierten Licht, c) Augitkristall mit Einschlüssen (43BPL) im Durchlicht (HF-D), d) dito im Durchlicht (Nic-D) mit fleckig blau-grünlichen Interferenzfarben 2. Ordnung	104
Abb. 86:	Staurolithpartikel (24C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito im Durchlicht (Nic-D), d) dito im Auflicht (HF-A)	105
Abb. 87:	Monazitpartikel (48C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito Auflicht (Nic-A), c) dito Auflicht (HL-A)	105
Abb. 88:	Monazitpartikel (08C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito Auflicht (Nic-A), c) dito Durchlicht (Nic-D) mit auffälligen Interferenzfarben, d) dito Auflicht (HL-A)	105
Abb. 89:	Gruppe von Turmalinkristallen in unterschiedlichen optischen Einstellungen (08C), a) Durchlicht (HF-D), b) dito Auflicht (Nic-A), c) dito Durchlicht (Nic-D), d) dito Auflicht (HF-A)	106
Abb. 90:	Verschiedene Pyrite im Auflicht/Hellfeld, a) Gruppe von zum Teil framboidalen Pyrit- und Markasitaggregaten (24E), b) oberflächlich oxidiertes Pyritframboidaggregat mit Anlauffarben (21), c) Pyritframboide mit partieller Umwandlung in Fe-Oxide (46)	106
Abb. 91:	Darstellung der mittleren Korngrößenverteilung der Fe-Oxide, Ilmenit-bürtigen Ti-Minerale und Granat in allen untersuchten Proben	107
Abb. 92:	Darstellung der mittleren Korngrößenverteilung von Zirkon, Rutil und Kassiterit in allen untersuchten Proben	107
Abb. 93:	Darstellung der Korngrößenverteilung von Kassiterit in den Proben der Lagerstätten 08, 38, 41 und 60	110
Abb. 94:	Beispiel für die Darstellung der mittleren Formfaktoren Kreisförmigkeit und Seitenverhältnis	111
Abb. 95:	Darstellung der mittleren Formfaktoren Kreisförmigkeit und Seitenverhältnis für alle untersuchten Proben für die Wertminerale (Skalen dimensionslos)	112

Abb. 96:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 08. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt	113
Abb. 97:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	114
Abb. 98:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 24. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt	115
Abb. 99:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	116
Abb. 100:	Schwermineralzusammensetzung der Probe 38	117
Abb. 101:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	118
Abb. 102:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Nobitz. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt	119
Abb. 103:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	120
Abb. 104:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 43. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt.	121
Abb. 105:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	122
Abb. 106:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen in Probe 48	123
Abb. 107:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	124
Abb. 108:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 60. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt	125
Abb. 109:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	126
Abb. 110:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 64. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt	127
Abb. 111:	Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen	128
Abb. 112:	Häufigkeitsverteilung der Schwermineralkonzentrationen (Anteile in der < 1 mm und Gesamtkorngrößenfraktion)	129
Abb. 113:	Generelles Fließschema zur Anreicherung von Kassiterit aus den Lagerstätten 08, 38, 41 und 60	135

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Probenlokationen nach Flüssen mit Auflistung der Probenart.	18
Tab. 2:	Übersicht über die magnetischen Suszeptibilitäten der betrachteten Schwerminerale	23
Tab. 3:	Beschriebene Schwerminerale (fett markierte Schwerminerale wurden als beibrechende Wertminerale bevorzugt betrachtet)	28
Tab. 4:	Beprobte Standorte im Einzugsbereich der Elbe und Bezug zu den rezenten Flusssystemen	33
Tab. 5:	Gegenüberstellung der Schwermineralzusammensetzung der Lagerstätten 19 und 65	38
Tab. 6:	Beprobte Standorte im Einzugsbereich von Donau, Isar und Inn und Bezug zu den rezenten Flusssystemen	60
Tab. 7:	Beprobte Standorte im Einzugsbereich des Mains	68
Tab. 8:	Beprobte Standorte im Einzugsbereich des Oberrheins	73
Tab. 9:	Beprobte Standorte im Einzugsbereich von Mittel- und Niederrhein	78
Tab. 10:	Beprobte Standorte im Einzugsbereich der Weser. Bezug zu den rezenten Flusssystemen	83
Tab. 11:	Lagerstätten-spezifische mittlere Korngrößen der Wertminerale (arithmetisches Mittel)	109
Tab. 12:	Faktoren zur Beschreibung der Kornformen – Kreisförmigkeit und Seitenverhältnisse	111
Tab. 13:	Abkürzungen zu magnetischen und elektrostatischen Parametern	113
Tab. 14:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 08 (bezogen auf Abbildung 97)	114
Tab. 15:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 24 (bezogen auf Abbildung 99)	116
Tab. 16:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen in der Probe 38 (bezogen auf Abbildung 101)	118
Tab. 17:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 41 (bezogen auf Abbildung 103)	120
Tab. 18:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 43 (bezogen auf Abbildung 105)	122
Tab. 19:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 48 (bezogen auf Abbildung 107)	124
Tab. 20:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 60 (bezogen auf Abbildung 109)	126
Tab. 21:	Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 64 (bezogen auf Abbildung 111)	128
Tab. 22:	Produktion an Kiesen und Sanden der untersuchten Lagerstätten, Anteile an Korngrößenfraktion < 1 mm und Schwergut (SG)	130
Tab. 23:	Konzentrationen der Wertminerale (SM) in der Korngrößenfraktion < 1 mm – bilanzierbare Proben (Rohgutmengen bekannt)	131
Tab. 24:	Konzentrationen der Wertminerale (SM) in der Korngrößenfraktion < 1 mm – nicht bilanzierbare Proben (Rohgutmengen nicht bekannt)	132
Tab. 25:	Theoretische Jahresproduktion an Wertmineralen aus den untersuchten Lagerstätten (Jahresmengen an < 0,5 t/a wurden nicht berücksichtigt)	133
Tab. 26:	Anzahl der notwendigen Spiralen bei gegebenem jährlichen Durchsatz	136
Tab. 27:	Geschätzte Anzahl der notwendigen Nassherde bei anfallendem Vorkonzentrat aus den Wendelscheidern	136
Tab. 28:	Verhalten der verschiedenen Schwerminerale bei der „scharfen“ Dichtentrennung	138

Tab. 29:	Lagerstätte 38 – Anreicherungs-faktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen (Norm. – Normierung auf 100 %)	138
Tab. 30:	Lagerstätte 08 – Anreicherungs-faktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen	139
Tab. 31:	Lagerstätte 60 – Anreicherungs-faktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen	140
Tab. 32:	Lagerstätte 41 – Anreicherungs-faktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen	142
Tab. 33:	Orientierende Kostenschätzung zur Gewinnung von Kassiterit aus den Lagerstätten 38, 08, 41 und 60	143
Tab. 34:	Schätzung der Investment- und Betriebskosten	144
Tab. 35:	Betriebsergebnisse ohne Investmentkosten von Bandmagnet- und Korona-Walzenscheider	145
Tab. 36:	Notwendige zu gewinnende jährliche Kassiteritmengen für ein kostendeckendes Betriebsergebnis	146
Tab. 37:	Notwendige Kassiteritkonzentration in der Fraktion < 1 mm bei den entsprechenden jährlichen Durchsätzen für ein kostendeckendes Betriebsergebnis	146

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) hat die Sicherung der Versorgung Deutschlands mit mineralischen und Energierohstoffen zur Aufgabe. Im Zuge der Nutzung einheimischer mineralischer Rohstoffe wurde die Nutzungsmöglichkeit von Wertmineralen (im engeren Sinne Schwerminerale) in Betracht gezogen, die aus Kies- und Sandlagerstätten Deutschlands beibrechend mitgewonnen werden könnten.

Die Studie beschäftigt sich mit der Auswahl, Beschaffung und Aufbereitung von Rohkiesproben aus Deutschland, der mineralogischen und chemischen Analyse sowie der wirtschaftlichen Bewertung der enthaltenen Schwerminerale, die als Wertminerale genutzt werden könnten.

Ziel der Studie ist es, die Möglichkeiten zur Aufbereitung und Nutzung von Schwermineralen in Deutschland zu untersuchen. Insgesamt umfasst das Projekt die Aufbereitung von schwermineralhaltigen Proben aus 40 Kieswerken deutschlandweit (PERSCHL 2018).

Die Probenahme und Aufbereitung der Rohkiesproben erfolgten durch die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH) mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR) im Zeitraum 07/2017 bis 05/2018. Die mineralogische und chemische Charakterisierung sowie die wirtschaftliche Bewertung der Schwerminerale wurden im Zeitraum 01/2019 bis 04/2021 durch die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH durchgeführt.

Bei Schwermineralen handelt es sich um Minerale mit einer spezifischen Dichte von $\geq 2,9 \text{ g/cm}^3$ (MANGE & MAURER 1992). Der akzessorische Anteil dieser Minerale in Ausgangsgesteinen liegt in der Regel bei maximal 1 % (MORTON 1985). Der Gehalt der Schwerminerale in Sedimenten wird neben der Mineralzusammensetzung des Ausgangsgesteins durch weitere Faktoren wie der chemischen Beständigkeit, der mechanischen Abrasion und der hydraulischen Sortierung bestimmt (MORTON 1985). Der Begriff „Wertminerale“ bezieht sich auf „Schwerminerale mit wirtschaftlicher Bedeutung“, bei denen es sich nach ELSNER (2013) um Ilmenit und Leukoxen, Rutil, Zirkon, Monazit und Xenotim, Disthen, Sillimanit

und Andalusit, Staurolith, Granat, Chromit, Magnetit, Kassiterit, Columbit-Tantalit sowie Wolframit und Scheelit handelt (PERSCHL 2018) (nähere Ausführungen finden sich im Abschnitt 5.1).

Der Fokus der Schwermineraluntersuchungen lag im Wesentlichen auf der beibrechenden Gewinnung von Magnetit, Ilmenit, Granat, Rutil, Zirkon und Kassiterit, wobei zu Lagerstätten mit erhöhten Kassiteritgehalten entsprechende Prognosen zur Gewinnung und wirtschaftlichen Betrachtung gezogen werden sollten.

2 Probenstandorte

Die Auswahl der Standorte erfolgte entlang der großen Flüsse in Deutschland, wobei eine gleichmäßige Verteilung gewährleistet werden sollte (Abb. 1). Eine Ausnahme bildet das Gebiet nördlich des Erzgebirges, da es bei der vorliegenden Studie nicht nur um den generellen Schwermetallgehalt in den Flüssen gehen sollte, sondern zudem ein spezieller Fokus auf Kassiterit (Zinnstein) lag.

Geologisch primär kommt Zinnstein in Deutschland in verwertbaren Mengen ausschließlich im

Erzgebirge vor, sodass der Bereich, in den das Erzgebirge entwässert, vermehrt beprobt wurde. Der Zinnstein ist hier hauptsächlich an die permokarbonischen Plutonite des Eibenstocker, Kirchnerger und Bergener Granits (Westerzgebirge), die Skarnlagerstätten im mittleren Erzgebirge (Tellerhäuser, Hämmerlein) und die Greisenlagerstätten im Bereich Altenberg/Zinnwald (Osterzgebirge) gebunden.

Für die Studie wurden Rohkies- und Reihenproben sowie Konzentrate aus der laufenden Schwermetallanreicherung aus den Kies- und Sandwerken untersucht.

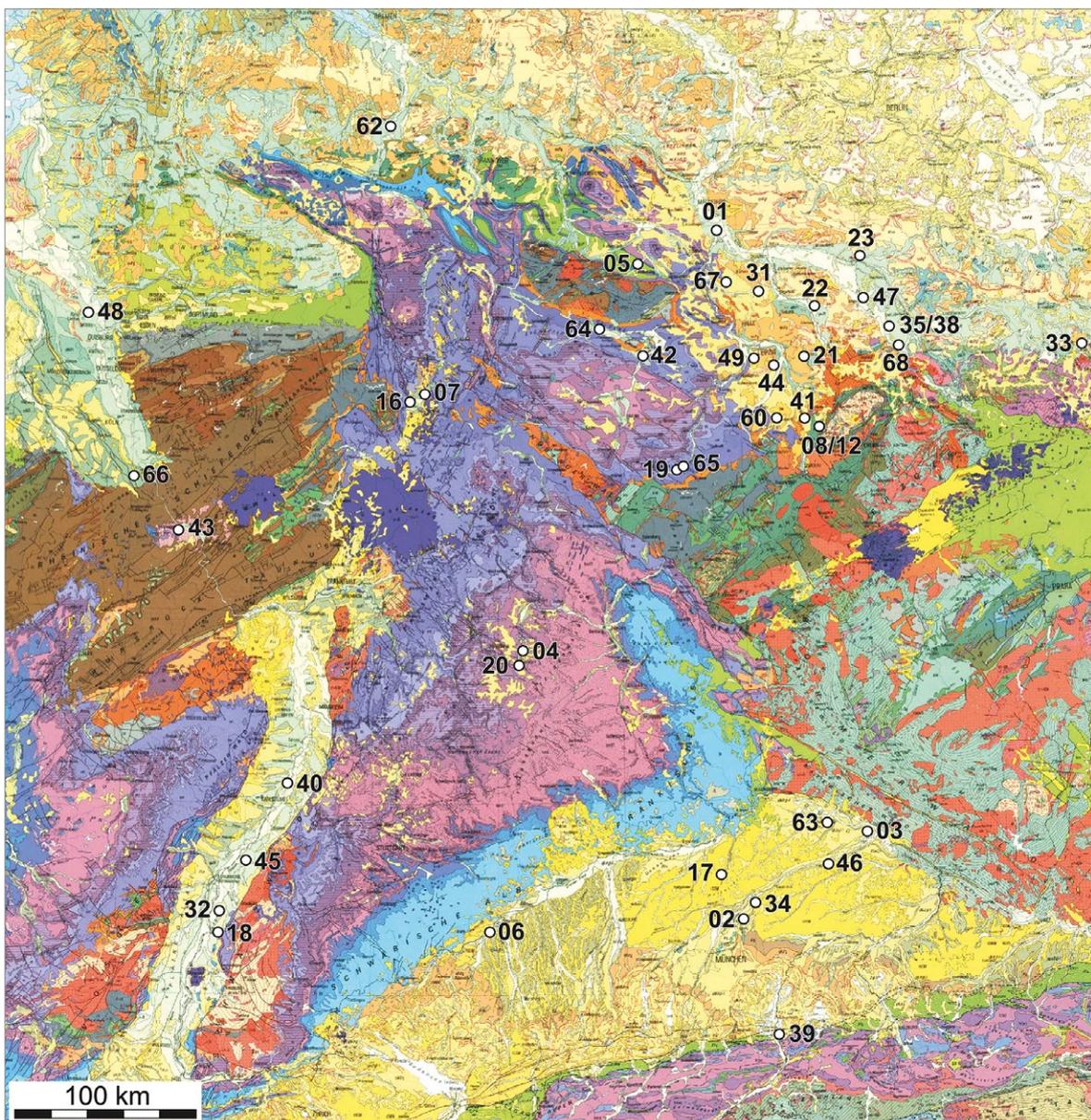


Abb. 1: Lage der Probennahmestandorte in Bezug zum geologischen Umfeld (GK1000, 1997)

3 Probenahme

Für die Studie wurden unterschiedliche Arten von Proben genommen. Insgesamt wurden 32 Rohkiesproben von der Vorhalde oder aus dem laufenden Betrieb aus 31 Kieswerken genommen, drei Proben aus Bohrungen für neue Abbauflächen aus zwei Kieswerken und 20 Proben aus drei Kieswerken, bei denen das Material vor Ort mit einem Wendelscheider aufkonzentriert wurde. Hinzu kommen sieben Vorkonzentrate von der Firma LöKa (KL), welche bereits Schwerminerale aus Kies- und Sandlagerstätten anreichert, die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

3.1 Probenahme Rohkiesproben

Die Rohkiesproben umfassten jeweils ca. 250 kg, die überwiegend aus dem laufenden Betrieb entnommen wurden.

Die Lagerstätte 60 ist aus zwei unterschiedlichen geologischen Einheiten aufgebaut, die zurzeit noch gemeinsam aufbereitet werden. Da die Möglichkeit der getrennten Aufbereitung langfristig jedoch besteht, wurden die beiden Einheiten Beckensande und Schmelzwasserkiese separat beprobt und aufbereitet.

3.2 Proben aus Bohrkernen

Zwei Unternehmen, die unter anderem Kieswerke an der Elbe betreiben, haben der Studie Material aus Erkundungsbohrungen zur Verfügung gestellt. Das Kieswerk Nr. 37/38 hat Probematerial für die Erkundung zweier neuer Felder geliefert. Von Kieswerk Nr. 47 wurde eine Probe geliefert, die repräsentativ aus drei Bohrungen zusammengestellt wurde.

3.3 Proben aus der Aufbereitungsanlage Kieswerk Nr. 41

Im Kieswerk Nr. 41 wurde Anfang 2018 die Aufbereitungsanlage um eine Anlage zur Gewinnung von Schwermineralen ergänzt. Die neue Anlage besteht aus sechs Doppelstart-Sortierspiralen, deren Schwergutaustrag auf eine Setzmaschine läuft, wo das schwere Material weiter aufkonzentriert werden soll (siehe Abb. 2).

3.4 Reihenproben mittels Wendelscheider

In zwei Kieswerken im Einzugsbereich der Schwarzen Elster (Nr. 23/24) und Zwickauer Mulde (Nr. 08/12) wurden Reihenproben über einen längeren Zeitraum mittels Schwergut-Wendelscheidern (Sortierspirale) vor Ort genommen. In zeitlichen Abständen über ein bis drei Tage wurden jeweils zehn repräsentative Proben über eine Teilentnahme aus dem laufenden Betrieb abgenommen.



Abb. 2: Aufbereitungsanlage zur Gewinnung von Schwermineralen im Kieswerk 41

a) Doppelstart-Sortierspiralen. b) Setzmaschine, Typ; 1 SM01

(Fotos/Quelle wurden vom Betreiber der Lagerstätte zur Verfügung gestellt; in PERSCHL 2018)

Tab. 1: Probenlokationen nach Flüssen mit Auflistung der Probenart.

**RK = Rohkies; RP = Reihenprobe; Konz.-SM = Konzentrate der Firma LöKa;
Konz.-RP = Konzentrate aus Reihenprobe im Kieswerk (aus PERSCHL 2018)**

Fluss/Region	Anzahl Kieswerke	Anzahl Proben	Probenart	Kieswerk-Nr.
Bode	1	1	RK	05
Donau	3	1	RK	06
		2	Konz.-SM	03KL, 63KL
Eder	2	2	RK	07, 16
Elbe	4	1	RK	01
		3	Bohrungen	37/38, 47
		2	Konz.-SM	35, 68
Helme	1	1	RK	64
Holledau	1	1	Konz.-SM	17KL
Inn	1	1	RK	39
Isar	3	2	RK	02, 46
		1	Konz.-SM	34KL
Main	2	1	RK	04
		1	Konz.-SM	20KL
Mulde (Zwickauer und Vereinigte Mulde)	3	2	RK	22, 31
		1	RP	08/12
Neiße/Lausitz	1	1	RK	33
Pleiße	1	1	Konz. RP	41
Rhein	7	7	RK	18, 32, 40, 43, 45, 48, 66
Saale	4	4	RK	19, 49, 65, 67
Schwarze Elster	1	2	RP	23/24
Unstrut	1	1	RK	42
Alter Elster/Saalelauf	1	2	RK	60
Weißer Elster	3	3	RK	21, 44, 49
Weser	1	1	RK	62

3.4.1 Kieswerk 23/24 – Schwarze Elster

Im Kieswerk 23/24 wurde eine Sortierspirale in den laufenden Betrieb für den Zeitraum der Probenahme eingebaut. In der Aufbereitungsanlage im Kieswerk befinden sich acht Doppel-Sortierspiralen zum Abscheiden von Leichtgut. Einer der 16 Aufgabeschläuche wurde für die Zeit der Beprobung auf die Schwergut-Sortierspirale geleitet (Abb. 3/4). Die Sortierspirale wies fünf Windungen und verstellbare Splitter am Auslass auf.

Die Probenahme erfolgte über drei Tage, wobei die Gewinnungs- und die Aufbereitungsanlage im Kieswerk nachmittags an zwei Tagen für jeweils ca. fünf Stunden ausgeschaltet war. Das Abziehen des Schwerguts erfolgte alle 30 Minuten für fünf Minuten. Zudem wurden verschiedene Extraproben genommen, an allen drei Tagen wurde das Schwergut für eine halbe Stunde am Stück entnommen und es wurde eine Probe von der Aufgabe auf die Spirale genommen (PERSCHL 2018).



Abb. 3: Aufbau der Probenahme mittels Sortierspirale im Kieswerk 23/24

a) Anlage mit Leichtgut-Abscheidern und zusätzlich temporär eingebauter Schwergut-Sortierspirale (Fotos/Quelle wurden vom Betreiber der Lagerstätte zur Verfügung gestellt; in PERSCHL 2018)

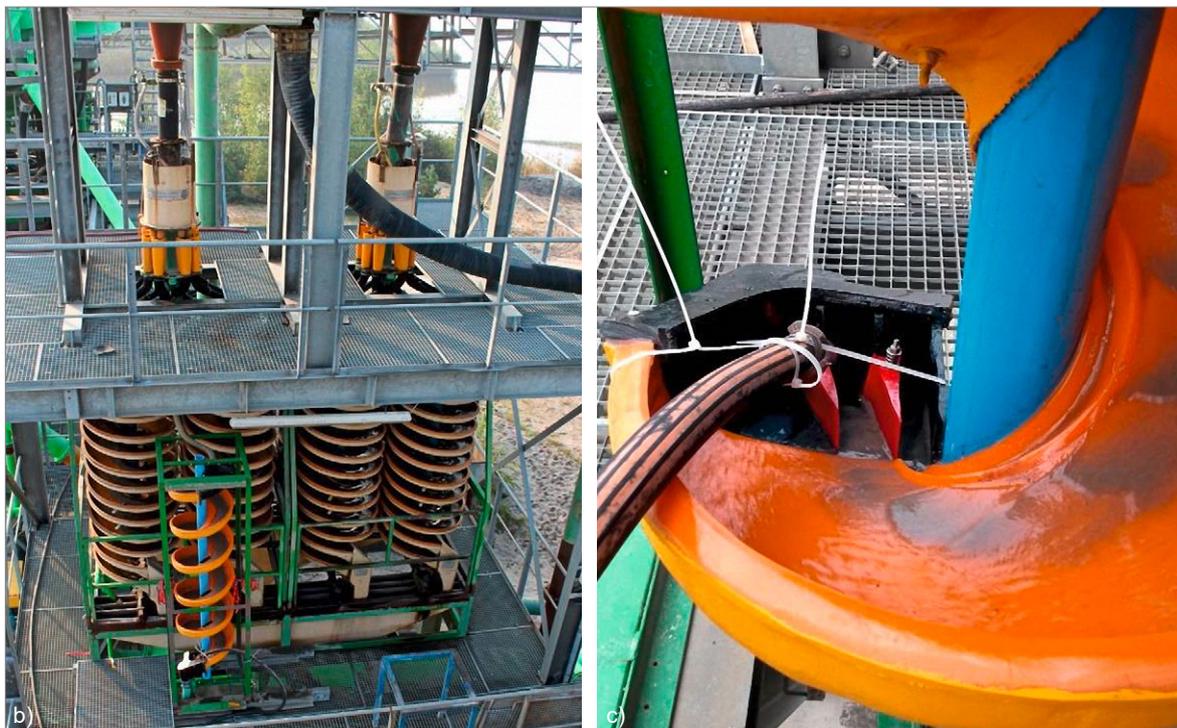


Abb. 4: Aufbau der Probenahme mittels Sortierspirale im Kieswerk 23/24

b) Aufgabe auf Sortierspiralen. c) Auslass Schwergut-Sortierspirale mit verstellbaren Splintern (Fotos/Quelle wurden vom Betreiber der Lagerstätte zur Verfügung gestellt; in PERSCHL 2018)

3.4.2 Kieswerk 08/12 – Zwickauer Mulde

Im Kieswerk 08/12 konnte keine Sortierspirale in die Aufbereitungsanlage eingebaut werden. Da das Material $< 1\text{ mm}$ in diesem Kieswerk überwiegend auf eine Halde gebracht wird, wurde eine Versuchsanlage auf dem Gelände aufgebaut und die Halde an zehn Stellen beprobt. Die erste Probe umfasste circa 360 l, was bei einer Schüttdichte von $1,8\text{ t/m}^3$ circa 650 kg entspricht, die folgenden neun Proben umfassten circa 180 l, was circa 320 kg pro Probe entspricht. Der Versuchsaufbau (Abb. 5) bestand aus einem Bunker, der oberhalb einer Vibrationsförderrinne installiert war. Mittels dieser Rinne wurde das Material gleichmäßig in eine Pumpe gegeben, über die die Sortierspirale

beschickt wurde. Die Spirale mit fünf Windungen hatte drei Auslässe, der innere mit dem Schwergut wurde aufgefangen, der Rest wurde direkt abgelaassen (PERSCHL 2018).



Abb. 5: Versuchsaufbau der Reihenprobenahme im Kieswerk 08/12

a) Gesamter Aufbau bestehend aus Bunker, Vibrationsförderrinne, Pumpe und Sortierspirale. b) Vibrationsförderrinne, über die Material in die Pumpe gegeben wird, und Austräge der Sortierspirale. c) Schwergutfahne in der Sortierspirale (Fotos: PERSCHL 2018)

4 Aufbereitung im Technikum

4.1 Klassierung und Dichtentrennung

4.1.1 Rohkiesproben

Die Probenaufbereitung erfolgte im Technikum des Instituts für Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR) der RWTH Aachen. Das Schema zu den einzelnen Aufbereitungsschritten wird in Abbildung 9 dargestellt.

Nach der Massebestimmung und der Bestimmung der Feuchte des Rohkieses wurde das Material zunächst mit einem Kreisschwingsieb bei 1 mm gesiebt (Abb. 6a/b). Zum Teil musste das Material schon vor der Aufgabe auf das Sieb geteilt werden, wenn die Mengen die 250 kg um ein Mehrfaches überstiegen. Der Sand wurde anschließend getrocknet, das Überkorn wurde verworfen.

Repräsentative Rohkiesproben sowie vereinzelte Proben vom Überkorn wurden entnommen. Das getrocknete Material wurde mit einem Riffelteiler auf 5–12 kg runtergeteilt und mit Hilfe eines Schüttelherds aufkonzentriert. Eine gleichgroße Probenmenge wurde als Rückstellprobe verwahrt. Als Schütteltisch (Nassherd) kam ein rechteckiger (1,085 x 2,646 m) Schwingherd der Firma Holman-Wilfley Ltd. zum Einsatz, bei dem das aufgegebene Material in Schwer-, Mittel- und

Leichtgut getrennt wird (Abb. 7c). Dabei bewegt sich das Material über den sowohl in Längs- als auch in Querrichtung geneigten Tisch, der in Längsrichtung mit Rillen versehen ist und in der Querrichtung mit Wasser beschickt wird. Das Schwergut wurde zur weiteren Aufkonzentrierung anschließend nochmals auf den Schüttelherd oder auf den Mozley-Scheider (RICHARD MOZLEY LABORATORY MINERAL SEPARATOR von RICHARD MOZLEY LTD.) gegeben, je nach Probenmenge und Sortiergrad (Abb. 7d). Das Mittelgut wurde verwahrt, das Leichtgut abgeschwemmt. Die so gewonnenen Schwermineralkonzentrate wurden für eine chemische Voransprache mit einem portablen RFA-Messgerät (Niton® XL 3t der Firma ThermoFisher SCIENTIFIC) analysiert. Anhand der Ergebnisse der Messungen wurde entschieden, welche Proben weiter aufbereitet werden. Dabei wurden vor allem die Elemente Fe, Ti, Sn und Zr betrachtet.

4.1.2 Reihenproben + Kieswerk 41

Mit den Reihenproben, die mittels Sortierspiralen vor Ort genommen wurden, wurde ähnlich verfahren (siehe Abb. 7). Da das Material bei der Aufbereitung im Kieswerk schon bei 1 mm abgesiebt wurde und aufkonzentriert vorlag, genügte hier ein Durchgang auf dem Schüttelherd, um Schwermineralkonzentrate herzustellen. Die nachfolgenden Aufbereitungsschritte waren dann identisch zu denen der Rohkiesproben. Jedoch wurden nur

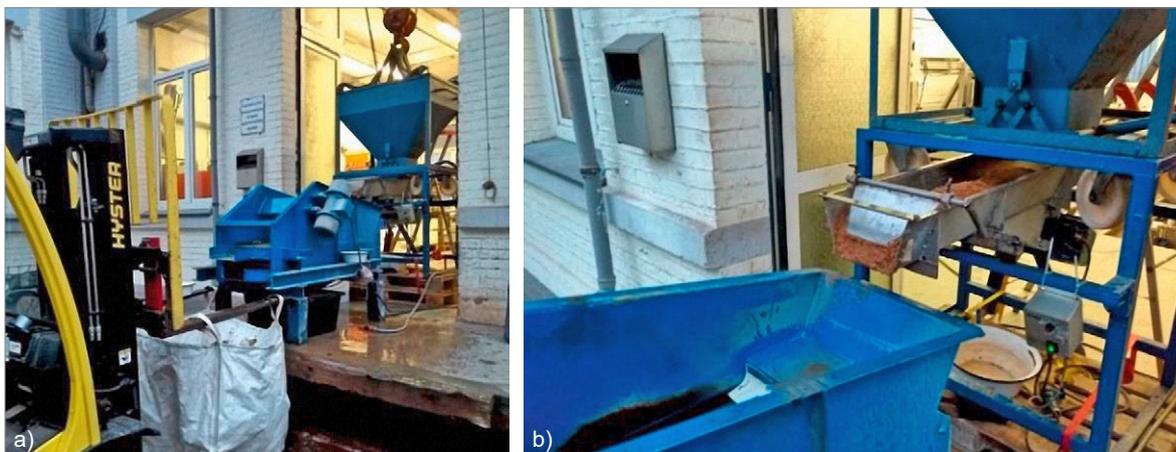


Abb. 6: Probenaufbereitung im Technikum des AMR (Institut für Aufbereitung mineralischer Rohstoffe – RWTH Aachen)
 a) Siebmaschine mit Bunker, Vibrorinne und Big Bag für Überkorn.
 b) Siebaufgabe mittels Bunker und Vibrorinne (Fotos: PERSCHL 2018)



Abb. 7: Probenaufbereitung mittels Schütteltisch (c) und Mozley-Scheider (d) im Technikum des AMR (Fotos: PERSCHL 2018)

ausgewählte Proben weiterverarbeitet, drei Proben aus dem Kieswerk 23/24 und fünf Proben aus dem Kieswerk 08/12. Die schon durch Wendelscheider und Setzherd angereicherten Proben aus dem Kieswerk 41 wurden auf die gleiche Weise aufbereitet wie die Reihenproben.

4.1.3 Proben Firma LöKa

Die sieben Konzentrate aus der Schwermineralgewinnung der Firma LöKa wurden mittels eines speziellen Nadelfilzes und scharfer Abtrennung auf einem Schütteltisch gewonnen. Das der Studie zur Verfügung gestellte Material ist der zweite Austrag bzw. das Mittelgut des Schütteltisches. Der erste Austrag (Schwergut) enthält überwiegend Edelmetalle und im dritten Austrag (Leichtgut) befinden sich überwiegend leichte Minerale wie Quarz.

4.2 Magnetische Separation

Das Schwergut wurde mit der Zielstellung, möglichst hochkonzentrierte nahezu monominerale Schwermineralkonzentrate zu erhalten,

mittels Magnetscheidung und elektrostatischer Trennung weiter zerlegt.

Magnetische Separation ist möglich aufgrund der magnetischen Eigenschaften eines Materials, das durch ein magnetisches Feld beeinflusst werden kann. Das Verhalten wird durch die magnetische Suszeptibilität (χ) und die relative magnetische Permeabilität (μ_r) beschrieben und erlaubt die Einteilung in:

Stoffe mit $\mu_r < 1$ bzw. $\chi < 0$ – diamagnetisch: Material schwächt ein angelegtes Magnetfeld geringfügig.

Stoffe mit $\mu_r > 1$ bzw. $\chi > 0$ – paramagnetisch: Material verstärkt ein angelegtes Magnetfeld geringfügig.

Stoffe mit $\mu_r \gg 1$ bzw. $\chi \gg 0$ – ferromagnetisch: Material verstärkt ein angelegtes Magnetfeld erheblich.

Die magnetische Suszeptibilität χ eines Materials beschreibt dessen Magnetisierbarkeit in einem extern angelegten magnetischen Feld. In Tabelle 2

Tab. 2: Übersicht über die magnetischen Suszeptibilitäten der betrachteten Schwerminerale (aus RÖSLER & LANGE 1975)

Magnetische Eigenschaften	Intensität	Magnetische Suszeptibilität verschiedener Minerale	
	$\chi \cdot 10^{-6}$	$\chi \cdot 10^{-6}$	Mineral
Ferromagnetisch (fm)	Stark > 1500	80.000 ... 20.000	Magnetit
Paramagnetisch (pm)	Mittel 300 ... 50	271 ... 113	Ilmenit
		124 ... 50	Almandin
		125 ... 53	Chromit
	Schwach 100 ... 10	120 ... 30	Amphibole
		130 ... 26	Pyroxene
		47 ... 13	Grossular
		31 ... 22	Turmalin (schw.-braun)
		24	Epidot
		(22 ... 1)	Titanit
		2	Rutil (schw.-braun)
Sehr schwach < 10	Sehr schwach < 10	0,73 ... -0,17	Zirkon
			Pyrit
			Rutil (rötlich)
			Kassiterit
			Topas
			Apatit

werden die magnetischen Eigenschaften der betrachteten Schwerminerale angegeben.

Den ausgewählten Proben wurde zunächst mit einem Handmagneten die ferromagnetische Fraktion entzogen, da diese die folgenden magnetischen Separierungsprozesse stört. In der ferromagnetischen Fraktion wird gewöhnlich Magnetit, aber auch zum Teil Ilmenit erfasst. Die ferromagnetische Fraktion wird im Folgenden mit dem Kürzel „fm“ bezeichnet.

Die weitere Auftrennung erfolgte nach den para- und diamagnetischen Eigenschaften durch einen Frantz-Magnetscheider. Der Frantz-Magnetscheider stellt einen starken Elektromagneten dar, der durch Änderung der Stromstärke unterschiedlich starke Magnetfeldstärken zulässt. Die Angaben zur angelegten Magnetfeldstärke erfolgen beim Frantz-Magnetscheider in Form der geräteeigenen Stromstärke in Ampere (A).

Es wurden Ampere-Schritte in Abhängigkeit vom Probenmaterial gewählt. In der Regel wurde in drei bis vier Schritten bis zu > 1 A abgetrennt. Die in der magnetischen Aufbereitung angegebenen Informationen belaufen sich deshalb auf Angaben im Bereich < 0,1 bis 1,0 A und > 1 A. Die zu betrachtenden Wertminerale Ilmenit und Granat sind typische paramagnetische Schwerminerale und können mittels Magnetscheidung abgetrennt werden. Die paramagnetischen Fraktionen (pm) sind in den folgenden Beschreibungen mit dem Kürzel/Nr. der Lagerstätte und der eingesetzten Stromstärke (A) am Frantz-Magnetscheider gekennzeichnet. Bei der Auswertung der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Stromstärke mit Trennung von paramagnetischer und diamagnetischer Fraktion bei 1 A nicht ausreichte. Infolgedessen konnte die vollständige Trennung in pm und dm nur unvollständig durchgeführt werden.



Abb. 8: Probenaufbereitung mittels Frantz-Magnetabscheider (e) und Korona-Walzenseider (f) am Institut für Aufbereitung und Recycling der RWTH Aachen (IAR); (Fotos: PERSCHL 2018)

4.3 Elektrostatische Trennung

Minerale, die bei einer Stromstärke von > 1 A nicht paramagnetisch sind, wurden nach PERSCHL (2018) der diamagnetischen Fraktion (dm) zugesprochen. Eine weitere Auftrennung der diamagnetischen Minerale erfolgte durch elektrostatische Sortierung, z. B. mittels Korona-Walzenseider. Bei der elektrostatischen Sortierung werden die unterschiedlichen Eigenschaften der Minerale genutzt, ob diese elektrisch leitend (L), halbleitend (HL) oder nichtleitend (NL) sind. Bestimmte Minerale werden erst bei höherer Temperatur elektrisch leitend (z. B. Rutil). So besteht die Möglichkeit, die elektrostatische Sortierung in L, HL oder NL zusätzlich auch bei erhöhten Temperaturen (80–90 °C) zu nutzen. Die L-Fraktion wird danach abgekühlt und nochmals elektrostatisch sortiert. Somit ist es möglich, Rutil und Kassiterit bei höheren Temperaturen (L) von Zirkon (NL) abzutrennen. Bei niedrigen Temperaturen wird Rutil zum Nichtleiter (2NL) und kann von Kassiterit als Leiter (2L) getrennt werden.

Die Kürzel der Probenbezeichnungen HL, NL und L bedeuten, dass das Material erwärmt zur Sortierung aufgegeben wurde. Anschließend wurde die Leiterfraktion (L) ein zweites Mal kalt aufgegeben und in 2L, 2HL und 2NL aufgetrennt.

Das vollständige Aufbereitungsschema ist in Abbildung 9 dargestellt.

4.4 Ergänzende Tests zur vereinfachten Herstellung von Schwerminerkonzentraten

Um in Hinsicht auf die spätere Anlagenauslegung die Fragestellung beantworten zu können, ob mit dem zur Verfügung gestellten Material im industriellen Maßstab Wertmineral-Konzentrate hergestellt werden können, wurden ergänzende Tests in vereinfachter Weise durchgeführt.

Diese Tests wurden mit Mikrosetzherd, Mikroflotationszelle sowie Frantz-Magnetscheider und Bandmagnetscheider realisiert. Dazu wurde Material aus den Rückstellproben der Kieswerke 08/12 und 41 sowie dem Konzentrat 35 verwendet, welches mittels hydrodynamischer Verfahren und Magnetscheidung auf einem Bandmagnetscheider mit höherem Durchsatz verarbeitet wurde.

Die Labortests mit eigens gebautem Mikrosetzherd (Einsatz von 10 g Probematerial bei Korngröße 60–200 μm , Abbildung 10) und Mikroflotationszelle (20 cm^3) ergaben zwar gute weitere Anreicherungsresultate (Zirkonkonzentrate von ca. 80 Masse-% und Kassiteritkonzentrate von 70 Masse-%), jedoch auch die Information, dass mit den verfügbaren geringen Mengen eine Konzentrierung der Mineralfraktionen auf > 95 Masse-% nicht möglich erscheint.

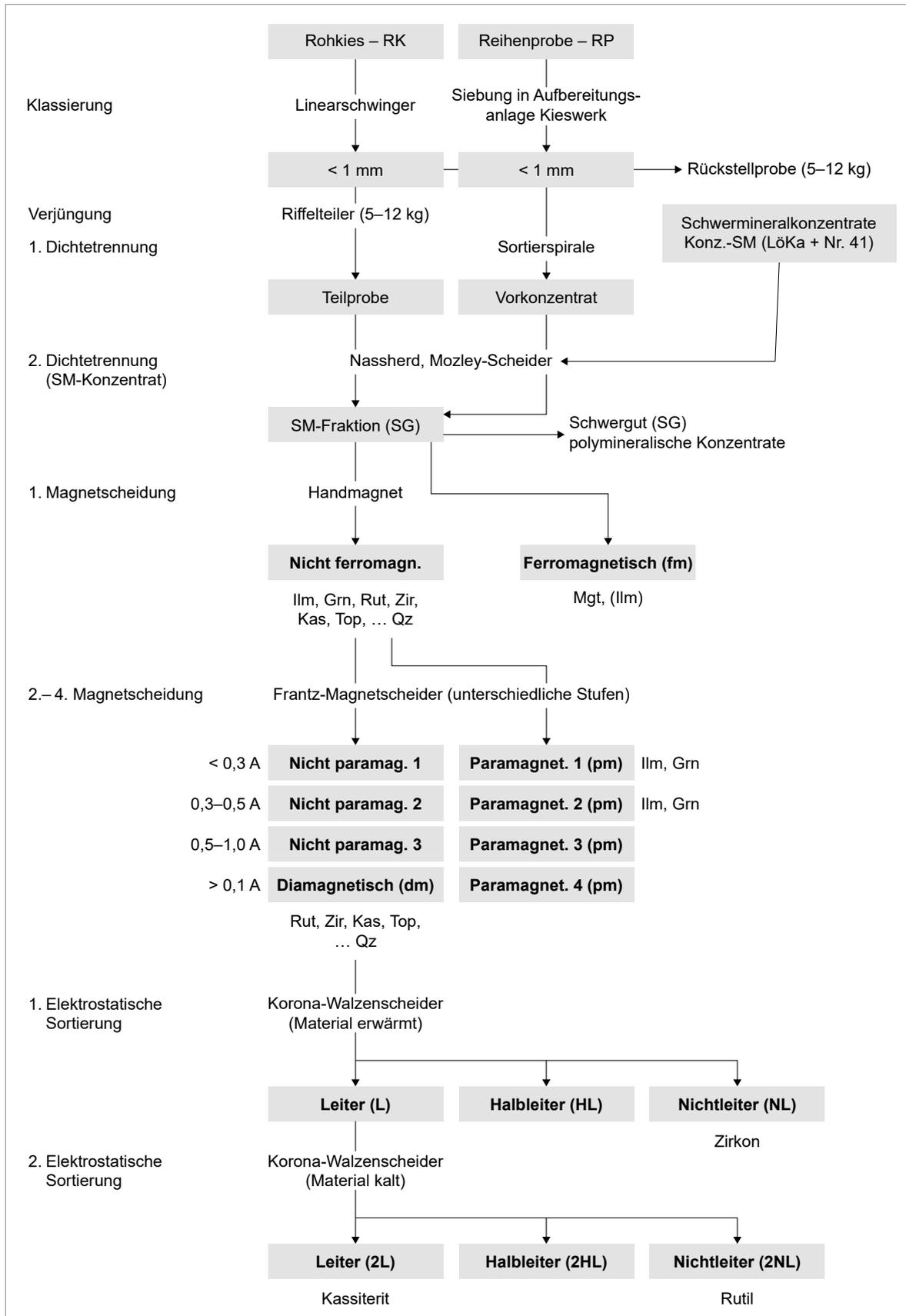


Abb. 9: Flussdiagramm zur Aufbereitung der Rohkiesproben und der mittels Sortierspiralen (Wendelscheider) gewonnenen Reihenproben an der RWTH (verändert nach PERSCHL 2018)

Dies liegt begründet in:

- mikroskopischen Verwachsungen von Magnetit und Ilmenit im Granat, die eine Trennung durch physikalische Verfahren nur bedingt zulassen,
- Übergängen von Ilmenit zu Leukoxen bzw. zu Rutil und Anatas, welche eine exakte magnetische Trennung der Ti-Phasen nicht zulassen,
- einer Vielzahl weiterer Begleit-Schwerminerale, die ähnliche physikalische Eigenschaften aufwiesen, wie die vom AG angegebenen Wertminerale.

Die Anreicherung der vereinigten Fraktionen 08/12 ergaben auf dem Bandmagnetscheider bei 1,1 Tesla eindeutigere Trennergebnisse als in PERSCHL (2018) (Abb. 11). Ilmenit, Turmalin, Staurolith und Monazit konnten durch den Bandmagnetscheider quantitativ abgetrennt werden. Voraussetzung dafür war jedoch die vorherige enge Klassierung. Durch die Klassierung konnten 80 % des Topases aus der Rutil, Zirkon und Kassiterit enthaltenden diamagnetischen Fraktion bereits im Vorfeld entfernt werden.



Abb. 10: Tests zur Anreicherung von Kassiterit aus der Probe 35 mit Mikrosetzherd, a) Mikrosetzherd mit Probematerial und Trennungserfolg, b) Gegenüberstellung von Ausgangsprobe, Konzentrat, Mittelgut und leichter Schwerfraktion (GEOS)



Abb. 11: Anreicherungstests mit der Probe 08/12 auf a/b) Bandmagnetscheider, c) Frantz-Magnetscheider (Labor TU Bergakademie Freiberg), d) Resultate der Bandmagnetscheidung

Die Testergebnisse wurden durch orientierende Messungen mit einer Handheld-RFA Titan S1 (BRUKER) und optische Mikroskopie ermittelt.

Generell wurde auf der Grundlage der ergänzenden Labortests die Aussage erzielt, dass es möglich ist, hochkonzentrierte mineralspezifische Fraktionen aus dem Material der betrachteten Lagerstätten zu erzeugen. Die Fortführung der Tests unter dem Aspekt der Erhöhung der Ausbringraten sowie die begleitende Analytik lagen jedoch nicht im vordergründigen Fokus der vorliegenden Studie.

5 Probenpräparation und Analytik

5.1 Begriffe/Bezeichnungen

Nachfolgend werden die Zuordnungen definiert, die im weiteren Text Verwendung finden.

5.1.1 Schwerminerale

Als Schwerminerale werden laut Definition Minerale bezeichnet, die eine höhere Dichte als Quarz mit $2,65 \text{ g/cm}^3$ aufweisen. In der Praxis werden jedoch oft nur Minerale mit einer Dichte von

$> 2,89 \text{ g/cm}^3$ zu den Schwermineralen gezählt. Der Grund dafür liegt in der Anwendung der Labormethode zur Trennung von Schwer- und Leichtmineralen mittels Dichteflüssigkeiten wie z. B. Bromoform, in welcher die „leichten“ Minerale $< 2,89 \text{ g/cm}^3$ aufschwimmen und die „schweren“ in der Flüssigkeit absinken.

Nach ELSNER (2006) existiert zusätzlich die Unterscheidung nach der Dichte in Bezug auf die Verwertbarkeit von Schwermineralen:

- schwere Schwerminerale (v. a. Gold, Platin, Kassiterit) mit einer Dichte von 6,8 bis 21 g/cm^3 ,

Tab. 3: Beschriebene Schwerminerale (fett markierte Schwerminerale wurden als beibrechende Wertminerale bevorzugt betrachtet)

Schwermineral	Chemische Zusammensetzung	Dichte [g/cm^3]
Magnetit	Fe_3O_4	5,2
Hämatit	Fe_2O_3	5,2–5,3
Chromit	$\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$	4,1–5,1
Ilmenit	FeTiO_3	4,7–4,8
„Leukoxen“	$\text{Fe}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$	3,5
Rutil/Anatas/Brookit	TiO_2	4,2
Titanit	$\text{CaTi}[\text{O} \text{SiO}_4]$	3,5–3,6
Granat	Fe, Mg, Ca-Silikat	3,5–4,1
Zirkon	ZrSiO_4	3,9–4,8
Kassiterit	SnO_2	6,7–7,1
Topas	$\text{Al}_2[(\text{F},\text{OH})_2 \text{SiO}_4]$	3,5–3,6
Turmalin (Schörl)	$\text{NaFe}^{2+}_3\text{Al}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)(\text{OH})_3(\text{OH})$	3,2
Andalusit	$\text{Al}_2[\text{O} \text{SiO}_4]$	3,1–3,2
Sillimanit	$\text{Al}_2[\text{O} \text{SiO}_4]$	3,2–3,3
Disthen	$\text{Al}_2[\text{O} \text{SiO}_4]$	3,6–3,7
Staurolith	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Zn})_2 [(\text{OH})/\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{23}]$	3,6–3,8
Epidot	$\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}) \text{Al}_2[\text{O} \text{OH} \text{SiO}_4 \text{Si}_2\text{O}_7]$	3,2–3,5
Zoisit	$\text{Ca}_2\text{Al}_3[\text{O} \text{OH} \text{SiO}_4 \text{Si}_2\text{O}_7]$	3,1–3,4
Hornblenden	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_{2-3} (\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5 [(\text{OH}, \text{F})_2 / (\text{Si}, \text{Al})_2\text{Si}_6\text{O}_{22}]$	3,1–3,2
Diopsid	$\text{CaMg} [\text{Si}_2\text{O}_6]$	3,2
Monazit	$\text{Ce}[\text{PO}_4]$	4,6–5,7
Pyrit/Markasit	FeS_2	5,0–5,2
Baryt	BaSO_4	4,5
Gold	Au	16–19

Datenzusammenstellung aus: <https://de.wikipedia.org/wiki/>

- leichte Schwerminerale (v. a. Ilmenit, Rutil, Zirkon, Monazit) mit einer Dichte von 4,2 bis 6,7 g/cm³,
- Edelsteine (v. a. Diamant) mit einer Dichte von 2,9 bis 4,1 g/cm³.
- In der Industrie erfolgt eine weitere Einteilung der Schwerminerale, ebenfalls nach der Dichte, aber nutzungsabhängig:
 - mit einer Dichte < 3,7 g/cm³ die leichten (nicht nutzbaren) Schwerminerale (Sillimanit, Epidot, Hornblende, Andalusit, Turmalin, Disthen etc.),
 - mit einer Dichte > 3,7 g/cm³ die schweren (nutzbaren) Schwerminerale (Ilmenit, Leukoxen, Granat, Rutil, Zirkon, Monazit, Xenotim etc.) (aus ELSNER 2006).

Die Dichten der im Rahmen vorliegender Studie in die nähere Betrachtung einbezogenen Schwerminerale sind in Tabelle 3 aufgeführt. Fett hervorgehobene Minerale waren als beibrechende Wertminerale bevorzugt zu betrachten.

Die Dichten der Umwandlungsprodukte des Ilmenits können stark von der des unverwitterten Ilmenits abweichen. Die Ausgangsdichte ist in Tabelle 3 mit 4,7 g/cm³ angegeben. Durch den Fe-Verlust während der Verwitterung/Umwandlung nimmt die Dichte der Körner bis auf 3,5 g/cm³ (Leukoxen) ab, was auf eine zunehmende Porosität schließen lässt, gleichzeitig nimmt der TiO₂-Gehalt zu (ELSNER 2010). Dabei ändern sich auch die physikalischen Eigenschaften, was letztendlich Auswirkungen auf das Trennverhalten der Ilmenit-bürtigen Verwitterungsprodukte im Magnetscheider hat.

5.1.2 Leichtminerale

Als Leichtminerale werden die durch QEMSCAN analysierten Phasen Quarz, Feldspat, Glimmer, Karbonate, Talk und Sekundärminerale wie Kaolinit und Gibbsit repräsentiert.

5.1.3 Schwergut (SG)

Unter dem Begriff Schwergut (SG) ist in den nachfolgenden Betrachtungen das durch Dichtesortierung (PERSCHL 2018) erhaltene Vorkonzentrat definiert, bevor es der weiteren Aufbereitung durch magnetische und elektrostatische Sortie-

rung zugeführt wurde. Dieses Schwergut enthielt zum Teil noch erhebliche Mengen an Leichtmineralen (siehe Anlage 3).

5.1.4 Schwermineralkonzentrat (SK)

Ist in vorliegender Studie die Rede von Schwermineralkonzentrat, so ist darunter der Anteil zu verstehen, der anhand der Differenzbildung aus dem Schwergut abzüglich der mineralogisch per QEMSCAN (siehe Anlage 3) ermittelten Anteile an Leichtmineralen gebildet wurde.

5.1.5 Schwermineralfraktionen (SF)

Die Schwermineralfraktionen wurden, wie in PERSCHL (2018) beschrieben, durch magnetische und elektrostatische Sortierung aus dem Schwergut erzeugt. Da die Leichtminerale nicht konsequent abgetrennt wurden (siehe Anlage 3), war es aus der Sicht des Autors notwendig, die prozentualen Angaben auf die Anteile der einzelnen Fraktionen am Schwermineralkonzentrat zu beziehen.

Angaben auf die in den fraktionierten Proben enthaltenen Schwerminerale beziehen sich auf die Probemenge Schwergut abzüglich der mittels QEMSCAN ermittelten Anteile an Leichtmineralen.

5.1.6 Polymineralische Konzentrate

Mit der Bezeichnung polymineralische Konzentrate sind die direkt aus dem Schwergut gewonnenen Proben zu verstehen. Nach der Probenübernahme wurde festgestellt, dass die Proben einiger Standorte bereits vollständig fraktioniert vorlagen und als „monomineralische“ Konzentrate bezeichnet wurden. In diesen Fällen wurde die Zusammensetzung der polymineralischen Ausgangskonzentrate über die massenmäßigen Anteile zurückgerechnet.

5.1.7 Monomineralische Konzentrate/Fraktionen

Monomineralische Konzentrate, auch als Fraktionen bezeichnet, sollten per definitionem aus nur einer Mineralsorte bestehen. Wie die Ausführungen in PERSCHL (2018) und auch die durch-

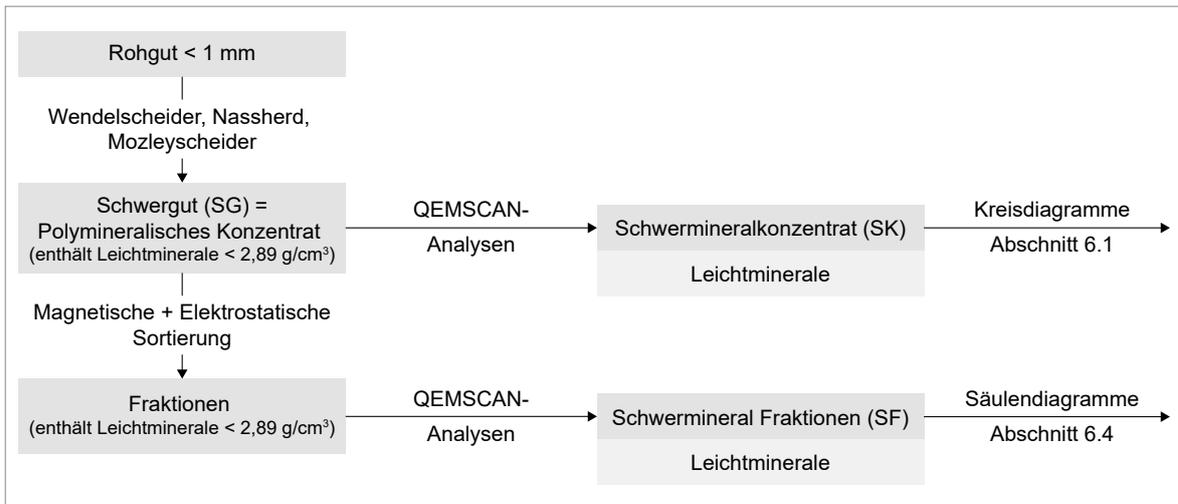


Abb. 12: Darstellung der Begriffszusammenhänge von Rohgut, Schwergut, Konzentraten und Fraktionen

geführten Tests zeigten, war es nicht gelungen, reine monomineralische Konzentrate herzustellen. Um die damals gewählte Probenbezeichnung konsistent fortzuführen, wurde die im Vorprojekt (PERSCHL 2018) gewählte Zuordnung übernommen.

Eine Übersicht über die beschriebenen Begriffszusammenhänge gibt die Abbildung 12.

5.2 Probenbearbeitung/-vorbereitung

5.2.1 Dünnschliffherstellung

Die Dünnschliffherstellung führte Dettmar dissection Technology GmbH & Co. KG Bochum durch. Hierbei wurden als erster Schritt polierte Dünnschliffe einer repräsentativen Probemenge mit einer Dicke von ca. 30 µm hergestellt. An diesen Dünnschliffen wurden die Analysen per QEMSCAN durchgeführt. Anschließend wurden die Schliffe auf die Enddicke von 25 µm für die optische Mikroskopie poliert (Entfernung der leitenden Kohlenstoffschicht). Die mineralogischen Analysen per QEMSCAN und optische Auflicht- und Durchlichtmikroskopie erfolgten an den polymineralischen Körnerpräparaten.

5.2.2 Mineralogische Analysen per QEMSCAN

Die mineralogischen Analysen per QEMSCAN erfolgten durch ERZLABOR Advanced Solutions. Die Mineralspezifikation erfolgte im Regelfall über die EDX-typische Elementanalyse und anschließende Auswertung durch automatisierte Software.

Um den Anteil an Topas per QEMSCAN zu bestimmen, mussten die Fluorgehalte der Proben im Vorfeld ermittelt werden. Bei Konzentraten, in welchen viel Topas vermutet wurde, erfolgte deshalb per chemischer Analyse (Actlabs/Canada) die Bestimmung des Fluorgehaltes. Diese Maßnahme lag nach Ansicht des Autors und nach Rücksprache mit dem Gerätebetreiber (ERZLABOR 2020) darin begründet, dass Al-Silikate und Topas per QEMSCAN nur anhand des Fluorgehaltes sicher voneinander unterschieden werden können.

Mineralanalytik – Geräteinformationen QEMSCAN

Gerätebesitzer: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)/Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF)

Gerätestandort: Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Labore der Abteilung Ressourcenanalytik, Halsbrücker Straße 34, 09599 Freiberg

Durchführung der Messungen: Die Messungen wurden durchgeführt von Dr. Dirk Sandmann (ERZLABOR Advanced Solutions GmbH) im Rahmen des Vertrages über die zeitweise Nutzung von Geräten des HZDR zur analytischen Materialcharakterisierung und Probenpräparation zwischen dem Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf e.V. und der ERZLABOR Advanced Solutions GmbH vom 30.11.2017

Gerätetyp: FEI QEMSCAN 650 F

Hardwareplattform: Rasterelektronenmikroskop FEI QUANTA 650 FEG

Softwareversion: FEI QEMSCAN 5.4 (aktuellste QEMSCAN-Version 2019)

5.2.3 Korngrößen – Kornformanalysen

Entsprechend der Aufgabenstellung sollten die Korngrößenanalysen für die in der Aufgabenstellung vorgegebene Anzahl an polymineralischen und monomineralischen Proben durchweg mittels CAMSIZER durchgeführt werden. Durch die QEMSCAN-Analysen, in Zusammenhang mit den mikroskopischen Untersuchungen, wurde festgestellt, dass monomineralische Fraktionen faktisch nicht vorlagen und auch verwachsungsbedingt nicht in reiner Form hergestellt werden konnten. Aufgrund dessen wären die Kornparameter an den Fraktionen durch CAMSIZER nicht mineralspezifisch bestimmbar gewesen. Die Korngrößenanalyse per CAMSIZER hätte hier nur an den polymineralischen Proben durchgeführt werden können.

Um dennoch einen vollständigen Satz an vergleichbaren mineralspezifischen Korngrößenanalysen für alle Proben zu erhalten, wurden diese zusammen zu den Kornform-Parametern Rundheit und Seitenverhältnis ausschließlich mit QEMSCAN ermittelt. Bei der Auswahl dieser Methode ist grundsätzlich in Betracht zu ziehen, dass die Analyse der Kornparameter am Schliff zweidimensional erfolgt. Durch die Präparation der Schriffe können Unterschiede im Vergleich zu Ergebnissen auftreten, die üblicherweise mit CAMSIZER ermittelt werden. Um mögliche Abweichungen weitestgehend auszuschließen, wurde nach Aussage des Schliffherstellers Dettmar dissection bei der Herstellung der Schriffe speziell darauf geach-

tet, dass eine statistisch homogene und möglichst richtungslose Mineralverteilung in den Schriffen gewährleistet wurde.

Der größte Teil der Mineralkörner lag frei und unverwachsen vor. In der mikroskopischen Ansprache der Dünnschliffe wurde aber weiterhin sichtbar, dass unregelmäßig geformte Mineralkörner zwar als Einzelkörner vorlagen, das Korn durch den Anschliff aber nur partiell oberflächlich analysierbar war. QEMSCAN erkennt hierbei oft nicht ein einzelnes großes Korn, sondern mehrere kleine Körner, was sich anschließend in den Kornparametern als Fehler niederschlägt. Der Fehlerbereich ist allgemein vertretbar. Daher ist QEMSCAN dem CAMSIZER im Rahmen der Untersuchungen vorzuziehen, da mineralspezifische Aussagen in ökonomisch vertretbarem Rahmen zu erzielen sind.

5.2.4 Optische Mikroskopie an Dünnschliffen (Auflicht-/ Durchlicht)

Nach den QEMSCAN-Untersuchungen wurden die Schriffe nochmals poliert, um die Kohlenstoffschicht zu entfernen und um die genormte Enddicke von 25 µm für die Durchlichtmikroskopie zu erreichen. Die Begutachtung, Beschreibung und fotografische Darstellung der Wertminerale (Auflicht-/Durchlicht) erfolgten durch das Rohstofflabor Erz & Stein. Zum Einsatz kamen die beiden Mikroskope Zeiss – JenaVert (Auflichtmikroskopie, Hell-/Dunkelfeld) und Zeiss – Amplitval (Auflicht-/Durchlichtmikroskopie) mit jeweiligem aufgesetzten Fototubus.

5.2.5 Auswertung der QEMSCAN-Analysen

Es wurden insgesamt 89 Schriffe per QEMSCAN bearbeitet (Anlage 2). Nach erfolgter Analyse wurde eine Gesamtdatenbank (in den Ergebnissen Anlage 3 enthalten) für die analysierten Schwerminerale erzeugt und über alle Proben abgeglichen. In der Plausibilitätskontrolle konnten einige Minerale nicht eindeutig durch die EDX-Sensoren erkannt werden.

So werden Minerale mit deutlich erhöhten Anteilen an leichten Elementen wie Li, B, F, Be durch

QEMSCAN nicht exakt zugeordnet und bedürfen zusätzlicher Informationen zur Auswertung. Für Proben, die schon durch die optische Begutachtung merkliche Mengen Topas enthielten, wurden deshalb chemische Analysen bei Actlabs/Canada angefordert.

Die Fe-Oxid-Phasen **Magnetit** und **Hämatit** (zum Teil auch Goethit) werden in den Grafiken allgemein als **Fe-Oxide** bezeichnet. In der mikroskopischen Kurzansprache und der optischen Mikroskopie (Abschnitt 6.2) werden die Minerale detailliert beschrieben.

In der Mineraldatenbank (Anlage 3) werden verschiedene Granattypen unterschieden. Diese sind in der jeweiligen Beschreibung der Schiffe und der Datenbank detailliert aufgeführt. In den Lagerstättenbeschreibungen wurden alle Granattypen zu einer Gesamtgruppe **Granat** zusammengefasst.

Des Weiteren werden die Fe-haltigen Titanphasen nach ihrem Fe-Gehalt aufgeschlüsselt (Fe/Ti-Verhältnisse, QEMSCAN-Analysen Anlage 3). Da sich der **Ilmenit** aufgrund chemischer Verwitterung bzw. Umwandlungen durch Fe-Verlust über die Mineralphasen Leukoxen-Pseudorutil/Pseudobrookit zum Rutil/Anatas umsetzt und somit auch die physikalischen Eigenschaften, wie magnetische Suszeptibilität, Dichte, Farbe, sich sukzessive ändern, ist eine mineralspezifische Aufbereitung von Fe-Ti-Oxiden kaum möglich.

Deutlich ist jedoch gegenüber den Fe-ärmeren Ti-Fe-Phasen in den schwach paramagnetischen Fraktionen eine typische Anreicherung der Fe-reichen Fe-Ti-Phasen in den stark paramagnetischen Fraktionen. Die Fe-haltigen Titanphasen werden durch die QEMSCAN zusammenfassend als Ilmenit bezeichnet, obwohl die meisten als Ilmenit bezeichneten Körner Fe-Defizite haben und Umwandlungsprodukte darstellen. In den mikroskopischen Beschreibungen in Abschnitt 6.2 wird auf die Umwandlungsprodukte detaillierter eingegangen.

Reine TiO₂-Phasen wie **Rutil**, **Anatas** und **Brookit** werden unter der Gruppe **Rutil** geführt, da diese durch QEMSCAN nicht unterschieden werden können. In der mikroskopischen Schliiffbeschreibung werden die verschiedenen TiO₂-Phasen extra angesprochen und dokumentiert.

Zirkon und **Kassiterit** werden unter ihrem Namen geführt.

Die Minerale **Andalusit**, **Sillimanit** und **Disthen** werden unter **Al-Silikate** zusammengefasst. Eine Unterscheidung der Minerale erfolgt in der mikroskopischen Ansprache.

Des Weiteren wurden die folgenden Minerale mit analysiert, mikroskopiert und teilweise beschrieben: **Turmalin**, **Topas**, **Epidot**, **Monazit**, **Titanit**, **Chromit**, **Pseudoilmenit**, **Pseudorutil**, **Pseudobrookit**, **Apatit**, **Pyrit**, **Staurolith**, **Apatit** und **Baryt**.

6 Ergebnisse

6.1 Regionalgeologische Einordnung der Kies- und Sandlagerstätten

Die regionalgeologische Einordnung der Lagerstätten erfolgte nach den Flusseinzugsgebieten Elbe, Donau, Main, Ober-, Mittel- und Niederrhein und Weser. Die zugehörigen Lagerstätten werden sowohl bezüglich der regionalgeologischen Situation als auch vom Schwermineralbestand her untereinander verglichen. Alle Angaben zu Mineralkonzentrationen werden in Masse-% angegeben.

6.1.1 Einzugsgebiet Elbe

Das Einzugsgebiet der Elbe bezieht sich hauptsächlich auf den Raum zwischen Neiße und Schwarzer Elster im Osten, Bode, Unstrut, Helme im Westen und Saale, Weiße Elster, Pleiße, Zwickauer Mulde, Flöha, Zschopau, Freiburger Mulde im Süden. Die Liefergebiete für die Kiese und Sande sind der Harz, der Thüringer Wald, Thüringer Becken, das Thüringer Schiefergebirge, Vogtland, Erzgebirge, Granulitgebirge, Elbtal-schiefergebirge, Zittauer Gebirge und die Lausitz. Zusätzlich wurden glazigene Sedimente während des Pleistozäns aus dem skandinavischen Raum antransportiert und mehr oder weniger eingemischt. Zum Teil werden in den Kiessandtagebauten reine fluviatile als auch reine glazigene Schichtenfolgen ausgehalten. Die generelle geologische Beschreibung bezieht sich auf fluviatile und glazifluviatile Terrassenablagerungen aus der Elster-, Saale- und Weichsel-Kaltzeit. In einigen Lagerstätten werden auch Kiessande aus dem Tertiär (Eozän – Oligozän) abgebaut. Das Schwermineralspektrum der einzelnen Schichten kann extreme Unterschiede zeigen. So sind in den tertiären Sedimenten die instabilen Schwerminerale sehr stark verringert bis nicht mehr vorhanden, die stabilen jedoch prozentual angereichert. In glazifluviatilen und rezenten fluviatilen Sedimenten werden die Einzugsgebiete mit sowohl stabilen als auch instabilen Schwermineralen präsentiert. Die glazifluviatilen Schichten weisen typische Schwermineralassoziationen der skandinavischen Liefergebiete auf. Diese lassen sich manchmal nicht von denen der fluviatilen unterscheiden. Spezielle

Schwerminerale und Schwermineralvergesellschaftungen geben Hinweise auf die Liefergebiete der einzelnen Flüsse. Für das Einzugsgebiet der Saale und Elbe haben MÜLLER et al. (1988) intensiv die Sedimente untersucht. So werden die Sedimente der Saale durch Epidot, die der Weißen Elster durch Topas, die Zwickauer Mulde durch Topas und Granat, die vereinigte Zschopau/Flöha/Striegis (Oschatzer Mulde) durch Granat, die Elbe durch Pyroxene und die Sedimente der Neiße durch Zirkon charakterisiert. Unter den „metamorphen“ Schwermineralen sind die Gehalte an Sillimanit in Elbeschottern, an Stauolith in Muldeschottern, an Andalusit in Sedimenten der Saale und der Weißen Elster und an Disthen in glazifluviatilen Sedimenten erhöht. Zusätzlich kommt als charakteristische Schwermineralvergesellschaftung der Kassiterit zusammen mit Topas in Frage, da aus diesen auf die Gang- und Greisenlagerstätten des Erzgebirges Rückschlüsse gezogen werden können.

Tab. 4: Beprobte Standorte im Einzugsbereich der Elbe und Bezug zu den rezenten Flusssystemen

Kürzel	Rezentes Einzugsgebiet
01	Elbe
05	Bode
08/12	Zwickauer Mulde
19/65	Saale
21	Weiße Elster
22	Vereinigte Mulde
23/24	Elbe/Schwarze Elster
31	Vereinigte Mulde
33	Neiße
35/38	Elbe
41	Pleiße
42	Unstrut
44	Weiße Elster
47	Elbe
49	Saale/Weiße Elster
60	Alter Elster-/Saalelauf
64	Helme
67	Saale
68	Elbe

Im Einzugsgebiet der Elbe wurden 20 Kiessandlagerstätten beprobt (PERSCHL 2018). Im Folgenden werden die regionalgeologische Einordnung, die gebauten Schichten, die Schwermineralgehalte, die mögliche Herkunft der Sedimente und die mineralogischen Charakteristika der Minerale Fe-Oxide, Ilmenit, Granat, Rutil, Zirkon und Kassiterit der Einzellagerstätten beschrieben.

6.1.1.1 01 (Elbe)

Regionalgeologisch zählt die Lagerstätte 01 zur weichselzeitlichen Niederterrasse der Elbe und befindet sich im mittelbaren Mündungsgebiet der Saale. Die Lagerstätte ist gekennzeichnet durch wechselnde Einflüsse aus dem Einzugsgebiet von Saale und Elbe. Die Schwermineralgehalte können mit 0,11 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,037 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 13 dargestellt.

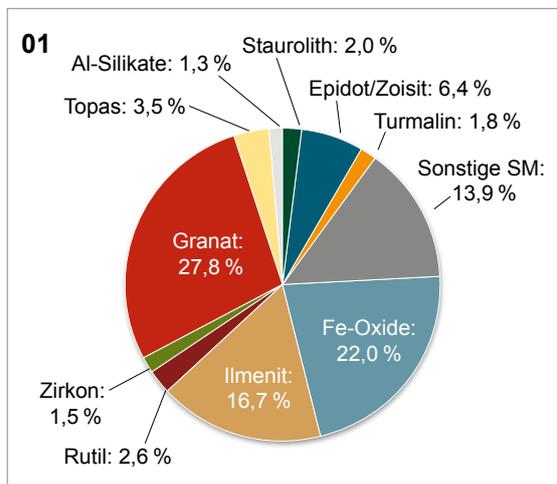


Abb. 13: Schwermineralzusammensetzung der Probe 01

Die Hauptanteile der Schwerminerale werden durch Fe-Oxide (22,0 %), Ilmenit (16,7 %) und Granat (27,8 %) gebildet. Granat wird von Almandin dominiert.

Weiterhin kommen vor: Rutil (2,6 %), Zirkon (1,5 %), Topas (3,5 %), Al-Silikate (1,3 %), Stau-

rolith (2,0 %), Epidot/Zoisit (6,4 %) und Turmalin mit 1,8 %.

Als sonstige Schwerminerale treten auf: Hornblenden + Aktinolith (5,1 %), Chromit (0,2 %), Titanit (0,8 %), Diopsid (5,8 %), Monazit (0,2 %), Apatit (0,1 %) und Pyrit (0,3 %).

Der Standort wurde bereits von ALLENBERG et al. (2012) untersucht, welcher eine ähnliche Schwermineralverteilung beschrieb. Nach MÜLLER et al. (1988) und ALLENBERG et al. (2012) kann der Anteil an Hornblende und Diopsid aus dem Elbeinzugsgebiet abgeleitet werden. Epidot zeigt den Einfluss der Saale. Ebenso kann der Anteil an Fe-Oxiden aus der Saale selbst oder deren Zuflüssen abgeleitet werden. Granat wird sowohl der Elbe als auch der Saale zugeschrieben. Topas und Turmalin stammen möglicherweise aus dem Einzugsbereich Weiße Elster/Zwickauer Mulde in die Elbe. Im Gegensatz zu den vorliegenden Daten wurde bei ALLENBERG et al. (2012) Kassiterit nachgewiesen.

Der Anteil an stabilen Schwermineralen ist als gering zu bezeichnen, was identisch ist mit den Angaben von ALLENBERG et al. (2012).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Zirkon kommt weitgehend homogen, hellfarbig, gut gerundet mit leicht rissiger Oberfläche, ohne erkennbaren Zonarbau vor.

Rutil ist meist massig, rötlich gelb, kantengerundet, oberflächlich etwas korrodiert und rissig sowie polykristallin, rötlich-bräunlich, derb, rissig und stark gerundet.

Ilmenit ist gekennzeichnet durch unterschiedlich intensive Umwandlungserscheinungen – Bildung von Verdrängungen durch Ti-Oxide sowie Hämatitmischungen bis zur Ausbildung von feinkristallinen Hämatitaggregaten, z. T. ist er gerundet und kantig, z. T. rissig-löchrig, homogen-derb.

Fe-Oxide kommen in Form von Magnetit als derbe Körner vor, teilweise gerundet, auffällig löchrig. Martitisierungen wurden kaum beobachtet, jedoch ist er häufig mit Hämatit orientiert verwachsen und

bildet schwammartige bis zellige Aggregate als Verdrängungsprodukte.

Granat als Almandin findet sich farblich unauffällig mit charakteristischem Relief, meist gut gerundet bis angerundet.

Besonderheiten: Vereinzelt Pyritaggregate mit framboidaler Internstruktur. Charakteristisch sind ebenso konzentrisch um kantige wie rundliche Fremdpartikel (z. B. Ti-Oxide) aufgebaute Fe-Hydroxid-Aggregate. Selten sind außerdem Apatit (gut gerundet) und Monazit (gerundet und löchrig mit zahlreichen Einschlüssen) anzutreffen.

6.1.1.2 05 (Bode)

In der Lagerstätte 05 werden Kiese und Sande der weichselzeitlichen Niederterrasse der Bode mittels Nassgewinnung abgebaut.

Die Schwermineralgehalte können mit 0,15 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,01 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Abbildung 14 zeigt die Schwermineralzusammensetzung.

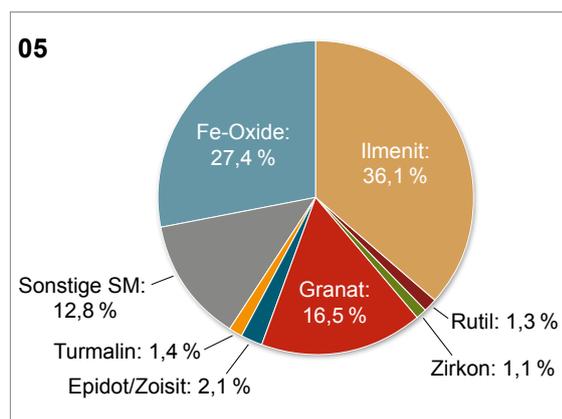


Abb. 14: Schwermineralzusammensetzung der Probe 05

Dominiert wird das Schwermineralkonzentrat von Ilmenit (36,1 %) und Fe-Oxiden (27,4 %). Granat tritt hauptsächlich als Almandin mit Übergängen zu Almandin-Pyrop auf, neben Grossular und Andradit. Als Turmalinvertreter wurde Schörl nachgewiesen.

Sonstige Schwerminerale sind: Titanit (4,7 %), Al-Silikate (0,3 %), Hornblende + Aktinolith (2,9 %), Diopsid (3,2 %), Apatit (0,5 %), Monazit (0,2 %) und Pyrit (1,4 %). Die Verteilung der Schwerminerale deckt sich im Wesentlichen mit Schwermineralanalysen von MÜLLER et al. (1988). Die Bode wurde im Bereich Quedlinburg mit einem hohen Anteil instabiler Minerale wie Granat, Hornblende, Augit, z. T. auch Epidot angetroffen.

Der hohe Anteil instabiler Schwerminerale weist auf das nahe Einzugsgebiet, den Mittel- und Unterharz hin. Schon LOSSEN (1882) beschreibt den Granat und Epidot (Pistazit) aus der Kontaktzone des Brockengranits. Die Turmalingehalte können aus dem Granit abgeleitet werden. Der Anteil an beibrechenden Wertmineralen ist als gering einzustufen.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit tritt sehr selten auf als einzelne polykristalline Aggregate mit sperrig-skelettartigem Gefüge und dunkelbrauner Färbung.

Zirkon kommt in Form wenig gut gerundeter Körner vor, selten angerundet als kurzprismatisch-idiomorphe Kristalle mit wenigen Einschlüssen.

Rutil weist überwiegend angerundete bis abgerundete, grau bis rauchbraun gefärbte Kristallfragmente mit Einschlüssen und starken Trübungen auf. Vereinzelt finden sich Alterationsbildungen in umgewandelten Ilmeniten.

Ilmenit zeigt häufig kantige bis angerundete Bruchstücke, xenomorphe Körner und Kristallfragmente, ist massig-dicht bis rissig oder löchrig, mit unterschiedlichen Korrosions- und Alterationsspuren, häufig mit partiellen Umwandlungen in Titanit. Ein Teil der EDX-analytisch bestimmten Ilmenite sind Ti-Oxid-Fe-Oxid-Gemenge.

Magnetit tritt primär nicht auf, stattdessen teilweise massiger Hämatit, z. T. verwachsen mit Ilmenitrelikten, sowie fein- bis kryptokristalline Massen in Form rundlicher Körner.

Granat bildet teils gerundete Körner, teils isometrische Kristalle und ist häufig reich an Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen.

Besonderheiten: Als Umwandlungsprodukte von Ilmeniten treten helle, feinkristalline Titanite in Verwachsung mit Fe-Oxiden auf. Mitunter kommen rundliche Limonit-Tonmineral-Ooide vor. Viele Partikel sind mit limonitischen Überkrustungen von nur wenigen μm Dicke umhüllt. Daneben finden sich vereinzelt Pyrit-Framboidaggregate, die z. T. Zellstrukturen organischen Materials nachzeichnen, z. T. umhüllt von einer anderen Sulfidphase (Cu-haltiger Markasit, Cu-verarmter nichtstöchiometrischer Chalkopyrit). Dabei scheint es sich um Bildungen zu handeln, die offenbar autochthon erst nach der Sedimentablagerung entstanden sind.

6.1.1.3 08/12 (Zwickauer Mulde)

Die Lagerstätte 08/12 liegt in tertiären Ablagerungen, die von glazifluviatilen Ablagerungen der Elster-Kaltzeit überlagert werden. Im Liegenden besteht die Kiessand-Lagerstätte aus fluviatilen Kiesen, Kiessanden und Sanden, welche im Tertiär (Eozän – Oligozän) in Verbindung mit einem Ost-West verlaufenden stark verzweigten Flusssystem, dem sog. Lunzenauer Fluss, abgelagert wurden. Der gesamte Bereich der Lagerstätte ist durch eine lateral und vertikal stark wechselnde Korngrößenverteilung gekennzeichnet (LfULG-SACHSEN 2021).

Die Lagerstätte wurde in zehn Sequenzen beprobt, indem jeweils 30 Minuten ein Teilstrom der Kies-Sandfraktion aufgefangen und separat aufbereitet wurde. Zwei der Sequenzen wurden näher untersucht. Die Schwerminerkonzentrationen beider

Proben sind identisch mit 0,3 % in der $< 1 \text{ mm}$ Fraktion und 0,13 % in der Gesamtkornfraktion.

Die Schwermineralverteilung der Proben ist ähnlich und wird in Abbildung 15 dargestellt.

Die Schwermineralverteilung zeigt als hauptsächliche Komponente Ilmenit (31,4–36,6 %), weiterhin starke Anreicherungen an Rutil (17,8–18,8 %), Zirkon (16,4–20,5 %) und Topas (9,3–13,8 %). Daneben finden sich Turmalin (5,2–7,1 %), Monazit/Xenotim (1,6–1,9 %), Staurolith (1,7–2,0 %), Al-Silikate (2,5–4,8 %) und Kassiterit mit 1,9–2,2 %.

Als sonstige Schwerminerale wurden gefunden: Chromit (0,4–0,9 %), Granat (0,2–0,3 %), Fe-Oxide (0,8–1,8 %) und Spuren von Epidot und Apatit.

Hervorzuheben sind hierbei der Kassiteritanteil und die hohen Konzentrationen von Rutil und Zirkon. Die Schwermineralzusammensetzung und -verteilung ist nahezu identisch mit der Lagerstätte 41, welche sich in 10 km Entfernung befindet. Das lässt auf das gleiche Einzugsgebiet schließen. Der hohe Anteil an stabilen Schwermineralen weist auf die beschriebenen tertiären Abbaubereiche hin. Die fast vollständige Abwesenheit von Granat kann einerseits auf die rein tertiäre Herkunft und starke Verwitterung hinweisen, andererseits darauf, dass die Sedimente nicht mit der Zwickauer Mulde, sondern eher mit dem Einzugsgebiet der Weißen Elster in Verbindung gebracht werden können. Das würde auch den hohen Anteil an

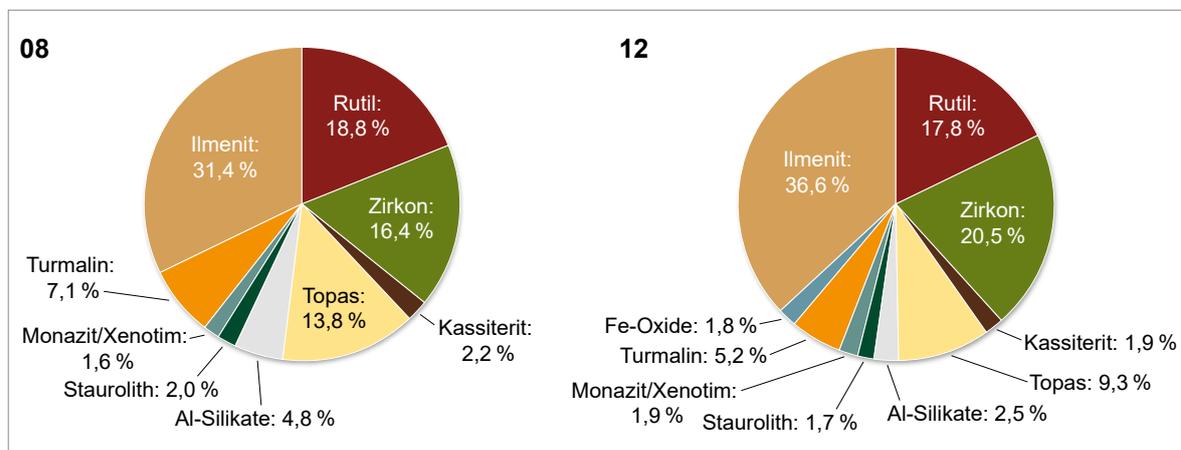


Abb. 15: Schwermineralzusammensetzung der Proben 08 und 12

Topas erklären. Der Anteil Chromit kann aus den verwitterten basischen Ergussgesteinen des Erzgebirges abgeleitet werden.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 08

Überwiegend wurden Topas, TiO₂- und Fe-haltige Ti-Oxid-Phasen sowie Zirkon, untergeordnet Turmalin gefunden.

Kassiterit zeigt partiell idiomorph bis gerundete, trübe, fleckige, farblos bis braune Kristallbruchstücke, z. T. einschlussreich.

Zirkon ist hellfarbig, homogen bis intensiv wachstumszonierte, teils idiomorph, teils gut gerundet.

Rutil kommt kantig bis gerundet vor, als monomineralische Partikel bis feinkörnig-orientiert verwachsene Aggregate, ist klar, braun, gelbrot bis blassrötlich gelb, z. T. als Säume um Ilmenitpartikel.

Ilmenit ist kaum als Mineralphase vertreten, meist als ockerrote bis dunkelbraune Ti-Fe-Oxid-Gemenge mit ilmenitähnlichem Summenchemismus, meist mit Umwandlungserscheinungen, z. T. in Rutil umgewandelt, vereinzelt reliktsch idiomorph, meist gestaltlos bis gerundet.

Magnetit wurde nicht angetroffen.

Granat zeigt kantige, farblos-klar erscheinende Splitter, z. T. ist er angerundet (selten).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 12

Hauptsächlich Zirkon, Rutil und Topas, neben unterschiedlich Fe-haltigen Ti-Oxiden. Untergeordnet Ilmenit und Turmalin. Kassiterit ist wenig enthalten, Granat tritt in Spuren auf.

Kassiterit zeigt meist gerundete bis angerundete Kristallbruchstücke, vereinzelt feinkörnige Aggregate, ist z. T. korrodiert, hell- bis dunkelbraun inhomogen gefärbt.

Zirkon ist idiomorph bis gerundet, hellfarbig, überwiegend klar, z. T. stark wachstumszonierte, mitunter Einschlüsse führend.

Rutil kommt meist als angerundete Kristallbruchstücke vor, ist oft fast klar, rotgelb bis gelbrotbraun gefärbt oder zeigt z. T. helle, polykristalline Aggregate. Vereinzelt tritt blaugrauer trüber Anatas auf.

Ilmenit ist als Mineralphase sehr selten, meist durch Ti-Fe-Oxidgemenge mit kryptokristallinem Internbau und dunkelbraunen bis braunroten Innenreflexen vertreten oder mit diesen verwachsen. Zum Teil ist er verwachsen mit Rutil bzw. Limonit. Partikel sind gestaltlos bis gerundet, z. T. deutlich pseudomorph.

Magnetit wurde nicht beobachtet, vereinzelt treten stark gerundeter Magnesiochromit sowie Limonit in kollomorphen Partikeln oder als Überkrustungen auf.

Granat ist sehr selten als formlose Splitter oder Verwachsungsphasen.

Besonderheiten: Monazit und Xenotim.

6.1.1.4 19 und 65 (Saale)

Das Haupteinzugsgebiet der Lagerstätten 19 und 65 ist das Thüringische Schiefergebirge. Beide Lagerstätten liegen in den Talsedimenten der Saale nur 6 km auseinander und werden in der unmittelbaren Umgebung vom Buntsandstein eingerahmt. In beiden Kiessandabbauen werden die fluvialen Niederterrassenschotter der Saale aus der Weichsel-Kaltzeit abgebaut. Die Lagerstätte 65 wurde zum Zeitpunkt der Probenahme nicht abgebaut.

Die Schwermineralgehalte in der Fraktion < 1 mm betragen 0,26 % (19) und 0,14 % (65). Die Gesamtkornfraktion beinhaltet 0,045 % (19) und 0,028 % (65) Schwerminerale.

In beiden Lagerstätten sind mit Vormacht die opaken Komponenten Fe-Oxide und Ilmenit angereichert. Weiterhin sind Granat (Almandin) und Epidot in größerem Maße vertreten. Der hohe Anteil Epidot scheint ein Marker für die Saale zu sein, da MÜLLER et al. (1988) und ALLENBERG et al. (2012) diesen für provenienzzanalytische Zwecke nutzten. Obwohl beide Lagerstätten in unmittelbarer Nähe zueinander liegen, zwischen diesen lokal auch kein weiterer Fluss mündet, treten bemerkenswerte Unterschiede auf.

Abbildung 16 zeigt die Zusammensetzung der Schwermineralkonzentrate.

Um die Unterschiede der beiden Standorte näher zu klassifizieren, werden diese in Tabelle 5 gegenübergestellt.

Der hohe Anteil an Ilmenit in beiden Lagerstätten entstammt vermutlich den grünschieferfaziellen karbonischen Sedimenten des Thüringer Schiefergebirges. Chromit, Titanit und Epidot lassen sich aus den Diabasen im Oberlauf der Saale erklären. Die Granate zeigen häufig Fremdphaseneinschlüsse (Quarz, Rutil, Ilmenit) und werden als metamorphe Porphyroblasten aus den altpaläozoischen Einheiten des Thüringer Schiefergebirges gedeutet (VOIGT & MEISEL 2014).

Baryt hängt mit den hydrothermalen Gängen in der Nordrandverwerfung des Thüringer Waldes bzw. den Vererzungen im Zechsteinkalk zwischen Kamsdorf und Saalfeld zusammen, welche die Saale randlich tangiert.

In beiden Proben wurde unter anderem auch der Eisen-Chlorit Chamosit nachgewiesen, welcher in unmittelbarer Umgebung bei Wittmannsgereuth als oolithische Eisenerze (Chamosit-Thuringitlagerstätten) über und unter Tage abgebaut wurde (Zufluss der Schwarzza).

Stärkster Unterschied zwischen beiden Proben besteht hinsichtlich der Kassiteritführung. Auffällig ist der Anteil an Kassiterit von 2 % in der Lagerstätte 19, wobei in der benachbarten Lagerstätte

Tab. 5: Gegenüberstellung der Schwermineralzusammensetzung der Lagerstätten 19 und 65 (Angaben in %)

Mineralphase(n)	19	65
Fe-Oxide	28,6	24,3
Ilmenit	26,9	16,9
Granat	10,9	15,6
Zirkon	2,9	0,8
Kassiterit	2,0	0,0
Rutil	3,8	2,8
Chromit	1,1	0,4
Epidot/Zoisit	8,0	23,0
Turmalin	0,9	1,4
Monazit/Xenotim	3,8	1,2
Titanit	2,6	2,5
Hornblende	4,7	8,9
Ortho-Pyroxene	1,8	1,4
Apatit	0,7	0,3
Baryt	0,3	0,4
Pyrit	0,5	0,0

65 kein Kassiterit nachgewiesen werden konnte. Literaturrecherchen ergaben, dass im Oberlauf der Saale zwischen Hirschberg und Lobenstein geringfügige Mineralisationen vorkommen, die Kassiteritführend sind (LAHUSEN & MORTEANI 1987). Diese liegen ca. 60 km flussaufwärts der Saale. Im weiteren Einzugsgebiet wurden keine weiteren Vorkommen von Kassiterit nachgewiesen.

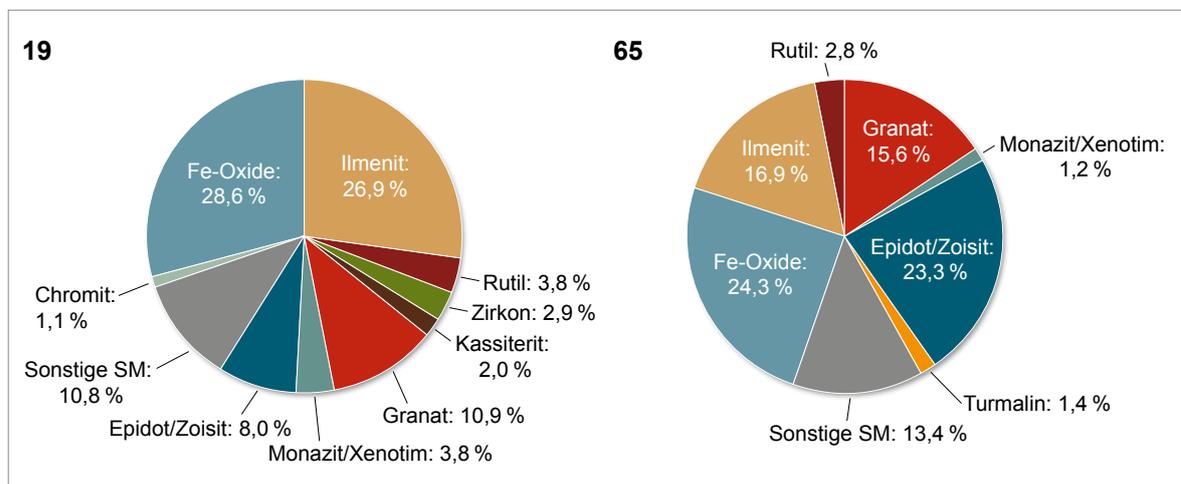


Abb. 16: Schwermineralzusammensetzungen der Proben 19 und 65

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 19

Kassiterit tritt als Kristallfragmente mit kantigen bis muschligen Bruchflächen auf, wenig angerundet, massig bis z. T. körnig, v. a. randlich rissig, häufig mit Ausbrüchen, fleckig bis streifig braungrau/braun, fast klar bis schwach trüb, z. T. mit Einschlüssen, mitunter wirrstrahlig verwachsen und porenreich, trüb. Zum Teil verwachsen mit Quarz und anderen Silikaten, vereinzelt treten angerundete, fasrig-kollomorphe, gelbliche bis graue Aggregate („Holzzinn“) auf.

Zirkon zeigt gedrungene, angerundete bis gut gerundete Kristallfragmente, z. T. mit großen Löchern mit eingeschlossenen Fremdphasen (z. B. Apatit), mitunter rissig mit Ausbrüchen.

Rutil kommt meist als unregelmäßige, kantig-angerundete bis teilweise gerundete Bruchstücke vor, teils als derbe, löchrig-einschlussreiche Massen, z. T. mit Ilmenit verwachsen, teils kryptokristallin-dicht, fast klar bis trüb, rötlich braun bis orange-gelb; vereinzelt gerundet, derb, bläulich-gelblich grau, leicht trüb als Anatas.

Ilmenit tritt angerundet bis teilweise gerundet auf, häufig von Rissen durchzogen mit Ausbrüchen, z. T. Einschlüsse, meist löchrig korrodiert, häufig verwachsen mit Rutil, Titanit, z. T. entmischt.

Magnetit bildet derbe, angerundete bis gerundete Körner mit narbiger Oberfläche, mitunter ist er kuglig, häufig mit Löchern, z. T. mit Rissen und großen rundlichen Ausbrüchen. Selten ist er randlich martitisiert. Daneben tritt Hämatit massig-derb auf mit Rissen und Ausbrüchen. Vereinzelt wurde rissiger, angerundeter bis rundlicher Mg-Chromit gefunden.

Granat zeigt unregelmäßige Bruchstücke mit Ausbuchtungen, ist kantig-angerundet bis gerundet, z. T. mit narbiger Oberfläche, z. T. rissig, häufig treten Fremdphaseneinschlüsse (Quarz, Rutil, Ilmenit) auf, die Farbe ist blass bis hellbräunlich rot, meist klar.

Besonderheiten: Pyrit teils derb, z. T. oxidiert, teils framboidal; kantige Galenitstättchen; grauer, feinkristalliner, einschlussreicher, wenig gerundeter Monazit.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 65

Zirkon zeigt angerundete Kristallfragmente, z. T. als gut gerundete prismatische Kristalle mit narbiger Oberfläche, mit Rissen und Gas-Flüssigkeits- sowie Festphasen-Einschlüssen (z. B. Apatit), hellfarbig, z. T. mit grünlich grauem Stich, fast klar.

Rutil kommt als polykristallin-massige, rissiger-derbe bis gitterartige Aggregate vor, z. T. feinkörnig-dichte und verschränkt-wirrkristalline Pseudomorphosen, weißlich, rotgelb bis graugelbe Färbung, z. T. bläulich als Anatas, leicht trüb bis durchscheinend. Mitunter als derbe, braune Kernbereiche in Ilmenit vorkommend, selten leistenförmig in Silikate eingewachsen, Partikel sind kantig-angerundet bis gerundet.

Ilmenit bildet meist kantige bis angerundete, partiell gerundete Bruchstücke derber bis polykristalliner Aggregate, ist häufig korrodiert, z. T. mit Rissen, Ausbrüchen, Löchern, Einschlüssen, z. T. partiell schlierig-streifig bis fleckig umgewandelt in Rutil, Ti-Fe-Oxide bzw. Titanit, und vereinzelt pseudomorphisiert zu orientiert verwachsenem Hämatit, vereinzelt tröpfchenförmige Hämatit-Ilmenit-Entmischungen, selten leistenförmig mit Silikaten verwachsen.

Magnetit tritt vereinzelt in Form angerundeter Kristalle, rissig mit muschligen Ausbrüchen, randlich z. T. martitisiert auf. Häufig als blättrig-fein- bis polykristalline, z. T. massige **Hämatit**aggregate, meist als pseudomorphe Bildungen; mitunter kollomorph-feinkörnige, gebänderte, z. T. limonitische Bildungen. Vereinzelt kommt derber, kantiger, randlich rissiger Chromit vor.

Granat zeigt kantig-angerundete bis gerundete Bruchstücke mit z. T. narbiger Oberfläche, ist hellfarbig, meist mit bräunlich-rötlichem Stich, meist klar, vereinzelt mit Rissen, teils einschlussfrei, teils reich an Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen, selten bräunlich, schwach trüb, einschlussreich, mit anomaler Anisotropie (Grossular) mit Limonit.

Besonderheiten: selten heller, klarer Baryt und rundlicher, trüber Monazit.

6.1.1.5 21 (Weiße Elster)

In der Lagerstätte 21 werden frühsaalekaltzeitliche fluviatile, stark sandige Kiese der tieferen Mittelterrasse (Hauptterrasse) gefördert (LfULG-SACHSEN 2021). Die Schwermineralgehalte in der Fraktion < 1 mm betragen 0,31 %, die der Gesamtkornfraktion 0,09 %.

Die Schwermineralzusammensetzung gibt die Abbildung 17 wieder.

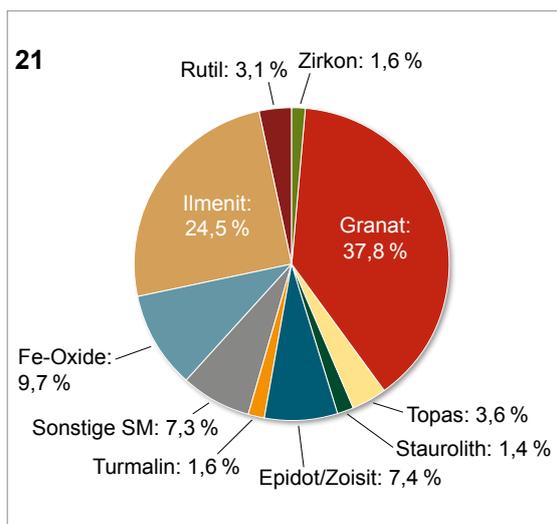


Abb. 17: Schwermineralzusammensetzung der Probe 21

Der hauptsächliche Anteil der Schwerminerale wird von Granat (37,8 %) mit Almandin, Ilmenit (24,5 %) und Fe-Oxiden (9,7 %) gebildet.

Weiterhin treten auf: Epidot/Zoisit (7,4 %), Topas (3,6 %), Rutil (3,1 %), Zirkon (1,6 %), Turmalin (1,6 %) und Staurolith (1,4 %).

Als sonstige Schwerminerale wurden gefunden: Hornblende (3,2 %), Diopsid + Enstatit-reiche Orthopyroxene (0,6 %), Al-Silikate (0,6 %), Apatit (0,7 %), Pyrit (1,2 %), Chromit (0,4 %), Titanit (0,4 %) und Kassiterit (0,3 %).

Nach EISSMANN (1975) und WOLF & SCHUBERT (1989) lag die Lagerstätte immer im Sedimentationsbereich der Zwickauer Mulde. Die Gehalte an Granat und Topas sind nach MÜLLER et al. (1988) typisch für die Zwickauer Mulde, wobei der hohe Anteil an Granat weiterhin auf die Einzugsge-

biete von Zschopau/Flöha und Striegis hinweist (Oschatzer Muldelauf).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit kommt als vereinzelte leicht bis mäßig angerundete Bruchstücke vor, ist leicht trüb bis trüb, rötlich braun bis bräunlich rot fleckig bis zoniert, derb bis löchrig, mitunter rissig, z. T. reich an Einschlüssen.

Zirkon bildet angerundete bis stark gerundete Kristalle und Kristallbruchstücke, ist selten zoniert, hellfarbig, leicht trüb.

Rutil bildet derbe Massen, ist z. T. rissig, angerundet, mit vereinzelten Fremdphaseneinschlüssen (z. B. Sulfide), trüb, rötlich braun bis dunkelbraun.

Ilmenit zeigt sich sehr divers, unregelmäßig-kantig, z. T. angerundet bis stark abgerundet, z. T. mit Löchern und Rissen, derb-monomineralisch bis lagig entmischt mit Hämatit verwachsen, z. T. korrodiert bis pseudomorph partiell bis vollständig in feinkörnige Aggregate aus Ti- und Ti-Fe-Oxiden, Titanit und Hämatit umgewandelt.

Fe-Oxide kommen als **Magnetit** in Form unregelmäßiger, kantig bis angerundeter Bruchstücke mit einzelnen Rissen und Löchern, hellgrauen Reflektionsfarben mit ilmenitähnlichem rosabräunlichem Stich und verschiedenen ausgebildeten, meist gerundeten Hämatitaggregaten vor.

Granat zeigt unregelmäßige, scharfkantige bis schwach angerundete Kristallsplitter. Er kommt hellfarbig bis blassrötlich und bräunlich vor, ist klar bis leicht trüb. Zum Teil treten Löcher und Festphaseneinschlüsse auf (Silikatminerale, Ilmenit, Ti-Oxide, Fe-Oxide).

Besonderheiten: Pyrit-Framboide und radialstrahlig-konzentrische Markasitkugeln, vereinzelt Apatit und Turmalin, Topas als kantige Bruchstücke.

6.1.1.6 22 (Vereinigte Mulde)

In der Lagerstätte 22 werden kiesige Sande der weichselkaltzeitlichen Mulde (Niederterrasse)

abgebaut (LfULG-SACHSEN 2021). Die weichselkaltzeitliche Mulde hatte das Einzugsgebiet der rezenten Vereinigten Mulde mit Ost- bis Westerbirge und dessen Vorland (EISSMANN 1997).

Die Schwermineralgehalte in der Fraktion < 1 mm betragen 0,14 %, die der Gesamtkornfraktion 0,064 %.

Die Schwermineralzusammensetzung gibt Abbildung 18 wieder.

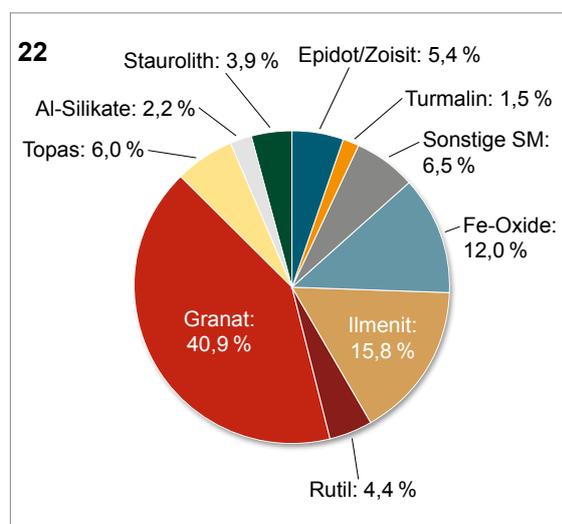


Abb. 18: Schwermineralzusammensetzung der Probe 22

Der hauptsächliche Anteil der Schwerminerale wird von Granat (40,9 %) mit Almandin, Ilmenit (15,8 %) und Fe-Oxiden (12,0 %) gebildet. Weiterhin treten auf: Epidot/Zoisit (5,4 %), Topas (6,0 %), Rutil (4,4 %), Al-Silikate (2,2 %), Turmalin (1,5 %) und Staurolith (3,9 %).

Als sonstige Schwerminerale wurden gefunden: Hornblende (3,4 %), Ca-reiche Amphibole (1,4 %), Aktinolith (0,2 %), Diopsid + Enstatit-reiche Orthopyroxene (0,5 %), Apatit (0,6 %) und Titanit (0,4 %).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit wurde nur ein Korn gefunden als kantiger, blassbräunlicher, fast klarer Splitter.

Zirkon bildet überwiegend gerundete bis stark gerundete Kristalle und Kristallbruchstücke, ist fast farblos, klar, häufig ausgeprägt rissig, mitunter enthält er Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse, selten nadlige Festphaseneinschlüsse. Vereinzelt ist er in kolloidomorphe Fe-Oxide eingewachsen.

Rutil zeigt kantige, partiell angerundete bis stark abgerundete Kristallfragmente, ist trüb bis fast klar, fast monomineralisch-homogen bis polykristallin feinkörnig bis gitterförmig, gelblich bis rötlich orange oder dunkelgelblich braun bis bläulich graubraun als Anatas, dann splittrig-rissig.

Ilmenit zeigt sich divers, mit unregelmäßigen bis rundlichen Partikeln, angerundet bis gut gerundet, dicht, häufig rissig, z. T. porig bis löchrig, monomineralisch derb, schwach pleochroitisch. Zum Teil sind schwach korrodierte bis feinkristallin-dichte Ti-Fe-Oxid-Gemenge mit Ilmenitchemismus vorhanden, z. T. mit spindelförmigen **Hämatit**-Ilmenit-Entmischungen. Vereinzelt treten Sulfideinschlüsse auf; mitunter ist er randlich in **Titanit** umgewandelt.

Fe-Oxide kommen als **Magnetit** derb, abgerundet, randlich rissig mit muschligen Ausbrüchen, vereinzelt mit martitischen Hämatitentmischungen vor, z. T. mit eingeschlossenen Apatitkristallen, hellgrauer Reflektionsfarbe ilmenitähnlich mit bräunlich gelbem Stich; **Hämatit** ist häufig pseudomorph kryptokristallin-dicht, abgerundet.

Granat zeigt kantige bis angerundete Bruchstücke, ist klar bis leicht trüb, fast farblos bis teilweise deutlich hellbräunlich roter Färbung, z. T. auch blassrötlich bis blassbräunlich, häufig mit Festphaseneinschlüssen (Silikate, Sulfide, Ilmenit, Oxide). Vereinzelt treten schlauchartige, verästelte Hohlräume auf.

Besonderheiten: keine

6.1.1.7 23/24 (Schwarze Elster)

Die Lagerstätte 23/24 befindet sich im jetzigen Einzugsgebiet der Schwarzen Elster, lag jedoch zur Elster-Kaltzeit, frühglazial am Streumener Elbelauf, in der frühen Saalezeit (Holsteinwarmzeit) am Berliner Elbelauf (ALLENBERG et al. 2012) und war Mündungsgebiet der Zwickauer Mulde (WOLF & SCHUBERT 1992).

Das abgebaute Material setzt sich zusammen aus Mischschottern der weichselzeitlichen Niederterrasse, saalezeitlichen Schmelzwassersanden und Hauptterrassenschotter sowie elsterzeitlichen Schmelzwassersanden (LAGB-Sachsen-Anhalt 2021).

Aus der Lagerstätte wurden zehn Teilproben (à ca. 300–400 kg) entnommen, klassiert und auf Schwerminerale aufbereitet (PERSCHL 2018). Die Menge an erhaltenem Schwergut war nahezu in allen Teilproben identisch. Von den zehn Teilproben wurden zwei Proben (Nr. 23 und 24) weiter aufbereitet und fraktioniert.

Die Schwermineralgehalte in der < 1 mm Fraktion betragen jeweils 0,30 %, die der Gesamtkornfraktion 0,13 %.

Abbildung 19 zeigt die Schwermineralzusammensetzung der beiden Proben aus der Lagerstätte 23/24.

Hauptanteile der Schwerminerale sind Granat (13,4–15,0 %), Ilmenit (14,3–22,3 %), neben Fe-Oxiden (6,6–7,0 %) und Epidot mit 3,4–4,8 %.

Als sonstige Minerale treten in den Vordergrund: Pyrit (23,7–31,7 %), Hornblende (5,2–7,4 %), Diopsid (4,1–5,9 %).

Weiterhin wurden Apatit (1,0–1,1 %), Titanit (0,9–1,0 %), Chromit (0,2 %) und Monazit (0,2 %) gefunden. Es wurden nur Spuren von Kassiterit nachgewiesen (0,02 %).

Der Pyrit tritt in framboidaler Ausbildung auf und lässt den Schluss zu, dass dieser authigen im bestehenden Sediment gebildet wurde (Abschnitt 4.2). Aufgrund dessen, dass im Falle der Gewinnung von Schwermineralen auch der Pyrit mit angereichert wird, wurde dieser nicht aus der herkömmlichen Schwermineralassoziation herausgerechnet.

Der Standort wurde schon in ALLENBERG et al. (2012) unter Probepunkt II.2 beschrieben. Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Schwermineralverteilung entlang der Flusssysteme. Es wurde ebenfalls ein sehr hoher Anteil an Pyrit (35 %) festgestellt. Unter Korrektur des Pyritgehaltes sind die Konzentrationen von Granat, Ilmenit, Epidot, Hornblende, Titanit, Chromit und Topas vergleichbar.

Bezüglich der Herkunft der Schwerminerale stehen der Topas und der Granat heraus, welche den Einfluss der Zwickauer Mulde widerspiegeln. Granat kann ebenfalls über das Einzugsgebiet der Zschopau/Flöha/Striegis geliefert worden sein, welche in die Vereinigte Mulde entwässern. Der Hinweis auf Disthen kann als Hochdruckvariante der Al-Silikate auf die Herkunft aus dem Granulitgebirge, aber auch glazigen gedeutet werden. Gesamt gesehen ist die Schwermineralzusammensetzung eine Mischung aus verschiedenen Einzugsgebieten, wie unter LAGB-Sachsen-Anhalt (2021) angegeben.

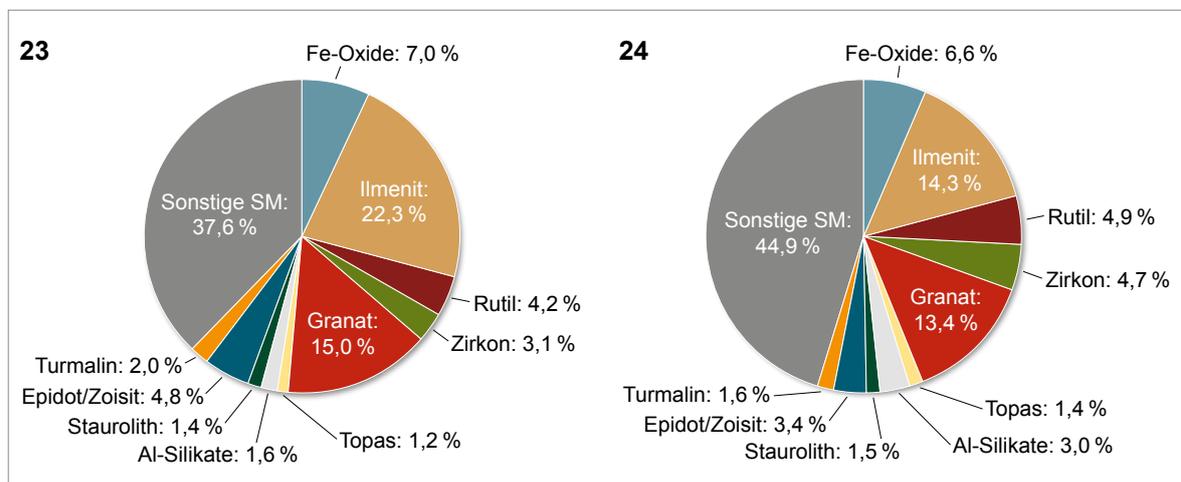


Abb. 19: Schwermineralzusammensetzung der Proben 23 und 24

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Zirkon tritt als Kristalle und Kristallfragmente auf, meist angerundet bis gerundet, z. T. mit narbiger Oberfläche, meist hellfarbig, häufig mit grünlich grauem Stich, z.T. braun und zoniert, klar bis schwach trüb, z. T. mit Festphaseneinschlüssen (u. a. Apatit), vereinzelt mit Rissen.

Rutil kommt meist als angerundete bis gerundete Kristallbruchstücke mit einzelnen Festphaseneinschlüssen vor, dunkelbraun, fast klar bis leicht trüb, z. T. mit Zwillingsstreifung, vereinzelt mit Ilmenit verwachsen, mitunter treten abgerundete, feinkörnig-dichte, z. T. poröse Massen auf, gelblich, weißlich, durchscheinend (Leukoxen). Vereinzelt wurde derber, leicht trüber, bräunlich-bläulich grauer Anatas gefunden.

Ilmenit zeigt sich sehr divers als derbe gerundete Bruchstücke, teilweise korrodiert bis fleckenweise alteriert, z. T. mit Brüchen und parallelen Spalt-rissen sowie Einschlüssen (bis poikilitisch) und Löchern. Es treten weiterhin z. T. gerundete, z. T. porenreiche Pseudomorphosen aus mikrokristallinen Fe-Ti-Oxid-Gemengen auf, z. T. alterierte Ilmenit-Hämatit-Entmischungen, vereinzelt teils gitterartig orientiert bzw. teils tröpfchenartig verwachsen.

Fe-Oxide wie **Magnetit** bilden vereinzelt kantige bis gerundete Kristalle und Bruchstücke (graue Reflektionsfarbe mit bräunlichem Stich) mit einzelnen Rissen und muschligen Ausbrüchen, mitunter mit Hämatitleisten (Martit). Zum Teil treten derbe bis feinkörnige Hämatitbildungen auf. Bei einem beträchtlichen Teil der chemisch als unspezifische Fe-Oxide ausgewiesenen Partikel handelt es sich offenbar um Fe-haltige Karbonatmineralaggregate – „Eisenkalk“. Geochemisch weisen die Fe-Karbonate als Fe(II) auf die reduzierenden Bedingungen im Sediment hin, welche bei entsprechender Sulfatanwesenheit die Fe(III)-Oxide reduzieren und mikrobiell den Pyrit bilden.

Granat tritt in Kristallen und Bruchstücken auf, kantig-angerundet bis gerundet, hellfarbig, z. T. mit rötlichem Stich bis hellbräunlich rosa, meist klar, teilweise mit orientiert eingewachsenen Festphaseneinschlüssen (v. a. Silikate, Ti-Oxide).

Besonderheiten: Nennenswert finden sich Dis-thenleisten, Staurolith, Turmalin, Titanitkristallbruchstücke, gerundeter Apatit; massenhaft fram-boidale Pyritneubildungen auf Quarz, Fe- und Ti-Oxiden, z. T. Markasit.

Die Probe 24 wurde weiterhin in mehrere magne-tische und elektrostatische Fraktionen getrennt, um enthaltene Wertminerale zu konzentrieren (Abschnitt 6.4.2).

6.1.1.8 31 (Vereinigte Mulde)

Die Lagerstätte 31 wird in Mischschottern aus saalezeitlichen Schmelzwassersanden, Hauptterrassenschottern und elsterzeitlichen Schmelzwassersanden abgebaut (LAGB-Sachsen-Anhalt 2021). Sie befindet sich im ehemaligen Lützener Saalelauf zur Zeit der Cromer- und frühen Elsterkaltzeit (MÜLLER et al. 1988).

Die Schwermineralkonzentrationen können mit 0,04 % in der Fraktion < 1 mm und 0,01 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Abbildung 20 zeigt die Schwermineralzusammen-setzung der Probe 31.

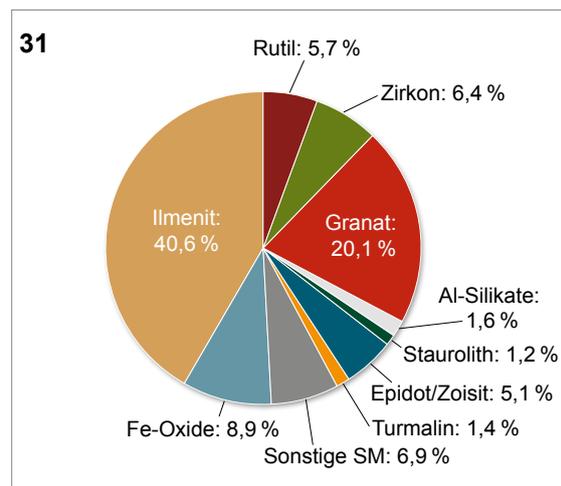


Abb. 20: Schwermineralzusammensetzung der Probe 31

Den überwiegenden Anteil der Schwerminerale nehmen Ilmenit (40,6 %), Fe-Oxide (8,9 %) und Granat ein (20,1 %).

Weitere Schwerminerale sind Rutil (5,7 %), Zirkon 6,5 %, Epidot (5,1 %) Al-Silikate (1,6 %), Staurolith (1,2 %) und Turmalin (1,4 %).

Als sonstige Schwerminerale treten auf: Kassiterit (0,2 %), Topas (0,5 %), Chromit (0,5 %), Hornblende (4,3 %), Apatit (0,4 %), Pyrit (0,2 %), Titanit (0,4 %), Monazit (0,4 %).

Die Gehalte an Epidot und Ilmenit lassen kombiniert eine Zugehörigkeit zum Einzugsgebiet der Saale zu. Die geringen Gehalte an Kassiterit und Topas können aus der Zwickauer Mulde stammen. Durch den hohen Granatanteil scheint auch ein Einfluss der Zschopau/Flöha/Striegis vorhanden zu sein (MÜLLER et al. 1988). Die Anwesenheit von Rutil, Zirkon und Turmalin im mehrere %-Bereich kann auf einen Anteil tertiärer Sedimente hindeuten.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit kommt als gerundete Körner vor, z. T. rissig, braun-rotbraun zoniert, schwach trüb, mitunter hellfarbig-bräunlich derb bis feinkörnig durchsetzt mit Einschlüssen (Nadeln, Tröpfchen ...) und vereinzelt mit Quarz und Silikatphasen verwachsen.

Zirkon tritt in gerundeten bis stark gerundeten Kristallbruchstücken auf, farblos bis hellfarbig, klar bis leicht trüb, mitunter rissig, z. T. zoniert, vereinzelt mit Festphaseneinschlüssen (Silikate, Apatit), selten als bläulich-weiße, trübe, radialstrahlige Kugeln mit Apatitaufwachsungen.

Rutil ist derb mit einzelnen Poren, Ausbrüchen, Rissen, gelblich rosa bis gelbrot, klar bis leicht trüb, pleochroitisch, z. T. einzelne Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse bis reich an nadelförmigen Einschlüssen, vereinzelt treten hellrötlich gelbe pseudomorphe polykristalline Aggregate auf.

Ilmenit kommt monomineralisch-derb vor, mit einzelnen Löchern und Rissen, silikatischen Einschlüssen und Löchern, z. T. idioblastensiebartig gehäuft, z. T. korrodiert, z. T. treten rundliche, kryptokristallin-dichte Aggregate bläulichgrauer Fe-Ti-Oxide mit Ilmenitchemismus auf.

Magnetit bildet derbe, mit rundlich-muschligen Ausbrüchen und einzelnen Rissen angerundete bis gerundete Körner, zeigt hellgraue Reflektionsfarbe mit bräunlich gelbem Stich, vereinzelt treten orientierte martitische Verwachsungen mit Hämatit auf, mitunter reich an Poren und entmischten silikatischen und sulfidischen Einschlüssen. **Hämatit** ist derb-polykristallin bis feinkristallin, wenig gerundet.

Granat zeigt unregelmäßige bis kantig-angerundete Bruchstücke, meist hellfarbig, stellenweise mit Vicinalen, vereinzelt Risse, Löcher und Einschlüsse (vereinzelt Sulfidtropfen).

Besonderheiten: Apatit, Topas, Phasen, welche auf technogene Einflüsse hindeuten (Cu-Legierungen, ZnO, CuO, Schlacke).

6.1.1.9 33 (Neiße)

Die Lagerstätte 33 befindet sich heute im Einzugsbereich der Neiße. Abgebaut werden in Nassgewinnung glazifluviale Ablagerungen in einer Rinne mit Anschluss an eine Endmoräne der Elster II Kaltzeit (LfULG-SACHSEN 2021).

Die Schwermineralkonzentrationen können mit sehr geringen 0,04 % in der Fraktion < 1 mm und 0,012 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Abbildung 21 visualisiert die Schwermineralzusammensetzung der Probe 33.

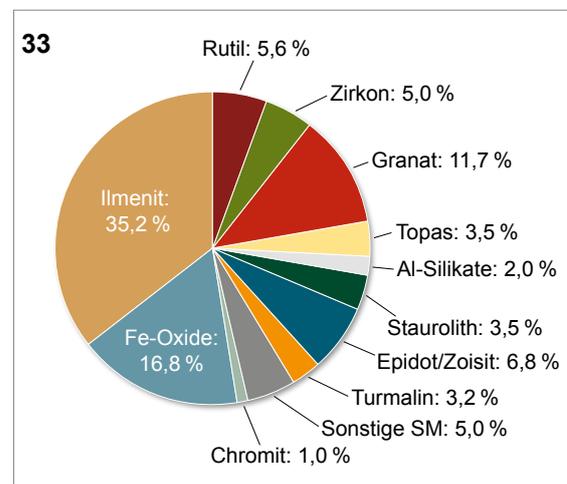


Abb. 21: Schwermineralzusammensetzung der Probe 33

Hauptbestandteile sind Fe-Oxide (16,8 %) und Ilmenit (32,2 %). Granat (11,7 %) tritt hauptsächlich als Almandin, in geringen Mengen als Grossular auf.

Weiterhin kommen vor: Rutil (5,6 %), Zirkon (5,0 %), Topas (3,5 %), Al-Silikate (2,0 %), Staurolith (3,5 %), Epidot/Zoisit (6,8 %), Turmalin (3,2 %) und Chromit (1,0 %).

Als sonstige Schwerminerale treten auf: Monazit (0,6 %), Beryll (0,5 %), Hornblende (2,8 %) und Titanit (0,3 %).

In geringen Mengen wurden die Spinelle Gahnit und Hercynit nachgewiesen (0,5 %). Auffällig ist der Anteil von Topas. Im direkten Einzugsbereich der Neiße sind keine Lagerstätten bekannt, die merkliche Anteile von Topas aufweisen. Das Vorhandensein von Beryll lässt den Schluss zu, dass im Einzugsbereich unter anderem Pegmatite vorkommen.

Während des Frühpleistozäns (Bautzener Elbe-lauf) mündete die damalige Neiße in den Weißwasserarm der Elbe (WOLF & SCHUBERT 1992). Die Neiße erhielt damit einerseits Sedimentmaterial aus dem östlichen niederschlesischen Raum, andererseits hatte sie Anschluss über den Bereich Osterzgebirge/Elbtalschiefergebirge. Der Topas zeigt eine starke Rissigkeit, was auf einen längeren Transport hindeuten kann. Chromit wird auf den Einfluss von basischen Gesteinen zurückgeführt, die im Einzugsbereich der Elbe liegen.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit wurde nicht beobachtet.

Zirkon tritt meist stark gerundet mit teilweise rissigen und rauen Oberflächen auf, z. T. ist er idiomorph, hellfarbig, klar bis leicht trüb, z. T. treten Gas-Flüssigkeits- bzw. opake Festphasen-Einschlüsse (Sulfide) auf.

Rutil ist derb bis feinkörnig, kantig, partiell abgerundet bis gerundet, die Oberfläche meist rau, gelblich braun bis graurötlich braun, meist trüb, mit Einschlüssen, z. T. rissig, vereinzelt hellrötlich gelbe, polykristallin-löchrige bis poikilitische, stark gerundete Aggregate mit einzelnen Ilmenitresten.

Ilmenit kommt divers vor, abgerundet bis stark gerundet, z. T. rau, teils derb, schwach anisotrop, wechselnd rissig, wenig korrodiert, mitunter löchrig bis poikilitisch, teils als helle kryptokristallin-dichte Fe-Ti-Oxid-Gemenge mit Ilmenitchemismus, mitunter auch mit flasrig-spindeligen Hämatit-Ilmenit-Entmischungen.

Magnetit bildet einzelne kantige Bruchstücke mit muschlig-rundlichen Ausbrüchen, mit grauer Reflektionsfarbe und braungelbem Stich. Daneben treten Hämatitaggregate als gerundete, schuppig-polykristallin-löchrige Pseudomorphosen auf.

Granat kommt in scharfkantigen bis partiell abgerundeten Bruchstücken und Splintern vor, z. T. ist er rissig, vereinzelt mit Löchern, hellfarbig bis leicht blassrötlich-bräunlich, klar, z. T. mit zahlreichen opaken Festphaseneinschlüssen und Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen. Mitunter ist er abgerundet und an der Oberfläche korrodiert.

Besonderheiten: Topas ist schwach bis stark rissig, abgerundet, etwas Karbonat, feinkörnig, rau, selten derber Pyrit.

6.1.1.10 38 (Elbe)

In der Kiessandlagerstätte 38 werden spätelsterkaltzeitliche fluviatile Sande und Kiese der „Elbtalwanne“ sowie Terrassenschotter der Weichselkaltzeit abgebaut. Aus der Lagerstätte wurde Material aus Bohrungen eines erweiterten Lagerstättenfeldes entnommen. Ein Teil der Probe wurde weiter in magnetische und elektrostatische Fraktionen zerlegt. Die Schwermineralgehalte sind im Vergleich mit anderen Proben relativ hoch und können mit 1,14 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,53 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Abbildung 22 zeigt die Schwermineralzusammensetzung der Probe 38.

In der Probe 38 kommen Fe-Oxide (14,7 %), Ilmenit (9,2 %), Al-Silikate (10,9 %), Topas (7,1 %), Granat (6,6 %), Zirkon (6,2 %) und Rutil (10,5 %) vor.

Weiterhin sind Epidot/Zoisit (2,3 %) und Turmalin (2,2 %) enthalten. Unter den sonstigen Schwermineralen werden Hornblendens (7,0 %) und Pyroxene (12,1 %), Apatit (6,0 %) und Titanit (3,2 %) gefunden. Kassiterit kommt mit 0,3 % vor.

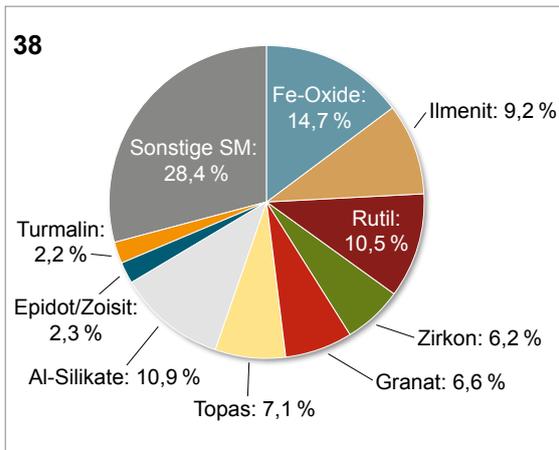


Abb. 22: Schwermineralzusammensetzung der Probe 38

Bezüglich des Standortes der Lagerstätte kann die Probe 38 mit der Probe 35KL verglichen werden (Abschnitt 6.1.1.11). In Probe 35KL wurden jedoch die leichten Schwerminerale bei der Schwermineralaufbereitung stark überfahren, sodass sich Kassiterit stark anreicherte (8,3 %).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Neben Aluminiumsilikaten, v. a. Sillimanit, z. T. auch Disthen und Andalusit, Quarz und Topas enthält die Probe Ilmenitphasen, Granate sowie Eisenoxidphasen, Zirkon, Rutil und etwas Kassiterit. Daneben kommen auch Amphibole und Pyroxene, Turmaline und Epidot vor.

Kassiterit tritt als meist kleine, scharfkantige Kristallfragmente auf mit einzelnen Rissen und Ausbrüchen, ist blass- bis hellbräunlich, zoniert bis fleckig graubraun, braun, braunorange, braungelb, klar bis leicht trübt, mitunter reich an verschiedenen Einschlüssen.

Zirkon bildet überwiegend feinkörnige, kurzprismatische bis fast isometrische, vereinzelt langprismatische Kristalle und Kristallbruchstücke. Diese sind kantig bis abgerundet, z. T. gut gerundet mit narbiger Oberfläche, häufig rissig, z. T. mit Festphaseneinschlüssen, v. a. Silikate, Apatit bzw. mit Anhäufungen von kleinen Einschlüssen hellfarbig bis lichtgrau oder blassbräunlich, vereinzelt braunfleckig, klar bis schwach trüb, mitunter zoniert.

Rutil kommt derb vor, die Reflektionsfarbe mit auffällig bräunlichem Stich, rotbraun bis dunkelgraubraun, trüb, mit Löchern, Ausbrüchen, silikatischen Einschlüssen, polysynthetisch verzwilligt; z. T. polykristallin körnig bis sagenitisch, meist hellgelb gefärbt.

Ilmenit zeigt meist abgerundete bis gerundete Partikel, teils derbe Massen, abgerundet bis gerundet, mit Rissen, Löchern, Ausbrüchen, selten mit Zwillingslamellen, regelmäßig mit silikatischen Einschlüssen, selten ist er mit Zirkon verwachsen, vereinzelt korrodiert bis fleckig alteriert; teils nahezu vollständig umgewandelt in feinstkörnig-dichte, nahezu homogene Massen der Pseudoilmenit-Pseudorutil-Reihe. Selten treten Hämatit-Ilmenit-Entmischungen auf.

Magnetit wurde nicht beobachtet, stattdessen porös-dichte polykristalline, orientiert verwachsene sowie derbe Hämatitaggregate, daneben rundliche kolloidale Limonitaggregate, die selten Sulfidreste führen. Vereinzelt tritt Chromit auf.

Granat kommt als kantige bis abgerundete Kristallfragmente vor, z. T. mit narbigen bis parkettierten Oberflächen, hellfarbig z. T. mit rötlichem bis bräunlichem Stich, meist wenig Einschlüsse, z. T. mit großen Silikateinschlüssen.

Besonderheiten: Die Probe enthält auffällig viel Titanit, als Seltenheiten treten Korund sowie Gahnit und andere Spinelle auf.

Die Probe 38 wurde weiterhin in mehrere magnetische und elektrostatische Fraktionen getrennt, um mögliche Wertminerale zu konzentrieren. Die Aufbereitungsversuche werden in Abschnitt 6.4.3 beschrieben.

6.1.1.11 35KL und 68KL (Elbe)

Die beiden Proben 35KL und 68KL stammen aus zwei Kieswerken, in welchen jeweils eine spezielle Anlage der Fa. Löka zur Schwermineralanreicherung installiert wurde. Beide Lagerstätten liegen im Ablagerungsbereich der Elbe und sind nur 11 km Luftlinie voneinander entfernt. In der Kiessandlagerstätte 35KL werden spätelsterkaltzeitliche fluviatile Sande und Kiese der „Elbtalwanne“ sowie Terrassenschotter der Weichselkaltzeit abgebaut.

Aus der Lagerstätte 68KL werden fluviatile, stark kiesige Sande der elster- bis saalekaltzeitlichen Elbe bei Riesa (Berliner Elbelauf, Tiefere Mittel-terrasse) gefördert.

Die Konzentrate wurden zunächst mit einer industriell installierten Waschrinne vorangereichert, anschließend auf dem Nassherd konzentriert. Durch „Überfahren“ der leichten Schwerminerale wurden bevorzugt die schweren Schwerminerale angereichert. Die Ausgangskonzentrationen der Schwerminerale können nicht angegeben werden, da keine Aussagen über die Ausgangsproben gegeben werden können (Entnahme aus der laufenden Aufbereitung).

Die Schwermineralzusammensetzungen werden in Abbildung 23 dargestellt.

Die Beschreibung der beiden Konzentrate erfolgt parallel, da die Ausgangsproben ähnlich sein dürften, jedoch durch das „scharfe“ Anreichern die ursprüngliche Schwermineralverteilung verändert wurde.

Den überwiegenden Anteil der Schwerminerale stellen die Fe-Oxide (34,7–48,7 %) und Ilmenit (25,7–33,5 %).

Als Hauptkomponente und schwerstes Mineral wurde Kassiterit stark angereichert auf 8,3 bis 8,7 %. Ebenfalls stark konzentriert wurden Zirkon (10,9–11,7 %) und Monazit (1,4–5,6 %).

Granat (2,1–2,4 %) und Rutil (1,1–1,6 %) wurden schon überfahren und somit abgereichert. Wahr-

scheinlich ist, dass Zirkon mit in die Abgänge gedrückt wurde.

Die beiden Konzentrate stellen Beispiele dar, dass es möglich ist, aus den Sedimenten der Elbe Kassiterit zu gewinnen. Kassiterit wird als schwerstes Schwermineral am stärksten angereichert.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten 35KL

Kassiterit tritt als unregelmäßige, teils kantige, teils angerundete bis gerundete Bruchstücke auf, mitunter mit Ausbuchtungen und Löchern (mit Sericit), rissig mit Ausbrüchen, fleckig-schlierig bis zониert hellbräunlich bis gelblich braun bzw. rotbraun, klar bis schwach trüb, vereinzelt mit größeren Festphaseneinschlüssen (Ilmenit). Einzelne Partikel sind polykristallin-körnig, dunkel, mit zahlreichen Einschlüssen.

Zirkon bildet gerundete bis gut gerundete, meist längliche Kristalle, vereinzelt idiomorphe Kristalle mit Löchern und Ausbuchtungen, ist meist hellfarbig, selten bräunlich, klar, selten wachstumszониert, z. T. mit Gas-Flüssigkeits- und Fremdphasen-Einschlüssen (Quarz, Silikate).

Rutil kommt derb, rissig, gut gerundet, braun vor, meist leicht trüb. Vereinzelt treten kantige, wenig angerundete Bruchstücke mit Rissen, Ausbrüchen und Löchern auf. Des Weiteren wurde schmutziggelblich-bläulicher, schwach trüber Anatas gefunden.

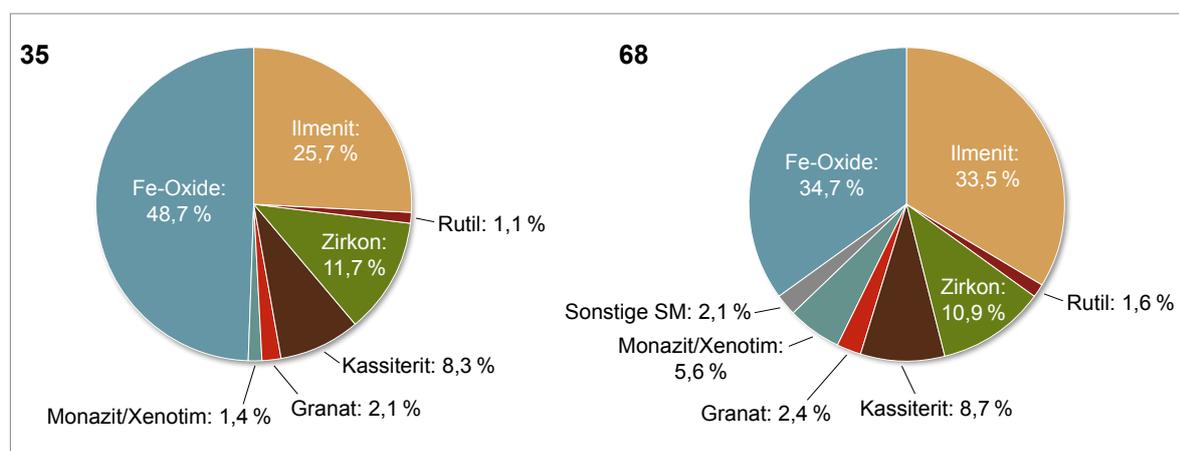


Abb. 23: Schwermineralzusammensetzung der Proben 35KL und 68KL

Ilmenit zeigt derbe, gerundete, rissige Körner, selten mit silikatischen Einschlüssen, mitunter randlich korrodiert, z. T. in Titanit umgewandelt. Häufig sind lamellare bis fleckige, teilweise orientierte Ilmenit-Hämatit-Verwachsungen vorhanden.

Fe-Oxide treten als **Magnetit** und **Hämatit** auf. Magnetit als massig-derbe, gerundete bis gut gerundete Körner (rosabräunlicher Stich), meist rissig, mit charakteristischen, oft großen rundlich muschligen Ausbrüchen und Löchern, mitunter randlich mit martitischen Hämatitlamellen bis weitgehend martitisiert. Hämatit bildet rundliche feinschuppig-dichte Aggregate oder angerundete Bruchstücke orientiert verwachsen und porös-derbe Pseudomorphosen.

Granat kommt in Form meist unregelmäßiger Kristallfragmente vor, angerundet, hellfarbig, fast klar, teilweise rissig, vereinzelt mit Gas-Flüssigkeits- bzw. Festphasen-Einschlüssen.

Besonderheiten: Magnetit tritt viel häufiger auf als nach QEMSCAN (vermutlich wg. Martitisierung andere Fe-O-Verhältnisse) detektiert. In Spuren treten Calcit, Monazit, Chromit, Stahl und selten Sulfide auf (Pyrit/Markasit).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten 68KL

Zu großen Teilen besteht die Probe aus Fe-Oxid-Phasen, wie Hämatit und Magnetit, und Ilmenitphasen sowie, weniger häufig, Zirkon. Untergeordnet sind Kassiterit, Monazit, Quarz, Granat-Phasen (v. a. Almandine) und TiO_2 -Phasen vertreten.

Kassiterit kommt als kantige bis gerundete Bruchstücke vor mit randlichen z. T. zahlreichen Rissen, Ausbrüchen und Löchern, teils mit schlierig-fleckigem, blassbräunlichem bis dunkelbraunem Aussehen, teils ist er leicht bräunlich orange bis braunrot, häufig gestreift, mitunter einschlussreich und schwach trüb. Vereinzelt treten hellfarbige, polykristalline, verschränkte Aggregate auf, vereinzelt mit Limonitüberzügen.

Zirkon bildet häufig langgestreckte bis gedrungene Kristalle und Kristallfragmente, sind kantig bis angerundet, hellfarbig, klar bis vereinzelt bräunlich, trüb, mitunter rissig, z. T. mit ausgeprägtem Zonarbau.

Rutil kommt häufig derb vor, kantig bis angerundet, mit Rissen, gelbbraun bis rötlich braun, fast klar, ist selten verwachsen mit derbem Ilmenit, z. T. bildet er helle, polykristalline bis feinkörnige Aggregate.

Ilmenit zeigt sich in Form teils angerundeter bis gerundeter Bruchstücke, ist häufig randlich korrodiert, z. T. mit meist parallelen Rissen und Ausbrüchen, mitunter mit Sulfideinschlüssen, teils kommen orientiert verwachsene Fe-Ti-Oxid-Phasen (ilmenitähnlich) vor, teilweise ist er partiell pseudomorph in Hämatit bzw. mitunter randlich in Titanit umgewandelt.

Magnetit bildet kantige bis angerundete, partiell gut gerundete Bruchstücke mit Rissen und rundlich muscheligen Ausbrüchen, vereinzelt mit Pyrit- und Apatiteinschlüssen, ist selten verwachsen mit Ilmenit, stellenweise martitisiert, z. T. fast vollständig in schuppigen bis derben Hämatit umgewandelt. Als Hämatit ist er z. T. derb mit Rissen, muschligen Ausbrüchen und Mineraleinschlüssen, z. T. gut gerundet, bildet feinschuppig-dichte Massen mit Löchern und Einschlüssen. Daneben treten einzelne angerundete Chromitkörner auf.

Granat zeigt sich als kantige bis angerundete Bruchstücke, vereinzelt mit Ausbrüchen, mitunter treten Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüsse auf, ist hellfarbig, überwiegend klar.

Besonderheiten: einzelne Pyritaggregate, Monazit häufig hellfarbig, fast klar.

6.1.1.12 41 (Pleiße)

In der Lagerstätte 41 werden fluviatile tertiäre Kiese und Kiessande (Eozän) des fossilen Altenburger und Lunzenauer Flusses abgebaut.

Als Probe wurde aus der Lagerstätte ein mittels Wendelscheider vorangereichertes Konzentrat weiter aufbereitet. Die Ausgangskonzentrationen sind nicht bekannt.

Die Schwermineralzusammensetzung ist in Abbildung 24 dargestellt.

Ilmenit hat den größten Anteil an der Schwermineralzusammensetzung mit 36,8 %. Rutil (14,4 %), Zirkon (14,5 %) und Topas (15 %) weisen starke

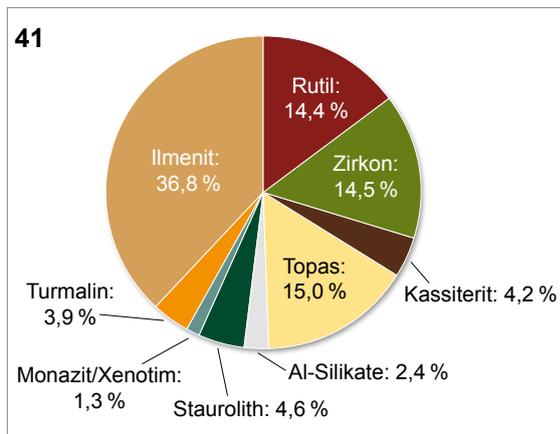


Abb. 24: Schwermineralzusammensetzung der Stichprobe eines Vorkonzentrates aus dem Wendelscheider der Lagerstätte 41

Anreicherungen auf. Daneben wurden Turmalin (3,9 %), Monazit/Xenotim (1,3 %), Staurolith (4,6 %) und Al-Silikate mit 2,4 % gefunden. Bemerkenswert ist der Anteil an Kassiterit mit 4,2 %.

Untergeordnet wurden die folgenden Minerale nachgewiesen: Fe-Oxide (0,8 %), Chromit (0,6 %), Granat (0,5 %), hauptsächlich als Almandin, Pyrit (0,7 %), Xenotim (0,2 %) und Spuren von Sphalerit. Turmalin wird von Schörl dominiert. Als Besonderheit wurde das Ce-Al-Phosphat Ce-Florencit analysiert.

Die hohe Anreicherung der stabilen Schwerminerale ist ein Merkmal intensiver chemischer Verwitterung der tertiären Kiese und Sande. Der Anteil der instabilen Phasen Al-Silikate und Staurolith gibt jedoch auch einen Hinweis auf jüngere Ablagerungen aus Metamorphiten.

Die Schwermineralverteilung und -konzentrationen sind nahezu identisch mit Probe 08/12. Beide Lagerstätten weisen damit das gleiche Einzugsgebiet und die gleiche geologische Geschichte auf (Eozäne Kiese und Sande des Lunzenauer Flusses).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit kommt als unregelmäßige, kantige bis gerundete Bruchstücke vor, mit Rissen und

Ausbrüchen, leicht trüb, fleckig bis zoniert hell- bis dunkelbraun, z. T. rotbraun, meist kaum Einschlüsse, vereinzelt ist er schwach trüb und einschchlussreich.

Zirkon zeigt idiomorphe, kantige, kaum angerundete, gedrungene bis längliche Kristalle bis stark abgerundete Kristallfragmente, kommt häufig mit Rissen vor, hellfarbig bis schlierig braun, vereinzelt dunkelbraun, fast klar bis trüb, vereinzelt zoniert, z. T. mit großen Einschlüssen und Löchern und zelliger Struktur.

Rutil ist teils derb, angerundet, liegt als Bruchstücke mit Rissen, Ausbrüchen und wenigen Einschlüssen (u. a. Sulfide) vor, unregelmäßig-buchig, stellenweise löchrig bis poikilitisch, gelbrot bis dunkelbraun, klar bis schwach trüb, häufig verzwillingt, teils als polykristallin-körnig-löchrige Massen, gerundet, schwach trüb, blass hellbräunlich, einschchlussreich. Daneben wurden vereinzelt kantige bläuliche Anataskristalle gefunden.

Ilmenit als Hauptanteil kommt derb vor, mit Entmischungskörperchen, angerundet bis gut gerundet, randlich rissig, mit einzelnen Einschlüssen, teilweise partiell in z. T. brüchige mikrokristalline Fe-Ti-Oxid-Gemenge umgewandelt; häufig gut gerundete bläulich graue Ti-Fe-Oxid-Pseudomorphosen mit Ilmenitchemismus und Fe-Defizit.

Magnetit wurde nicht beobachtet. Vereinzelt treten polykristalline, poröse **Hämatit**aggragate auf, z. T. lamellar verzwillingt, angerundet.

Granat bildet meist kantige, z. T. angerundete Bruchstücke, mit Rissen, klar, hellfarbig bis leicht bräunlich bis leicht rosa, mitunter zoniert. Vereinzelt wurden Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse gefunden.

Besonderheiten: konzentrisch-radialstrahlige Markasitaggragate, z. T. mit Framboiden, Topas kantig bis angerundet, unterschiedliche Monazit-ausbildung.

Die Probe 41 wurde weiterhin in mehrere magnetische und elektrostatische Fraktionen getrennt, um mögliche Wertminerale zu konzentrieren (Abschnitt 6.4.4).

6.1.1.13 42 (Unstrut)

Im Kieswerk 42 werden graue bis braune fluviatile Kiessande der Weichselkaltzeit (Niederterrassenschotter) im Bereich der Unstrut abgebaut. Die Herkunft der Kiese wird aus sauren und intermediären Vulkaniten des Thüringer Waldes, nordischen Geschieben und den Gesteinen des Thüringer Beckens abgeleitet (TLUBN 2021).

Die Schwermineralgehalte können mit sehr geringen 0,07 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,02 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 25 dargestellt.

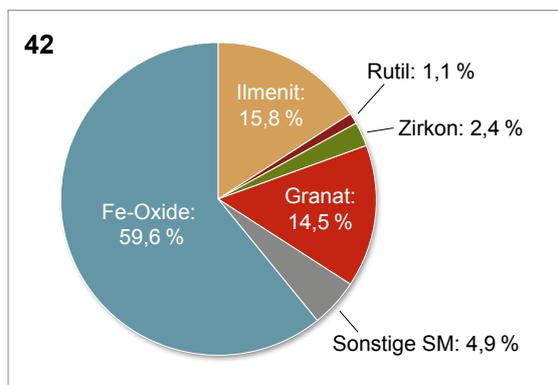


Abb. 25: Schwermineralzusammensetzung der Probe 42

Hauptanteile der Schwerminerale sind Fe-Oxide (59,6 %), Ilmenit (15,8 %) und Granat (14,5 %), hauptsächlich als Ca-Mg-haltiger Almandin ausgebildet mit geringen Anteilen an Pyrop-Almandin.

Weiterhin treten geringe Mengen an Rutil (1,1 %) und Zirkon (2,4 %) auf.

Als sonstige Schwerminerale kommen vor: Hornblende (0,6 %), Pyroxene (0,2 %), Turmalin (0,5 %), Baryt (1,8 %), Monazit (0,2), Pyrit (0,7 %) sowie Apatit (0,7 %).

Die Anwesenheit von Baryt zeigt die Nähe zu den hydrothermalen Ganglagerstätten am Nordrand des Thüringer Beckens. Der Granat, die Hornblenden und Pyroxene können aus den aufgearbeiteten nordischen Geschieben abgeleitet werden. Turmalin wird als stabiler Bestandteil der Gesteine des Buntsandsteins abgeleitet.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit wurde nicht nachgewiesen.

Zirkon bildet meist längliche, gut gerundete, rissige, hellfarbige, klare Kristalle mit wenigen Einschlüssen.

Rutil tritt häufig derb, leicht trüb bis trüb, bräunlich gelb bis orangebraun, gerundet auf. Zum Teil findet sich Anatas als kantige, partiell idiomorphe, fleckig blaue bis gelbliche, klare bis leicht trübe Kristalle.

Ilmenit kommt vereinzelt derb vor, meist als angerundete bis abgerundete Bruchstücke, z. T. mit Rissen, z. T. mit einzelnen Einschlüssen und Löchern; gitterartig orientiert mit Hämatitlamellen verwachsen, z. T. korrodiert und fleckig in Ti-Fe-Oxide umgewandelt, z. T. als gerundete feinkörnig-dichte Ti-Fe-Oxid-Massen mit Ilmenitchemismus, mitunter myrmekitisch in Hämatit und Titanit zerfallen.

Magnetit zeigt angerundete Bruchstücke mit gestoßenen, rissigen Rändern, mit Löchern und Ausbrüchen, hellgraue Reflektionsfarben mit bräunlich gelbem Stich (ilmenitähnlich), vereinzelt ist er randlich martitisiert. Daneben tritt **Hämatit** als dichte, feinblättrig-poröse bis derbe, z. T. kolloidmorphie, angerundete Massen auf.

Granat bildet teils kantig-idiomorphe Kristallstöcke (vorwiegend oktaedrisch), ist hellfarbig, fast klar mit einzelnen größeren Einschlüssen. Teils treten kantige, partiell angerundete Bruchstücke auf, z. T. mit großen silikatischen oder sulfidischen Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen, mitunter idiomorphensiebartig, hellfarbig, blassrötlich bis bräunlich rosa.

Besonderheiten: Deutlicher Glimmeranteil, kantige bis angerundete feinkörnige Barytbruchstücke, Apatit, vereinzelt Sulfide (Pyritframboidaggregate), Dolomit mikritisch.

6.1.1.14 44 (Weiße Elster)

In der Lagerstätte 44 werden elster- und saalekaltzeitliche (Mittelpleistozän), fluviatile Kiessande aus dem Einzugsbereich der Weißen Elster abge-

baut. Die Lagerstätte befindet sich nach LfULG-SACHSEN (2021) im Endabbau. Nach EISSMANN (1997) stammen die Sedimente aus dem Bereich des Vogtlandes und dem randlichen Westerzgebirge. Die Schwermineralgehalte können mit 0,25 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,077 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung zeigt Abbildung 26.

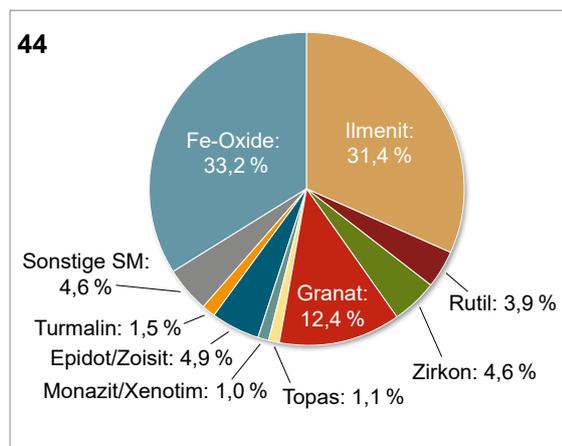


Abb. 26: Schwermineralzusammensetzung der Probe 44

Die Probe enthält als Hauptkomponenten Fe-Oxide (33,2 %) in Form von Magnetit und Hämatit, Ilmenit (31,4 %) und Granat (12,4 %).

Weiterhin treten auf: Rutil (3,9 %), Zirkon (4,6 %), Epidot/Zoisit (4,9 %), Turmalin (1,5 %), Monazit/Xenotim (1,0 %) und Topas mit 1,1 %.

Als sonstige Schwerminerale wurden analysiert Al-Silikate (0,3 %), Staurolith (0,3 %), Titanit (1,6 %), Hornblenden (1,7 %), Apatit (0,7 %) und geringe Mengen an Kassiterit (0,1 %).

Der Anteil Epidot/Zoisit stammt vermutlich aus den grünschieferfaziellen Metamorphiten des Vogtlandes. Topas kann über die Weiße Elster als auch die Pleiße bzw. Zwickauer Mulde transportiert worden sein. Der hohe Anteil an Granat lässt sich nur durch den Anschluss an die Zwickauer Mulde erklären, welcher auch die geringen Anteile des Kassiterits zulässt.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Hauptgemengeteile der Probe sind Fe-Oxid-Phasen, u. a. Hämatit und Magnetit, und Ilmenit, während Granat, Zirkon und Rutil bzw. Anatas mit Epidot zu den Nebengemengeteilen zählen. Kassiterit ist in Spuren vertreten.

Kassiterit tritt selten als angerundete, partiell kantige bis gerundete Kristallbruchstücke auf, ist schlierig bis zoniert bräunlich bis rötlich braun, schlierig trüb, z. T. mit zahlreichen Festphaseneinschlüssen. Zum Teil kommen kantig zerbrochene körnige, trübe, braune Massen vor.

Zirkon zeigt stark gerundete gedrungene Kristalle mit narbiger Oberfläche, ist hellfarbig, klar, z. T. mit Rissen, teilweise mit Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen, vereinzelt sind angerundete, unregelmäßige Bruchstücke vorhanden.

Rutil kommt als meist derbe, angerundete bis gerundete Bruchstücke mit Rissen vor, mitunter mit Einschlüssen und rötlich brauner bis gelblich brauner Färbung, fast klar bis schwach trüb. Vereinzelt treten hellere, angerundete, polykristalline, myrmekitische Aggregate auf.

Ilmenit ist derb, angerundet bis gerundet, meist rissig, vereinzelt mit Ausbrüchen, häufig randlich korrodiert, selten mit Einschlüssen bis poikilitisch, vereinzelt mit Hämatit verwachsen bzw. durch Alteration partiell hämatitisiert, mitunter teilweise bis vollständig in mikrokristallin-dichte Titanitmassen umgewandelt. Zum Teil treten gut gerundete pseudomorphe feinkörnige Ti-Fe-Oxid-Massen mit Ilmenitchemismus auf.

Magnetit bildet derbe, kantig-angerundete bis gerundete Bruchstücke mit auffälligen länglichen Löchern und muscheligen Ausbrüchen, teilweise mit Rissen am Rand. Er zeigt hellgraue Reflektionsfarben mit ilmenitähnlichem bräunlich gelbem Stich, mitunter ist er von Rändern und Rissen ausgehend in Hämatit umgewandelt, vereinzelt randlich martitisiert. **Hämatit** tritt häufig als abgerundete kolloidomorphe bis feinschuppig-körnige Massen auf.

Granat zeigt angerundete bis gerundete Bruchstücke mit hellfarbiger bis blassrosa Färbung, vereinzelt ist er blassbräunlich rot, teilweise spärlich

bis reichlich Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse enthaltend. Vereinzelt treten Stockaggregate idiomorpher oktaedrischer Kristalle auf.

Besonderheiten: Anwesenheit von Topas, Apatit und Monazit. Selten sind kantige, derbe, rissige Pyritbruchstücke.

6.1.1.15 47 (Elbe)

Die Probe 47 stellt Material aus einer Bohrung dar, die in die fluviatilen, stark kiesigen Sande der weichselkalt- bis frühholozänen Elbsedimente (Niederterrasse) niedergebracht wurde. Informationen zu Koordinaten und Teufen der Bohrungen lagen nicht vor und konnten auch nicht ermittelt werden. Nach EISSMANN (1975) kann ein Schwermineralspektrum in den Sedimenten erwartet werden, welches im Zusammenhang mit Magmatiten, kristallinen Schiefen und Rhyolithen steht.

Die Schwermineralgehalte betragen 0,36 % in der Fraktion < 1 mm und 0,20 % in der Gesamtkornfraktion.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 27 dargestellt.

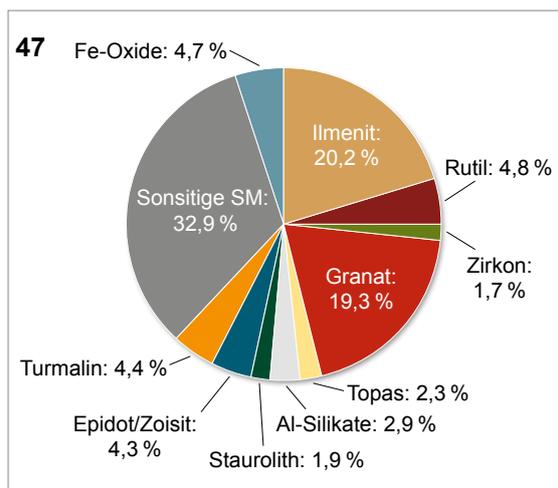


Abb. 27: Schwermineralzusammensetzung der Probe 47

Hauptanteile sind Ilmenit (20,2 %) und Granat (19,3 %), vorwiegend als Ca-Mg-haltiger Almandin, mit Anteilen von Almandin-Pyrop und Grossular.

Weiterhin treten auf Fe-Oxide (4,7 %), Rutil (4,8 %), Zirkon (1,7 %), Topas, (2,3 %), Al-Silikate (2,9 %), Staurolith (1,9 %), Epidot/Zoisit (4,3 %) und Turmalin (4,4 %).

Als sonstige Schwerminerale wurden gefunden: Hornblenden und Aktinolith (17,4 %), Diopsid (12,2 %), Titanit (1,6 %), Apatit (1,2 %), Monazit (0,4 %) und Mg-Chromit (0,1 %).

Der sehr hohe Anteil an Hornblenden und Pyroxenen ist nach MÜLLER et al. (1988) typisch für die Elbesedimente und zeigt den Anteil an basischen Magmatiten an. Obwohl Topas nachgewiesen wurde, findet sich kein Kassiterit im Schwermineralspektrum.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Es wurde kein **Kassiterit** nachgewiesen.

Zirkon tritt als stark gerundete Körner und gedrungene Kristalle auf, z. T. finden sich kantig-angerundete Kristallfragmente, die häufig rissig, hellfarbig, klar bis leicht trüb, vereinzelt bräunlich, zoniert, trüb sind. Selten sind rundliche feinkörnige, durchscheinende, helle, metamikte Partikel.

Rutil ist häufig derb, kantig-angerundet bis gerundet, z. T. rissig, gelbbraun, fast klar, z. T. mit Einschlüssen. Vereinzelt wurde polykristalliner, löchrig-poröser Anatas gefunden.

Ilmenit kommt kantig, meist angerundet bis gerundet vor, häufig derb, mit Rissen und Ausbrüchen, z. T. pleochroitisch, mitunter löchrig und ausgebuchtet, mit einzelnen Silikat- und Sulfideinschlüssen, z. T. korrodiert bis fleckig in derben oder polykristallinen Rutil umgewandelt. Mitunter treten Aggregate gitterförmig orientiert verwachsener Lamellen auf, vereinzelt orientiert mit Hämatit verwachsen. Weiterhin wurden gerundete mikrokristalline Ti-Fe-Oxid-Aggregate mit Ilmenitchemismus nachgewiesen.

Magnetit wurde nicht beobachtet, stattdessen Fe-Oxide als rundliche, polykristallin-feinkörnige und orientiert verwachsene **Hämatit**aggregate. Vereinzelt traten Chromitkörner auf.

Granat bildet kantig-angerundete bis gerundete Splitter und Bruchstücke, hellfarbig bis leicht rötlich-bräunlich, meist klar, häufig mit Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen (z. T. mit verschiedenen Mineralphasen nebeneinander).

Besonderheiten: keine

6.1.1.16 49 (Saale/Weiße Elster)

In der Lagerstätte 49 werden Kiessande aus der saalezeitlichen mittelpleistozänen Saale-Hauptterrasse abgebaut (LAGB-Sachsen-Anhalt 2021).

Abbildung 28 zeigt die Schwermineralzusammensetzung.

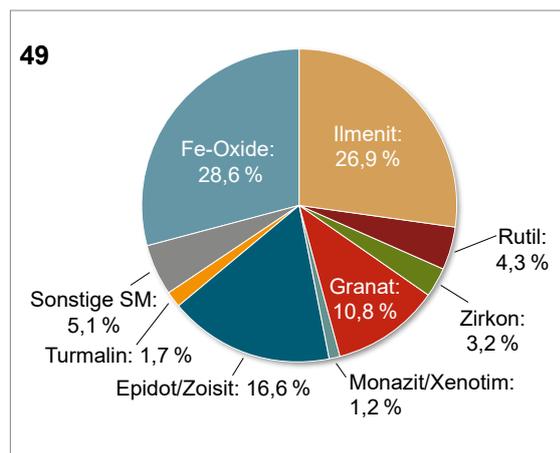


Abb. 28: Schwermineralzusammensetzung der Probe 49

Die Schwermineralkonzentrationen können mit 0,14 % in der Fraktion < 1 mm und 0,06 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Den überwiegenden Anteil der Schwerminerale stellen Fe-Oxide (28,6 %), Ilmenit (26,9 %) und Epidot/Zoisit (16,6 %). Weiter treten auf: Granat (10,8 %) als Almandin und Grossular, Rutil (4,3 %), Zirkon (3,2 %), Monazit (1,2 %) und Turmalin (1,7 %).

Sonstige Schwerminerale sind: Chromit (0,2 %), Titanit (1,0 %), Topas (0,3 %), Al-Silikate (0,3 %), Apatit (0,4 %), Hornblende (2,8 %) und Kassiterit (0,1 %).

Die Schwermineralzusammensetzung ist vergleichbar mit der Probe I-7 in ALLENBERG et al. (2012), welche nahezu den gleichen Standort widerspiegelt. Der Bereich der Lagerstätte liegt innerhalb des von SCHULZ (1962) und RUSKE (1964) postulierten saalezeitlichen Zusammenflusses von Unstrut und Saale. Da nur Spuren von Topas und Kassiterit vorhanden sind, ist die Herkunft der Schwerminerale weniger aus dem Erzgebirgsraum, eher aus dem Einzugsbereich der Saale abzuleiten, was auch durch die hohen Epidotgehalte begründet wird. Eine ähnliche Zusammensetzung wird bei Lagerstätte 65 gefunden, welche im direkten Saaleinflussbereich liegt.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit ist selten und kommt als kantige, z. T. angerundete Bruchstücke vor, fleckig hellfarbig bis hellbraun, z. T. rotbraun, klar bis leicht trüb, vereinzelt einschlussreich.

Zirkon bildet angerundete bis gut gerundete Kristalle, häufig mit narbiger Oberfläche, z. T. rissig, hellfarbig, klar bis leicht trüb, mit einzelnen Einschlüssen, z. T. ist er wachstumszoniert, mitunter metamikt, graubraun, zoniert und einschlussreich.

Rutil kommt hauptsächlich derb vor mit Rissen und Ausbrüchen, kantig bis gerundet, gelbbraun bis rötlich braun, z. T. fleckig verwachsen mit Ilmenit, z. T. mit Einschlüssen; vereinzelt eingewachsen in Quarzmatrix; vereinzelt polykristallin bis feinkörnig, trüb, orangeweiß bis bräunlich. Anatas mit grünlich blauer Färbung wurde nachgewiesen.

Ilmenit ist sehr divers in der Ausbildung, untergeordnet derb-homogen, angerundet bis gerundet, z. T. mit Rissen, vereinzelt lamellar verzwilligt oder mit orientierten Hämatitgemischungen. Häufig zeigt er verschiedene Defekte und Umwandlungserscheinungen. Es treten Löcher, poikilitische Einschlussgefüge, parallele Spaltrisse, Korrosion und partielle Pseudomorphisierungen zu Rutil, Titanit, kryptokristallin-dichten Ti-Fe-Oxid-Gemengen und fleckige Verwachsungen mit Rutil auf.

Als Fe-Oxide konnte **Magnetit** als kantig-angerundete bis gut gerundete Partikel festgestellt werden, z. T. mit Rissen, Löchern und Ausbrüchen, häufig fleckig vom Rand ausgehend in Hämatit

umgewandelt. Zum Teil finden sich martitische mit Hämatitlamellen, häufig mit limonitischer Kruste, z. T. kollomorphe Hämatit- und Limonitaggregate (siehe auch Abschnitt 6.2).

Granat tritt in Form von kantigen bis angerundeten Bruchstücken auf, z. T. ausgebuchtet, häufig narbig, z. T. rissig, hellfarbig sowie leicht bis blassrötlich bis blassbraun, klar bis leicht trüb, mit einzelnen bis zahlreichen Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen (Silikate), vereinzelt anomal anisotrop.

6.1.1.17 60 (Weiße Elster/Saale)

In der Lagerstätte 60 werden elster-, lokal saalekaltzeitliche, glazifluviale Schmelzwasserkiese abgebaut (Schmelzwasserkiese des Elsteris-Vorstoßes) (TLUBN 2021). Nach Aussage des Betreibers werden diese in Beckensande (BS) und Schmelzwasserkiese (SWK) getrennt. Die beiden Kiessande wurden separat beprobt und aufbereitet. An Schwermineralgehalten treten in der Fraktion < 1 mm 0,51 % in den Beckensanden und 0,077 % in den Schmelzwasserkiesen auf. Die Gesamtkorngröße beinhaltet 0,47 % Schwerminerale in den Beckensanden und 0,05 % in den Schmelzwasserkiesen. Aufgrund der geringen Schwermineralgehalte in den Schmelzwasserkiesen wurden diese nicht weiter betrachtet, sondern die Beckensande weiter aufbereitet und untersucht.

In Abbildung 29 ist die Schwermineralverteilung der Beckensande dargestellt.

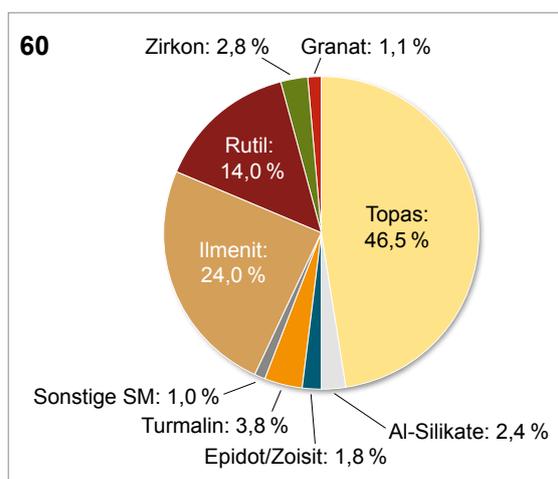


Abb. 29: Schwermineralzusammensetzung der Probe 60 Beckensande (BS)

Der größte Teil des Schwermineralspektrums wird von Topas eingenommen (46,5 %). Als Titanphasen treten Ilmenit (24,0 %) und Rutil (14,0 %) auf. Des Weiteren wurden Al-Silikate (2,4 %), Epidot/Zoisit (1,8 %), Turmalin (3,8 %), Zirkon (2,8 %) und Granat (1,1 %) analysiert.

Als sonstige Schwerminerale sind vorhanden Kassiterit (0,4 %), Staurolith (0,2 %), Chromit (0,2 %), Titanit (0,1 %), Hornblenden (0,1 %) und Apatit (0,1 %).

Vergleicht man die Schwermineralzusammensetzung von 60 mit denen von 41 und 08/12, so ist der Topasgehalt in 60 bedeutend höher als in den anderen beiden Lagerstätten. Der Anteil an Epidot, der typisch für die vogtländischen Schiefer ist, fehlt bei 08 und 41.

Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass in 08 und 41 eozäne Kiese und Sande abgebaut werden, in 60 aber elster- bzw. saalekaltzeitliche fluviatile Sedimente. Der vergleichsweise hohe Anteil an Rutil und Turmalin in 60 kann eine tertiäre Komponente nicht ausschließen.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Die Probe führt erhebliche Anteile an Topas, Ilmenit und Fe-reduzierte ilmenitverwandte Phasen. Zu geringen Anteilen sind Fe-Oxidphasen, Zirkon und Kassiterit neben Turmalin und Fe-haltigen Silikaten (Epidot, Staurolith) vertreten.

Kassiterit tritt als kantige bis angerundete Kristallfragmente auf, ist zoniert bis schlierig-fleckig gelbbräunlich bis rötlich-braun oder bräunlich-orange gefärbt, leicht trüb, z. T. mit Einschlüssen selten mit grünlich-bläulichem Turmalin verwachsen.

Zirkon bildet meist gedrungene bis isometrisch erscheinende, seltener prismatische Kristalle und Kristallfragmente, ist meist angerundet bis gut gerundet, z. T. rissig, hellfarbig, z. T. mit bräunlichen Schlieren und Flecken, mit Festphaseneinschlüssen, v. a. Silikat- und Phosphatminerale, vereinzelt auch mit Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen.

Rutil kommt überwiegend gerundet, polykristallin-feinkörnig, verschiedengestaltig, orangerot,

rötlich-gelblich, hellfarbig vor, oft als Fe-haltige Leukoxen-TiO₂-Umwandlungsprodukte, vereinzelt als helle Rutil- bzw. Anatas-Polykristallaggregate; teilweise gerundet, derb, oft löchrig, orange bis dunkelbraunrot, schwach trüb, polysynthetisch verzwilligt. Daneben treten kantige bis korrodiert-angerundete Kristallbruchstücke mit Rissen, Einschlüssen und Löchern auf, die wolkig dunkelbraun, bräunlich, gelblich grau bis graublau erscheinen, schwach trüb als Anatas zu bezeichnen sind.

Ilmenit zeigt angerundete bis gut gerundete Bruchstücke, mitunter Kristallfragmente, ist meist rissig und an Partikelgrenzen korrodiert, z. T. löchrig bis poikilitisch, z. T. mit silikatischen, untergeordnet tropfenförmigen sulfidischen Einschlüssen, selten mit Rutil verwachsen, z. T. partiell in Pseudorutilphasen mit braunen Innenreflexen umgewandelt, mitunter unregelmäßig bis lagig mit feinkörnigem Titanit verwachsen. Hämatit-Ilmenit-Entmischungen sind selten zu finden, daneben gerundete Partikel vollständiger, feinkörnig-dichter, z. T. rissiger sowie z. T. poröser Pseudoilmenit-Pseudorutil-Leukoxen-Pseudomorphosen; sowie diverse andere Umwandlungsprodukte.

Magnetit wurde nicht beobachtet. Vereinzelt finden sich angerundete bis gerundete, z. T. korrodierte polykristalline **Hämatit**aggregate, selten Titanohämatit mit lamellenförmigen Ilmenitentmischungen. Außerdem kommt Chromit in runden, homogenen, an Kornoberflächen rissigen Partikeln vor.

Granat kommt als kantige bis angerundete Bruchstücke vor, überwiegend hellfarbig mit leicht rötlichem Stich, meist klar, z. T. mit Löchern und Einschlüssen, mitunter gelbbraunlich-rötlich mit Rissen und Einschlüssen, kaum zoniert.

Besonderheiten: Es treten deutliche Mengen an Magnsiochromit auf, vereinzelt auch Korund.

Die Probe 60 wurde weiterhin in mehrere magnetische und elektrostatische Fraktionen getrennt, um mögliche Wertminerale zu konzentrieren. Die Aufbereitungsversuche werden in Abschnitt 6.4.7 beschrieben.

6.1.1.18 64 (Helme)

Die Lagerstätte 64 befindet sich im Einzugsbereich der Helme in einer Subrosionssenke, die gefüllt ist mit mehreren pleistozänen Schotterkörpern. Abgebaut werden hauptsächlich fluviatile weichselkaltzeitliche, mitunter auch saalekaltzeitliche Kiessande. Der Kiessand ist überwiegend fein- bis mittelkiesig und mittel- bis grobsandig, rötlich grau bis graubraun, mit nicht aushaltenden Ton/Schlufflagen. Die Geröllzusammensetzung besteht hauptsächlich aus Rhyolithen/Andesiten und Grauwacken, gefolgt von Quarziten/Kiesel-schiefern, Tonschiefern, Rotliegendesedimenten, Melaphyren/Keratophyren/Diabasen, Quarz, Sandstein (Buntsandstein), selten nordischen Komponenten. Abgeleitet werden die Gesteinskomponenten hauptsächlich aus dem Südharz (TLUBN 2021).

Die Schwermineralgehalte können mit 1,32 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,135 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 30 dargestellt.

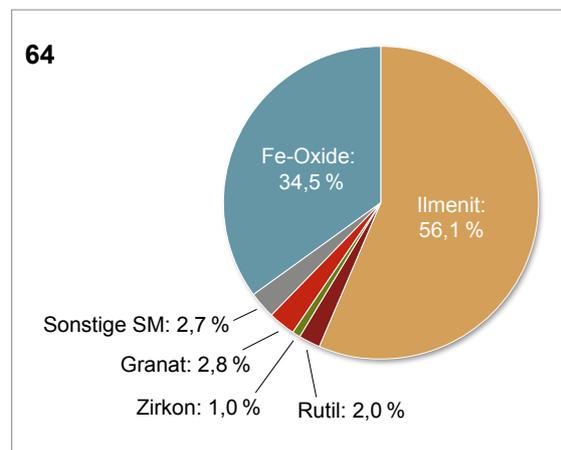


Abb. 30: Schwermineralzusammensetzung der Probe 64

Die Probe 64 besticht durch seinen sehr hohen Anteil an Ilmenit (56,1 %) und Fe-Oxiden (34,5 %). Die weiteren Wertminerale Rutil (2,0 %) und Zirkon (1,0 %) treten sehr untergeordnet auf.

Als sonstige Schwerminerale wurden Baryt (1,8 %), Apatit (0,3 %), Turmalin (0,3 %), Monazit

(0,1 %), Chromit (0,1 %) und Epidot/Zoisit (0,1 %) gefunden.

Die Herkunft der Schwerminerale kann aus der unmittelbaren Umgebung des Süd-Harzes über die Vorfluter Zorge und Bere abgeleitet werden. Tonschiefer, Melaphyre/Keratophyre/Diabase können die Liefergesteine des Ilmenits sein. Des Weiteren sind die Ilmenite stark Mangan-haltig. Der Bereich um Ilfeld ist bekannt für seine Fe-Mn-Gänge. Auch ist der Anteil an Baryt auf die zahlreichen Barytgänge im nördlichen Einzugsgebiet der Lagerstätte zurückzuführen.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kurzbeschreibung: Neben Quarz und Feldspäten sind in der Probe in höheren Anteilen Ilmenit und ilmenitverwandte Phasen sowie Fe-Oxide, v. a. Hämatit, vertreten. Untergeordnet kommen Rutil und Anatas, Zirkon und Granat sowie etwas Topas vor.

Kassiterit wurde nicht beobachtet.

Zirkon bildet prismatische bis gedrungene Kristalle, ist angerundet bis gerundet, hellfarbig, z. T. mit grünlich grauem Stich, überwiegend klar, z. T. mit Rissen und Fremdphaseneinschlüssen (Apatit, Silikate), z. T. treten Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse auf, vereinzelt ist er zoniert.

Rutil kommt gerundet, derb, z. T. polysynthetisch verzwillingt vor, ist braun bis orange, leicht trüb bis durchscheinend, daneben treten angerundete bis gerundete polykristalline Aggregate auf, teils feinkörnig-richtungslos, teils gitterartig-orientiert, meist rötlich gelb bis gelblich-weißlich. Zum Teil werden graubraune oder gelblich graue bis bläulich graue, trübe, polykristalline Anatasaggregate beobachtet, selten sind idiomorphe, scharfkantige Kristalle, z. T. verwachsen mit massigem Hämatit, z. T. als Entmischung.

Ilmenit bildet hauptsächlich Bruchstücke, vereinzelt nur idiomorphe Kristalle, ist angerundet bis gut gerundet, vereinzelt mit Zwillingslamellen, mitunter polysynthetisch verzwillingt, oft rissig und korrodiert, meist mit Übergängen zu Fe-verarmtem Ilmenit bis Pseudorutil, z. T. mit Löchern und Einschlüssen. Häufig sind verschiedene Fe-hal-

tige Pseudorutil-Leukoxen-Phasen mit braunen Innenreflexen, gut gerundeten Partikeln, porös-feinkörnig bis kryptokristallin-dicht mit orientierten oder richtungslosen Gefügen. Selten treten Hämatit-Ilmenit-Entmischungen auf, dann randlich häufig mit hämatitisch-limonitischen Verwitterungskrusten.

Es wurde kein **Magnetit** beobachtet. Häufig treten angerundete bis gerundete **Hämatit**aggregate auf, teils als feinschuppig-dichte Massen, teils polykristalline, porös-dichte bis zellige Verdrängungsbildungen unterschiedlicher Textur, vereinzelt kollomorph bis radialfasrig-konzentrisch. Selten ist gut gerundeter, porös-derber, rissiger Ti-Hämatit gefunden worden. Mitunter sind Entmischungsverwachsungen von Hämatit und Rutil vorhanden. Vereinzelt kommt Chromit vor.

Granat zeigt kantige, vereinzelt angerundete Bruchstücke, mitunter mit partiell parkettierter Oberfläche, ist hellfarbig mit rötlichem Stich, vereinzelt blassrosa, häufig reich an Einschlüssen verschiedener Mineralphasen, z. T. treten fadenartige, vereinzelt schlauchförmig Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse auf.

Besonderheiten: Baryt, überwiegend gerundet mit Rissen und zahlreichen Ausbrüchen, monokristallin, hellfarbig, leicht trüb bis hellgrau, trüb, feinkörnig-dicht, oft mit bräunlichen Pigmentschlieren; selten ist framboidaler Pyrit.

Die Probe 64 wurde weiterhin in mehrere magnetische und elektrostatische Fraktionen getrennt, um mögliche Wertminerale zu konzentrieren (Abschnitt 6.4.8).

6.1.1.19 67 (Saale)

In der Lagerstätte 67 werden Mischschotter aus saalezeitlichen Schmelzwassersanden (glazial) und Hauptterrassenschottern in Trocken- und Nassgewinnung abgebaut (LAGB 2021).

Die Schwermineralgehalte betragen 0,13 % in der Fraktion < 1 mm und 0,044 % in der Gesamtkornfraktion.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 31 dargestellt.

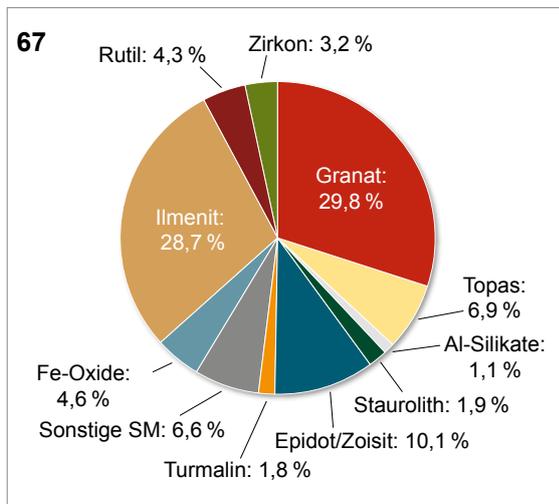


Abb. 31: Schwermineralzusammensetzung der Probe 67

Den überwiegenden Anteil der Schwerminerale stellen Ilmenit (28,7 %), Granat (29,8 %) und Epidot/Zoisit (10,1 %).

Daneben sind Topas (6,9 %), Al-Silikate (1,1 %), Staurolith (1,9 %), Turmalin (1,8 %), Fe-Oxide (4,6 %), Zirkon (3,2 %) und Rutil mit 4,3 % enthalten.

Als sonstige Schwerminerale treten auf: Hornblenden (4,4 %), Pyroxene (0,3 %), Titanit (0,8 %), Apatit (0,7 %), Kassiterit (0,1 %) und Chromit (0,4 %).

Relativ hohe Gehalte an Topas, Granat und die Anwesenheit von Kassiterit machen als Liefergebiet die Zwickauer Mulde wahrscheinlich (MÜLLER et al. 1988). Dafür sprechen auch die Anteile an Al-Silikaten und Staurolith. Die Lagerstätte liegt im derzeitigen Einflussbereich der Saale. Daraus könnte der hohe Anteil an Epidot abgeleitet werden (ALLENBERG et al. 2012). Nach LAGB (2021) wird die Lagerstätte aber auch mit glazialen Anteilen beschrieben, woraus der Granat- und Epidotanteil abgeleitet werden kann.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit tritt als kantige bis angerundete Kristallbruchstücke auf, insbesondere randlich mit Rissen und Ausbrüchen, z. T. verzwillingt, schlie-

rig-fleckig bis zoniert hellfarbig bis braun, z. T. dunkelrotbraun, klar bis schwach trüb, häufig mit verschiedenen Einschlüssen.

Zirkon zeigt kantige bis angerundete, mitunter gut gerundete Kristalle und Kristallfragmente, ist z. T. narbig, hellfarbig, z. T. mit grünlichem Stich, meist klar, meist nur mit wenigen Einschlüssen.

Rutil kommt als teils kantige bis angerundete, rissige Kristallfragmente vor, als teils gerundete derbe Massen mit bis poikilitischem Lochmuster, z. T. als angerundete bis gerundete polykristalline Massen, nicht selten sind spindelig-gitterförmige orientierte Sagenite; daneben auch als Anatas in Form gerundeter körniger Massen, trüb, bräunlich grau bis bläulich grau.

Ilmenit ist häufig derb, angerundet bis gerundet, z. T. mit parallelen Rissen und häufig korrodiert, vereinzelt löchrig, vereinzelt treten Ilmenit-Hämatit-Entmischungen auf, z. T. partiell alteriert bis Umwandlungen in Rutil bzw. Titanit, z. T. gerundete kryptokristalline Ti-Fe-Oxid-Massen mit Ilmenitchemismus.

Magnetit ist praktisch nicht vorhanden, aber z. T. angerundete, derbe, löchrige Hämatit-Pseudomorphosen mit vereinzelt Magnetitresten, z. T. als gerundete feinkörnig-dichte sowie porös-kollomorphe Hämatitaggregate. Daneben tritt gerundeter, randlich rissiger Chromit auf.

Granat zeigt kantige bis angerundete, z. T. bis gut gerundete Bruchstücke mit Ausbuchtungen und Ausbrüchen. Teils ist er einschlussfrei, teils reich an Einschlüssen (Mineralphasen: Rutil, Sulfide, Ilmenit, Quarz, Silikate; Hohlräume und Löcher sowie Gas- und Flüssigkeits-Einschlüsse, vereinzelt als Netzwerke verästelter Kanäle), hellfarbig bis blassrötlich, z. T. hellbräunlich rot, klar bis leicht trüb.

Besonderheiten: Topas tritt häufig als auffällig große Bruchstücke auf, kantig bis angerundet, mit Rissen und Ausbrüchen. Markasitaggregate und Galenit als scharfkantige Spaltstücke wurden gefunden. Letztere werden auf Verschleppungen bei der Aufbereitung zurückgeführt.

Eine Zusammenfassung der Schwermineralverteilung und -gehalte der Lagerstätten im Einzugsbereich der Elbe wird in Abbildung 32 dargestellt.

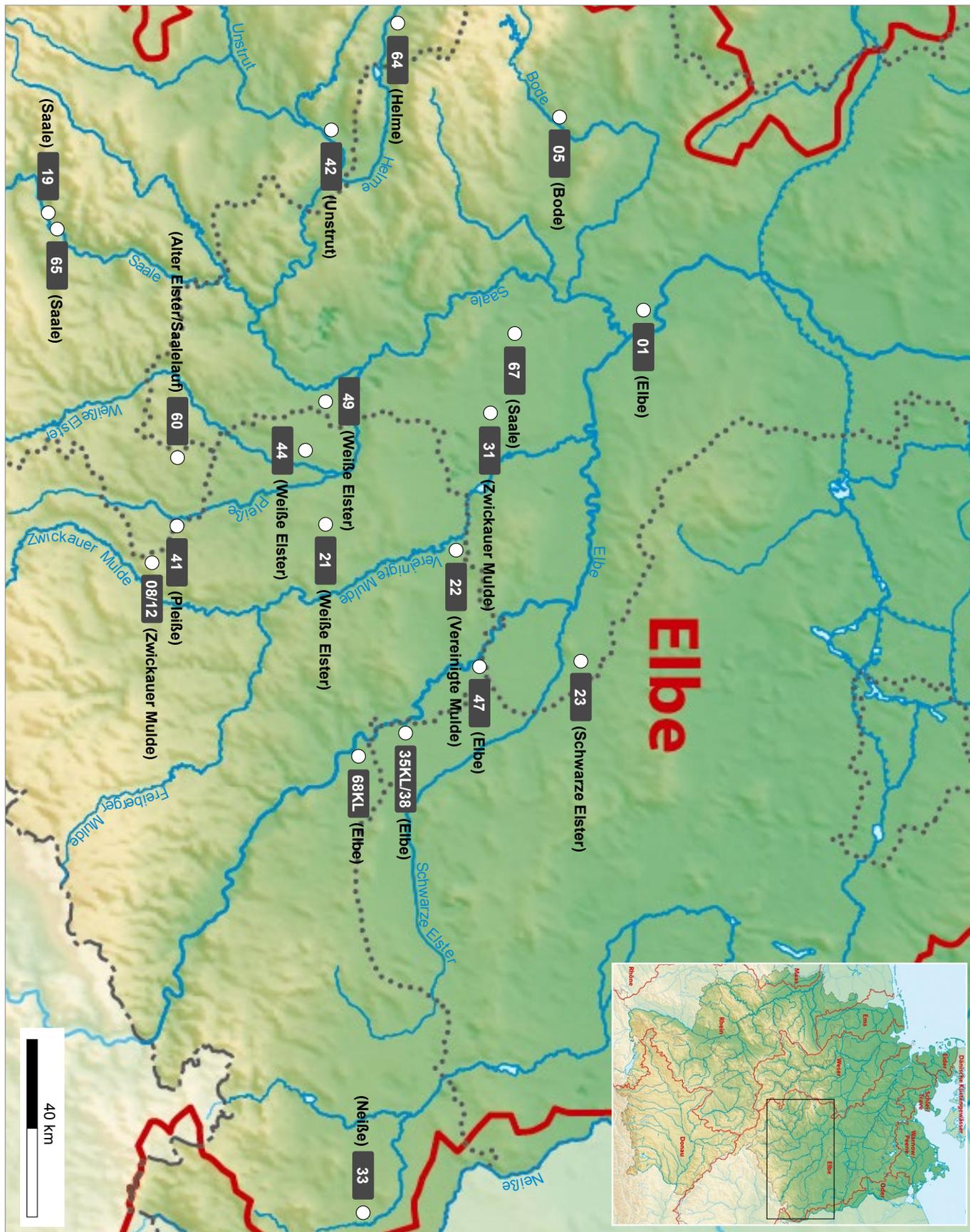
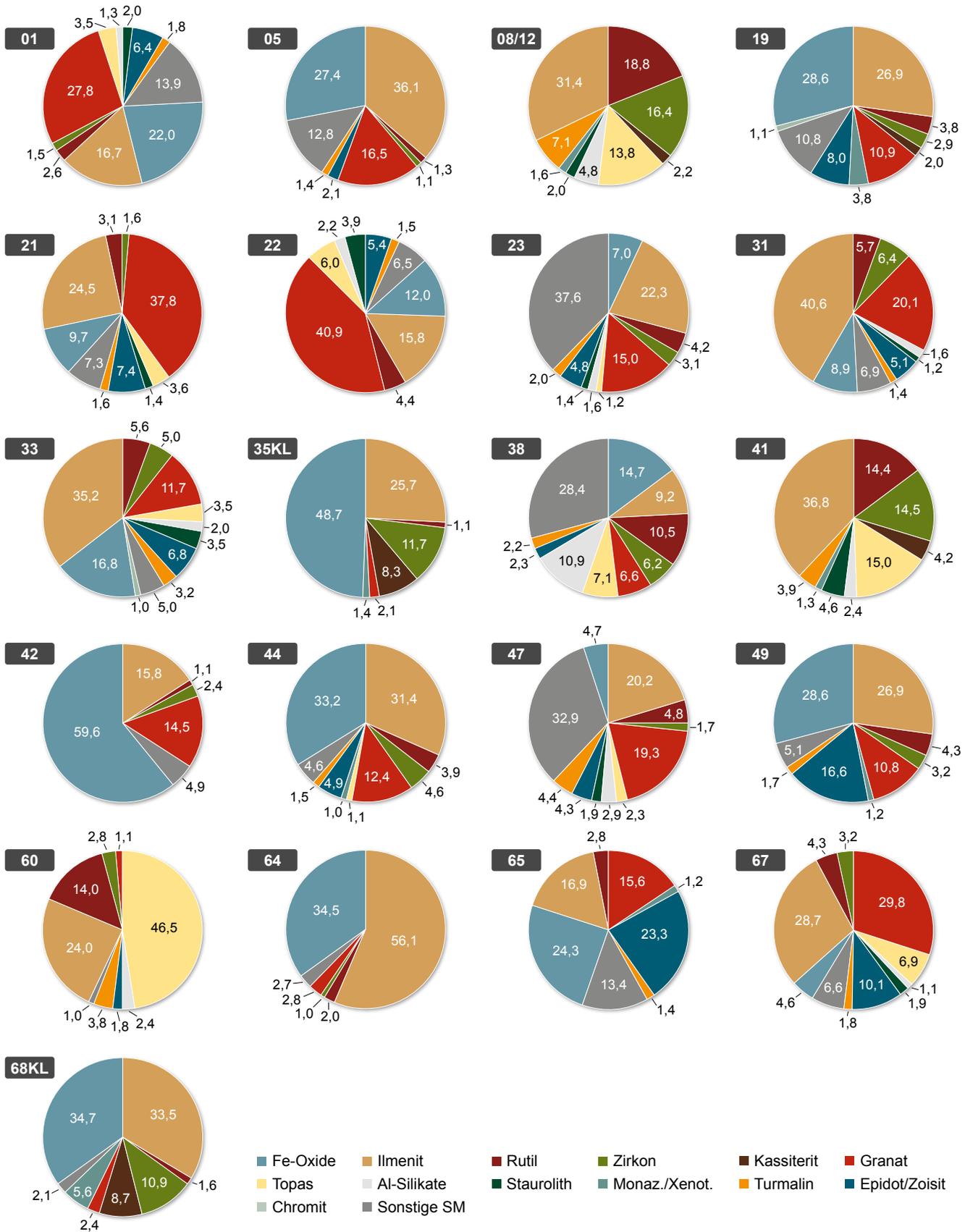


Abb. 32: Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten im Einzugsbereich der Elbe (Angaben in %) (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021)



In den Proben 35KL und 68KL sind die schweren Schwerminerale bevorzugt angereichert (NORD-NORDWEST/WIKIPEDIA 2021).

Die 20 Lagerstätten (Abb. 32), welche im Einzugsgebiet der Elbe beprobt wurden, zeigen sehr prägnante regionale Unterschiede. Diese sind auf die lokalen Einzugsgebiete der Nebenflüsse zurückzuführen. Wie schon MÜLLER et al. (1988) festgestellt haben, enthalten die Sedimente, die im Zusammenhang mit der Saale stehen, meist viel Epidot. Dieser lässt sich aus dem Thüringer Schiefergebirge ableiten und als Marker nutzen. Je weiter nördlich Epidot in den Sedimenten anzutreffen ist, kann er sich mit Epidot aus den glazialen Sedimenten überschneiden. Topas und Kassiterit sind Marker aus dem Bereich Erzgebirge. Beide stammen hauptsächlich aus den Greisenlagerstätten und assoziierten Granitoiden, Metasomatiten, Pegmatiten und Gangbildungen. So sind sogar in der Lagerstätte 33 (Neiße) relativ hohe Mengen an Topas neben metamorphen Al-Silikaten und Staurolith zu finden, die nach WOLF & SCHUBERT (1992) auf ehemalige Flussläufe mit Bezug zum Erzgebirge hinweisen. Der Topas wird hauptsächlich über die Weiße Elster, Pleiße und Zwickauer Mulde nach Norden transportiert und findet sich in diversen beprobten Lagerstätten wieder. Nach MÜLLER et al. (1988) wurde sächsischer Topas auch in den Niederlanden gefunden. Die Al-Silikate und Staurolith sind ebenfalls in den Lagerstätten vorhanden, welche mit metamorphen Gesteinen wie Glimmerschiefer, Gneise und Granulite in Zusammenhang gebracht werden.

Höhere Kassiteritgehalte im Prozentbereich treten nur in den Lagerstätten 41 und 08/12 auf. In beiden werden tertiäre Kiese und Sande abgebaut. Diese fallen durch das Fehlen von instabilen und Anreicherung der stabilen Schwerminerale auf. Im Falle von Lagerstätte 60 mit extrem erhöhten Topas- und sehr geringen Granatgehalten scheint eine reine Ableitung der Sedimente aus dem Einzugsbereich der Weißen Elster möglich. In dessen Kiesfraktion (SWK-Schmelzwasserkiese) wurden jedoch auch Feuerstein und Kreide gefunden (eigene Untersuchungen im BMBF-Projekt SEESand), die eindeutig auf einen glazigenen Einfluss hindeuten.

Kassiterit-höflich sind die Lagerstätten 41 und 08/12 mit mehreren Prozent im Schwergut. Daneben würde in den Lagerstätten 60 und 38 Kassiterit gewinnbar sein.

6.1.2 Einzugsgebiet Donau, Isar und Inn

Das Einzugsgebiet der Donau ist das gesamte nördliche Alpenvorland und es ist gekennzeichnet durch die hauptsächlichlichen Zuflüsse der Iller, Mindel, Lech, Isar und des Inn aus dem nördlichen und Zentralalpenraum und der Naab und des Regen im nordöstlichen Bereich mit den Liefergebieten aus dem Fichtelgebirge und dem Bayrischen Wald. Hauptsächlich werden Fluss- und Schmelzwasserschotter aus der Mindel-, Riss- und Würmkaltzeit bis spätes Holozän abgebaut (LfU-BAYERN 2021). Daneben finden sich Kiessandlagerstätten in tertiären Ablagerungen (Nördliche Vollschotter-Abfolge) (UNGER 1983, 1989; DOPPLER et al. 2005, MAURER & BUCHNER 2007). Speziell in den Vollschottern wurden auch Hinweise gefunden, dass die Donau im Tertiär Richtung Westen entwässerte und ein Einzugsgebiet hauptsächlich aus der Böhmisches Masse hatte. Die hauptsächlichliche Menge an pleistozänen Sedimenten stammt jedoch aus der Aufarbeitung des glazialen Schutts aus dem nördlichen Alpenraum.

Im Einzugsgebiet von Donau, Isar und Inn wurden acht Standorte von Kiessandlagerstätten beprobt. Im Folgenden werden die regionalgeologische Einordnung, die gebauten Schichten, die Schwermineralgehalte, die mögliche Herkunft der Sedimente und die mineralogischen Charakteristika der Minerale Fe-Oxide, Ilmenit, Granat, Rutil, Zirkon (und Kassiterit) der Einzellagerstätten beschrieben.

Tab. 6: Beprobte Standorte im Einzugsbereich von Donau, Isar und Inn und Bezug zu den rezenten Flusssystemen

Kürzel	rezentes Einzugsgebiet
02	Isar
03KL	Donau
06	Donau
17KL	Tertiäre Hochfläche
34KL	Isar
39	Inn
46	Isar
63KL	Donau

6.1.2.1 02 (Isar)

Die Lagerstätte 02 beinhaltet hochwürmzeitliche Schmelzwasserschotter aus der Niederterrasse im Bereich der Isar (LfU-BAYERN 2021). Der Schwermineralgehalt wurde mit 0,75 % in der Fraktion < 1 mm und 0,14 % in der Gesamtkornfraktion bestimmt.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 33 dargestellt.

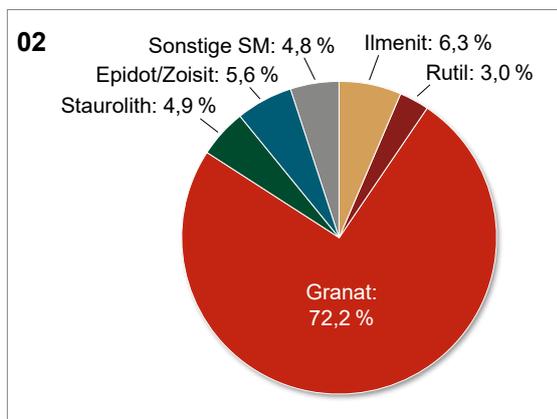


Abb. 33: Schwermineralzusammensetzung der Probe 02

Granat ist der Hauptbestandteil der Schwerminerale mit 72,2 %. Daneben treten Staurolith (4,9 %), Epidot/Zoisit (5,6 %), Ilmenit (6,3 %) und Rutil (3,0 %) auf.

Als sonstige Schwerminerale wurden nachgewiesen: Zirkon (0,3 %), Chromit (0,1 %), Fe-Oxide (0,8 %), Titanit (0,8 %), Al-Silikate (0,9 %), Turmalin (0,4 %) und Monazit (0,5 %).

Der sehr hohe Anteil an Granat ist wie bei den Lagerstätten 06 und 46 aus den Granat-führenden basischen Metamorphiten abzuleiten, welche über die Gletscher aus dem Zentralteil der Alpen transportiert wurden. Ebenso sind die Lagerstätten in den Gehalten an Rutil, Staurolith, Epidot und Ilmenit sehr ähnlich.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Zirkon ist teilweise angerundet idiomorph bis gerundet, z. T. löchrig, hellfarbig, mitunter tritt ein diffuser Zonarbau auf mit großen Kernen (Zirkon-

altbestand), meist ist er homogen bis schlierig-undulös ausgebildet.

Rutil erscheint sowohl primär massig als auch in Form feinkristalliner Umwandlungsprodukte, derbe Massen dunkelgelbrot und einschlussreich, feinkristalline Aggregate hellrötlich gelb und regellos oder orientiert verwachsen, als Neubildung kommt auch sehr heller meist feinkristalliner Anatas vor.

Ilmenit tritt in der Regel massig-dicht bis löchrig als angerundete idiomorphe Kristalle oder angerundete Kristallbruchstücke auf, ist oberflächlich und auf Rissen unterschiedlich stark korrodiert bis nahezu vollständig in Ti-Oxide umgewandelt (sowohl Rutil als auch Anatas). Häufig finden sich Verwachsungen mit Fe-Oxiden.

Fe-Oxide treten überwiegend als kristalliner Hämatit auf.

Granat kommt hellfarbig vor mit starkem Relief, zeigt meist kantige bis angerundete Bruchstücke, z. T. mit scharfkantigen Ausbrüchen; teilweise mit oxidischen Einschlüssen (wahrscheinlich Ilmenit und Magnetit) und ist vereinzelt reich an Gas-Flüsigkeits-Einschlüssen.

Besonderheiten: Neben verschiedenen Karbonatphasen treten in der Probe Pyrit und Galenit mit unterschiedlichem Verwachsungsgrad auf. Bräunliche bis schwärzliche unregelmäßige, mit Silikaten verwachsene Monazitpartikel sind nicht selten. Daneben kommen Limonit-Tonmineral-Aggregate vor. Auf einzelnen silikatischen Körnern kommen helle, nanokristalline Krusten vor, die möglicherweise aus Karbonaten bestehen. Apatit ist sehr selten.

6.1.2.2 03KL und 63KL (Donau)

Die beiden Proben 03 und 63 stammen aus zwei Kieswerken, in welchen jeweils eine spezielle Anlage zur Schwermineralanreicherung installiert wurde. In der Lagerstätte 03 werden eiszeitliche Schmelzwasserschotter der Hochterrasse 2 aus der Donau abgebaut. Lagerstätte 63 beinhaltet die würmzeitlichen Flussschotter aus der Niederterrasse der Donau.

Die Konzentrate wurden mittels Nassherd hergestellt, indem bevorzugt die schweren Schwerminerale

rale angereichert wurden. Die Ausgangskonzentration der Schwerminerale kann nicht angegeben werden, da keine Aussagen über die Ausgangsproben bekannt sind.

In Abbildung 34 werden die Schwermineralzusammensetzungen der Proben 03KL und 63KL veranschaulicht.

Die beiden Proben zeigen nahezu identische Schwermineralverteilungen und -konzentrationen, obwohl sie aus unterschiedlichen Lagerstätten stammen, welche ca. 30 km voneinander entfernt liegen.

Hauptanteile der Schwerminerale sind Ilmenit (39,5–43,0 %) und Fe-Oxide (7,1–9,0 %). Granat (21,2–25,5 %) wird durch Almandin dominiert. Durch das „Überfahren“ der Schwermineralfraktion wurden die Anteile an Monazit/Xenotim (8,8–10,9 %) und Zirkon (10,6–13,5 %) sehr stark erhöht.

Weitere Schwerminerale sind: Rutil (2,3–3,1 %), Titanit (0,3 %), Kassiterit (0,2 %), Epidot (0,2 %), Hornblende (0,3–0,5 %), Staurolith (0,2 %) und Pyrit (0,1–0,2 %). In beiden Proben waren noch geringe Mengen an Edelmetallen vorhanden.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten 03KL

Kassiterit bildet regellos geformte bis rundliche Partikel, meist trüb, braun bis blassbräunlich

gefärbt mit wolkiger Farbverteilung, z. T. schwach zoniert, z. T. mit Einschlüssen.

Zirkon tritt vorwiegend hellfarbig bis farblos auf, anscheinend verschiedene Ausbildungen – idiomorphe, dünnsäulige bis kurzprismatische Kristalle, z. T. mit ausgeprägtem Zonarbau, sowie angerundete bis stark gerundete, sehr homogen erscheinende Partikel.

Rutil zeigt gelbrote Färbungen, sowohl als derbe Umwandlungszonen im Ilmenit als auch kompakte Bruchstücke mit Einschlüssen neben feinkörnig-polykristallinen Aggregaten, die offenbar Verdrängungsbildungen darstellen.

Ilmenit kommt in gerundeten, vereinzelt kantigen Bruchstücken vor, z. T. angerundete Kristalle und Kristallfragmente, teils nahezu homogen und einschlussarm, teils mehr oder weniger löchrig, z. T. siebartig; häufig von parallelen Rissen durchzogen, selten treten Entmischungsgefüge auf, in der Regel ist er oberflächlich korrodiert, vereinzelt partiell durch junge Ti-Oxide verdrängt.

Fe-Oxide treten überwiegend als derber bis polykristalliner **Hämatit** auf, z. T. mit Ilmenit oder anderen Fe-Oxiden verwachsen. Magnetit bildet einzelne, meist löchrige, optisch isotrope Partikel.

Granat kommt in der Regel in kantigen bis kanten-gerundeten Bruchstücken vor mit meist leicht rötlicher, kaum erkennbarer Eigenfarbe, deutlichem Relief. Im Gegensatz zu vielen anderen Lagerstätten zeigt dieser kaum Einschlüsse.

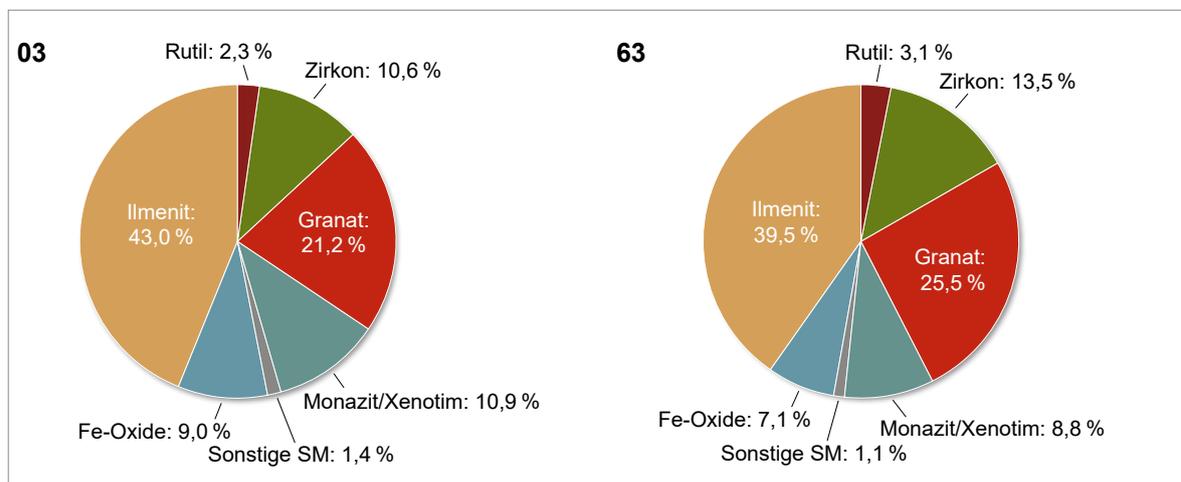


Abb. 34: Schwermineralzusammensetzungen der Proben 03KL und 63KL

Besonderheiten: Monazit tritt in rundlichen, meist schwach trüben, hellfarbigen Partikeln auf, die verhältnismäßig arm an Einschlüssen sind. Turmalin bildet dunkelgrüne zonar aufgebaute säulige Kristalle. Sulfide bilden z. T. angerundete, zusammengesetzte Kristallaggregate einer idaitartigen ockergelben, stark anisotropen Phase neben z. T. zonar gewachsenen Pyrit-Kristallaggregaten.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten 63KL

Hauptbestandteile der Probe sind Ilmenit, Granatphasen (v. a. Almandine) und Zirkon. Daneben sind Monazit, Fe-Oxide (u. a. Hämatit und Magnetit), Rutil/Anatas, Quarz sowie diverse Fe-Ti-Oxide und Limonit-Tonmineral-Verwachsungen enthalten. Akzessorisch kommt zudem Kassiterit vor.

Kassiterit tritt als unregelmäßige Bruchstücke auf, kantig bis angerundet, z. T. mit Ausbrüchen und Rissen, schlierig-fleckig blassbräunlich bis gelblich braun oder rotbraun, leicht trüb mit zahlreichen, z. T. großen Festphasen- und z. T. Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen.

Zirkon zeigt kantige bis angerundete, vereinzelt gerundete Kristalle und Kristallfragmente, mitunter sind diese rissig, z. T. wachstumszonierte, häufig mit einzelnen großen Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen, z. T. einschlussreich, hellfarbig, z. T. mit bräunlichem Stich, meist klar.

Rutil kommt gelblich braun bis rötlich braun vor, z. T. fleckig, fast klar bis leicht trüb, z. T. durchscheinend, z. T. mit Einschlüssen. Selten findet sich Anatas, gefleckt, blassgelblich blassblau, schwach trüb.

Ilmenit bildet meist derbe, angerundete bis gerundete Bruchstücke, ist selten verzwillingt, z. T. oberflächlich korrodiert, z. T. mit Rissen, vereinzelt mit Löchern und Einschlüssen, selten poikilitisch, vereinzelt myrmekekitartig in Titanit umgewandelt, mitunter treten Ti-Hämatit-Ilmenit-Entmischungen auf, z. T. mit Rutilgitter, vereinzelt als gerundete, kryptokristalline Fe-Ti-Oxid-Massen.

Magnetit ist teils derb, teils treten angerundete bis gerundete Bruchstücke auf mit Rissen und großen rundlich muschligen Ausbrüchen (ilmenitähnlich), teils finden sich derbe, gerundete **Hämatit**bruch-

stücke (verzwillingt), z. T. Hämatitpseudomorphosen und martitische Hämatit-Magnetit-Verwachsungen.

Granat kommt hauptsächlich als Kristallbruchstücke vor, teils kantig, teils angerundet bis gerundet, vereinzelt gut gerundet, stellenweise mit Narben bzw. Vicinalen auf Bruchflächen, hellfarbig, z. T. mit bräunlichem bis rötlichem Stich, vereinzelt bis blassbräunlich rötlich, meist klar bis leicht trüb, häufig mit Festphasen und Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen (selten schlauchförmig, z. T. verästelt), stellenweise gehäuft bis dicht.

Besonderheiten: selten Pyritaggregate, Monazit oft fast klar.

6.1.2.3 06 (Donau)

Die Lagerstätte 06 an der Donau wird im nördlichen Alpenvorland in quartären, fluviatilen Rheingletscher-Niederterrassenschottern abgebaut (LGRB-BW 2021).

Die Schwermineralgehalte in der Fraktion < 1 mm wurden mit 0,22 % bestimmt. Durch einen sehr hohen Kiesanteil treten in der Gesamtfraktion nur 0,007 % Schwerminerale auf.

Die Schwermineralzusammensetzung zeigt Abbildung 35.

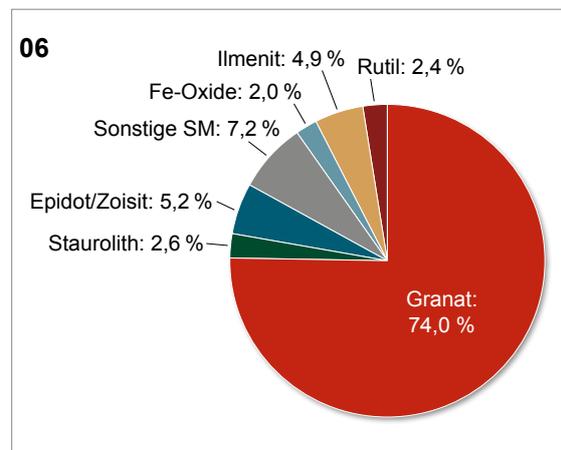


Abb. 35: Schwermineralzusammensetzung der Probe 06

Den überwiegenden Anteil der Schwerminerale stellt Granat dar (74 %), überwiegend als Mg-Ca-betonter Almandin, mit geringen Anteilen von Almandin-Pyrop und Grossular.

Weitere Schwerminerale sind Rutil (2,4 %), Ilmenit (4,9 %), Fe-Oxide (2,0 %), Epidot/Zoisit (5,2 % und Staurolith (2,6 %). Als sonstige treten auf: Turmalin (0,5 %) Al-Silikate (0,2 %), Hornblende (4,5 %), Titanit (0,9 %) und Apatit (0,9 %). Monazit und Kassiterit wurden in Spuren gefunden.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit bildet selten derbe, meist angerundete Kristallbruchstücke mit hellen, rötlich-bräunlichen und grauen Farbtönen und wenigen Einschlüssen.

Zirkon zeigt vereinzelt gerundete Kristalle mit gelegentlich auftretenden Kristallflächen, meist hellfarbig, leicht trüb, ohne nennenswerte Einschlüsse.

Rutil ist in der Regel Alterationsprodukt in verschiedener Ausbildung – gelbrot, derb-grobkristallin mit zahlreichen Einschlüssen, z. T. mit Ilmenit verwachsen sowie in Form von rötlich gelben, krypto- bis feinkristallin-dichten Aggregaten, häufig gut gerundet.

Ilmenite sind als kantige bis gerundete Bruchstücke, meist sehr homogen, aber oft rissig, löchrig und mit Einschlüssen von Fremdphasen ausgebildet. Gelegentlich treten sie orientiert verwachsen mit Hämatit bzw. Titanohämatit auf, vereinzelt auch mit Partikeln aus oxidischen Fe- und Ti-Phasen mit ilmenitischem Gesamtchemismus.

Magnetit wurde nicht beobachtet, dafür grobkristallin-derbe bis kollomorph-kryptokristalline Hämatitbildungen als Pseudomorphosen, z. T. pseudomorph nach framboidalem Pyrit.

Granat tritt überwiegend als kantige bis angerundete Kristallbruchstücke auf, mit nicht erkennbarer bis blasser Färbung (meist rötlich-bräunlich), vereinzelt reich an länglichen Opakeinschlüssen (anscheinend Ilmenit).

Besonderheiten: Relativ häufig sind helle, kantige bis wenig gerundete Karbonatpartikel, sowohl

Dolomit als auch Calcit, zu beobachten, die z. T. etwas korrodiert sind. Meist verwachsen mit Rutil und Ilmenit tritt vereinzelt weißlich farbloser Titanit auf. Monazit ist kryptokristallin-dicht mit hellen gelblichen Farbtönen und vielen Einschlüssen und zeigt neben starker Rundung einzelne Korrosionserscheinungen. Vereinzelt kommen derbe Sulfidpartikel (Pyrit mit anomaler Anisotropie – Cu-haltig) mit Fe-Oxidkrusten vor.

6.1.2.4 17KL

Die Lagerstätte 17KL wird im nördlichen Alpenvorland in den nördlichen Vollschotter-Abfolgen tertiärer Ablagerungen gebaut. Die Probe stellt ein Konzentrat dar, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass hauptsächlich die schweren Schwerminerale stark angereichert wurden. Der hohe Anteil von Granat, welcher als leichtes Schwermineral stark verringert sein sollte, beruht darauf, dass die Sedimente schon von vornherein einen sehr hohen Granatanteil enthalten. Die Schwermineralkonzentration der Ausgangsprobe kann nicht angegeben werden. Diese Information konnte nicht recherchiert werden.

Die Schwermineralverteilung ist in Abbildung 36 dargestellt.

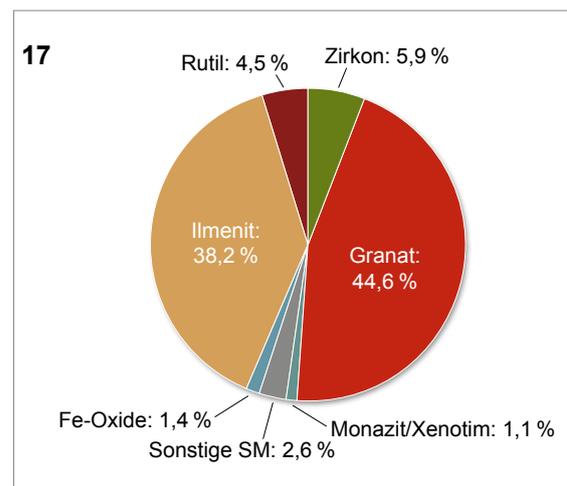


Abb. 36: Schwermineralzusammensetzung der Probe 17KL

Hauptanteile der Schwerminerale sind Granat (44,6 %) und Ilmenit (38,2 %). Der Granat wird durch Almandin dominiert.

Des Weiteren sind enthalten Rutil (4,5 %), Zirkon (5,9 %), Fe-Oxide (1,4 %) und Monazit mit 1,1 %.

In geringen Mengen kommen Hornblende (0,8 %), Staurolith (0,4 %), Apatit (0,2 %), Pyrit (0,6 %), Titanit (0,3 %), Epidot (0,4 %) und Spuren von Chromit, Kassiterit und Au (< 0,1 %) vor.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit kommt in Spuren vor als meist kleine gerundete Bruchstücke, braun bis hellbraun, z. T. hellgrau, klar bis trüb.

Zirkon bildet angerundete bis stark gerundete hellfarbige, schwach trübe Kristalle mit nur wenigen Einschlüssen.

Rutil liegt als freie Partikel monomineralisch vor, beinhaltet kaum Einschlüsse und Verwachsungen, ist meist gut gerundet, vereinzelt mit Kristallflächen, wenig getrübt, meist gelbrot. In Verwachsung mit Ilmenit bildet er massige Innenbereiche, z. T. mit Einschlüssen, trüb, vorherrschend sind Brauntöne.

Ilmenit zeigt sehr diverse Charakteristika. Er ist in der Regel gut gerundet, z. T. mit kantigen Ausbrüchen, häufig rissig, massig, z. T. porös bis löchrig (z. T. idioblastensiebartig), vereinzelt als orientiert-spindelförmige bis regellos fleckige Entmischungsbildungen aus Ilmenit-Hämatit-Pseudobrookit und vereinzelt auch als Hüllen um Rutil-Ilmenit-Partikel.

Fe-Oxide zeigen sich als **Magnetit** in Form von löchrigen massigen Bruchstücken, partiell in Hämatit/Ti-Hämatit umgewandelt. Als weitere Fe-Oxidphasen kommen Hämatit und Chromit/Magnesoehromit vor.

Das hauptsächliche Mineral **Granat** liegt ebenfalls in diversen Formen vor. Als angerundete bis gut gerundete unregelmäßige Bruchstücke und mitunter als idiomorphe Kristalle, meist ohne erkennbare Färbung, vereinzelt rötlich, meist mit Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen (einphasig, mehrphasig). Fremdpartikel sind z. T. in Wachstumszonen angereichert, nicht selten treten eingewachsene Ilmenitleisten und -tropfen bzw. Rutilkristalle auf.

Besonderheiten: in geringen Anteilen Monazit, Dolomit, Sulfidkristallaggregate – vermutlich bunt angelaufener Pyrit, vereinzelt Titanit.

6.1.2.5 34KL (Isar)

Die Lagerstätte 34KL befindet sich im Einzugsbereich der Isar. Abgebaut werden spätwürmzeitliche Schmelzwasserschotter (Spätglazialterrasse 2) des nördlichen Alpenvorlandes (LfU BAYERN 2021). Das Konzentrat wurde mittels Nassherd hergestellt, indem bevorzugt die schweren Schwerminerale angereichert wurden. Die Schwermineralkonzentration der Ausgangsprobe kann nicht angegeben werden. Diese Information konnte nicht recherchiert werden.

Die Schwermineralzusammensetzung zeigt Abbildung 37.

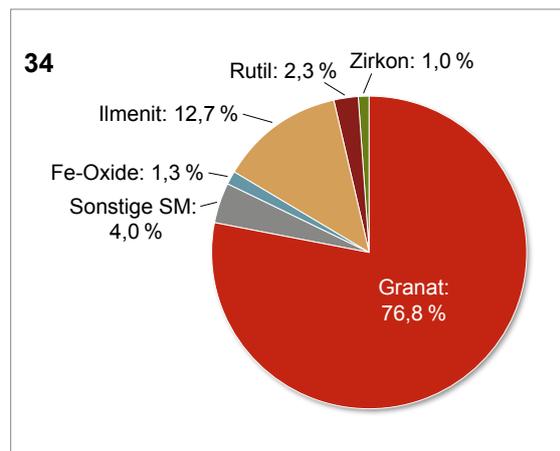


Abb. 37: Schwermineralzusammensetzung der Probe 34KL

Hauptbestandteile der Probe sind Granat (76,8 %), welcher durch Ca-Mg-haltigen Almandin dominiert wird, und Ilmenit (12,7 %).

Es finden sich nur sehr geringe Anteile an Rutil (2,3 %), Zirkon (1,0 %) und Fe-Oxiden (1,3 %).

Die sonstigen Schwerminerale setzen sich zusammen aus Turmalin (0,2 %), Hornblende (1,3 %), Staurolith (0,4 %), Monazit (0,2 %) und Pyrit (1,9 %).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Zirkon bildet angerundete bis gerundete prismatische Kristalle und Kristallbruchstücke, hellfarbig, klar bis blassbräunlich rötlich, z. T. mit Kristallkernen, häufig mit Festphaseneinschlüssen (Apatitnadeln, Silikatphasen).

Rutil kommt derb, rissig, rötlichbraun bis gelbbraun vor, z. T. mit Einschlüssen, z. T. mit Ilmenit verwachsen.

Ilmenit zeigt sehr verschiedene Formen. Meist ist er derb, unregelmäßige, kantige Bruchstücke mit Ausbrüchen bildend, partiell bis vollständig angerundet, schwach rissig, löchrig bis poikilitisch, vereinzelt Partikel mit Rutilkernen, z. T. flaserig-spindelförmige bis lamellare Hämatit-Ilmenit-Entmischungen, lokal korrodiert, z. T. treten Umwandlungen in Rutil und Titanit auf.

Fe-Oxide: **Magnetit** tritt angerundet bis gut gerundet auf mit rundlich muschligen Ausbrüchen, vereinzelt mit Rissen, selten mit randlichen martitischen Bildungen, zeigt eine graue Reflektionsfarbe mit rosabräunlichem Stich. Hämatit ist vereinzelt massig-derb vorhanden (oft ohne Innenreflexe) und bildet teils feinkörnig-feinschuppige bis lamellenförmige verwachsene Pseudomorphosen.

Von **Granat** werden Kristallfragmente bis idiomorphe Kristalle gefunden, vereinzelt polykristalline Aggregate, die häufig kantig bis angerundet vorkommen, meist hellfarbig, z. T. mit rötlichem oder bräunlichem Stich, oft klar, teils einschlussfrei, teils bis dicht durchsetzt mit Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen, z. T. in Zonen angereichert, vereinzelt große Einschlüsse mit Ilmenit, Pyrit, TiO_2 und Silikaten.

Besonderheiten: Framboidale bis polykristalline Markasit- und Pyritbildungen (sekundär, z. T. Aufwachsungen auf Bestandsphasen), polykristalline Dolomitpartikel, vereinzelt Monazit (farblos), selten Stahlschlacke als technisches Produkt.

6.1.2.6 39 (Inn)

In der Lagerstätte 39 wurden bis 2017 Kiese und Sande aus den jüngsten Auenablagerungen, der

jüngeren Postglazialterrasse 3 abgebaut. Seit 2017 werden spätwürmzeitliche Schmelzwasserschotter der Spätglazialterrasse des Inn verarbeitet. Aus welcher Charge die Probe stammt, konnte nicht ermittelt werden.

Abbildung 38 veranschaulicht die Schwermineralzusammensetzung der Probe 39.

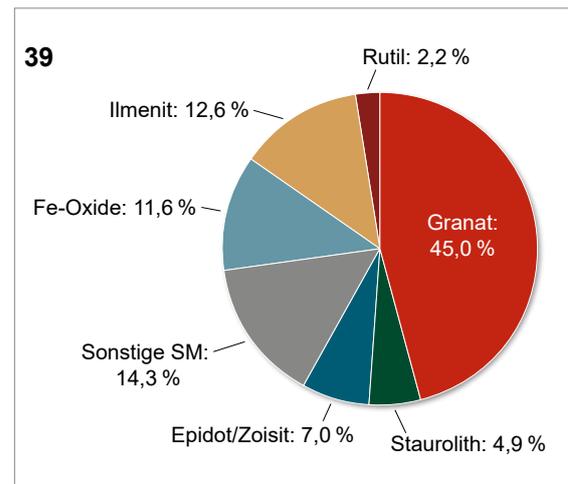


Abb. 38: Schwermineralzusammensetzung der Probe 39

Die Schwermineralgehalte betragen 0,23 % in der Fraktion < 1 mm und 0,064 % in der Gesamtkornfraktion. Die häufigsten Schwerminerale sind Granat (45,0 %) mit Vormacht von Mg-Ca-betontem Almandin, jedoch auch mit geringen Mengen an Grossular und Andradit, Ilmenit (12,6 %) und Fe-Oxiden (11,6 %).

Weitere Schwerminerale sind Epidot/Zoisit (7,0 %), Staurolith (4,9 %) und Rutil (2,2 %).

Als sonstige, nicht dargestellte Schwerminerale treten auf: Turmalin (0,6 %), Hornblende (6,5 %), Apatit (2,2 %), Monazit (0,5 %), Pyrit (2,1 %), Titanit (2,3 %), Al-Silikate (0,3 %) und Zirkon (0,4 %).

Als Edukte der Schwerminerale kommen hauptsächlich metamorphe Gesteine mit Granat und Staurolith in Frage. Der extrem geringe Anteil an Zirkon weist auf eher basische Gesteine hin. Die Anwesenheit von überwiegend Granat und Hornblende lässt eine Ableitung aus den Granatamphiboliten der nördlichen Alpen zu, die mit den Gletschern transportiert wurden.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Zirkon zeigt abgerundete idiomorphe Kristalle, teilweise rissig mit einzelnen Einschlüssen (meist Fremdphasen), ist hellfarbig bis leicht bräunlich, fast klar und vereinzelt mit Oxidphasen verwachsen.

Rutil bildet derbe, abgerundete bis gerundete Kristallbruchstücke, ist oft verzwillingt, dunkelbraun, leicht trüb, z. T. mit Einschlüssen. Er kommt z. T. in Silikate eingewachsen als körnige Aggregate vor, rötlich gelb, z. T. mit alteriertem Ilmenit verwachsen. Einzelne bläulich graue Anatase wurden gefunden.

Ilmenit tritt sehr divers auf, meist in Form unregelmäßiger, abgerundeter bis gerundeter Bruchstücke, teils derb, z. T. rissig bis splittrig, teilweise löchrig bis poikilitisch, teils als polykristalline, mit Quarz und Silikaten verwachsene Aggregate. Randlich bzw. von Rissen ausgehend ist er häufig korrodiert, z. T. in rundliche Ti-Fe-Oxid-Pseudomorphosen mit Ilmenitchemismus, z. T. umgewandelt in Rutil oder Anatas bzw. feinkörnige Titanit- und Titanit-TiO₂-Massen.

Fe-Oxide wurden nur als **Hämatit** nachgewiesen, als derb-grobkristalline Bruchstücke, abgerundet bis feinblättrig-dichte Massen mit Löchern und Poren, gerundet. Außerdem treten vereinzelt weitere oxidische Phasen wie Chromite auf (selten).

Granat als Hauptkomponente kommt als Kristallfragmente vor, vereinzelt auch als Kristalle, sie sind kantig, partiell abgerundet bis gerundet, mit Ausbrüchen und Rissen, hellfarbig bis schwach rötlich-bräunlich, klar bis schwach trüb, z. T. reich an Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen (u. a. TiO₂, Ilmenit).

Besonderheiten: Vereinzelt treten randlich oxidierte Sulfide (Pyrit) auf, mitunter auf Primärpartikel aufgewachsen. Dolomit tritt überwiegend mikritisch auf.

6.1.2.7 46 (Isar)

Die Lagerstätte 46 befindet sich im nördlichen Alpenvorland (Unterbayerisches Hügelland/Isar-Inn-Schotterplatten). Es werden spätwürmzeitli-

che (Spätglazialterrasse 2) und jüngere Schmelzwasserschotter (Spätholozän) im Einzugsbereich der Isar abgebaut (LfU-BAYERN 2021). Die Schwermineralgehalte können mit hohen 1,5 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,26 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 39 dargestellt.

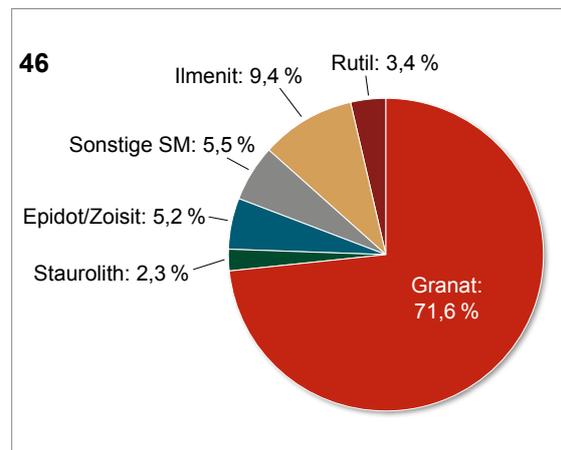


Abb. 39: Schwermineralzusammensetzung der Probe 46

Hauptanteil der Schwerminerale ist Granat (71,6 %), vorwiegend als Ca-Mg-haltiger Almandin und Ilmenit. Weiterhin kommen Epidot/Zoisit (5,2 %), Staurolith (2,3 %) und Rutil (3,4 %) vor.

Zusätzlich wurden die folgenden Schwerminerale analysiert: Zirkon (0,3 %), Fe-Oxide (0,3 %), Titanit (0,9 %), Al-Silikate (0,4 %), Hornblende (1,8 %), Monazit (0,2 %) und Apatit (1,6 %).

Die Schwermineralassoziation ist sehr ähnlich den Lagerstätten 02 und 06. Die Herkunft der Schwerminerale kann über die Metamorphite der nördlichen Alpen abgeleitet werden, wobei diese über den Moränenschutt der Gletscher antransportiert und anschließend über die Schmelzwässer verteilt wurden. Typische Gesteine, die den Granat lieferten, können die Granat-Amphibolite und Eklogite sein, die auch in den Schottern der Isar zu finden sind.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Zu einem großen Teil besteht die Probe aus Granatphasen (vorwiegend Almandin), ein weiterer Hauptbestandteil ist Dolomit. Untergeordnet kommen Ilmenit, Quarz und Rutil vor. Zudem sind geringe Anteile an Zirkon und Eisenoxiden enthalten.

Zirkon zeigt kantige bis abgerundete Bruchstücke, z. T. als abgerundete Kristallfragmente, ist häufig rissig, hellfarbig bis blassrötlich braun, klar bis leicht trüb, vereinzelt metamikt und dann trüb, aber wenig Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse.

Rutil kommt z. T. derb vor, von gelbbrauner bis rotbrauner Färbung, fast klar bis schwach trüb, oft reich an orientiert eingelagerten Einschlüssen, als kantige bis abgerundete Bruchstücke mit Rissen, mitunter randlich in Titanit umgewandelt, z. T. auch abgerundete, polykristalline, löchrig-rissige Partikel, hellrötlich gelb. Selten findet sich Anatas (weiß bis bläulich), vereinzelt treten gitterartige helle Pseudomorphosen nach Ilmenit auf.

Ilmenit tritt teils derb, als unregelmäßige Bruchstücke und Kristallfragmente, kantig-abgerundet, häufig mit Rissen und Löchern, z. T. mit Festphaseneinschlüssen auf. Vereinzelt enthalten die Körner Rutilkerne, vereinzelt sind sie orientiert mit Hämatit verwachsen, selten pleochroitisch, häufig randlich korrodiert und alteriert, z. T. stark von feinkristallinem Rutil und Titanit verdrängt.

Magnetit wurde nicht beobachtet. Andere Fe-Oxide sind meist in Verwachsungen. Vereinzelt treten abgerundete (Mg-)Chromit-Körner mit schwach bräunlichen Innenreflexen auf.

Granat: unregelmäßig-kantig bis gut gerundet, z. T. mit Löchern und Ausbuchtungen, z. T. mit Festphaseneinschlüssen (Apatit, Ilmenit, Silikate, Rutil), vereinzelt in Zonen angereichert, mitunter mit Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen, hellfarbig bis leicht bräunlich, z. T. blassrosa braun, meist klar.

Besonderheiten: Selten treten rundliche, partiell oxidierte Pyrit-Framboidaggregate auf. Dolomit ist feinkristallin-dicht bis spätig, Calcit spätig-derb mit Zwillinglamellen.

Abbildung 40 zeigt die Zusammenfassung der Schwermineralgehalte für das Einzugsgebiet Donau, Isar und Inn.

In den Proben mit Bezeichnung KL sind die schweren Schwerminerale bevorzugt angereichert (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021).

Die Lagerstätten im nördlichen Alpenvorland sind durchweg durch einen sehr hohen Anteil an Granat gekennzeichnet. Kassiterit tritt nur in Spuren auf. Zirkon ist ebenfalls nur sehr gering vertreten. In den Lagerstätten 03KL und 63KL wurden die leichten Schwerminerale im Zuge einer „scharfen“ Nassherdaufbereitung sehr stark minimiert. Hier wurden in stärkerem Maße Zirkon und Monazit angereichert. Durch die komplette Entfernung der paramagnetischen Fraktion (z. B. mittels Bandmagnetscheider) könnte hier eine Rutil-Zirkon-Fraktion gewonnen werden.

6.1.3 Einzugsgebiet Main

Im Einzugsgebiet des Mains wurden zwei Kies- und Sandlagerstätten beprobt. Die beiden Lagerstätten werden in oberpleistozänen Flussschottern der Niederterrasse und holozänen Sedimenten abgebaut (LfU-BAYERN 2021).

Im Folgenden werden die regionalgeologische Einordnung, die gebauten Schichten, die Schwermineralgehalte, die mögliche Herkunft der Sedimente und die mineralogischen Charakteristika der betrachteten Wertminerale beschrieben.

Tab. 7: Beprobte Standorte im Einzugsbereich des Mains

Kürzel	rezentes Einzugsgebiet
04	Main
20KL	Main

6.1.3.1 04 und 20KL

Die Proben der beiden Lagerstätten 04 und 20KL stammen aus Flussschottern des Mains. Die Lagerstätte 04 wird in der oberpleistozänen Niederterrasse und jüngeren Sedimenten aus dem

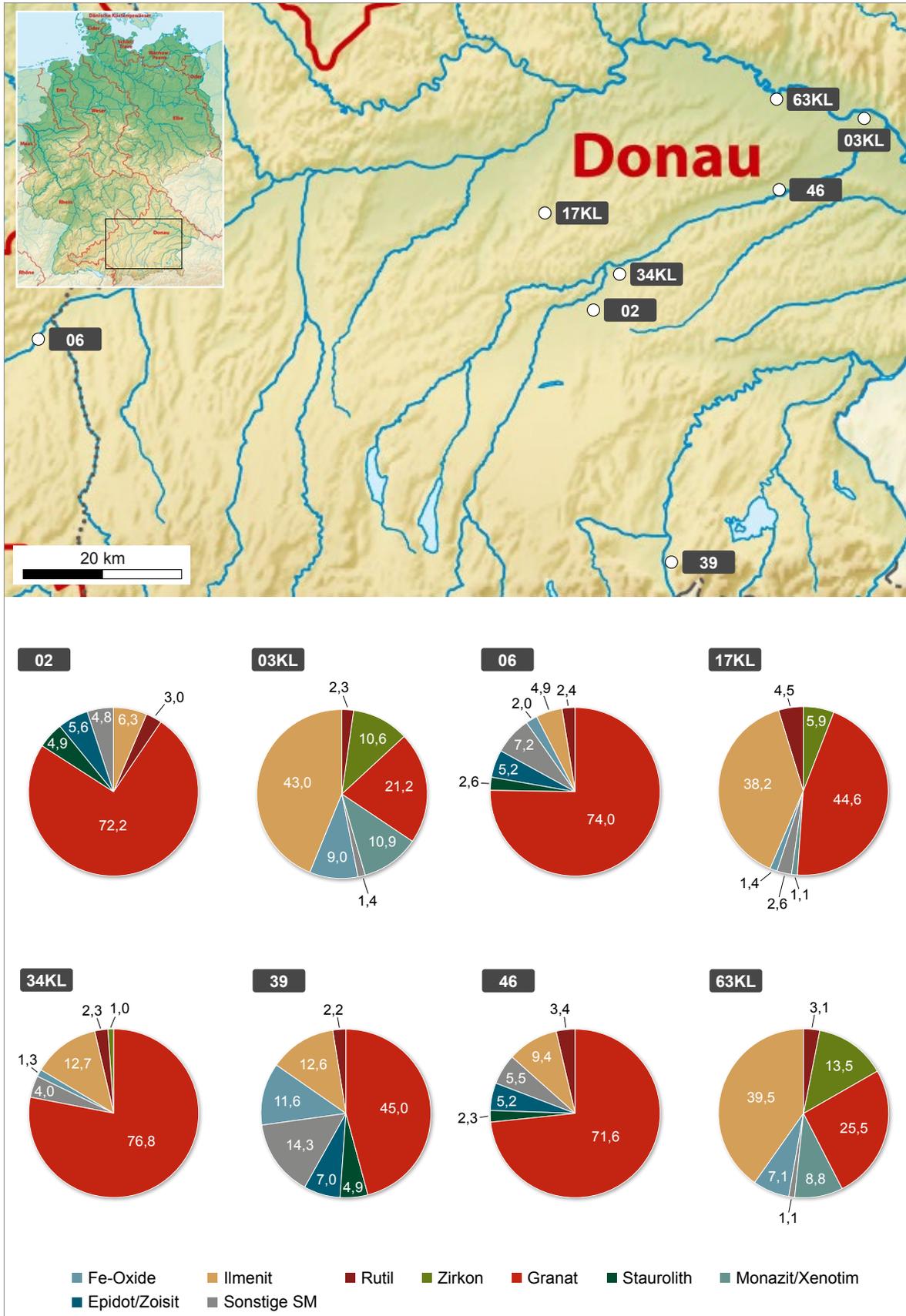


Abb. 40: Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten in den Einzugsgebieten von Donau, Isar und Inn (Angaben in %) (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021)

Holozän abgebaut. Die Probe 20KL stammt aus einem Kieswerk in Kitzingen, welches den 10 km entfernten Hörblacher Kies aus der oberpleistozänen Niederterrasse verarbeitet (LfU-BAYERN 2021). Beide Lagerstätten liegen in der Main-Aue und sind nur 3 km Luftlinie voneinander entfernt. Die Probe 04 wurde direkt vor Ort beprobt und entsprechend der in Abschnitt 2 beschriebenen allgemeinen Aufbereitung unterzogen. Bezüglich der regionalen Lage sind beide Lagerstätten vergleichbar. In der Probe 20KL wurde jedoch durch eine starke physikalische Anreicherung mittels Dichtentrennung (Nassherd) der Anteil der leichten Schwerminerale stark verringert, sodass sich bevorzugt die schweren Schwerminerale Zirkon, Monazit, Ilmenit und Fe-Oxide anreicherten. Die leichten Schwerminerale wurden in die Abgänge gedrückt. Bedingt durch die unterschiedliche Aufbereitung sind jedoch nur qualitative Aussagen möglich.

Abbildung 41 zeigt die Schwermineralzusammensetzung der beiden Proben.

04: Der Hauptanteil der Schwerminerale wird von Fe-Oxiden (41,3 %) und Ilmenit (16,3 %) eingenommen. Granat (7,9 %) wird von Almandin dominiert, mit Anteilen von Grossular.

Sonstige Schwerminerale neben dem dargestellten Rutil (5,0 %), Zirkon (13,3 %), Monazit/Xenotim (5,6 %), Epidot/Zoisit (6,3 %) sind: Turmalin (0,6 %), Titanit (0,4 %), Hornblende (0,9 %) und Apatit (1,5 %).

20KL: Die „überfahrene“ Schwermineralprobe zeigt eine sehr markante Anreicherung von Zirkon

(35,3 %) und Monazit/Xenotim (20,3 %). Alle anderen Schwerminerale, außer Fe-Oxide (16,8 %) und Ilmenit (16,4 %), wurden durch das „Überfahren“ stark reduziert wie Rutil (4,1 %) und Granat (4,8 %).

Das Einzugsgebiet des Mains bis Kitzingen sind hauptsächlich die Sedimente der Trias mit Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper. Weiterhin werden das thüringisch-fränkische Schiefergebirge und das Fichtelgebirge tangiert.

Im Fichtelgebirge, welches als Liefergebiet in Frage kommt, werden Pegmatite mit Monazit, Granat, vorzugsweise als Almandin und Grossular und z. T. Turmalin beschrieben. Ilmenit und die Fe-Oxide können bevorzugt aus dem Bereich der Schiefergebirge, die höheren Zirkon- und Rutilkonzentrationen sowie der Turmalin aus den Triassedimenten abgeleitet werden.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 04

Kassiterit tritt vereinzelt auf, dann zoniert bräunliche, gerundete bis angerundete Klusten, z. T. mit Tonmineral-Limonit-Kruste bildend.

Zirkon bildet angerundete bis stark gerundete Kristalle, z. T. kurzprismatisch-idiomorph, vereinzelt mit Zonarbau, ist meist hellfarbig und klar, häufig rissig, mit verhältnismäßig wenigen Einschlüssen (selten Sulfide oder Apatit).

Rutil kommt meist als angerundete bis gerundete Partikel vor, sowohl als trübe, dunkelgelbrot

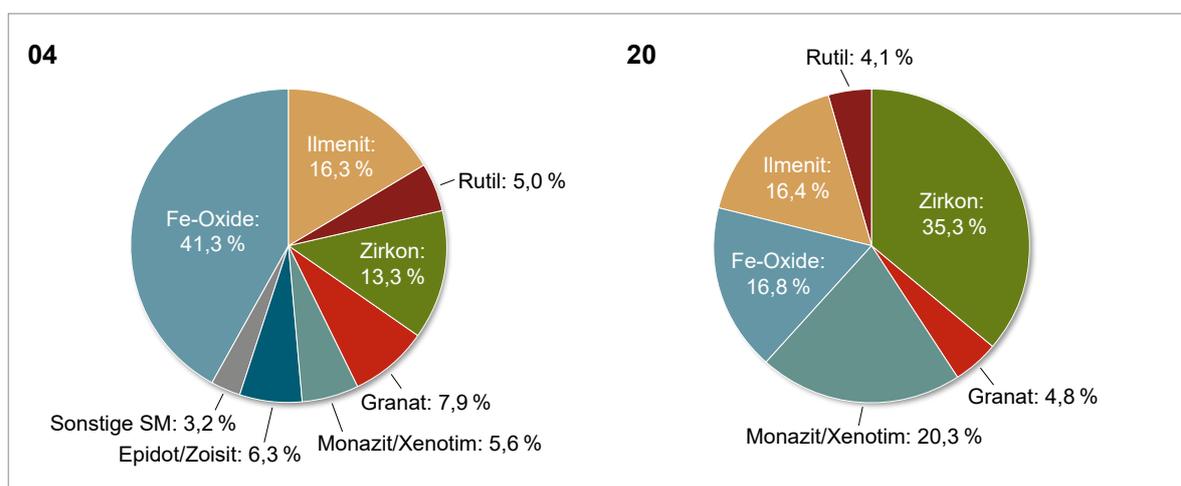


Abb. 41: Schwermineralzusammensetzung der Proben 04 und 20KL

gefärbte Kristallbruchstücke, mitunter mit heller Titanitkruste als auch als krypto- bis feinkristalline, aus Ilmenit hervorgegangene Reaktionsprodukte.

Ilmenit ist stellenweise Mn-haltig. Einige durch EDX ausgewiesene Ilmenitpartikel erwiesen sich visuell als innige Verwachsungen von Ti- und Fe-Oxiden, die offenbar im Mittel ilmenitähnliche Elementverhältnisse aufweisen.

Magnetit wurde nicht beobachtet, stattdessen kommen massive Hämatitbruchstücke vor sowie kollomorphe bis kryptokristalline Fe-Oxid-Bildungen, die möglicherweise z. T. durch Verwitterung aus Sulfiden entstanden sind. Außerdem treten Krusten und Aggregate kollomorpher Fe-Oxyhydroxide, z. T. authigene Bildungen auf.

Granat bildet kantige bis mäßig gerundete Bruchstücke, ist hellfarbig, klar bis leicht trüb, in der Regel mit wenigen Einschlüssen, davon mit wenigen Fremdphasen.

Besonderheiten: Häufig treten schalig-konzentrisch aufgebaute Ooide mit unterschiedlichen Kernen aus Tonmineral-Goethit- bzw. Tonmineral-Lepidokrokite-Gemengen (gelbe bzw. rote Innenreflexe) auf. Neben Apatit ist relativ häufig Xenotim zu finden, der hellfarbig, klar bis leicht trüb ist und wenig Einschlüsse besitzt. Sulfide in Form von massigem Pyrit sind sehr selten.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 20KL

In der Probe bilden Zirkon und Monazit mit Eisenoxidphasen die Hauptbestandteile, daneben sind Ilmenit, Quarz, Ti-Oxid-Phasen und Granat enthalten.

Kassiterit tritt selten als unregelmäßige, partiell bis stark gerundete Kristallfragmente auf, fleckig bis zoniert blassbräunlich bis dunkelbraun gefärbt, klar bis schwach trüb, oft rissig, z. T. mit Einschlüssen.

Zirkon ist sehr divers, anscheinend treten mehrere Generationen auf, hellfarbig, meist klar bis leicht trüb, vereinzelt mit Kristallkernen, vereinzelt mit Wachstumszonierung, unterschiedliche Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüsse. Oft idiomorph-scharfkantig bis gut gerundet, lang-

prismatisch bis nadlig sowie kurzprismatisch bis gedrungen.

Rutil kommt überwiegend derb vor, monomineralisch als z. T. grobe, meist gut gerundete, partiell kantige Partikel mit Ausbrüchen und Rissen, leicht trüb, braunrot; selten polykristalline, orientiert verwachsene, hellrotgelbe Aggregate als pseudomorphe Bildungen. Vereinzelt ist er in Verwachsungen mit Ilmenit als Rutilkern zu beobachten, z. T. als längliche Kristalle in derbem Hämatit. Ein Teil der derben TiO₂-Partikel sind kräftigblaue, leicht trübe, kantige bis angerundete Anatase.

Ilmenit tritt sehr divers auf. In der Regel bildet er unregelmäßige Bruchstücke, vereinzelt ist er idiomorph, meist aber angerundet, vereinzelt homogen derb, oft korrodiert mit fleckigen Umwandlungen in Hämatit, z. T. treten Fe-Ti-Oxide, mit gitterartigen Hämatitentmischungen, z. T. als orientierte Entmischungsspindeln in Hämatit auf.

Magnetit wurde nicht beobachtet. Regelmäßig tritt Hämatit als Pseudomorphosen mit Gittertextur auf, ist derb oder feinkörnig bis feinblättrig. Vereinzelt kommen Limonitbildungen als dichte, feinkörnige Knollen oder als Krusten vor. Weitere vereinzelt Fe-Phasen sind Chromit bis Mg-Chromit.

Granat bildet unregelmäßige Splitter, ist meist angerundet, stellenweise treten Oberflächen mit Parkettierung und Vicinalen auf. Oft sind regelmäßige Gas-Flüssigkeits- und meist silikatische Festphasen-Einschlüsse vorhanden. Die Färbungen sind hellfarbig (leicht rötlich bis bräunlich) bis farblos, fast klar.

Besonderheiten: Die Probe ist reich an Monazit. Vereinzelt treten radialstrahlig-konzentrische Umkrustungen (Calcit/Aragonit, Ca-Phosphate, Limonit) verschiedener Phasen auf. Selten ist feinkörniger Pyrit, z. T. oxidiert.

Abbildung 42 zeigt die Zusammenfassung der Schwermineralgehalte für die beiden Lagerstätten am Main. Da der Ursprung des Materials in 20KL aus der 10 km entfernten Hörblacher Kiessandlagerstätte stammt, wird dieses mit dargestellt.

In der Probe 20KL sind die schweren Schwerminerale bevorzugt angereichert (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021).

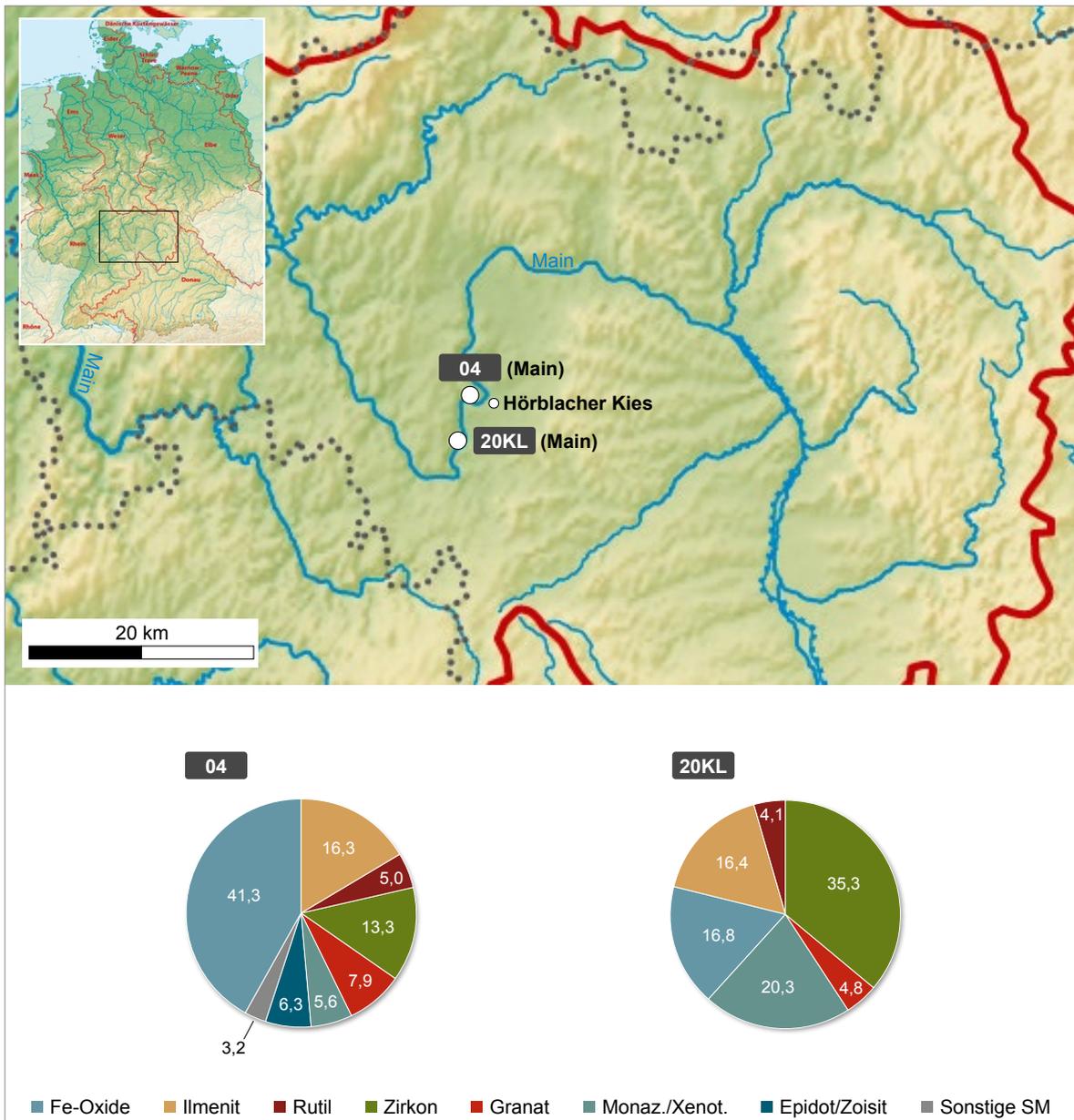


Abb. 42: Schwermineralzusammensetzung der beiden Kiessandlagerstätten am Main (Angaben in %) (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021)

6.1.4 Einzugsgebiet Oberrhein

Im Einzugsgebiet des Oberrheins wurden vier Kies- und Sandlagerstätten beprobt. Nach LGRB-BW (2021) liegen die beprobten Lagerstätten des Oberrheins 18, 32, 45 in der sog. Neuenburg- und der Ortmann-Formation. Die Neuenburg-Formation besteht aus überwiegend unverwitterten, grauen bis rötlich grauen, groben, sehr locker bis locker gelagerten Schottern mit wechselnden Sandanteilen. In Rheinnähe dominieren die Sedimente alpinen Ursprungs. Mit zuneh-

mender Entfernung vom Rhein nimmt der Anteil an Schwarzwaldkomponenten zu. Am östlichen Grabenrand bestehen sowohl die Neuenburg- als auch die Ortenau-Formation meist ausschließlich aus Schwarzwaldkomponenten. Die unmittelbare Nähe des Schwarzwaldes zu den Lagerstätten mit nur 3 bis 14 km Entfernung vom Mittelgebirgsrand macht diesen zum hauptsächlichen Liefergebiet. Die Lagerstätte 40 wird in den pleistozänen, fluvialen Sedimenten des Rheins abgebaut und sollte im Wesentlichen nur die vorher schon abgelagerten Sedimente aufweisen. Im Folgenden werden

die regionalgeologische Einordnung, die gebauten Schichten, die Schwermineralgehalte, die mögliche Herkunft der Sedimente und die mineralogischen Charakteristika der betrachteten Wertminerale beschrieben.

Tab. 8: Beprobte Standorte im Einzugsbereich des Oberrheins

Kürzel	rezentes Einzugsgebiet
18	Oberrhein
32	Oberrhein
40	Oberrhein
45	Oberrhein

6.1.4.1 18 und 32 (Oberrhein)

Die Lagerstätten 18 und 32 befinden sich am Oberlauf des Rheins im Oberrheintalgraben und sind Luftlinie nur 13 km voneinander entfernt. In beiden Lagerstätten findet der Abbau von quartären, fluvialen Kiesen des Rheins aus den Ablagerungen der Neuenburg-Formation statt (LGRB-BW 2021). Die Lagerstätten befinden sich rechtsseitig des Rheins am Fuße des Schwarzwaldes.

Die Schwermineralgehalte in der Fraktion < 1 mm betragen 0,40 % (18) und 0,18 % (32). Die Gesamtkornfraktion beinhaltet 0,09 % (18) und 0,06 % (32).

Die Schwermineralzusammensetzung der beiden Proben ist in Abbildung 43 dargestellt.

Beide Proben zeigen eine auffällig ähnliche Schwermineralverteilung, jedoch mit kleineren Unterschieden. Dabei wird mehr als die Hälfte des Schwerminerkonzentrats durch Granat (Almandin) gebildet (55,1 % und 52,9 %).

In der Probe 18 wurden die folgenden Schwerminerale bestimmt: Epidot/Zoisit (13,7 %), Fe-Oxide (6,1 %), Ilmenit (7,1 %), Rutil (2,1 %), Monazit/Xenotim (1,9 %) und Staurolith (1,7 %).

Als sonstige Schwerminerale treten auf: Turmalin (0,3 %), Chromit (0,3 %), Titanit (3,8 %), Hornblende (3,7 %) + geringe Mengen Aktinolith, Apatit (1,3 %), Diopsid (0,5 %), Al-Silikate (0,3 %) und Spuren von Kassiterit und Pyrit. Zirkon ist nur mit 0,5 % vertreten.

Probe 32 beinhaltet höhere Konzentrationen an Fe-Oxiden (11,9 %) und Ilmenit (14,6 %). Weiterhin treten die folgenden Schwerminerale auf: Epidot/Zoisit (4,4 %), Monazit/Xenotim (1,6 %), Chromit (1,2 %), Rutil (3,7 %) und Zirkon mit 3,4 %.

Als sonstige Schwerminerale wurden gefunden: Turmalin (0,2 %), Titanit (2 %), Hornblende (1,5 %), Apatit (1,3 %) und Staurolith (0,8 %).

Auffällige erhöhte Gehalte an SEE-Phosphaten wie Monazit und Xenotim könnten auf den Einfluss des Kaiserstuhls im Oberlauf des Rheins hinwei-

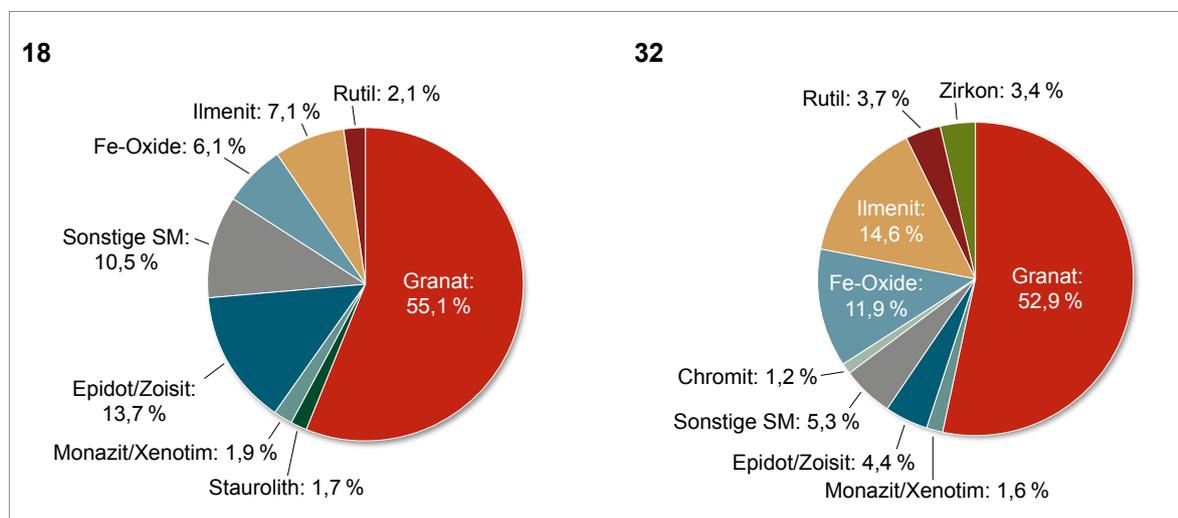


Abb. 43: Schwermineralzusammensetzungen der Proben 18 und 32

sen. Der Kaiserstuhl ist nur 25 km (Probe 18) bzw. 36 km (Probe 32) oberläufig von den Lagerstätten entfernt. Auffällige Spuren von Nb-Ta-Mineralen, die auf den Kaiserstuhl hinweisen könnten, fehlen jedoch. Die Zirkone zeigen allerdings Einschlüsse von SEE-Phosphaten, die Marker sein könnten.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 18

Kassiterit tritt sehr selten auf, angerundetes Bruchstück, dunkelbraun mit Farbzonierung.

Zirkon bildet überwiegend gerundete bis stark gerundete Kristalle und Kristallfragmente, häufig mit Einschlüssen (z. T. Ca- und Seltenerdphosphaten), ist hellfarbig und meist trüb.

Rutil kommt hauptsächlich als Umwandlungsbildungen in Form von kompakten Kristallbruchstücken, meist mit lamellarem bis körnig-dichtem Internbau und zahlreichen Poren und Einschlüssen vor und ist trüb, rotbraun bis rotgelb. Hellere Aggregate sind feinkörnig, z. T. in Verwachsung mit alteriertem Ilmenit und Titanit, vereinzelt masig als innerer Bereich von Ilmenit-Körnern.

Ilmenit zeigt einzelne massive bis lamellar-polykristalline, stark gerundete Partikel, häufig mit Nebengesteinsresten und leichten Alterationspuren, z. T. idiomorphartig löchrig, z. T. rissig, z. T. korrodiert, z. T. mit Hämatitentmischungen, z. T. verwachsen mit Rutil. Häufig finden sich feinkörnige Pseudobrookit-Rutil-Verwachsungen oder hämatitähnliche submikroskopische Rutil-entmischungen in Hämatit (beide chem. ähnlich Ilmenit). Regelmäßig Umwandlungen zu Rutil und Titanit, mitunter als amöboidförmiger Kern in gerundeten Titanitkörnern, kommen als Umwandlungsreste vor.

Magnetit wurde nicht sicher beobachtet, eventuell als einzelne Reste in Martiten oder Titanomagnetitresten in orientierten Verwachsungen mit Ilmenit. Reine Fe-Oxide sind vorwiegend Hämatit und Ti-Hämatit sowie Limonitaggregate, kantig bis angerundet.

Granat wird überwiegend von Almandin gebildet, mit variierenden Fe-Gehalten. Es finden sich angerundete bis gerundete idiomorphe Kristalle und Kristallbruchstücke, häufig mit Einschlüssen

z. T. mit Ilmenit, Rutil, vereinzelt Biotit, klar bis trüb, hellfarbig in rötlichen Tönen bis deutlich blassbräunlich rot, z. T. mit Zonierungen bzw. Farbverläufen in einem Partikel.

Besonderheiten: Apatit u. Monazit als Nebengemengeteile, selten framboidaler Pyrit.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 32

Zirkon bildet Kristalle und Kristallbruchstücke, angerundet bis partiell gerundet, mit oft splittrigem Rand, hellfarbig, klar bis leicht trüb, z. T. rissig, vereinzelt mit teilweise großen Festphaseneinschlüssen (Silikate, Apatit) bzw. Löchern.

Rutil kommt derb, angerundet mit Ausbrüchen, rosaorange, leicht trüb, z. T. mit Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen vor. Zum Teil ist er verwachsen mit Ilmenit mit leicht trübem gelbrotbraunem Kern und orangegelber, klarer, rissiger Hülle, weiterhin pseudomorph polykristallin-feinkörnig mit rötlich gelber Färbung. Selten treten kryptokristallin-dichter, stark gerundeter, bläulich-gelblicher Anatas auf.

Ilmenit zeigt sich als meist angerundete Bruchstücke mit Ausbrüchen und Rissen. Als monominerale Körner zeigt er teils kaum, teils starke Anisotropie, z. T. mit Entmischungen. Vereinzelt ist er korrodiert, mitunter mit partiellen Umwandlungen in Rutil sowie Titanit, mitunter verdrängt durch gitterförmigen Hämatit. Teilweise treten pseudomorphe, kryptokristallin-derbe Ti-Fe-Oxid-Aggregate auf.

Magnetit tritt vereinzelt als angerundete kantige Bruchstücke auf mit auffälligen muschligen Ausbrüchen und Löchern, grauen Reflektionsfarben mit ilmenitartigem bräunlich gelbem Stich. Mitunter zeigen sich martitische Hämatitentmischungen. Häufig treten feinkörnige dichte, rundliche Hämatitaggregate auf sowie massive, schwach angerundete Hämatitkristalle und -kristallfragmente, daneben Chromit.

Granat als Hauptbestandteil kommt vor in Form regelloser, partiell angerundeter bis gerundeter Bruchstücke mit randlichen Ausbrüchen, häufig mit winzigen Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen, teilweise mit Festphaseneinschlüssen (Silikate, Rutil, Ilmenit, Apatit), hellfarbig bis blassrötlich-bräunlich bis blassbräunlich rosa, fast klar bis leicht trüb.

Besonderheiten: Titanit (einschlussreich, gerundet), selten Sulfide (Pyrit).

6.1.4.2 45 (Oberrhein)

In der Lagerstätte 45 werden quartäre, fluviatile Kiese des Rheins aus den Ablagerungen der Ortenau-Formation abgebaut. Diese bestehen im zentralen Oberrheingraben aus sandigen Kiesen mit überwiegend alpinem Ursprung. Am Übergang vom Oberrheingraben in die Schwarzwaldtäler nimmt der Anteil an Lokalmaterial aus dem Schwarzwald stark zu (LGRB-BW 2021). Die Lagerstätte befindet sich rechtsseitig des Rheins am Fuße des Schwarzwaldes.

Die Schwermineralgehalte können mit 0,36 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,11 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Abbildung 44 zeigt die Schwermineralzusammensetzung der Probe 45.

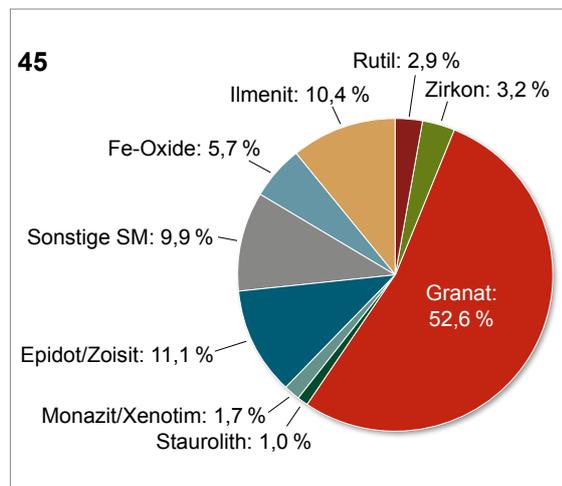


Abb. 44: Schwermineralzusammensetzung der Probe 45

Hauptanteil der Schwerminerale ist Granat (52,6 %), vorwiegend als Ca-Mg-haltiger Almandin, ausgebildet mit geringen Anteilen an Andradit und Grossular.

Weiterhin treten auf Epidot/Zoisit (11,1 %), Ilmenit (10,4 %), Rutil (2,9 %), Zirkon (3,2 %), Monazit/Xenotim (1,7 %) und Staurolith mit 1,0 %.

Als sonstige Schwerminerale wurden analysiert: Turmalin (0,3 %), Hornblenden (2,5 %), Apatit (2,1 %), Pyrit (1,2 %), Titanit (3,0 %) und Mg-Chromit (0,8 %). Es wurden Spuren von Kassiterit gefunden, wobei dieser generell mit anderen Mineralen verwachsen war.

Die Lage der Lagerstätte und die sehr starke Vertretung des Granats lassen als Liefergebiet hauptsächlich den Schwarzwald zu. Der Granat ist ableitbar aus den Granatgneisen und Granat-amphiboliten. Die Abwesenheit von Pyrop-betontem Granat scheint ein Anzeichen zu sein, dass die Eklogite des Schwarzwaldes kaum eine Rolle spielen (ERDMANNSDÖRFFER 1938).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Die Probe setzt sich hauptsächlich aus Granatphasen und Epidot zusammen. Daneben kommen Ilmenit, Titanit, Eisenoxidphasen, Apatit, Quarz, Zirkon und Rutil vor. Kassiterit ist nur in vernachlässigbaren Spuren nachweisbar.

Kassiterit tritt sehr selten auf (einzelne Körner) und nur in Verwachsungen mit Rutil-Ilmenit-Silikat- und Quarz-Feldspat-Turmalin-Assoziationen sowie mit Granat als derbe, fleckig braune, schwach trübe Körner.

Zirkon bildet angerundete bis gerundete gedrungene Kristalle und Kristallfragmente mit einzelnen Rissen, ist klar bis leicht trüb, hellfarbig bis leicht bräunlich, z. T. wachstumszonierte, häufig mit einzelnen Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen.

Rutil kommt als gerundete, z. T. rissige Bruchstücke vor, ist kräftig braun gefärbt, leicht trüb, vereinzelt randlich in Titanit umgewandelt. Daneben sind hellfarbige bis gelbliche pseudomorphe Bildungen vorhanden, teilweise löchrig-polykristallin bis feinkörnig-dicht.

Ilmenit ist häufig derb, zeigt kantige bis angerundete Bruchstücke mit stellenweisen Ausbrüchen, z. T. mit Rissen, vereinzelt mit Festphasen-Einschlüssen sowie Löchern, z. T. myrmekitartig, teilweise orientierte Hämatit-Ilmenit-Entmischungen, gelegentlich mit Quarz verwachsen, teilweise korrodiert mit fleckigen Umwandlungen zu TiO_2 und

Titanit, mitunter als feinkörnige Ti-Fe-Oxid-Pseudomorphosen mit Ilmenitchemismus.

Magnetit tritt als kantige bis gerundete, derbe Bruchstücke mit Rissen und Ausbrüchen auf, zeigt eine hellgraue Reflektionsfarbe mit gelbbraunem Stich, meist mit schwacher randlicher Martitisierung. Zudem wurden gerundete, derbe bis schuppig-poröse **Hämatit**aggregate, z. T. rundlich mit gitterförmig orientiert verwachsenen Lamellen, selten mit eingewachsenen Ilmenitkristallen gefunden.

Granat zeigt meist kantige bis angerundete Bruchstücke, ist überwiegend klar, hellfarbig bis leicht bräunlich, z. T. blassrötlich-bräunlich, vereinzelt blassrosagelbbraun, teilweise mit Löchern und z. T. reich mit Festphasen- (Quarz, Glimmer, Apatit, Ilmenit, TiO_2 u. a.) sowie Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen, mitunter in Zonen angereichert.

Besonderheiten: Titanit tritt derb auf, ist hell und feinkörnig, grau als Pseudomorphose vermutlich nach Ilmenit. Framboidaler Pyrit als Einzelkörner.

6.1.4.3 40 (Oberrhein)

Im Kieswerk 40 werden aktuell pleistozäne, karbonathaltige, fluviale Kiese und Sande aus der Mittelrhein-Hauptterrasse abgebaut. Diese setzen sich aus braungrauen bis rötlich-braunen sandigen Mittel- bis Grobkiesen zusammen. Lokal treten die Terrassen in karbonatischer Fein- bis Mittelsandfazies auf (WEIDENFELLER 2021, LGB-RLP 2021).

Die Schwermineralgehalte können mit 0,14 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,065 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 45 dargestellt.

Hauptanteil der Schwerminerale ist Granat (45,5 %), hauptsächlich als Ca-Mg-haltiger Almandin ausgebildet mit geringen Anteilen an Andradit und Grossular. Weiterhin treten Fe-Oxide (4,8 %), Ilmenit (7,8 %), Epidot/Zoisit (19,9 %), Rutil (3,0 %), Zirkon (1,3 %), Monazit (2,2 %) und Staurolith mit 1,1 % auf. Als sonstige Schwerminerale wurden nachgewiesen: Hornblende (4,5 %), Pyroxene (0,4 %), Titanit (4,2 %), Turmalin (1,6 %), Chromit (0,5 %), Apatit (1,5 %) und Al-Silikate (0,1 %).

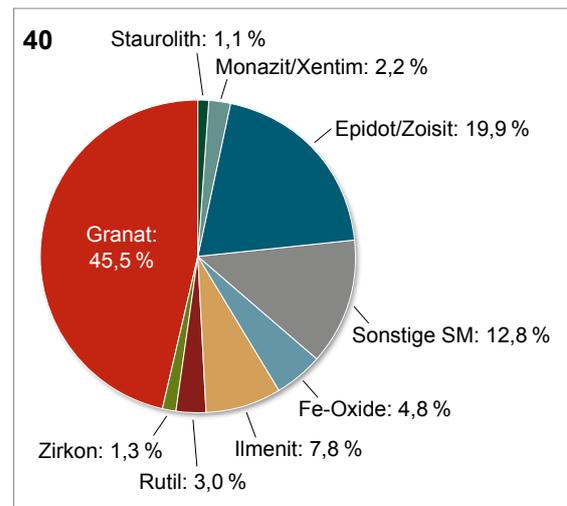


Abb. 45: Schwermineralzusammensetzung der Probe 40

Die Schwermineralzusammensetzung zeigt sehr ähnliche Signaturen wie die Probe 45 ca. 50 km rheinaufwärts, mit einem sehr hohen Anteil an Ca-Mg-haltigem Almandin und Epidot/Zoisit. Beide Lagerstätten lassen ein hauptsächliches Liefergebiet der Schwerminerale aus dem Schwarzwald zu.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Quarz, Calcit, Epidot, verschiedene Granatphasen und Dolomit bilden die Hauptgemengeteile der Probe. Diverse Eisenoxidphasen, Ilmenit und Rutil sind als Nebengemengeteile enthalten. Akzessorisch kommen Monazit und Zirkon vor, während Kassiterit nur in Spuren vertreten ist.

Kassiterit tritt selten als Kristallbruchstücke, kantig bis angerundet, fleckig bis zoniert hell- bis dunkelbraun, fast klar bis schwach trüb, kaum Einschlüsse.

Zirkon bildet angerundete idiomorphe Kristalle, etwas rissig, einzelne Einschlüsse (meist Fremdphasen), ist hellfarbig bis leicht bräunlich, fast klar und vereinzelt mit Oxidphasen verwachsen.

Rutil kommt hauptsächlich derb vor, als angerundete bis gerundete Kristallbruchstücke, oft verzwilligt, dunkelbraun, leicht trüb, z. T. mit Einschlüssen; z. T. in Silikate eingewachsen als körnige Aggregate mit rötlich gelber Färbung. Zum Teil

auch bläulich grauer Anatas. Zum Teil ist er mit alteriertem Ilmenit verwachsen.

Ilmenit zeigt diverse Formen, meist unregelmäßige, abgerundete bis gerundete Bruchstücke, teils derb, z. T. rissig bis splittig, teilweise löchrig bis poikilitisch, teils polykristalline, mit Quarz und Silikaten verwachsene Aggregate. Zum Teil ist er randlich bzw. von Rissen ausgehend korrodiert, z. T. zeigt er rundliche Ti-Fe-Oxid-Pseudomorphosen mit Ilmenitchemismus, z. T. ist er umgewandelt in Rutil oder Anatas bzw. feinkörnige Titanit- und Titanit-TiO₂-Massen.

Magnetit wurde nicht beobachtet. Stattdessen tritt **Hämatit** auf, als derb-grobkristalline Bruchstücke, abgerundet bis feinblättrig-dichte Massen mit Löchern und Poren, zum Teil gerundet. Außerdem werden vereinzelt weitere oxidische Phasen wie Chromite gefunden.

Granat tritt als Kristallfragmente auf, vereinzelt als Kristalle, kantig, partiell abgerundet bis gerundet, mit Ausbrüchen und Rissen, ist hellfarbig bis schwach rötlich-bräunlich, klar bis schwach trüb, z. T. reich an Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen (u. a. TiO₂, Ilmenit).

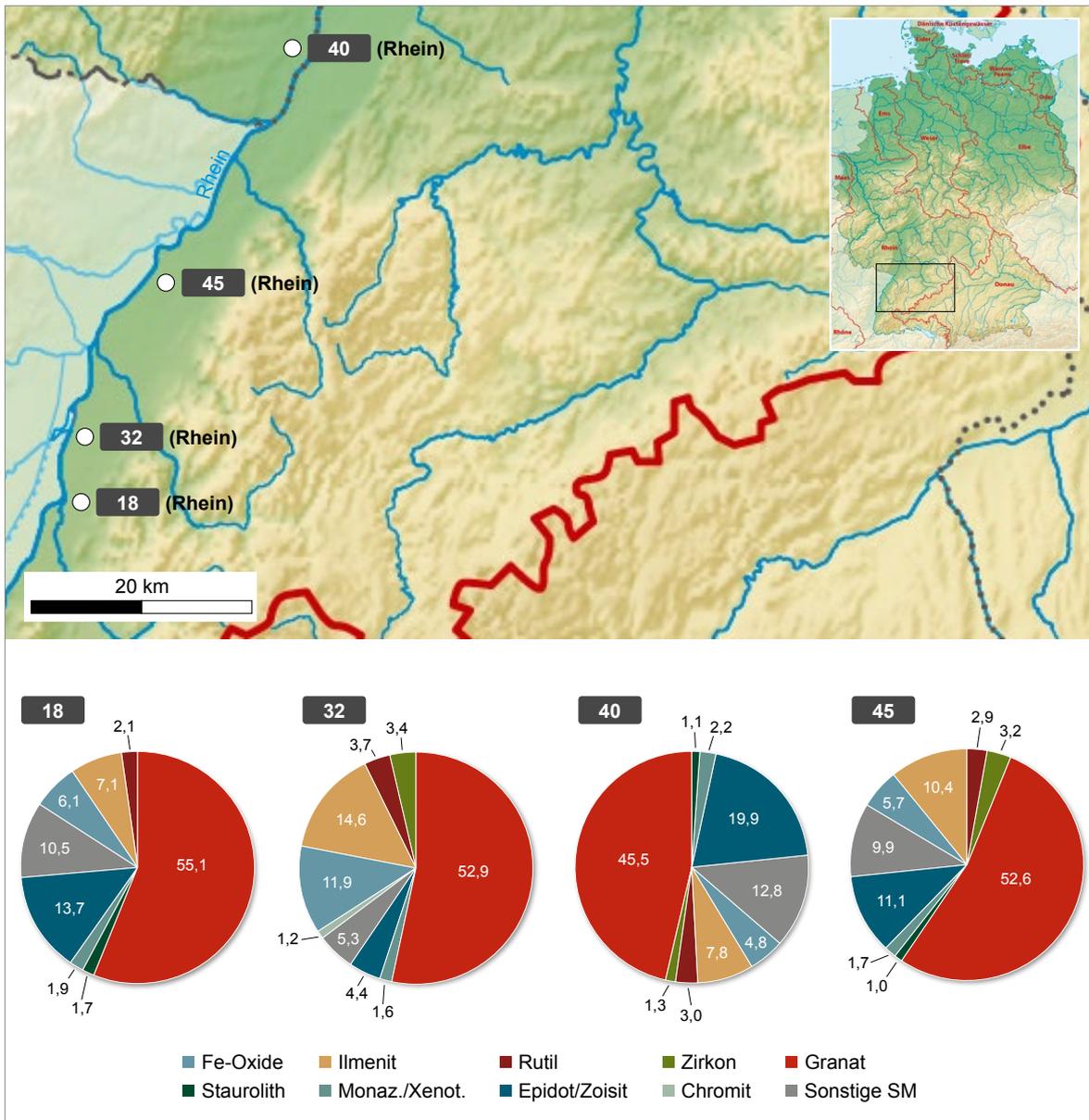


Abb. 46: Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten im Einzugsgebiet des Oberrheins (Angaben in %) (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021)

Besonderheiten: Vereinzelt randlich oxidierte Sulfide (Pyrit), mitunter auf Primärpartikeln angewachsen, Dolomit überwiegend mikritisch.

Eine Zusammenfassung der Schwermineralgehalte für den Bereich Oberrhein wird in Abbildung 46 dargestellt.

Die vier Lagerstätten am Oberrhein weisen eine sehr ähnliche Schwermineralverteilung mit überwiegend Granat als Hauptmineralkomponente auf. Die sehr ähnliche Mineralzusammensetzung der Lagerstätten 18, 32 und 45 beruht auf den gleichen regionalgeologischen Gegebenheiten, dem Haupteinzugsgebiet Alpenraum und der unmittelbaren Nähe zum Schwarzwald. Die Schwermineralzusammensetzung wird im weiteren Verlauf des Rheins in der Lagerstätte 40 mit übernommen.

6.1.5 Einzugsgebiet Nieder- und Mittelrhein

Die beprobten Lagerstätten des Mittel- und Niederrheins enthalten neben den Sedimenten des Oberrheins als Liefergebiet Material der geologischen Einheiten des Rheinischen Schiefergebirges, mit den tangierenden Einheiten des Westerwaldes, der Eifel, des Spessarts und des Odenwaldes.

Tab. 9: Beprobte Standorte im Einzugsbereich von Mittel- und Niederrhein

Kürzel	rezentes Einzugsgebiet
43	Mittelrhein
48	Niederrhein
66	Mittelrhein

6.1.5.1 43 (Mittelrhein)

In der Lagerstätte 43 werden fluviatile, quartäre Terrassensande und -kiese (sandige Mittel- bis Grobkiese) der Mittelrhein-Hauptterrassen-Formation abgebaut (WEIDENFELLER 2009, LGB-RLP 2021).

Die Schwermineralgehalte können mit 0,84 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,64 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 47 dargestellt.

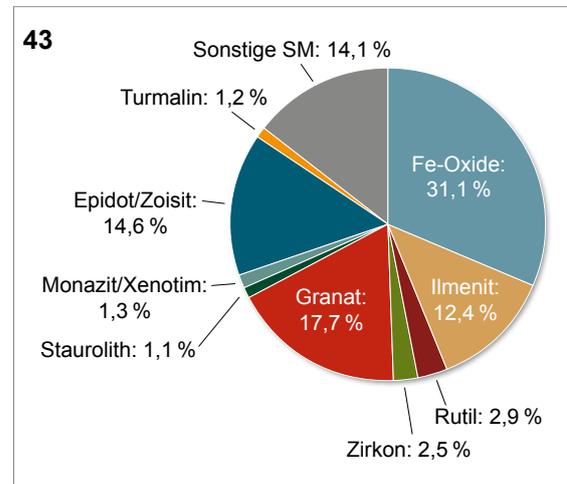


Abb. 47: Schwermineralzusammensetzung der Probe 43

Der überwiegende Anteil der Schwermineralzusammensetzung wird durch Fe-Oxide (31,1 %), Ilmenit (12,4 %), Granat (17,7 %) und Epidot/Zoisit (14,5 %) gebildet. Daneben treten auf: Zirkon (2,5 %), Rutil (2,9 %), Turmalin (1,2 %), Monazit/Xenotim (1,3 %) und Staurolith (1,1 %).

Sonstige Schwerminerale sind Titanit (3,3 %), Hornblende (2,9 %), Diopsid (5,9) und Apatit (2,3 %).

Die Lagerstätte liegt im Einflussbereich der basischen tertiären Vulkanite des Westerwaldes und der Vulkanite der Eifel sowie innerhalb des Rheinischen Schiefergebirges. Die Hornblendens und Pyroxene können aus den Vulkaniten abgeleitet werden (TURK et al. 1984). Epidot/Zoisit und Granat sind typische Minerale, welche aus den Schiefen stammen. Nach FELIX-HENNINGSEN et al. (1991) sind die Anteile an den stabilen Schwermineralen Zirkon, Rutil und Turmalin aus intensiven Verwitterungsdecken der Schiefer abstammend.

Nach Aussage des Betreibers der Lagerstätte werden bereits Anteile an ferromagnetischen Komponenten (Magnetit) aus den Sanden gewonnen, sehr fein gemahlen und als Dichtesuspension in Schwimm-/Sinkverfahren verwendet.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Die Probe besteht zu einem großen Teil aus diversen Fe-Oxiden, v. a. Magnetit und Ilmenit-Phasen. Daneben treten Granate und Zirkon sowie etwas Rutil und Topas auf. Kassiterit ist selten.

Kassiterit ist selten (wenige Körner, z. T. in Verwachsungen) als abgerundete Kristallsplitter, derb, hellfarbig mit braunen Schlieren bis gelblich graubraun, leicht trüb, kaum Einschlüsse.

Zirkon bildet meist kantige oder abgerundete bis gerundete, gedrungene bis längliche Kristalle oder Kristallfragmente, ist überwiegend hellfarbig, z. T. mit bräunlichen Flecken, Sektoren oder Zonen, mitunter ausgeprägt zoniert, klar bis leicht trüb, z. T. rissig, regelmäßig treten Festphasen-, seltener Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse auf.

Rutil kommt teils derb mit Zwillingslamellierung vor, meist orangebraun und klar. Teils treten gelbe bis orangegelbe, orientiert verwachsene porös-feinkörnige Pseudomorphosen auf, mitunter mit runden, feinkörnig-dichten, rötlich gelbweißen Leukoxenaggregaten. Vereinzelt auch poröserbe Massen von bläulich farblosem, leicht trübem Anatas.

Ilmenit zeigt überwiegend homogene Körner, mit wenigen Löchern und sulfidischen bzw. silikatischen Einschlüssen, z. T. ist er rissig mit einzelnen Ausbrüchen; mitunter verwachsen mit Rutil, vereinzelt treten Ilmenit-Hämatit-Entmischungen auf, z. T. von Rändern, Rissen oder parallelen Spaltrissen ausgehend korrodiert bis fleckig-schlierig umgewandelt in feinkörnigen Anatas und Titanit. Zum Teil treten auch partiell bis vollständig in Pseudorutil (z. T. sagenitisch) umgewandelte Phasen auf.

Magnetit kommt überwiegend als **Titanomagnetit** vor (i. d. R. Spur rosabräunlicher als Ilmenit), meist ist er homogen, oft rissig und mit muscheligen Ausbrüchen, vereinzelt mit tropfenförmigen Sulfideinschlüssen, auch mit Silikaten und Phosphaten, z. T. mit derbem Titanit verwachsen: Gewöhnlicher Magnetit ist selten, dann gut gerundet und meist randlich martitisiert. Daneben treten fast vollständige Pseudomorphosen von derbem Hämatit nach Magnetit auf, meist mit fleckigen Magnetitresten sowie feinschuppigen Hämatitaggregaten und

kollomorphen limonitischen Sulfidumwandlungsprodukten, z. T. mit Sulfidresten im Innern. Außerdem kommen diverse rundliche, kollomorphe bis körnig-poröse sowie ooidartige, konzentrische Limonit- als auch Hämatitbildungen vor, die im Trennungsprozess mitgeschleppt werden.

Granat bildet kantige bis abgerundete Kristallfragmente, ist z. T. rissig, hellfarbig, häufig mit rötlichem Stich, vereinzelt rosabräunlich, meist klar, z. T. leicht trüb, mitunter reich an Einschlüssen, z. T. silikatische, z. T. Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse ohne Einregelung, selten poikilitisch. Im Wesentlichen ist keine Zonierung erkennbar.

Besonderheiten: Vereinzelt Sulfide, selten Galeinit.

Die Probe 43 wurde in mehrere magnetische und elektrostatische Fraktionen aufgetrennt, um enthaltene Wertminerale zu konzentrieren. Die Aufbereitungsversuche werden in Abschnitt 6.4.5 beschrieben.

6.1.5.2 48 (Niederrhein)

In der Lagerstätte 48 werden quartärzeitliche Kiese und Sande der Rhein-Niederterrasse (Kamp-Lintfort) abgebaut. Nach GD-NRW (2021) liegt der Standort nahe der westlichen Grenze des Inlandeisvorstoßes der Saale-Kaltzeit. Die Rheinterrassen sind hier glazial überprägt.

Die Schwermineralgehalte betragen 0,38 % in der Fraktion < 1 mm und 0,28 % in der Gesamtkornfraktion.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 48 dargestellt.

Die Probe enthält als Hauptbestandteile Granat (36,4 %) mit Vormacht von Ca-Mg-betontem Almandin und geringen Mengen an Grossular und Andradit. Weiterhin treten auf: Fe-Oxide (10,9 %), Ilmenit (11,9 %), Epidot/Zoisit (11,3 %), Rutil (4,2 %), Zirkon (3,7 %), Monazit (1,7 %) und Staurolith (1,4 %).

Als sonstige Schwerminerale wurden gefunden: Chromit (0,7 %), Titanit (2,8 %), Hornblende (3,0 %), Diopsid und Enstatit (2,9 %), Apatit (1,9 %), Pyrit (4,8 %) und Turmalin (0,7 %).

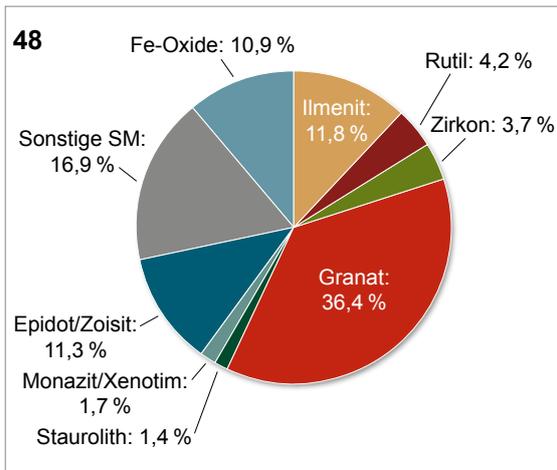


Abb. 48: Schwermineralzusammensetzung der Probe 48

Nach SHALA (2001) und KLOSTERMANN (1992) zeichnet sich die Niederterrasse in diesem Bereich des Rheins durch hohe Gehalte von Schwermineralen der vulkanischen Gruppe wie braune Hornblende, Klinopyroxen, Titanit und Olivin aus. Stellenweise sollen diese vulkanischen Schwerminerale bis zu 80 % des gesamten Spektrums ausmachen (THOSTE 1974). Die aus vulkanischer Aktivität abgeleiteten Schwerminerale Titanit, Hornblende und Pyroxene treten in der Probe mit nur ca. 10 % am Schwermineralspektrum auf. Dazu kommt noch Chromit mit geringen Anteilen. Überwiegend ist jedoch Granat und Epidot enthalten, der sich nach MENGELING (1986) durch hohe Anteile nordischen Materials ableitet. Demzufolge dürfte der größte Teil des Schwermineralspektrums aus eiszeitlichen Ablagerungen bestehen. Diese Ableitung geht konform mit den Aussagen nach GD-NRW (2021).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Neben Quarz und epidotartigen Phasen gehören die Granate zu den Hauptbestandteilen der Probe. Daneben sind u. a. Eisenoxidphasen, Ilmenit, Rutil und Zirkon enthalten. Topas tritt als Spur auf, Kasserit fehlt.

Zirkon zeigt idiomorphe, kantig-angerundete bis gerundete, lang- und kurzprismatische Kristalle sowie angerundete bis gerundete Kristallbruchstücke, ist hellfarbig, grünlich, rötlich, klar bis leicht

trüb, vereinzelt rissig, mit einzelnen Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen, vereinzelt einschlussreich (u. a. Apatit), mitunter treten gerundete Körner metamikter, feinkörniger, transluzenter, bräunlich braungrauer Massen auf.

Rutil kommt derb, rötlich braun bis gelblich braun, fast klar bis leicht trüb vor, z. T. mit Einschlüssen, vereinzelt ist er faserig. Teilweise treten helle, polykristalline, z. T. orientiert verwachsene gerundete Aggregate auf, daneben Anatas kantig, derb, fast klar, blaugrau, mit Einschlüssen.

Ilmenit tritt als teilweise derbe, kantige, z. T. splittig-raue bis angerundete Bruchstücke auf mit Rissen und Ausbrüchen, selten mit orientierten Hämatitmischungen, z. T. korrodiert bis löchrig, z. T. pseudomorph in kryptokristalline Ti-Fe-Oxide umgewandelt, regelmäßig mit Titanit-Saum.

Magnetit tritt als wenige gut gerundete, homogene Bruchstücke mit randlichen Rissen und Ausbrüchen auf, vereinzelt mit Mineraleinschlüssen, teils hämatitähnlich (isotrop, ohne IR), teils ilmenitähnlich; häufiger homogener, weitgehend entmischungsfreier Titanomagnetit mit muschligem Ausbrüchen (als Ilmenit-Fe-Oxid-Gemenge). Daneben finden sich schuppige bis derbe Hämatitaggregate sowie feinkörnige, konzentrisch-schalige Limonitknöllchen.

Granat kommt überwiegend als kantige bis angerundete Bruchstücke vor, teilweise gerundet, meist klar, vereinzelt leicht trüb, hellfarbig bis hellbräunlich-rötlich, vereinzelt zoniert, mitunter dunkelrotbraun (Andradit), z. T. sind einzelne bis zahlreiche Einschlüsse vorhanden (Gas-Flüssigkeit- sowie Festphasen: Glimmer u. a. Silikate, Ilmenit, TiO_2 , seltener Sulfide).

Besonderheiten: häufig überwiegend framboidale Pyritbildungen, z. T. markasitisiert; konzentrisch-schalige Limonitbildungen, u. a. um Ilmenit.

6.1.5.3 66 (Mittelrhein)

In der Lagerstätte 66 werden quartärzeitliche Sande und Kiese aus den Rheinterrassen und tertiärzeitliche Quarzsande mit einem Alter von ca. 5 Ma abgebaut (GD-NRW 2021).

Die Schwermineralgehalte sind sehr gering mit 0,036 % in der Fraktion < 1 mm und 0,007 % in der Gesamtkornfraktion.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 49 dargestellt.

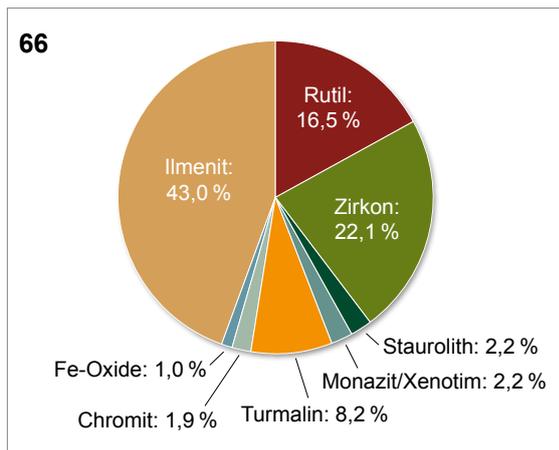


Abb. 49: Schwermineralzusammensetzung der Probe 66

Den überwiegenden Anteil der Schwerminerale stellt Ilmenit (43,0 %). Weiterhin sind die stabilen Schwerminerale Rutil (16,5 %), Zirkon (22,1 %), Turmalin (8,2 %), Monazit/Xenotim (2,2 %) und Chromit (1,9 %) vertreten.

Einen geringen Prozentsatz stellen Staurolith (2,2 %) und Fe-Oxide (1,0 %) dar. In Spuren treten Topas (0,2 %), Kassiterit (0,4 %), Titanit (0,1 %), Granat (0,6 %) und Epidot (0,8 %) auf.

Der überwiegende Anteil an stabilen Schwermineralen zeigt an, dass tertiärzeitliche Sedimente entnommen wurden, da instabile Schwerminerale nahezu nicht mehr vorhanden sind.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit bildet angerundete bis gerundete Bruchstücke, ist häufig rissig, zeigt narbige Oberflächen, ist vereinzelt zoniert, hell gelblich-bräunlich bis fleckig rötlich braun, fast klar, z. T. treten Einschlüsse auf.

Zirkon kommt als angerundete bis gut gerundete Kristalle und Kristallbruchstücke vor, ist hellfarbig,

meist klar, z. T. mit Rissen, z. T. mit Zonarbau, teilweise mit Löchern und Festphaseneinschlüssen (z. B. Sulfide), vereinzelt körnig-trüb, weißlich, gut gerundet mit Einschlüssen und Poren.

Rutil ist häufig derb, kantig bis angerundet, vereinzelt treten gerundete Bruchstücke auf, meist rissig, gelbbraun bis rotbraun, klar, z. T. mit polykristallinen rötlich-gelblichen Aggregaten, wenig gerundet. Anatas ist kaum gerundet, derb bis körnig, schwach trüb, fleckig bräunlich grau bis bläulich grau.

Ilmenit bildet häufig derbe, angerundete bis gerundete Bruchstücke, oft mit Rissen und Ausbrüchen, vereinzelt ist er löchrig, mitunter treten Einschlüsse auf (Silikate, Sulfide), z. T. fleckenweise Pseudomorphisierungen in feinkörnige Ti-Fe-Oxide, selten sind randliche Umwandlungen im Titanit, praktisch keine Hämatit-Ilmenit-Entmischungen.

Magnetit tritt nur selten auf, dann als derbe Bruchstücke mit polykristallinen Oberflächen, mit Löchern und Einschlüssen, daneben Chromit, derb, kantig-angerundet, z. T. mit Rissen, Poren und Löchern.

Granat bildet kantige bis angerundete Splitter und Bruchstücke, ist z. T. rissig, zeigt häufig narbige Oberflächen, teilweise mit Gas-Flüssigkeits- und Festphasen-Einschlüssen, ist hellfarbig z. T. mit rötlichem Stich, klar; daneben mitunter Verwachsungsbestandteil in anderen Partikeln.

Besonderheiten: vereinzelt Sulfidaggregate mit Pyrit, z. T. framboidal, Chalkopyrit-Digenit-Verwachsungen und Sphalerit.

Eine Zusammenfassung der Schwermineralgehalte in den Proben für den Bereich Mittel- und Niederrhein wird in Abbildung 50 dargestellt.

Die Probe der Lagerstätte 66 im Einzugsbereich Niederrhein fällt durch einen hohen Anteil an stabilen Schwermineralen auf, was den Abbau tertiärer Sedimente vermuten lässt. Der generelle Gehalt an Schwermineralen kann als sehr gering eingeschätzt werden. Nach Aussage der Betreiber werden die Sande als Quarzrohstoffe in der chemischen und Glasindustrie eingesetzt.

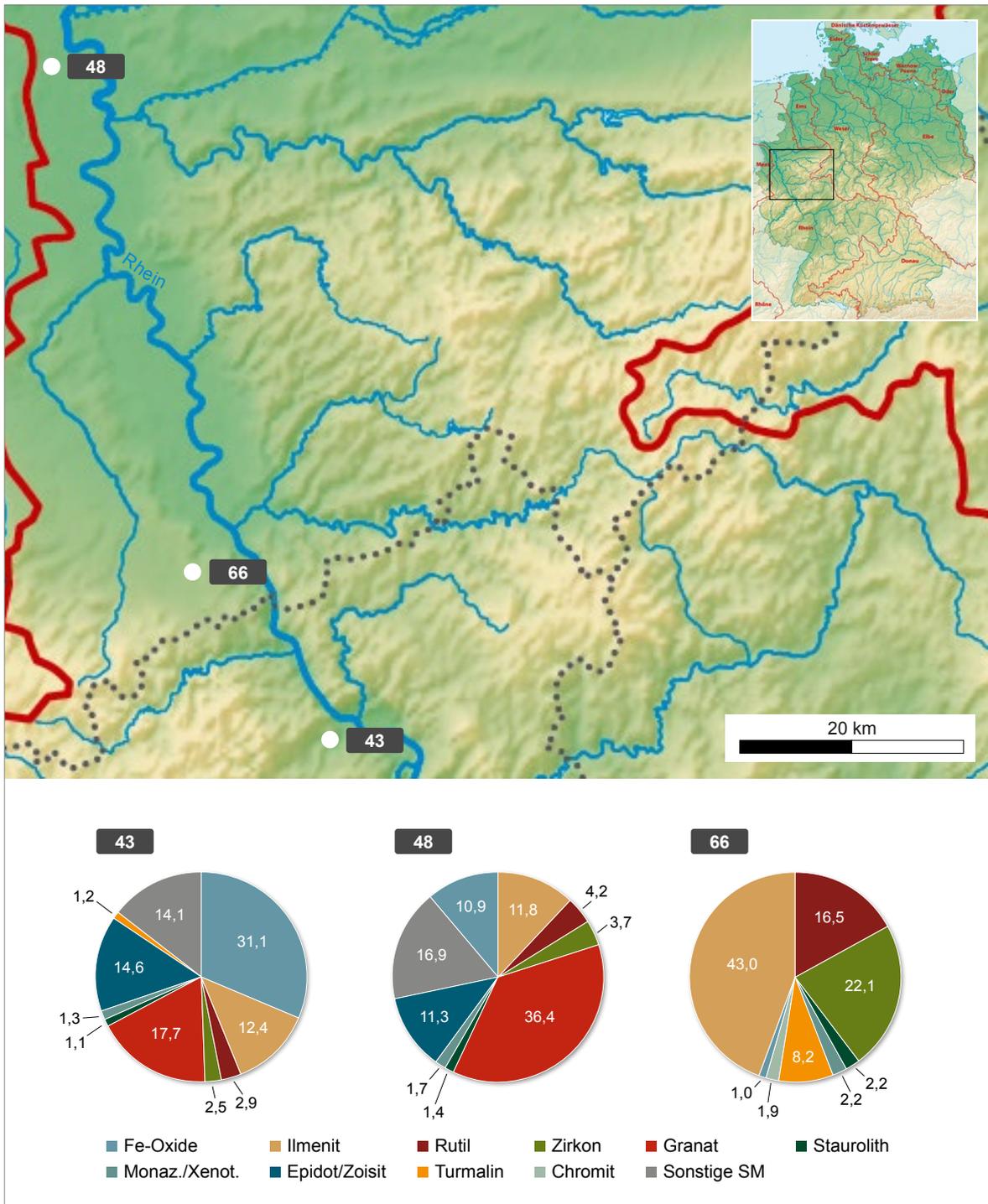


Abb. 50: Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten in den Einzugsgebieten von Mittel- und Niederrhein (Angaben in %) (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021)

Die beiden Lagerstätten 43 und 48 erinnern in ihrer Schwermineralzusammensetzung stark an die Lagerstätten im Oberlauf des Rheins, jedoch mit geringeren Granatanteilen. Im Gesamtverlauf des Rheins wurden alle Proben (bis auf 66) aus quartären, fluviatilen Kiesen und Sanden der

Mittelrhein-Hauptterrassen und der Rhein-Niederrasse gewonnen. Die Sedimente zeichnen sich demnach durch eine sehr ähnliche Zusammensetzung des Schwermineralspektrums aus.

6.1.6 Einzugsgebiet Weser

Das Einzugsgebiet der Weser tangiert im Süden den Vogelsberg, im Westen das Rheinische Schiefergebirge, im Osten den Thüringer Wald, das Thüringer Becken und den Harz. Richtung Norden findet hauptsächlich eine Prägung durch glaziale Sedimente statt. Die beiden Lagerstätten 07 und 16 befinden sich im Oberlauf der Weser im Einzugsgebiet der Eder bzw. im Mündungsbereich der Schwalm. Die Lagerstätte 62 liegt im Unterlauf der Weser und ist umrahmt von glazialen Sedimenten der Saaleeiszeit.

Tab. 10: Beprobte Standorte im Einzugsbereich der Weser. Bezug zu den rezenten Flusssystemen

Kürzel	rezentes Einzugsgebiet
07	Eder/Oberlauf Weser
16	Eder/Oberlauf Weser
62	Unterlauf Weser

6.1.6.1 07 und 16 (Eder/Oberlauf Weser)

Die Sande und Kiese beider Lagerstätten (07 und 16) wurden im Pliozän bis Altpleistozän als Schwalm-Eder-Terrassen der Zennener Senke (als Teil der Niederhessischen Tertiärsenke) abgelagert. Nach Angaben des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie

bestehen die pleistozänen Ablagerungen aus dem Verwitterungsschutt des Rheinischen Schiefergebirges, der in breiten Flusssystemen in östliche Richtung transportiert, mehrfach umgelagert und schließlich im östlichen Vorland des Gebirges abgelagert wurde (HLNUG 2021).

Beide Lagerstätten liegen nur 10 km voneinander entfernt in dem Bereich der Eder und zeigen nahezu die gleiche Schwermineralverteilung. Die Schwermineralgehalte in der Fraktion < 1 mm betragen 0,05 % (07) und 0,03 % (16). Die Gesamtkornfraktion beinhaltet 0,029 % (07) und 0,007 % (16). Der Unterschied in der Gesamtkornfraktion zwischen beiden ist bedingt durch einen höheren Grobanteil > 1 mm in der Probe 16.

Abbildung 51 veranschaulicht die Schwermineralzusammensetzung der Proben 07 und 16.

Den überwiegenden Anteil der Schwerminerale stellt Turmalin mit Schörl dar (34,0–35,2 %).

Daneben sind jeweils merkliche Anteile von Ilmenit (11,2–17,5 %), Rutil (17,5–20,9 %) und Zirkon (16,6–19,3 %) enthalten. Monazit/Xenotim kommen mit 1,3–2,4 %, Fe-Oxide mit 1,2–6,0 % und Chromit mit 3,1–6,6 % vor.

An sonstigen Schwermineralen wurden in den Lagerstätten gefunden: Al-Silikate (0,1 %), Staurolith (0,1–0,6 %), Granat (0,5–0,7 %), Titanit (0,1–0,3 %) und Spuren von Hornblenden, Pyroxenen, Apatit, Baryt, Kassiterit, Topas und auch Galenit mit Pb-Sekundärphasen. Das vielfach in

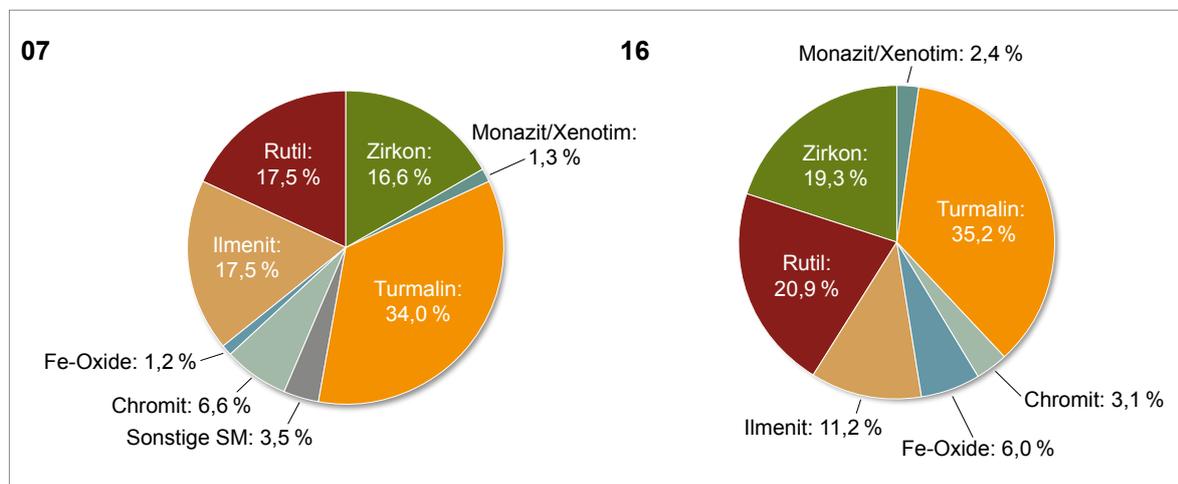


Abb. 51: Schwermineralzusammensetzung der Proben 07 und 16

der Literatur beschriebene Eder-Gold (HOMANN 2011, ELSNER & LEHMANN 2014) konnte in den Proben nicht nachgewiesen werden.

HOMANN (2011) untersuchte ebenfalls Schwermineralassoziationen in den Eder-Terrassen des Lagerstättenumfeldes. Nach dessen Aussage können Granat, Turmalin, Epidot, Rutil und Zirkon, neben Monazit und Titanit aus den erodierten unterkarbonischen Eder-Grauwacken abgeleitet werden. Der Verfasser wies auch größere Mengen Olivin, Hornblende und Augit aus, die aus dem südlich gelegenen Bereich des Vogelsberges stammten. Im Vergleich mit den Daten von HOMANN (2011) sind in den vorliegenden Proben alle instabilen Schwerminerale sehr stark abgereichert. Die Schwermineralzusammensetzung mit vorwiegend stabilen Schwermineralen weist auf eine starke Verwitterung hin, was durch die tertiären Ablagerungen bestätigt wird (Pliozän bis Altpleistozän). Weiterhin liegen die Lagerstätten auch im Einflussbereich des Buntsandsteins. VOIGT (2007) konnte in den Buntsandsteinen Thüringens extreme Anreicherungen von ausschließlich Turmalin, Rutil und Zirkon feststellen, was auf eine sehr intensive Zerstörung aller instabilen Schwerminerale hinwies. Schlussendlich weisen die Proben einen überwiegenden Anteil an stabilen Phasen auf plus einen Anteil nicht oder schwach verwitterter Schwerminerale, die aus der unmittelbaren Umgebung stammen dürften (Metamorphe Phasen und Galenit + andere Sulfide).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 07

Kassiterit wurde selten als Einzelkörner, dunkelbraun, trüb, gerundet-rau, rissig gefunden.

Zirkon, als Hauptbestandteil, kommt teils als Bruchstücke mit Kristallflächen bis idiomorph, teils gut gerundet vor, überwiegend farblos bis blassfarbig, klar bis leicht trüb, vereinzelt mit Gas-Flüssigkeits- und Fremdphasen-Einschlüssen und selten zoniert.

Rutil ist sehr unterschiedlich ausgebildet, teils gelbrot, massig ohne Eigengestalt in gerundeten Körnern, teils skelettartig orientiert verwachsene bis feinkörnige Aggregate. Zum Teil tritt Anatas auf, z. T. idiomorph, im Dunkelfeld an blauer Zonierung erkennbar.

Ilmenit zeigt meist gerundete Körner ohne Texturierung, mitunter sind diese deutlich korrodiert, z. T. in Verwachsung mit Rutil und vereinzelt mit Sulfideinschlüssen beobachtet.

Magnetit wurde nicht beobachtet, stattdessen treten rundliche, konzentrisch aufgebaute, vereinzelt auf Ilmenit sitzende Fe-Oxihydroxid-Aggregate bzw. gut gerundete, dunkle Magnesiochromitpartikel mit rötlich braunen Innenreflexen auf.

Granat findet sich als kantige bis angerundete Bruchstücke ohne erkennbare Färbung oder leicht bräunlich gefärbt, z. T. mit Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen.

Besonderheiten: Scharf begrenzte Galenitspaltstücke (mit typischen Spaltausbrüchen im Schriff) ohne erkennbare Korrosionserscheinungen, vereinzelt andere Sulfide. Monazit, trüb, fein- bis kryptokristallin, gut gerundet, z. T. mit anderen Phasen verwachsen. Das häufigste Mineral Turmalin tritt meist trüb mit Braun- bis Olivtönen, gut gerundet als Schörl auf.

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten – 16

Kassiterit wurde nicht beobachtet.

Zirkon zeigt angerundete bis gerundete Kristalle, ist hellfarbig, häufig klar, mit wenigen Einschlüssen, mitunter zoniert und dann einschlussreich.

Rutil kommt feinkörnig bis gitterförmig orientiert verwachsen vor, als gelbliche oder massige, einschlussreiche und dadurch trübe Kristallbruchstücke mit rötlich gelben bis braungelben Färbungen. Zum Teil tritt Anatas auf, meist teilweise idiomorph, leicht trüb, graubläulich bis graugelblich gefärbt, als seltene Ti-Phase kommt Titanit vor.

Ilmenit tritt meist als massige Kristallbruchstücke mit kantigen Bruchflächen ohne nennenswerte Eigengestalt auf, ist häufig rissig – oder bildet gerundete Partikel mit randlichen Korrosionsspuren und Umwandlungserscheinungen, z. T. mit Entmischungen.

Magnetit findet sich in Spuren mit löchrigen, derben Bruchstücken.

Granat wurde in Spuren gefunden als gerundete Körner mit Ausbrüchen, hellfarbig (leicht rötlich), fast klar und mit wenig Einschlüssen.

Besonderheiten: Häufig gut gerundete Turmaline (Anwesenheit von Beryll wäre zu verifizieren). Vereinzelt Pyrit-Framboidaggregate und Pb-Sulfide bzw. Pb-Sekundärphasen.

6.1.6.2 62 (Unterlauf Weser)

In der Kieslagerstätte 62 werden weichselzeitliche fluviatile Kiese und Sande der Weser-Niederterrasse abgebaut (LBEG 2021).

Die Schwermineralgehalte können mit 0,03 % in der Fraktion < 1 mm und mit 0,01 % in der Gesamtkornfraktion angegeben werden.

Die Schwermineralzusammensetzung wird in Abbildung 52 dargestellt.

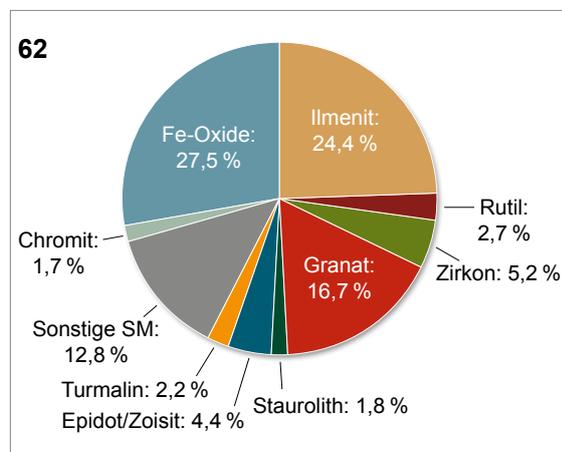


Abb. 52: Schwermineralzusammensetzung der Probe 62

Hauptanteil der Schwerminerale sind Fe-Oxide (27,5 %), Ilmenit (24,4 %) und Granat (16,7 %). Granat wird durch Ca-Mg-betonten Almandin dominiert, daneben tritt Grossular auf.

Des Weiteren sind enthalten: Rutil (2,7 %), Zirkon (5,2 %), Staurolith (1,8 %), Epidot/Zoisit (4,4 %), Turmalin (2,2 %) und Chromit (1,7 %).

Als sonstige Schwerminerale treten auf: Al-Silikate (0,3 %), Hornblende (3,1 %), Diopsid (2,4 %),

Pyrit (5,5 %), Apatit (0,6 %), Titanit (0,9 %) und Topas (0,1 %).

Mikroskopische Kurzbeschreibung der Wertkomponenten

Kassiterit wurde nicht nachgewiesen.

Zirkon zeigt überwiegend stark gerundete Kristalle und Kristallbruchstücke mit narbiger Oberfläche, mit einzelnen Rissen, ist klar bis leicht trüb, hellfarbig bis leicht bräunlich, vereinzelt mit leicht graugrünlich mit blassbräunlichen Schlieren, vereinzelt mit Festphasen- und Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen und nur selten mit Wachstumszonierung.

Rutil bildet derbe, kantige bis angerundete Bruchstücke mit narbiger Oberfläche, ist gelblich braun, fast klar bis leicht trüb, mit Rissen und Einschlüssen. Daneben tritt derber Anatas als kantige Bruchstücke auf, schlierig-fleckig graubräunlich bis gelblich, z.T. graubläulich, fast klar bis trüb, mit Einschlüssen.

Ilmenit kommt hauptsächlich derb vor, als kantige bis gerundete Bruchstücke, meist rissig, mit Ausbrüchen und Ausbuchtungen, selten verzwilligt, partiell korrodiert, vereinzelt treten Ilmenit-Hämatit-Entmischungen und -Verwachsungen auf, selten mit randlichen Umwandlungen in Titanit, mitunter ist er pseudomorph in rundliche Aggregate kryptokristalliner Ti-Fe-Oxid-Gemenge umgewandelt.

Magnetit bildet kantige bis gerundete Bruchstücke mit Rissen und großen rundlich muschligen Ausbrüchen und Löchern (hellgraue Reflektionsfarbe mit bräunlich-gelblichem Stich), daneben tritt entmischungsfreier, ilmenitähnlicher Titanomagnetit mit muschligen Ausbrüchen und Löchern auf. Außerdem Hämatit als monokristalline bis polykristalline, z.T. orientiert lamellar verwachsene Aggregate, kantig bis gerundet, z.T. mit Ausbrüchen und Rissen. Zudem wurden verschiedene Chromit-Phasen, derb, gut gerundet gefunden.

Granat ist meist kantig-angerundet bis gut gerundet als Bruchstücke mit häufig narbiger Oberfläche, z.T. mit Rissen, hellfarbig bis leicht bräunlich bzw. hellbräunlich-rötlich, meist klar, vereinzelt einschlussreich, mitunter treten große Festphaseneinschlüsse (Ilmenit) auf.

Besonderheiten: Framboidaler bis kollomorpher Pyrit als sedimentäre Neubildung, z. T. auf Fe-Phasen aufgewachsen.

Eine Zusammenfassung der Schwermineralgehalte in den Proben für den Bereich der Weser wird in Abbildung 53 dargestellt.

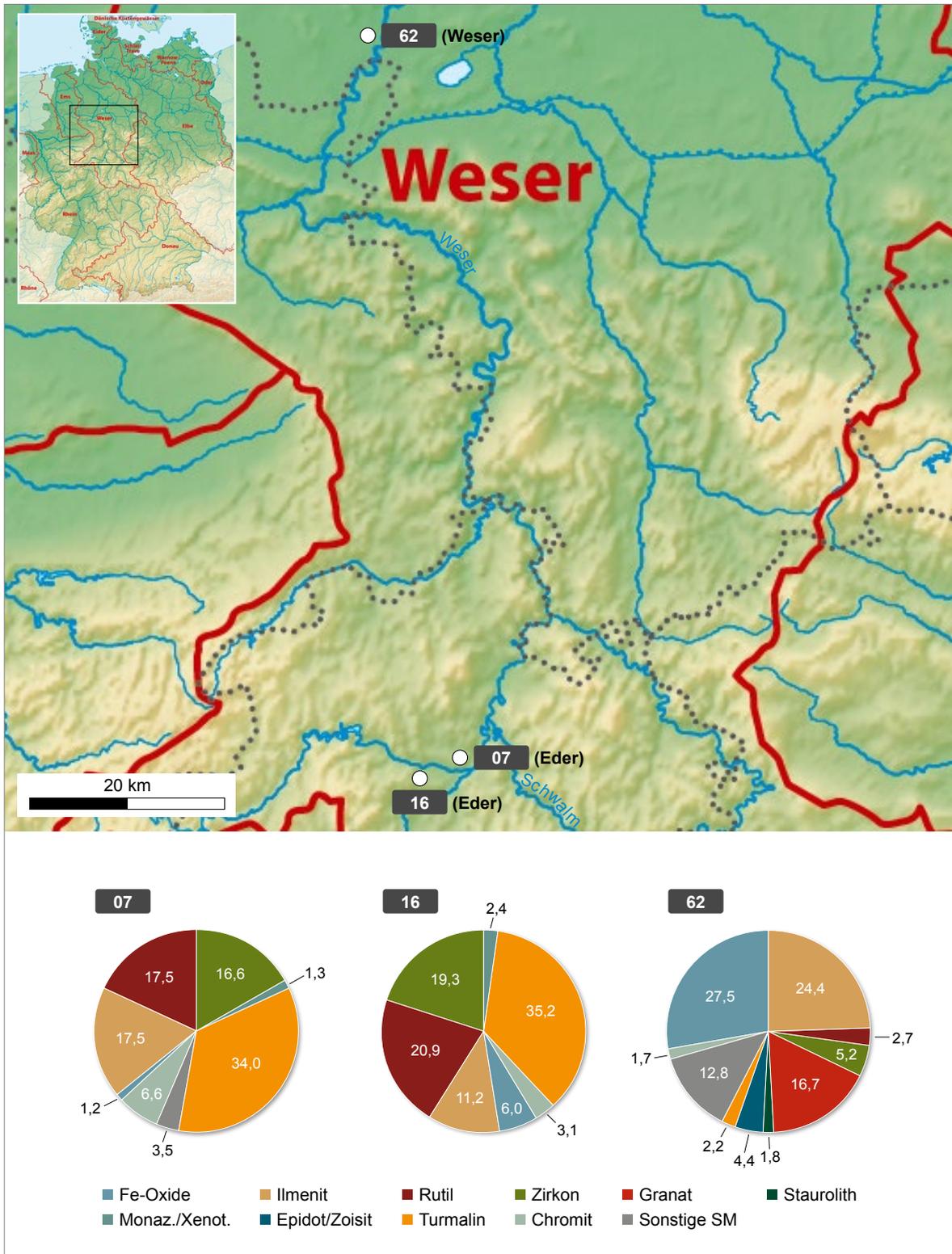


Abb. 53: Schwermineralzusammensetzung verschiedener Kiessandlagerstätten im Einzugsgebiet der Weser (Angaben in %) (NORDNORDWEST/WIKIPEDIA 2021)

Im Wesereinzugsgebiet fallen die Lagerstätten 07 und 16 durch ihren hohen Anteil an stabilen Schwermineralen auf. Die Chromitgehalte lassen sich erklären, wenn basische Gesteine als Lieferanten mit in Frage kommen. Das Fehlen der normalerweise parallel mit vorkommenden Minerale Olivin, Hornblende und Augit, welche von verschiedenen Autoren beschrieben wurden (SCHMIDT-DÖHL 2017, HENNINGSEN 1980), lässt sich dadurch erklären, dass Letztere instabil sind und die intensive tropische Verwitterung während des Tertiärs nicht überdauerten. Turmalin und Zirkon sind aber keine typischen Minerale, die aus den basischen Gesteinen abzuleiten sind. Demzufolge sind die Liefergebiete für diese Sedimente weiter zu fassen. Im weiteren Verlaufe der Weser bis zur Lagerstätte 62 scheint sich ein Teil des gleichen Schwermineralspektrums wiederzufinden, jedoch mit Anteilen glazigenen Materials.

Eine geringe Menge an Topas in der Lagerstätte 62 lässt die Vermutung offen, dass auch ein Anschluss an die Elbe in den Sedimenten nicht auszuschließen ist. MÜLLER et al. (1988) beschreiben, dass sich Topas in charakteristischer Weise in verschiedenen vor- bis frühlsterglazialen Flussschottern der Niederlande wiederfindet. Es kann als erwiesen gelten, dass die Elbe bis zum ersten elsterglazialen Eisvorstoß in Nordwestrichtung nach den Niederlanden floss und auf ihrem Weg die Sedimente der Mulde, Saale, Weser und den Vorläufer der Ems aufgenommen hat.

6.2 Mineralogische und mikroskopische Charakterisierung der Schwerminerale

Im aktuellen Abschnitt werden die Wertminerale Fe-Oxide, Ilmenit, Granat, Zirkon, Kassiterit und Rutil bevorzugt in ihren Ausbildungen betrachtet. Des Weiteren sind weitere häufige Schwerminerale fotografisch dargestellt und im Erscheinungsbild beschrieben.

Die folgenden Kürzel wurden für die Mineralnamen in den Fotos verwendet:

Mgt-Magnetit, Hem-Hämatit, Ilm-Ilmenit, Grt-Granat, Ks-Kassiterit, Zir-Zirkon, Rut-Rutil, Ana-Anatas, Tur-Turmalin, Top-Topas, Epd-Epidot, Mnz-Monazit, Tit-Titanit, Crt-Chromit, Psi-Pseudomilmenit, Psr-Pseudorutil, Psb-Pseudobrookit,

Ap-Apatit, Py-Pyrit, Sil-Sillimanit, Dth-Disthen, And-Andalusit, Str-Stauroolith, Ap-Apatit.

Beschreibung der Schliffotos: Die folgenden Mineralfotos wurden sowohl im Durchlicht als auch im Auflicht in verschiedenen optischen Einstellungen fotografiert:

HF-D – Durchlicht im Hellfeld

HF-A – Auflicht im Hellfeld

Nic-D – Durchlicht mit gekreuzten Nicols

Nic-A – Auflicht mit gekreuzten Nicols

DF-A – Auflicht im Dunkelfeld

Die Unterschriften in den folgenden Abbildungen erfolgten mit der Nummer der Lagerstätte, des Buchstabens der jeweiligen Aufbereitung (ferro-para-diamagnetisch Anlage 2) und den jeweiligen optischen Einstellungen.

Magnetit und andere Fe-Oxide

Die in Schwermineralgemengen auftretenden Fe-reichen Oxidphasen mit z.T. ferromagnetischen Eigenschaften können sowohl dem Fe-Ti-Oxid-Phasensystem als auch der Spinell-Gruppe zugeordnet werden und können untereinander vielfältige, strukturell begründete Phasenbeziehungen realisieren (s. z.B. HARRISON & PUTNIS 1999). Darüber hinaus können Beimengungen weiterer Elemente eine erhebliche Rolle spielen (s. SHIGA 1988, VAISH et al. 2007). Vielfältig sind ebenfalls die möglichen Entmischungserscheinungen aus Ti-haltigem Magnetit sowie gegenseitige Ersetzungen der verschiedenen Fe-Oxid-Phasen (vgl. z. B. RAMDOHR 1960, HATANO 1976, PRICE 1981, MÜCKE 1989, MÜCKE & CABRAL 2005, MÜCKE 2016). Speziell der Prozess des orientierten Kristallwachstums von Hämatit in Magnetit infolge partieller Oxidation ist von McCARTY et al. (2014) studiert worden. Das primäre Auftreten dieser oxidischen Mineralphasen, insbesondere des Magnetits, ist an saure bis basische Magmatite, Metasomatite und mittel- bis hochgradig metamorphe Gesteine gebunden. Die damit verbundenen mineralogischen Erscheinungen sind umfangreich untersucht worden (et al. HATANO 1976, ISHIHARA 1977, VON GRUENEWALDT et al. 1985, MÜCKE & CABRAL 2005).

Auflichtmikroskopisch zeigt Magnetit (Fe_3O_4) bei mittlerer Reflektanz eine charakteristische bräunlich graue Reflektionsfarbe (Abb. 54), die zwischen den einzelnen Proben teilweise unterschiedliche Nuancen aufweist. Das Bräunlichgrau ist entweder gewöhnlich rosastichig (vermutlich von gelöstem Ti – lt. MÜCKE (2016)) oder enthält einen gelblich rosa oder ockergelblichen bis ilmenitähnlich braungelben Farbstich. Anisotropien, wie von RAMDOHR (1960) beschrieben, wurden nicht festgestellt. Daneben kommt als häufige Fe-Oxidphase Hämatit (Fe_2O_3) in unterschiedlichen Ausbildungsformen vor (Abb. 56, Abb. 57). Diese Mineralphase ist mittelhoch, jedoch auffallend hell reflektierend mit bläulich grauweißer Reflektionsfarbe. Bei gekreuzten Polarisatoren zeigt Hämatit intensive braungraue Anisotropieeffekte sowie blutrote Innenreflexe, während die Bireflektnaz häufig kaum erkennbar ist. Vereinzelt ist der Hämatit polysynthetisch verzwilligt. Mitunter vorkommende, ebenso bläulich grauweiße, hämatitähnliche Phasen ohne Anisotropie und Innenreflexe können wahrscheinlich als Maghemit (kubisches Fe_2O_3) angesprochen werden (vgl. RAMDOHR 1960). Möglicherweise stellen einzelne Bildungen auch Pseudobrookit-Hämatit-Pseudomorphosen dar. Verwachsungen der Fe-Oxidphasen mit Ti-Mineralphasen, u. a. Ilmenit, sind nicht selten.

Die Magnetitpartikel treten meist als kantige bis gerundete Bruchstücke mit Rissen und auffallend großen, rundlich muschligen Ausbrüchen und Löchern in Erscheinung. Mitunter wird der Magnetit, in einigen Proben gehäuft, vom Rand her martitisiert, d. h. in Hämatit umgewandelt (Abb. 55 b).

Dabei sind sowohl feinkörnig-fleckige Bereiche als auch orientierte Einlagerungen von Hämatitlamellen entwickelt. Die Martitisierungen führen in einzelnen Fällen zu vollständigen Hämatitpseudomorphosen mit orientiertem Gefüge. Neben Aggregaten mit Verdrängungsstruktur treten polykristalline, z. T. orientiert lamellar verwachsene bis schuppig-dichte Hämatitaggregate auf. Daneben kommen einkristallartige derbe Hämatite und z. T. Maghemite vor, z. T. mit Ausbrüchen und Rissen. Die Partikel selbst sind teils kantig, teils angerundet bis gerundet.

Vereinzelt ist ein entmischungsfreier, ilmenitähnlicher, jedoch isotroper Titanomagnetit mit muscheligen Ausbrüchen und Löchern zu beobachten. Zudem kommen in einer Reihe von Proben verschiedene Chromit-Phasen vor, die sich durch graue, z. T. olivstichige Reflektionsfarben mit schwachen braunen Innenreflexen auszeichnen. Diese Partikel sind derb, gut gerundet und besitzen oft eine rissige Oberfläche (Abbildung 58).

Die Schwierigkeiten und Möglichkeiten der lichtmikroskopischen Unterscheidung von verwachsenen oxidischen Fe-Mineralen zeigen u. a. PIRARD & LEBICHOT (2004) und GOMES & PACIORNIK (2008). Die Verwendbarkeit von Magnetit in der Provenienz-Analyse zeigt z. B. GRIGSBY (1990).

Verschiedene Limonit/Fe-Hydroxid-Körner, z. T. mit Ti-Oxid-Kernen mit konzentrischem Aufbau und framboidalem Charakter zeigen die Abbildung 59 und Abbildung 60.

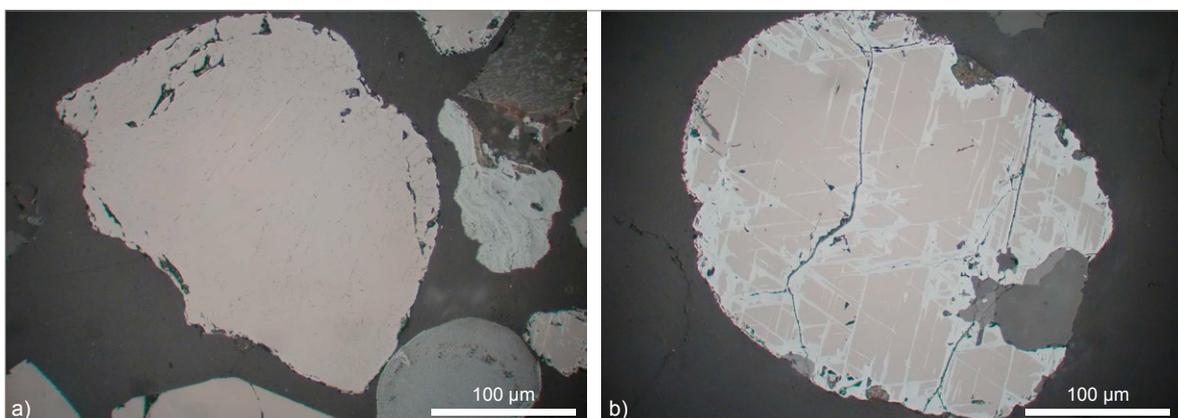


Abb. 54: a) Magnetit im Auflicht (43A_HF-A), b) teilweise martitisierter Magnetit im Auflicht (22_HF-A) mit hellgrauen Hämatitleisten

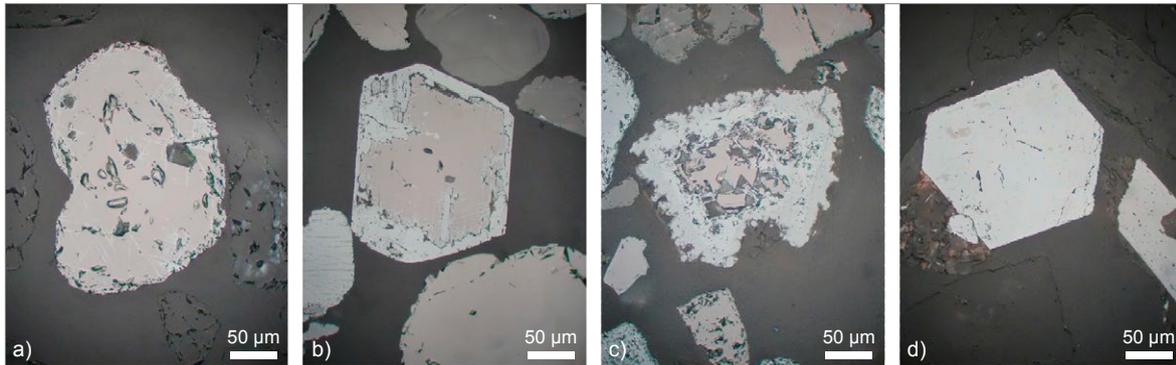


Abb. 55: Verschiedene Umwandlungsstadien von Magnetit in Hämatit, a) Magnetit mit schwacher Martitisierung (16_HF-A_Mgt-Hem), b) idiomorphes Magnetitkorn wird pseudomorph von Hämatit verdrängt (35_HF-A_Mgt-Hem), c) völlig „zerfressenes“ Magnetitkorn (65_HF-A_Mgt-Hem), d) Pseudomorphose von Hämatit nach Magnetit mit Spuren von Magnetit im Korn (65_HF-A_Hem)

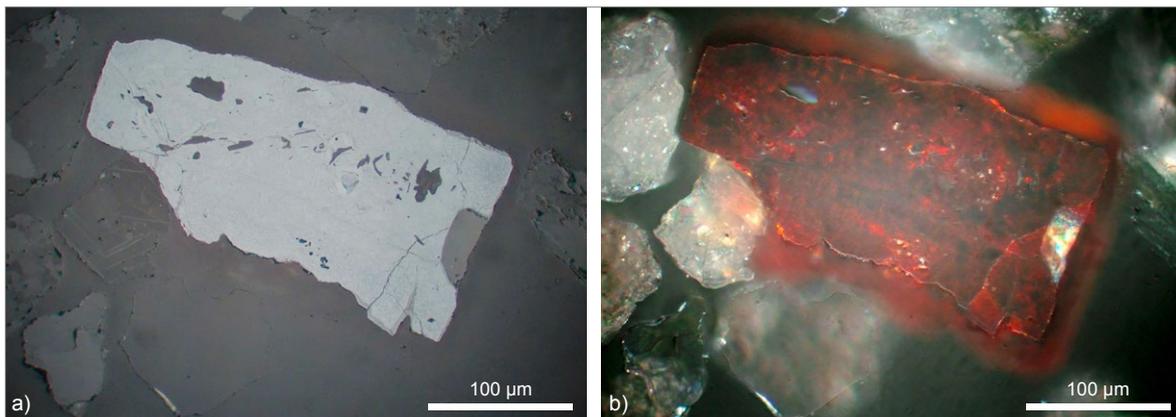


Abb. 56: a) Hämatit im Auflicht (06_HF-A), b) dito im Auflicht (Nic-A)

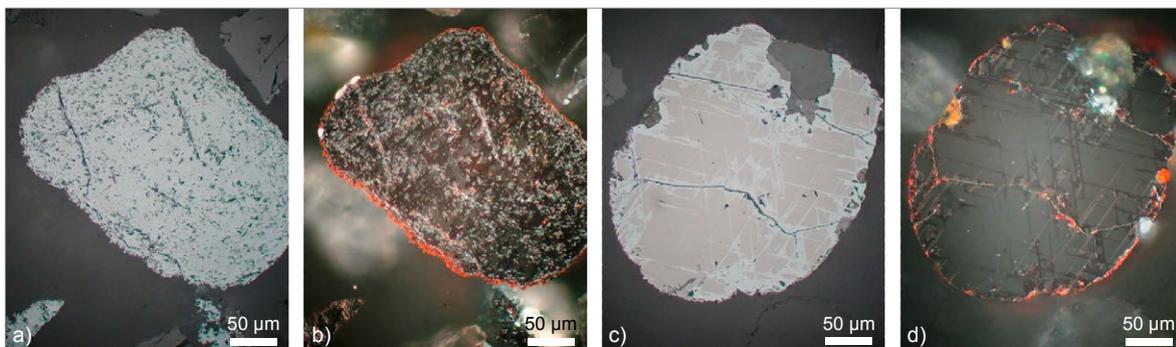


Abb. 57: Feinkristallines Hämatitaggregat im Auflicht (18_HF-A), b) dito im Auflicht (Nic-A) mit Anisotropieeffekten und roten Innenreflexen, c) teilweise martitisierter Magnetit (23_HF-A) mit d) sichtbaren roten Innenreflexen des Hämatits (Nic-A)

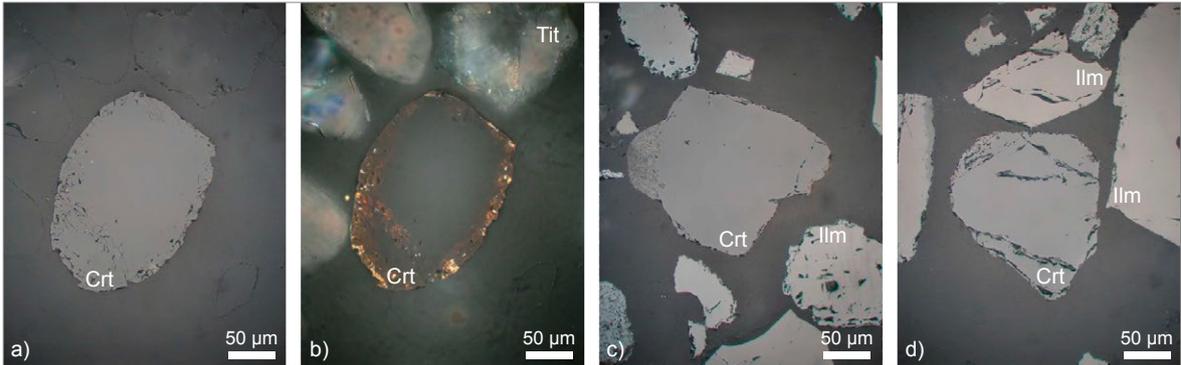


Abb. 58: a) Chromit (Varietät Magnesiochromit) im Auflicht (07_HF-A), b) dito Chromit mit Titanitkorn im Auflicht (Nic-A), c) Chromit im Auflicht (43A_HF-A), d) Chromit mit Ilmenit im Auflicht (43A_HF-A)

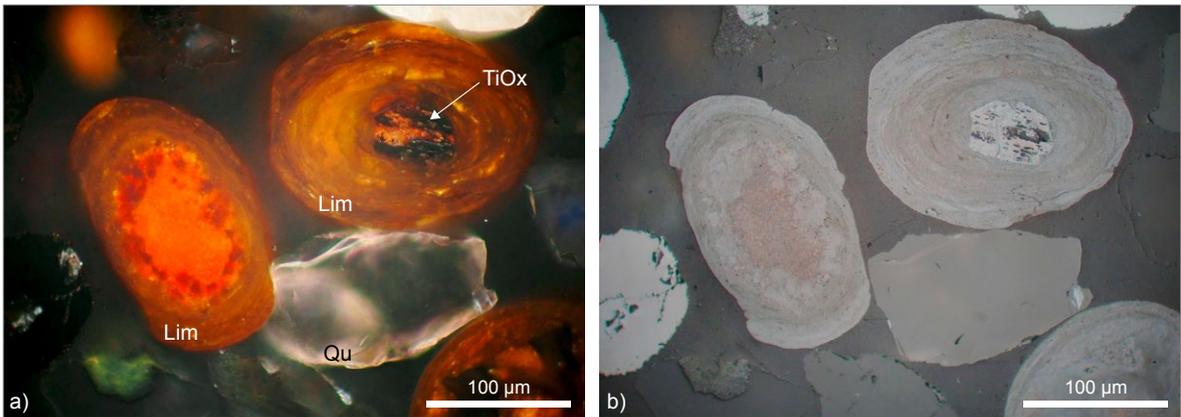


Abb. 59: a) Konzentrische Limonit/Fe-Hydroxid-Körner mit Ti-Oxid-Kernen in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen (04), a) Auflicht (Nic-A), b) dito im Auflicht (HF-A)

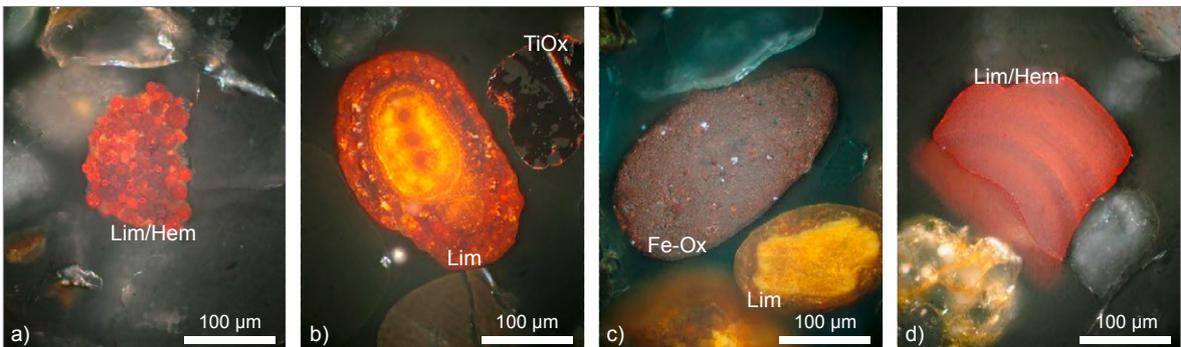


Abb. 60: Verschiedene Limonit/Fe-Oxid/Hydroxid-Partikel im Auflicht bei gekreuzten Nicols, a) Pseudomorphosen nach framboidalem Pyrit (06), b) konzentrisches Limonitaggregat neben Ti-Oxid (07), c) Fe-Oxid-Partikel mit feinschuppiger Textur (04), d) Konzentrisches Limonit-Hämatit-Aggregat (65)

Ilmenit und ilmenitartige Phasen

Mineralchemisch eindeutig definierter Ilmenit (FeTiO_3) ist in den bewerteten Schwermineralassoziationen meist nur zu einem geringen Anteil vertreten. Viele nach elementchemischem Befund (QEMSCAN) als Ilmenit deklarierte Phasen erweisen sich im polarisationsmikroskopischen Bild oft als komplexe Phasenumwandlungsprodukte mit mikro- bis nanogranularen Gefügen oder mit Entmischungsstrukturen. Auch die sog. Leukoxene stellen vielfach sehr diverse Alterationsbildungen dar, die aus den TiO_2 -reichen Zwischenprodukten verschiedener Umwandlungsstufen bestehen (vgl. RAMDOHR 1960, TEMPLE 1966, MÜCKE & CHAUDHURI 1991, Phasenbeziehungen $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ nach LINDSLEY 1965).

Diese in den meisten der untersuchten Schwermineralgemengen präsente Vielfalt kann auf Einträge aus verschiedenen Quellen bzw. unterschiedlichen Alterationsbereichen ilmenitführender Gesteinskörper hinweisen. Zunächst treten, mitunter gehäuft, auffällige Ilmenit-Hämatit-Entmischungsbildungen auf (Abb. 62c), die sich als Verwachsungen von spindel- bis linsenförmigen, bisweilen auch lamellen- bis flammenförmigen Ti-Hämatit- und Fe-Ilmenit-Entmischungskörpern (Ilmenohämatit/Hämoilmenit) z. T. in mehreren Generationen darstellen. Je nach Vormacht werden die partiell zerfallenen Mischkristalle als Hämatitilmenit oder als Ilmenithämatit bezeichnet (MÜCKE 1989). Submikroskopisch können im Ti-Hämatit neben Ilmenit auch Rutil-Phasen entmischt sein (KASAMA et al. 2004).

Die Mineralphasen in diesen Entmischungsbildungen fallen im polarisationsmikroskopischen Bild durch untypische Eigenschaften auf: Der Ilmenit erscheint mehr bräunlich grau und der Hämatit kräftiger grau gegenüber den unverwachsenen reinen Phasen, zudem sind in der Regel praktisch keine Anisotropieeffekte zu erkennen. Die Partikel dieser zweiphasigen Aggregate zeigen selten Alterationserscheinungen an ihren Oberflächen. Diese Bildungen stellen offenbar eutektoiden Zerfallsprodukte von $\text{FeTiO}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Hochtemperaturmischkristallen dar (HARRISON & REDFERN 2001).

Analoge Verwachsungen bzw. Entmischungen von Magnetit und Ilmenit, wie u. a. von MÜCKE (1989) oder TAN (2016) beschrieben, sind in den untersuchten Schwermineralgemengen nicht beobachtet worden. Bereits RAMDOHR (1960) war von einer unbegrenzten Mischbarkeit zwischen FeTiO_3 und Fe_2O_3 oberhalb 600 °C ausgegangen, HARRISON et al. (2000) konnten die einsetzende Entmischung unterhalb 600 °C und das Einfrieren der Ti-Fe-Austauschmigration ab 475 °C experimentell bestätigen. Infolge dieses Entmischungsvorganges können sich sogar magnetische Cluster bilden (vgl. KASAMA et al. 2004, ROBINSON et al. 2004, FRANSEN et al. 2010), die dann auf das Magnettrennungsverhalten von Ilmenitkonzentrationen einen deutlichen Einfluss haben können.

Neben den offenbar magmatogen entstandenen Verwachsungen sind in den ilmenithaltigen Mineralassoziationen häufig überwiegend nahezu bis vollständig entmischungsfreie Ilmenite sowie deren Alterationsprodukte enthalten. Nach MÜCKE

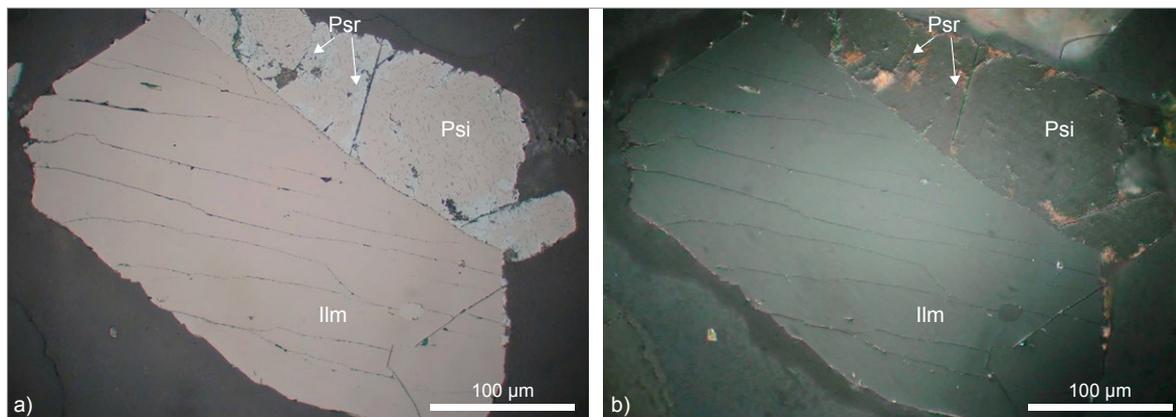


Abb. 61: a) Ilmenit (Ilm) und Pseudoilmenit-Pseudorutil-Verwachsung (Psi/Psr) im Auflicht (05_HF-A), b) dito im Auflicht (Nic-A) – Pseudorutil mit typischen bräunlichen Innenreflexen

& CHAUDHURI (1991) gibt es eine kontinuierliche Alterationsentwicklungsreihe von frischem Ilmenit über Fe-abgereicherten Ilmenit ($(\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{TiO}_3$ bis $\text{Fe}_{2,3}\text{Ti}_3\text{O}_9$ – in den vorliegenden Beschreibungen z.T. als Pseudoilmenit bezeichnet), Pseudorutil ($\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$), Fe-abgereicherten, hydratisiertem Pseudorutil ($\text{Fe}_6\text{Ti}_{15}\text{O}_{18}(\text{OH})_{12}$ bis $\text{Fe}_3\text{Ti}_{15}\text{O}_{24}(\text{OH})_6$) als TiO_2 -Protophasen zu Leukoxenphasen, die letztlich Aggregate aus richtungslos verwachsenen Anataskriställchen bilden (Rutilbildungen sind in der Regel orientiert verwachsen – RAMDOHR (1960)). Zu diesen Reaktionsprodukten scheinen auch Hydroxyl-Pseudorutil ($\text{FeTi}_6\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$?) und der ähnliche Kleberit ($\text{Fe}^{3+}\text{Ti}_6\text{O}_{11}(\text{OH})_5$) zu gehören (www.mindat.org 2021, GREY et al. 2013). Die Beziehungen Ilmenit-Pseudorutil- TiO_2 sind u. a. von TEUFER & TEMPLE (1966), TEMPLE (1966), WORT & JONES (1980), GREY et al. (1994) untersucht worden. Hierbei scheint der Anteil von Fe^{3+} im Fe-abgereicherten Ilmenit, vermutlich zur

Gewährleistung des Ladungsausgleichs, während des Alterationsverlaufs bis zum Pseudorutil zuzunehmen (WAERENBORGH et al. 2002). Nach RAMDOHR (1960) handelt es sich dabei nicht um oberflächennahe Verwitterungsbildungen, sondern um Ergebnisse metamorpher oder metasomatischer bis hydrothormaler Überprägung. ANAND et al. (1984) führen diese Umwandlungen auch auf Vorgänge während der lateritischen Verwitterung zurück, auch HUGO & CORNELL (1991) sehen holozäne Verwitterungseinflüsse, neben endogenen Erscheinungen. Bereits COIL (1933) stellte die variierende Zusammensetzung des Leukoxens fest und nahm an, dass es sich um amorphes, wasserhaltiges TiO_2 handelt.

Diese Ilmenit- TiO_2 -Alterationsreihe scheint in einer Reihe von Schliffpräparaten nahezu vollständig vertreten zu sein. Gewöhnlicher Ilmenit ohne nennenswerte Alteration zeichnet sich durch

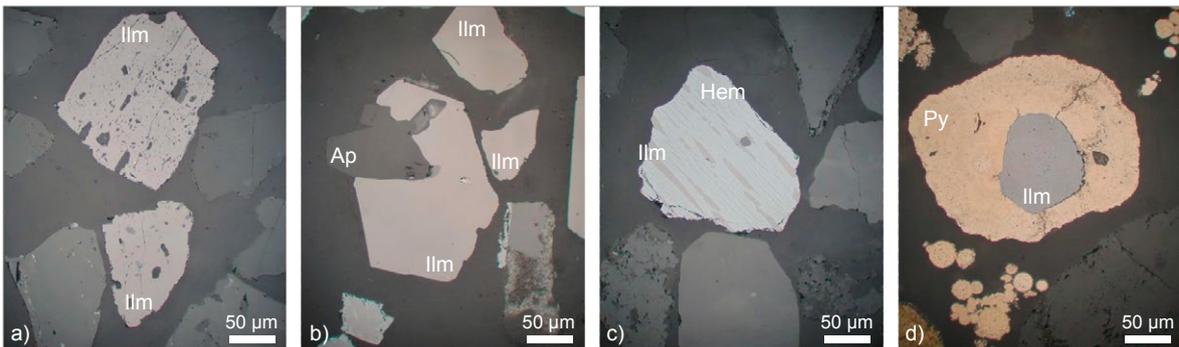


Abb. 62: Verschiedene Erscheinungsformen und Verwachsungen des Ilmenits; a) poikilitische Ilmenitpartikel (06_HF-A) im Auflicht, b) Verwachsung von Ilmenit mit Apatit (43A_HF-A), c) Entmischungen von Ilmenit in Hämatit (06_HF-A), d) Ilmenit als Kern in framboidalem Pyrit (24E_HF-A)

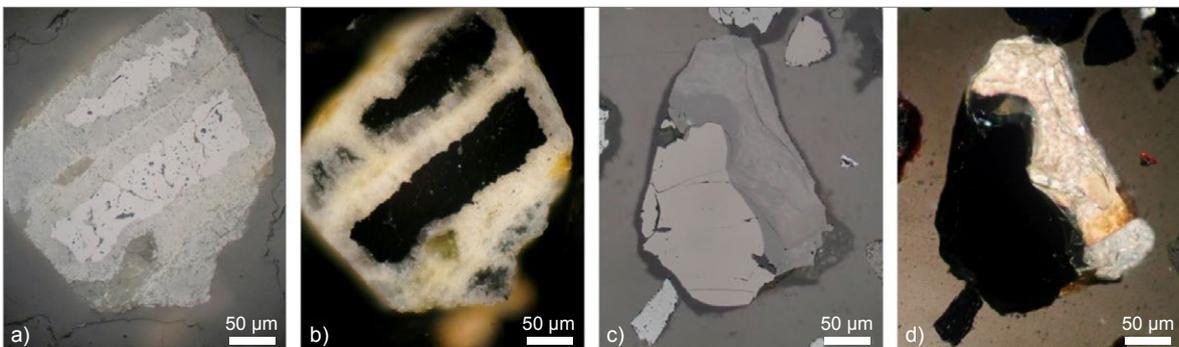


Abb. 63: Randliche Umwandlungen von Ilmenit in Titanit; a) Auflicht (65_HF-A), b) dito Auflicht (Nic-A), c) Randliche Umwandlung von Ilmenit in Titanit und Ti-Oxidphasen, Auflicht (43A_HF-A), d) dito im Auflicht (Nic-A)

lichtgraubraune bis braungraue Reflexionsfarben mit orangerosa Stich aus und ist häufig bereits an deutlicher Bireflexion, insbesondere bei Verzwilligung, sowie auffälligen braun-grauen Anisotropiefarben zu erkennen. Diese Aggregate zeigen selten äußere Umwandlungserscheinungen.

Häufiger kommen in vielen Proben Ilmenite mit weitgehend fehlenden Anisotropieeffekten im polarisierten Licht und deutlich leuchtenderen Graubrauntönen bis Ockerbrauntönen vor, meist mit rosa Stich, und moderater Reflektanz. Dabei sollen der zunehmend gelbliche Farbton und die manchmal etwas verringerte Reflektanz bereits mit Verringerungen des Fe-Gehaltes zusammenhängen (MÜCKE & CHAUDHURI 1991). Diese Ilmenite sind häufig rissig, nicht selten löchrig bis poikilitisch und enthalten teilweise diverse Einschlüsse (z. B. Pyrit, Apatit, Silikate). Die Partikel sind nur vereinzelt idiomorph. Von der Oberfläche und von Rissen ausgehend sind mitunter dunkle Umwandlungsbereiche zu erkennen. Bei Kornvergrößerungen erweisen sich diese Umwandlungen entweder als polykristalline, helle TiO₂-Bildungen (wahrscheinlich überwiegend Anatas) oder als polykristalline gelblich weiße Titanitkrusten, deren Phasengrenze zum Ilmenit oft myrmekitisch ausgebildet ist.

Einzelne Ilmenite sind auf charakteristische Weise mit rot-braunem, derbem Rutil verwachsen. Zum Teil stellen sich diese Bildungen als Ilmenite mit Rutilkern dar. Dem Erscheinungsbild nach sind diese Bildungen primär entstanden.

Als Pseudomorphisierungen des Ilmenits erscheinen häufig kryptokristallin-dichte Aggregate bis fleckig-heterogene Massen mit bläulich grauer bis grauer bzw. graublauer Färbung, vereinzelt auftretender Anisotropie, mittlerer Reflektanz und teils fehlenden, teils deutlichen rotbraunen bis gelbbraunen Innenreflexen. Diese Phasen wurden nach ihrer summarischen Elementzusammensetzung (QEMSCAN) mitunter als Fe-Ti-Oxide mit Ilmenitchemismus angesprochen. Nach MÜCKE & CHAUDHURI (1991) handelt es sich dabei um Pseudorutil, dessen Blautönung mit dem Fe-Gehalt abnimmt. Die braunen Innenreflexe sollen demnach für den Fe-abgereicherten und partiell hydratisierten Pseudorutil typisch sein.

Weitere feinkörnige bis dichte, hellgraue bis gelblich grauweiße Partikel mit z. T. kräftigen rötlich gelbbraunen bis gelblich grauen Innenreflexen

und deutlich erhöhter Reflektanz bestehen offenbar aus Leukoxen, oft verwachsen mit Anatas, Quarz, Titanit oder Resten des Eduktmaterials. Diese Phasen weisen in der Regel ein sehr großes Ti-Fe-Verhältnis (> 5–10) auf.

Insbesondere die Alterationsbildungen sind in den meisten Proben deutlich abgerollt. Die fließenden Übergänge bzw. verschiedenen Stadien in einzelnen Partikeln erschweren eine generalisierte Beschreibung der Phasenkatégorie „Ilmenit“. Grundsätzlich scheinen jedoch Gemenge dieser Art in natürlichen Schwermineralanreicherungen üblich zu sein (vgl. z. B. AHMED et al. 2010) und können auch zu Provenienz-Analysen herangezogen werden (z. B. JÄRVELILL et al. 2019).

Rutil und Anatas

Ähnlich den Ilmeniten und ilmenitartigen Phasen zeigen die Titanoxidphasen in einzelnen Proben ein sehr diverses Erscheinungsbild. Dabei wirkt erschwerend, dass sich die häufig nebeneinander vorkommenden polymorphen TiO₂-Phasen Rutil und Anatas mit mikroskopoptischen Methoden häufig nicht eindeutig unterscheiden lassen. Brookit als dritte TiO₂-Modifikation wurde hingegen nicht beobachtet. Zudem ist nicht auszuschließen, dass einige der in den untersuchten Präparaten beobachteten TiO₂-Aggregate Produkte von Anatas-Rutil-Phasenumwandlungen sind, wie von SHANNON & PASK (1964) oder HANAOR & SORRELL (2011) beschrieben. Eine sichere Differenzierung ist nur unter Zuhilfenahme weiterer Methoden wie der Raman-Spektroskopie möglich (TRIEBOLD et al. 2011).

Primäre Rutil (z. B. Abb. 64, Abb. 65) entstammen offenbar zu einem großen Teil mittel- bis hochmetamorphen Bildungsbereichen (TRIEBOLD 2011), u. a. durch den Zerfall von Ilmenit (LUVIZOTTO et al. 2009), und darüber hinaus basischen bis intermediären Magmatiten sowie hoch spezialisierten Graniten und deren Abkömmlingen und hydrothermalen Bildungen (ZACK & KOIJMAN 2017). In Sedimentgesteinen können während der Diagenese authigener Rutil, Anatas oder Brookit entstehen (MEINHOLD 2010). Geochemisch stellen Cr und Nb, neben Fe und Zr, häufig in Rutilen auftretende Spurenelemente dar, daneben können v. a. auch Ta, Mg, Al, Sb, W, Sn, V, Cu, Ni, U, Pb, Th enthalten sein (MEINHOLD 2010, ZACK & KOIJMAN 2017). Das jeweilige Spurenelementinventar

ist dabei abhängig von der Rutilgenese und beeinflusst auch die Färbung (RABBIA & HERNÁNDEZ 2012).

Die Färbungen natürlicher Rutilite variieren von fast farblos über gelbliche, bräunliche, rötliche Tönungen bis zu tief rötlich gelb, bräunlich gelb, gelbbrot, braunorange, rotbraun oder schwarzbraun. Eine stark pleochroitische Gelbfärbung soll mit $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ -Ladungstransferübergängen bei Fe-Einbau zusammenhängen, während die mit Cr- und V-Einbau verbundenen innerzentrischen Übergänge in Cr^{2+} -Zentren und V^{4+} sowie $\text{O}^{2-}/\text{Cr}^{4+}$ -Liganden-Ladungsübertragungsübergänge die charakteristische orangefarbene bis rote Farbtöne bedingen sollen (LUCASSEN et al. 2013). Dagegen führt eine starke reduktive Behandlung des Materials zu Blaufärbungen, verursacht durch $\text{Ti}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ -Ladungstransferübergänge, die durch Nb-Einbau verstärkt werden (LUCASSEN et al. 2013). Im Unterschied dazu ist Anatas in der Regel graublau oder gelb gefärbt. Diese Färbungen werden mit verschiedenen Ti^{3+} -gekoppelten Elektronendefektzentren in Verbindungen

gebracht, die durch Temperung unter Wasserstoff- bzw. Sauerstoffatmosphäre ineinander umgewandelt oder ausgelöscht werden können (SEKIYA et al. 2004).

Die Färbungen der betrachteten Rutilite und Anatas sind selten homogen, sondern meist wolkig oder fleckig verteilt, was den bekannten Inhomogenitäten der Elementverteilung entspricht (vgl. RABBIA & HERNÁNDEZ 2012). Dabei umfasst die Bandbreite in den untersuchten Schliifproben Färbungen wie (rosa)gelblich, rötlich gelb, orangegelb-braungelb, gelbbrot-gelbbrotbraun-rotbraun, orangebraun-dunkelbraun, aber auch grau bis rauchbraun. Diese Färbungen sind lichtbrechungsbedingt eher im Dunkelfeld oder im polarisierten Licht im Auflichtmodus als im Durchlicht sichtbar.

In den Schliifpräparaten treten die TiO_2 -Phasen gegenüber anderen nichtmetallischen Mineralphasen durch ihre auffallend erhöhte Reflektanz hervor. Die Partikel sind im Auflicht weißgrau,

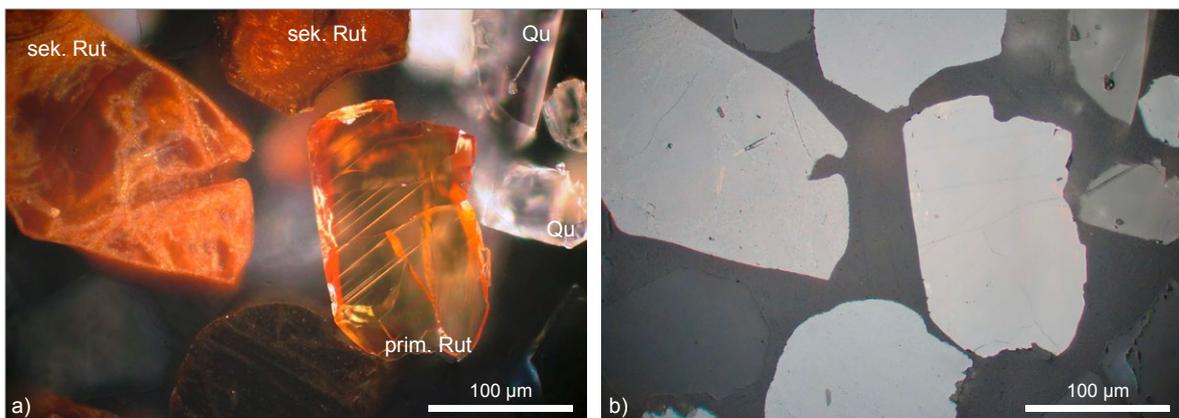


Abb. 64: Typische Erscheinungen von primärem und sekundärem (pseudomorphem) Rutil im Dünnschliff, a) im Auflicht (12_Nic-A), b) dito, im Auflicht kaum differenzierbar (HF-A)



Abb. 65: Typisches Erscheinungsbild von Rutil mit unterschiedlichen mikroskopischen Verfahren, a) Auflicht (41I_Nic-A), b) dito im Durchlicht (HF-D), c) dito im Auflicht (HF-A)

wobei Rutil häufig einen cremigen oder einen leicht bläulichen Farbstich zeigt, während Anatas gegenüber Rutil immer etwas dunkler und bläulicher erscheint. Rutil zeichnet sich zudem durch eine deutliche Bireflektnanz aus, die vor allem bei polysynthetisch verzwilligten Aggregaten auffällt. Dabei treten sowohl dünne Zwillingslamellen als auch Zwillingsparkettierungen in Erscheinung. Die farblos-grauen Anisotropieeffekte werden in der Regel durch die meist intensiven Eigenfärbungen überdeckt.

Noch verschiedenartiger als die Farbvarietäten sind in den Proben die Ausbildungsformen vertreten. Dabei sind teils kantige bis angerundete, manchmal rissige Kristallfragmente, seltener idiomorphe Kristalle, teils gerundete derbe Massen mit bis poikilitischem Lochmuster, z.T. angerundete bis gerundete, richtungslos bis orientiert verwachsene polykristalline Massen zu beobachten,

die überwiegend unterschiedliche Entstehungsgeschichten zu haben scheinen. Neben fein- bis „zucker“-körnigen Verdrängungsgefügen kommen vereinzelt trigonal-gitterförmige orientierte bis spindelige Sagenite vor. Sagenitische Verzwilligungen können sowohl beim Zerfall Ti-reicher Biotite (PICHLER & SCHMITT-RIEGRAF 1987) als auch, z.T. verwachsen mit Hämatit, als Pseudomorphose nach Ilmenit (u. a. RAMDOHR 1960) entstehen.

Die derben Rutilmassen enthalten regelmäßig verschiedenartige Einschlüsse vor allem fester Phasen, die z.T. orientiert eingewachsen sind. Zudem treten nicht selten Verwachsungen mit Ilmenit in Erscheinung. Regelmäßig sind dabei Aggregate vertreten, die aus einem dunkel gefärbten, rotbraunen massigen, rundlich xenomorphen Rutilkern und einer gleichförmigen Ilmenithülle bestehen. Diese Erscheinungen werden als koronare

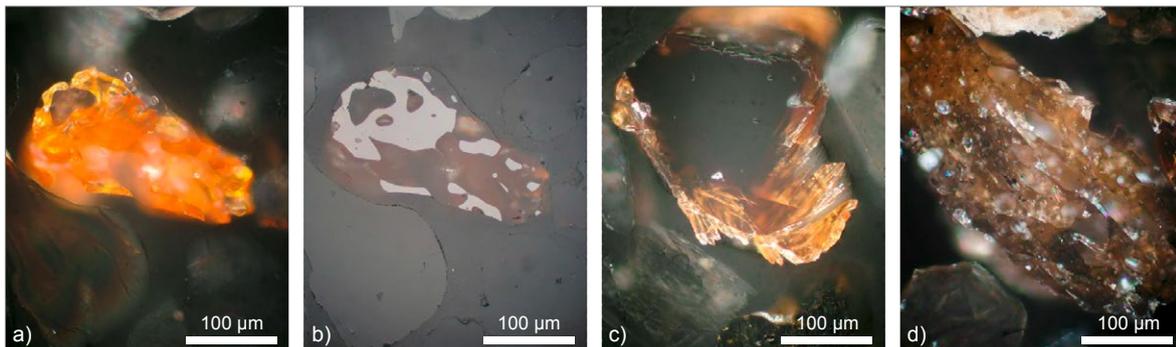


Abb. 66: Verschiedene Bildungen von Rutil, a) im Auflicht (07_Nic-A), b) dito im Auflicht mit typischen Innenreflexen (HF-A), c) nadliges Aggregat im Auflicht (47_Nic-A), d) zelliger Rutil mit braunen Innenreflexen im Auflicht (41_Nic-A)

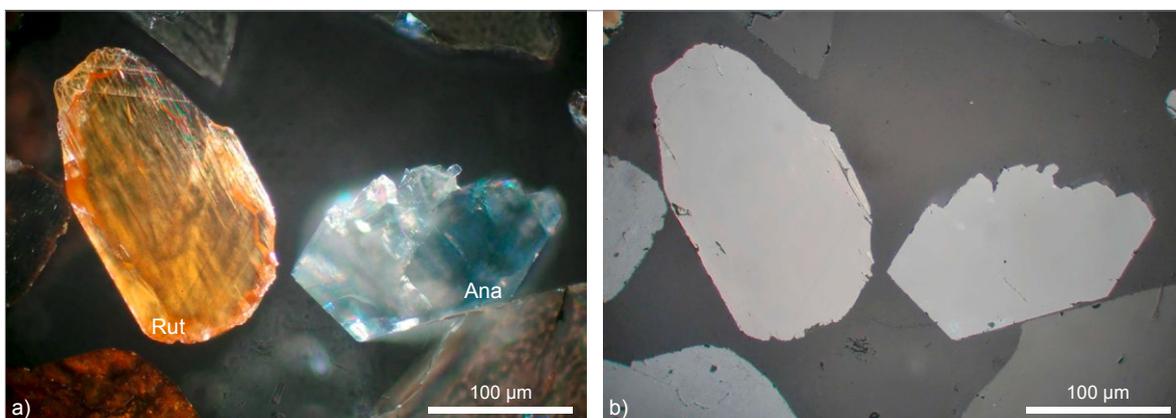


Abb. 67: Rutil und Anatas im a) Auflicht unter gekreuzten Nicols (41), b) dito im Auflicht/Hellfeld (Anatas etwas dunkler und bläulicher)

Texturen bezeichnet, die durch metamorphogene Verdrängung des Rutil durch Ilmenit entstehen sollen (ZACK & KOIJMAN 2017).

Umgekehrt sind vereinzelt auch Rutilhüllen um Ilmenit zu finden, da Rutil ebenso durch metamorphe Vorgänge Ilmenit ersetzen kann, in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Wirtsgesteins (LUVIZOTTO et al. 2009). Gelegentlich geht Rutil in feinkörnige Titanitkrusten über.

Im Unterschied zum Rutil tritt Anatas häufig in idiomorphen Kristallen bzw. Kristallfragmenten auf, die oft vor allem Gas-Flüssigkeits-Einschlüsse führen. Die Anataspartikel sind teils kantig, teils angerundet bis gerundet. TiO_2 -Phasen sind vielfältig sedimentologisch nutzbar. Über eine Auswahl bisheriger Anwendungen berichtet MEINHOLD (2010).

Zirkon

Anhand z. T. erheblich unterschiedlicher Erscheinungsformen scheinen in vielen Präparaten offenbar Zirkone verschiedener Herkunft aufzutreten. Einerseits präsentieren sich Zirkone stark gerundet (Abb. 68) und andererseits als unbeschädigte bis zerbrochene idiomorphe Kristalle, wobei die Kristalle selbst wiederum Unterschiede im Habitus zeigen können (vgl. auch PIRKLE & PODMEYER 1993). Einen Überblick über mögliche Erscheinungsformen von Zirkonen, die auch im vorliegenden Material vorkommen, geben CORFU et al. (2003). Zirkon (ZrSiO_4) ist in der Regel häufig mit Fremdionen (z. B. Hf, Al, U, Th, Na ...) in z. T.

erheblichen Konzentrationen verunreinigt, die wiederum seine physikalischen Eigenschaften beeinflussen können (z. B. HINTON & UPTON 1991, FINCH & HANCHAR 2003).

Polarisationsmikroskopisch tritt Zirkon aufgrund seiner hohen Lichtbrechung ($n > 1,9$) im Durchlicht durch sein auffälliges Relief sowie kräftig bunte Interferenzfarben der 2. und 3. Ordnung und im Auflicht (Abb. 68) durch seine markant leicht erhöhte Reflektanz in Erscheinung (vgl. auch PICHLER & SCHMITT-RIEGRAF 1987, PRACEJUS 2015). Gegenüber anderen Silikaten zeigt Zirkon im Auflicht ein charakteristisches helles Mittelgrau mit leicht gelblichem Stich, dessen Kontrast mit verringerter Lichtbrechung abnimmt, sowie leuchtende weißliche, selten farbige Innenreflexe und wechselnd bunte Interferenzeffekte.

In den untersuchten Schwermineralproben sind die Zirkone in der Regel farblos bis hellfarbig, nur vereinzelt sind insbesondere im Durchlicht olivgrünliche bis graugrünliche, blassrosa oder bräunliche Farbtöne erkennbar, die nach KEMPE et al. (2016) auf verschiedene Farursachen zurückgeführt werden können. Vereinzelt sind auch Zirkone mit verminderter Lichtbrechung sowie schlierigen bis granularen Trübungen und Braunfärbungen zu finden, die zumindest partiell als metamiktisiert angesehen werden können. Die damit verbundenen Gitterschädigungen gelten als strahlungsinduziert (z. B. SALJE et al. 1999, ZHANG et al. 2000) – wobei dafür keine hohen Aktinidgehalte erforderlich sein sollen, insbesondere bei inhomogener, meist zonaler Metamiktisierung (NASDALA 2005) (Abb. 69).

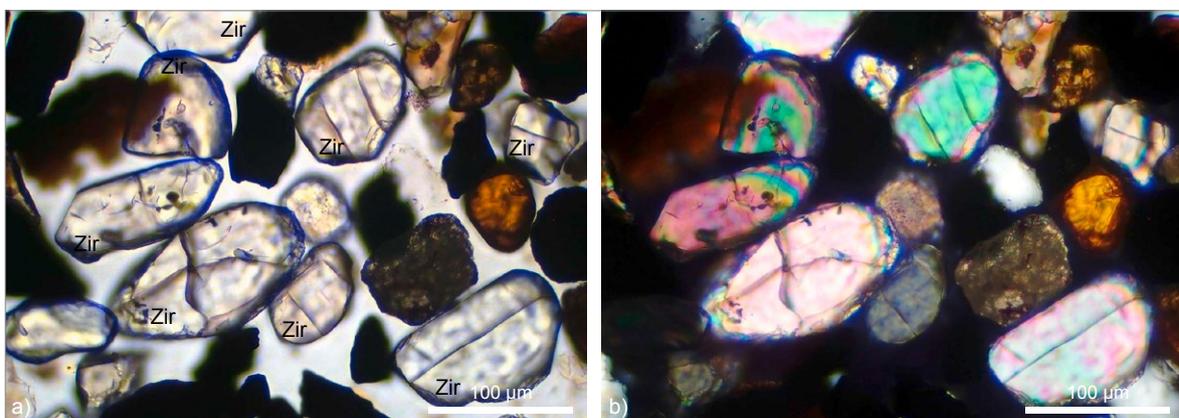


Abb. 68: a) Gruppe von Zirkonen mit starkem Relief im Durchlicht (54_HF-D), b) dito mit typischen Interferenzfarben des Zirkons (Nic-D)

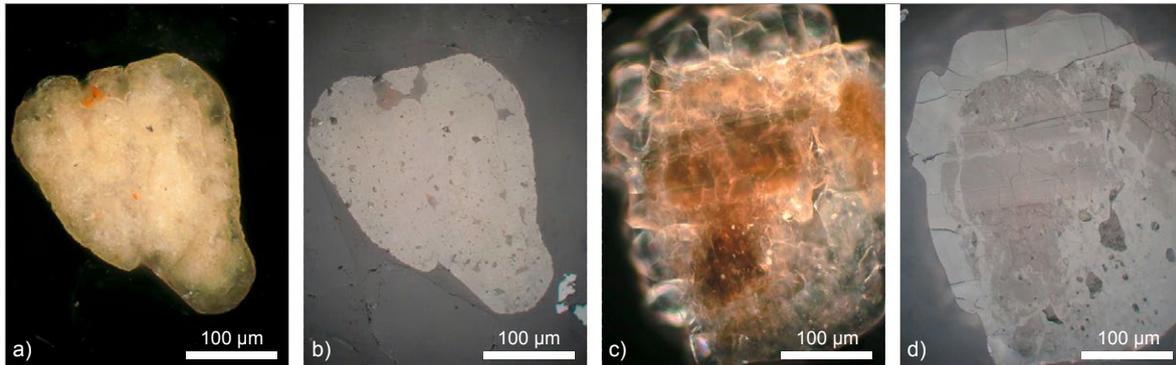


Abb. 69: a) Metamikter Zirkon im Auflicht (47_Nic-A) mit feingranularem Gefüge, b) dito im Auflicht (HF-A) – Kristallstruktur wurde durch die Strahlung zerstört, c) partiell metamikter Zirkon mit braunen, geringer reflektierenden Metamiktisierungs-zonen im Auflicht (41_Nic-A), d) dito im Auflicht (HF-A)

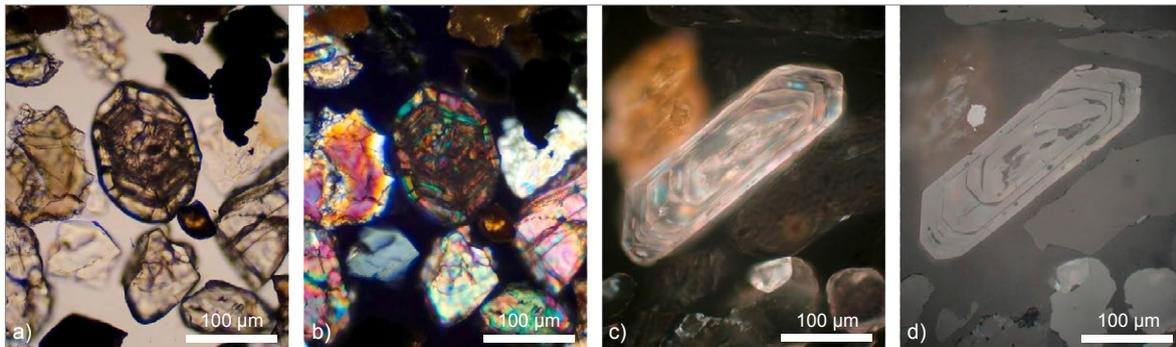


Abb. 70: a) Gedrungener idiomorpher Zirkon mit Zonierung im Durchlicht (38_HF-D), b) dito im Durchlicht (Nic-D), c) idiomorpher farbloser langgestreckter Zirkon mit Wachstumszonierung im Auflicht (38_Nic-A), d) dito im Auflicht (HF-A)

Neben unterschiedlichen kurz- bis langprismatischen Kristallformen weisen die Zirkone teils einen ausgeprägten Zonarbau, teils eine homogene Kristallmatrix auf. Vereinzelt sind die aufgewachsenen Kristallzonen durch interne Grenzflächen abgegrenzt. Unabhängig davon sind in vielen Kristallen sowohl Gas-Flüssigkeits- als auch Festphasen-Einschlüsse (z. B. Sulfide, Quarz, Apatit, Seltenerdphosphate) enthalten. Durch herausgelöste Phaseneinschlüsse erscheinen manche Zirkone löchrig.

Obwohl Zirkon als sehr stabiles Schwermineral gilt, weist auch dieses Mineral in sedimentären Anreicherungen eine gewisse Verwitterungsempfindlichkeit auf, die seit Langem bekannt ist (CARROLL 1953). Gerade auf die Verwitterung von detritischen Zirkonen wirkt sich der Metamiktisierungsgrad erheblich aus (BALAN et al. 2001), da

die mechanische und chemische Stabilität durch diesen Effekt abnimmt (BEIRAU et al. 2016). Dass sich Zirkon in Verbindung mit Altersbestimmungen vorzüglich für Herkunfts- bzw. Provenienz-Analysen eignet, haben u. a. SCHÄFER & DÖRR (1997), FEDO et al. (2003), MORTON et al. (2005) und AUBRECHT et al. (2017) gezeigt.

Granate

Granate stellen eine große Mineralgruppe innerhalb der Inselsilikate, deren Endglieder untereinander verschiedene, jedoch z. T. begrenzte Mischkristallbeziehungen eingehen (vgl. NOVAK & GIBBS 1971, STRUNZ 1982, PICHLER & SCHMITT-RIEGRAF 1987, GEIGER 2016). Unbegrenzte Mischbarkeit besteht nur zwischen Pyrop, Almandin und Spessartin sowie zwischen Andradit und Grossular,

wobei sich jeweils Gitterparameter, Lichtbrechung und Dichte nahezu linear ändern (vgl. FLEISCHER 1937, TRÖGER 1956, WINCHELL 1958).

Im Auflicht zeigen die grau mit einer Nuance ins Cremige erscheinenden Granatphasen durch ihre erhöhte Lichtbrechung eine gegenüber anderen Silikaten oder Karbonaten leicht höhere, meist charakteristische Reflektanz. Die erhöhte Lichtbrechung bedingt im Durchlicht ein erhöhtes Relief mit Chagrin (Abb. 71). Die meisten Granatphasen verhalten sich optisch isotrop. Sehr selten sind Erscheinungen anomaler Anisotropie zu beobachten, meist als hellere bis graue Schlieren oder Felder bzw. Sektoren in der Partikelfläche.

Diese könnten möglicherweise durch Gitterspannungen infolge von Einschlüssen bedingt sein. Andererseits nennt TRÖGER (1956) Grossular und

Andradit bzw. deren Mischkristalle als oft anomal doppelbrechend, was von TAKÉUCHI & HAGA (1976) mit geringfügigen Gitterverschiebungen, die zu Erniedrigungen der kubischen zur monoklinen Symmetrie führen, begründet wird. Zudem scheint der Einbau von OH-Gruppen zur Ausbildung einer Doppelbrechung zu führen (ALLEN & BUSECK 1988, ANTAO 2015).

Die zumeist klaren Granate erscheinen in den untersuchten Schliffpräparaten im Durchlicht überwiegend farblos bis undefinierbar hellfarbig (Abb. 71). Mitunter gehäuft treten blassrosa bis bräunlich rosa oder rötliche und sehr selten ins gelblich-grünliche spielende Farbtöne auf. Gelbbraune oder dunkelrotbraune Färbungen (Andradit) sind selten. Im Auflicht sind, auch anhand von Innenreflexen im polarisierten Licht oder im Dunkelfeldmodus, diese Färbungen kaum erkenn-

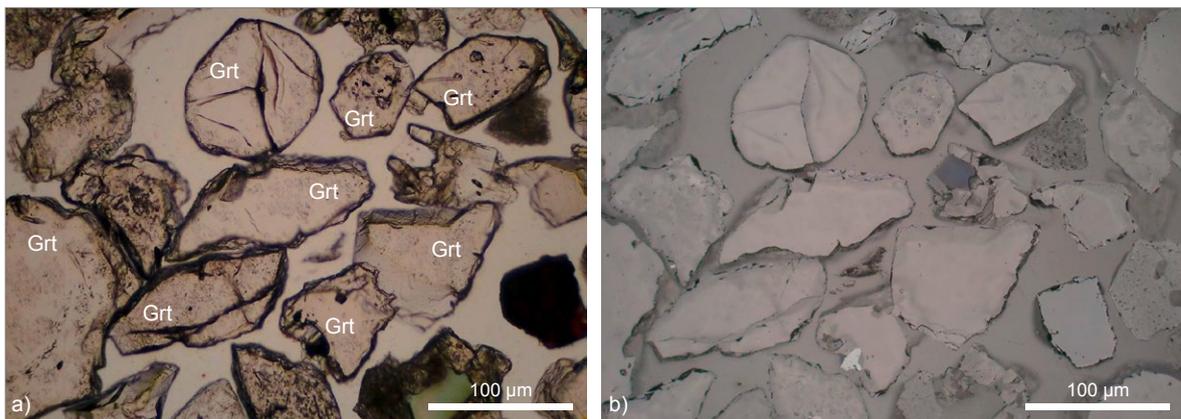


Abb. 71: a) Gruppe von Almandin betontem Granat im Durchlicht (02_HF-D), b) dito Granat mit erhöhter Reflektanz im Auflicht (HF-A)

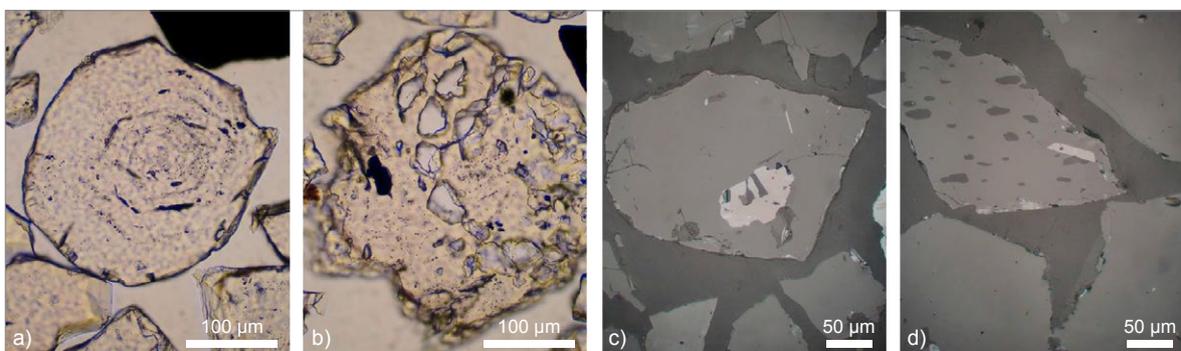


Abb. 72: Granat in verschiedenen Ausbildungen; a) durch Einschlüsse zoniertes idiomorphes Granatpartikel (34_HF-D), b) poikilitisches Granatpartikel (34_HF-D), c) Granatpartikel mit Ilmenit-Einschluss (34_HF-A), d) Granatpartikel mit Einschlüssen von Ilmenit-Rutil-Verwachsungen (67_HF-A)

bar. Die Färbungen beruhen teils auf Elektronenübergängen zwischen Energiezuständen der Übergangsmetallionen Fe^{3+} und Mn^{2+} (MANNING 1967) und teils auf Ladungsaustauschvorgängen z. B. zwischen Ti und Fe (RUNCIMAN & MARSHALL 1975). Eine Zuordnung zu einem bestimmten Mischkristall der Granatgruppe ist anhand des optischen Erscheinungsbildes nicht möglich. Hinzu kommt, dass Granatmischkristalle erhebliche Heterogenitäten (BOFFA BALLARAN et al. 1999), Entmischungen ursprünglicher Hochdruck-Hochtemperaturmischkristalle (CRESSEY 1978) sowie zonare Veränderungen der Zusammensetzung, die sich z. T. in farblichen Unterschieden zeigen, aufweisen können. Während Zonalitäten in Granatpartikeln selten zu beobachten waren, traten häufig sehr unterschiedliche Einschlüsse, teils in Wachstumszonen angereichert, teils statistisch über den Kristall verteilt in Erscheinung. Dabei sind neben Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen sowie poikilitischen Hohlräumen und geraden oder schlauchförmig gewundenen bis verästelten Kanälen verschiedenartige Festphaseneinschlüsse erkennbar (Abb. 72), teils als Einwachsungen, teils als Entmischungen. Neben Quarz, verschiedenen Silikaten, insbesondere Glimmern, kommen leisten- bis tropfenförmiger Ilmenit, helle Ti-Oxid-Tropfen bzw. -Kristalle (anscheinend meist Rutil), Sulfidtropfen (meist Pyrit), Apatit und äußerst selten Fe-Oxide vor. Diese Fremdphasen könnten die Möglichkeit bieten, vom Einschlussinventar der Granate auf die Bildungsgeschichte zu schließen (vgl. z. B. Cox 1969). Die Einzelpartikel können sowohl gut gerundet als auch als idiomorphe Kristalle bzw. scharfkantige Bruchstücke auftreten. Vereinzelt zeigen Kornoberflächen Parkettierung bzw. flachpyramidenförmige Vicinalen („Warzen“ – vgl. MANGE & MAURER (1991)).

In verschiedenen Regionen konnten u. a. SALATA (2013) und SUGGATE & HALL (2014) zeigen, dass die Untersuchung von detritischen Granaten in Sedimenten und Sedimentgesteinen gut für Provenienz-Analysen nutzbar sind. Hierfür hatten KRIPPNER et al. (2014) anhand von Verteilungsdiagrammen der chemischen Granatzusammensetzung unterschiedlicher Wirtsgesteine wichtige Grundlagen geschaffen, die mittels multivariater Methoden schärfere Diskriminierungen erlauben (TOLOSANA-DELGADO et al. 2018). Dem wird die Tatsache zugrunde gelegt, dass die unterschiedlichen granatführenden Gesteine jeweils Granate

mit innerhalb bestimmter Grenzen variierenden Mischkristallzusammensetzungen enthalten.

Kassiterit

Das Auftreten von Kassiterit in Schwermineralassoziationen ist generell an Lieferquellen wie seltenmetallspezialisierte Granitoide sowie mit ihnen assoziierte Metasomatite, Pegmatite und Gangbildungen gebunden (EVANS 1982). Kassiterit (SnO_2) spiegelt häufig sowohl in seiner Ausbildung als auch in seinem Spurencismus seinen Bildungsraum wider. Dabei enthalten Kassiterite regelmäßig chemische Beimengungen wie Fe, Mn, Ti, Nb, Ta, W, selten auch Si, In, Sc, Cr u. a. (u. a. NEIVA 1996, MURAO & FURUNO 1991, PAVLOVA et al. 2015). Diese Fremdionen sollen auch für seine, oft in Zonen variierenden Färbungen verantwortlich sein (vgl. u. a. CHENG 2019) und mitunter auch ein anomales magnetisches Verhalten hervorrufen können (z. B. GRUBB & HANNAFORD 1966, GREAVES 1971).

Die Ausbildung des Kassiterits in den untersuchten Präparaten weicht nur in wenigen Fällen vom üblichen Erscheinungsbild ab. Dabei handelt es sich sowohl um gut gerundete bis angerundete Kristallfragmente, z. T. mit kantigen Bruch- und Kristallflächen (Abb. 73). Selten treten polykristalline Aggregate mit verschränktem bis sperrig-skelettartigem oder feinkörnig-porösem Gefüge auf. Insbesondere kleine Kassiteritkörner sind mitunter mit unterschiedlichen Mineralassoziationen verwachsen. Dabei wurden Quarz-Silikat-, Rutil-Ilmenit-Silikat- und Quarz-Feldspat-Turmalin-Paragenesen sowie Granat beobachtet.

Auflichtmikroskopisch zeigt Kassiterit durch seine geringe Reflektanz ein meist gleichmäßiges dunkleres Grau mit Stich ins Bräunliche, das geringfügig heller als gewöhnliche Gangmineralphasen ist. Die hohe Lichtbrechung des Kassiterits bewirkt dabei ein plastisch-dunkles Hervortreten ausgebrochener Kornränder und Risse und gibt ein typisches Erscheinungsbild. Im Durchlicht erscheint dementsprechend ein mehr oder weniger starkes Relief. Nur gelegentlich sind Kassiteritpartikel auffallend pleochroitisch, vor allem bei intensiver Verzwilligung, sonst sind Pleochroismus und Bireflektaanz kaum wahrnehmbar. Während im Auflicht Anisotropieeffekte in der Regel durch die intensiven meist braunfarbigen Innenreflexe über-

deckt werden, überlagern sich im Durchlicht bei gekreuzten Polaren die oft kräftigen Eigenfärbungen nicht selten mit charakteristisch grünlichen Interferenzfarben der 4. Ordnung.

Die Eigenfärbungen der Kassiterite in den Proben variieren sehr stark, wobei selbst innerhalb einer Probe sehr umfangreiche Variationen auftreten können. Die meist unregelmäßige Farbverteilung zeigt sich von homogen-gleichförmig bis streng zoniert bis diffus schlierig-wolkig, z.T. innerhalb eines Kornes. Die Farben selbst reichen von nahezu farblos über graue, grünlich graue bis grünlich-bräunliche, gelbliche, bräunliche, rötliche, orange und graubraune Töne bis zu kräftigem Braungelb, Braun, Bräunlichrot und Violettbraun (Abb. 74).

Kollomorpher Kassiterit, sog. „Holzzinn“ ist in den Präparaten nur sehr selten zu finden, sein Vorkommen in Flusssedimenten im zentralsächsischen Raum ist jedoch belegt (PETERMANN & SEIFERT 2014). Diese Partikel stellen Aggregate konzentrisch-radial bis parallel angeordneter Fasern dar, die grauweißliche bis bräunlich-gelbliche, z.T.

zonierte Färbungen aufweisen und das Verhalten im polarisierten Licht bestimmen. Dieser Varietät soll eine oberflächennahe Bildungsweise zugrunde liegen (et al. WAGNER 1926, LUFKIN 1977, HOSKING et al. 1988, PETROCHENKOV & CHISTYAKOVA 2011).

Die Kassiteritpartikel führen neben Löchern und Rissen nicht selten verschiedene Einschlüsse, neben blasenförmigen Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen auch tropfenförmige bis idiomorphe Entmischungen von Fremdphasen. Bekannt sind u. a. Einschlüsse von Nb-Ta-Mineralen wie Columbite, Ixiolit sowie Rutil, Ilmenit, Wolframit, Zirkon, Sulfide und Silikate (u.a. NEIVA 1996). In den untersuchten Präparaten sind in den Kassiteriten vor allem Einschlüsse von Ilmenit, Quarz, Apatit und Silikate festgestellt worden. Vereinzelt waren Hohlräume mit Sericit oder Kaolinit gefüllt.

Kassiterit gilt aufgrund seiner Härte und trotz Sprödigkeit als ein transportstabiles Schwermineral. Zur Nutzbarkeit für Provenienz-Analysen sind mineralogische Besonderheiten und Begleitminerale von DILL et al. (2006) untersucht worden.

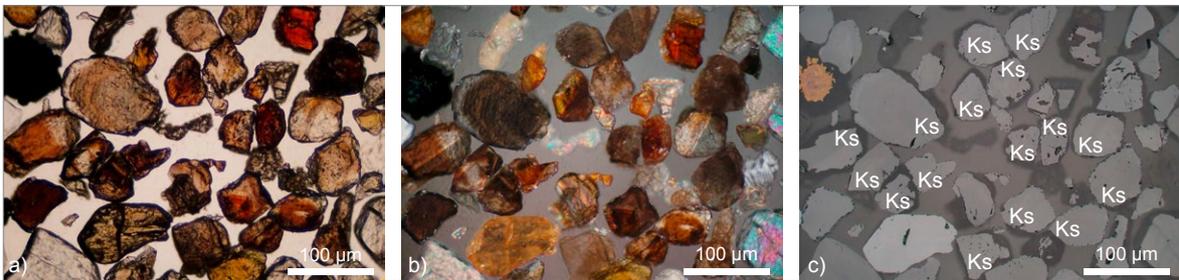


Abb. 73: a) Gruppe von unterschiedlich gefärbten Kassiteriten im Durchlicht (41G_HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito im Hellfeld (HF-A)

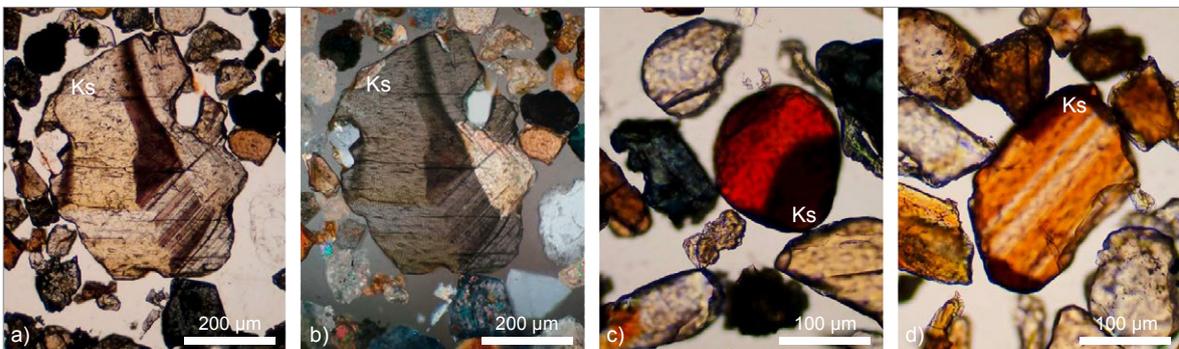


Abb. 74: Kassiterit in verschiedenen Ausbildungen; a) nahezu klares Kassiteritpartikel mit Farbzonierung im Durchlicht (41G_HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) intensiv rot gefärbter Kassiterit (41G_HF-D), d) zonierter Kassiterit (41G_HF-D) mit orangebrauner Färbung

Weitere Schwerminerale

Apatit

Apatit tritt oft nur in geringen Mengen auf. Im Schliffbild ist er in der Regel sehr unauffällig, ist meist farblos mit mittelhoher Lichtbrechung und grauen quarzähnlichen Interferenzfarben (Abb. 75).

Epidot

Epidot als relativ instabiles Schwermineral fällt in den Schliffen meist durch eine schwach pistaziengrüne Färbung mit starkem Relief auf. Typisch sind die auffälligen Interferenzfarben bei gekreuzten Nicols (Abb. 76).

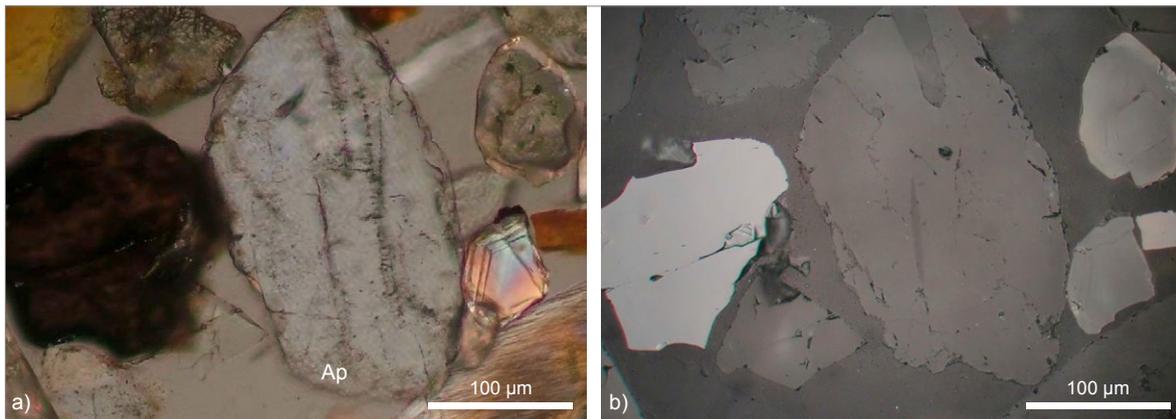


Abb. 75: Erscheinungsbild von Apatit, a) im Auflicht/gekreuzte Nicols (38) neben Zirkon, b) dito im Auflicht/Hellfeld

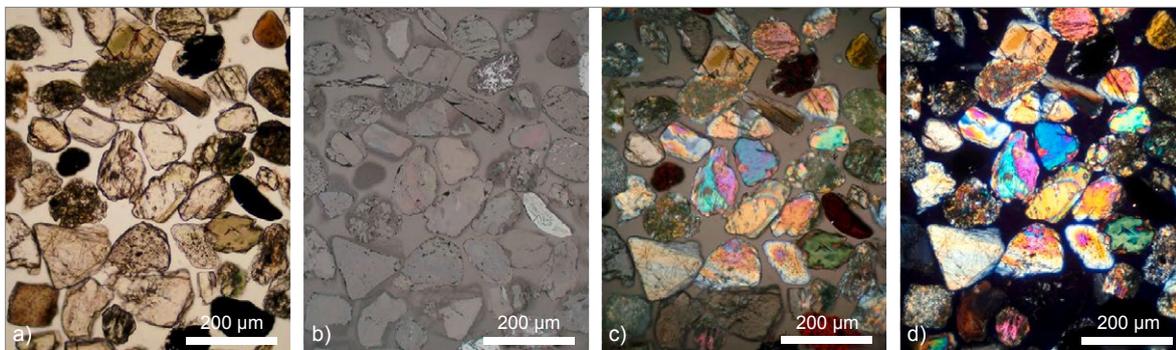


Abb. 76: Gruppe von Epidotkörnern in unterschiedlichen optischen Einstellungen als Vergleich; a) 48C_HF-D, b) dito HF-A, c) dito Nic-A, d) dito Nic-D mit auffälligen Interferenzfarben

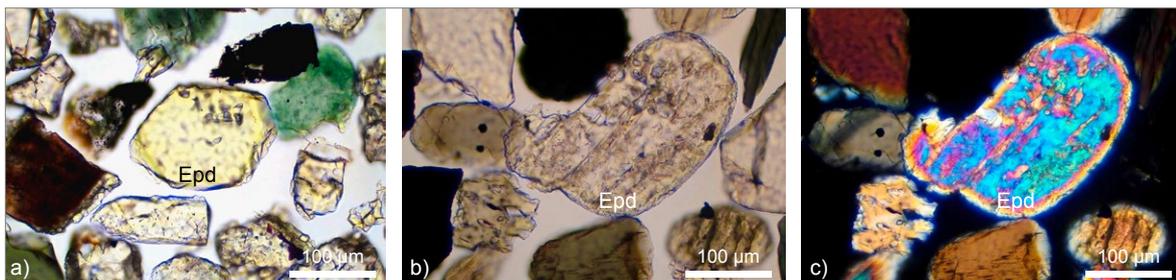


Abb. 77: a) Epidot mit typischer pistaziengrüner Färbung im Durchlicht (48C_HF-D), b) Epidot im Durchlicht (24C_HF-D), c) dito Epidot mit typischen Interferenzfarben im Durchlicht (Nic-D)

Topas

Topas ist in den Schliffen farblos und zeigt häufig eine gute Spaltbarkeit. Im polarisierten Licht erscheinen grauweiße bis strohgelbe Interferenzfarben der 1. Ordnung (Abb. 78 b).

Sillimanit

Sillimanit, als regionalmetamorphes Al-Silikat, fällt durch seine nadlige bis faserige Ausbildung in den Dünnschliffen auf. Die Fasern sind häufig geknickt oder gebogen (Abb. 80). Er zeigt im

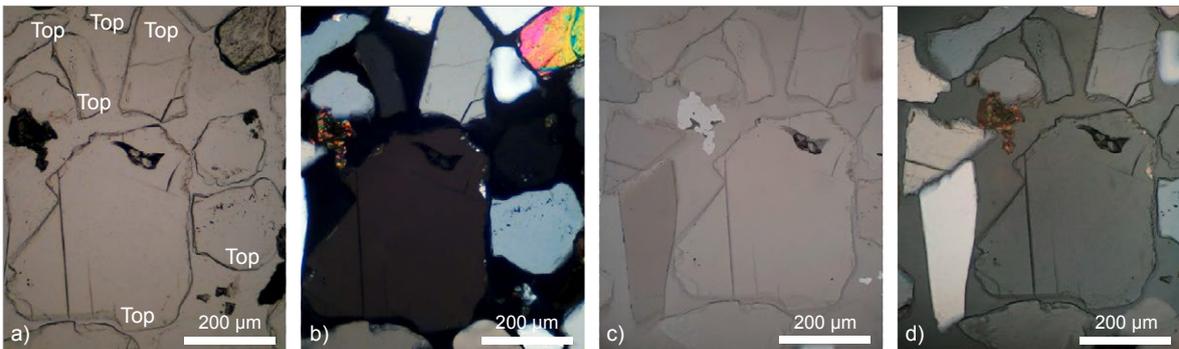


Abb. 78: Topas in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen als Vergleich;
a) 41I_HF-D, b) ditto Nic-D, c) ditto HF-A, d) ditto Nic-A

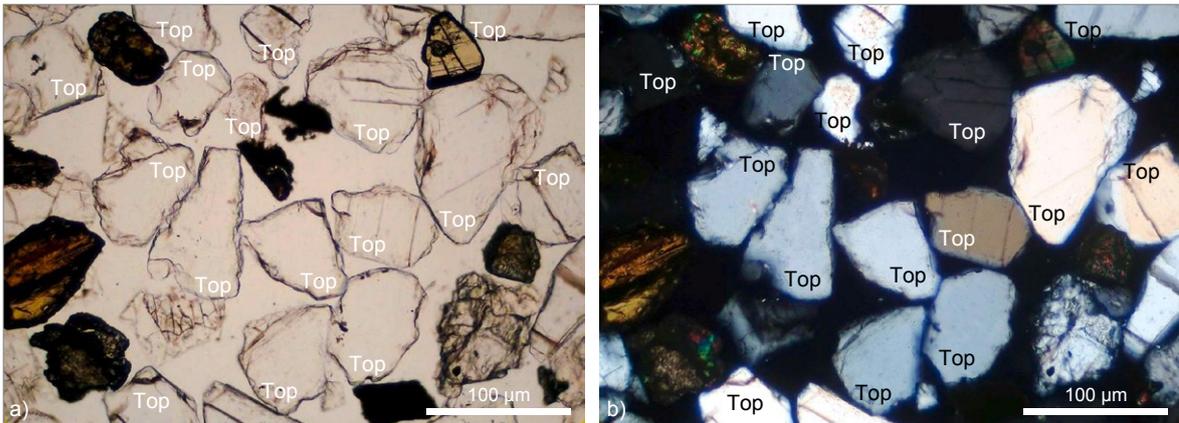


Abb. 79: a) Gruppe klarer Topaspartikel im Durchlicht (60F_HF-D), b) ditto Topaspartikel im Durchlicht (Nic-D)

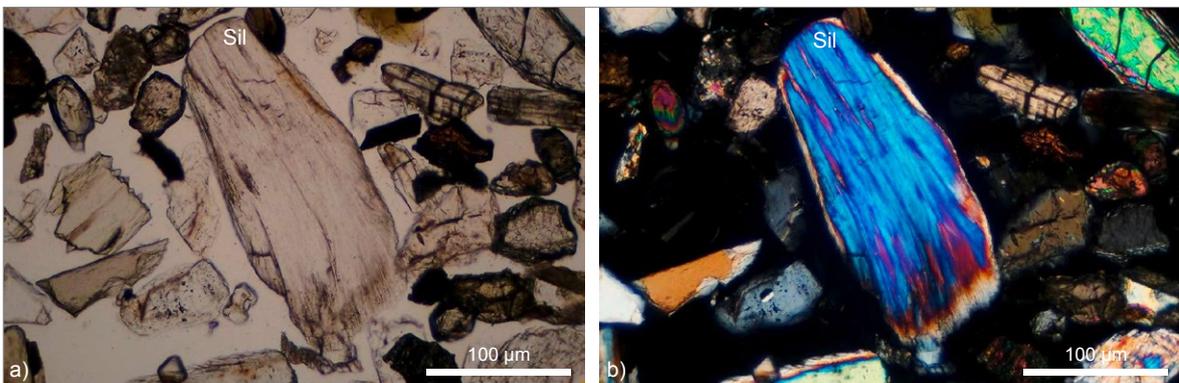


Abb. 80: Sillimanitpartikel (38E) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen,
a) Durchlicht (HF-D), b) ditto im Aufsicht (Nic-A)

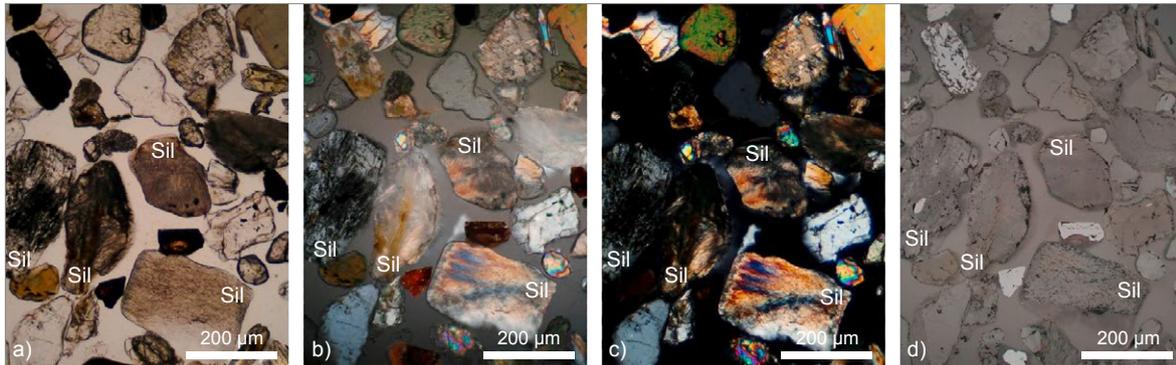


Abb. 81: Sillimanitpartikel (24C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito im Durchlicht (Nic-D), d) dito im Auflicht (HF-A)

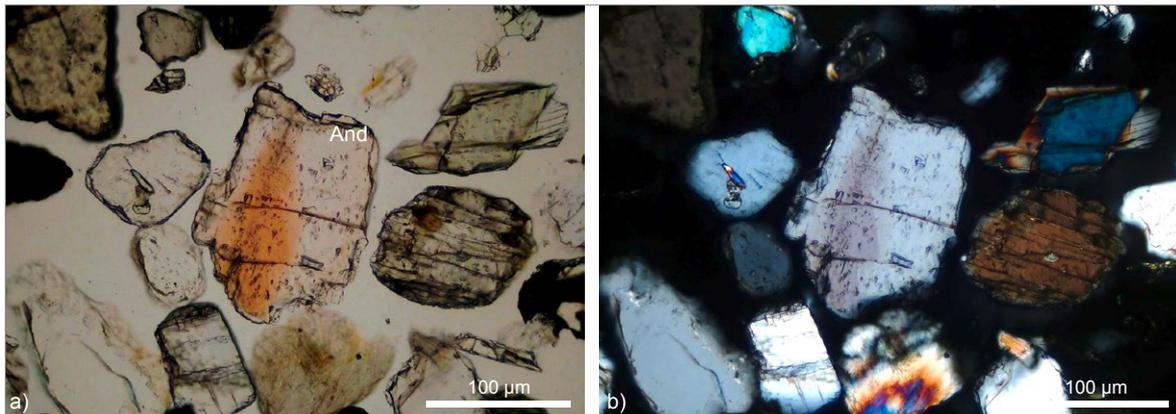


Abb. 82: Andalusitpartikel im a) Durchlicht (38F_HF-D) und b) im Durchlicht (Nic-D) mit Interferenzfarben 1. Ordnung

Durchlicht eine mittelhohe Lichtbrechung und auffällige orangegelbe-violettblaue Interferenzfarben.

Andalusit

Andalusit ist ein häufiges Mineral in Al-reichen kontakt- und regionalmetamorphen Gesteinen, die bei niedrigem Druck und mäßigen Temperaturen gebildet wurden (Knoten-, Frucht-, Glimmerschiefer). Mit seinem mäßig hohen Relief, geringer Doppelbrechung (Abb. 82) und großem Achsenwinkel unterscheidet er sich von Sillimanit (eher faserig). Disthen hat eine schiefe Auslöschung, rechtwinklige Spaltbarkeit und ein höheres Relief.

Disthen

Für das metamorphe Schwermineral Disthen sind die gute, nahezu rechtwinklige Spaltbarkeit in alle drei Richtungen und ein leicht bläulicher Farbton typisch. Er zeigt ein lichtbrechungsbedingtes auffälliges Relief (Abb. 83a), Pleochroismus und charakteristische Interferenzfarben.

Pyroxene (Diopsid, Augit ...)

Die reinen Mg-Endglieder der Ortho- und Klinopyroxene sind farblos. Mit zunehmendem Eisen-gehalt treten grünliche Farbtöne auf. Diopsid ist häufig verzwilligt (Abb. 85b).

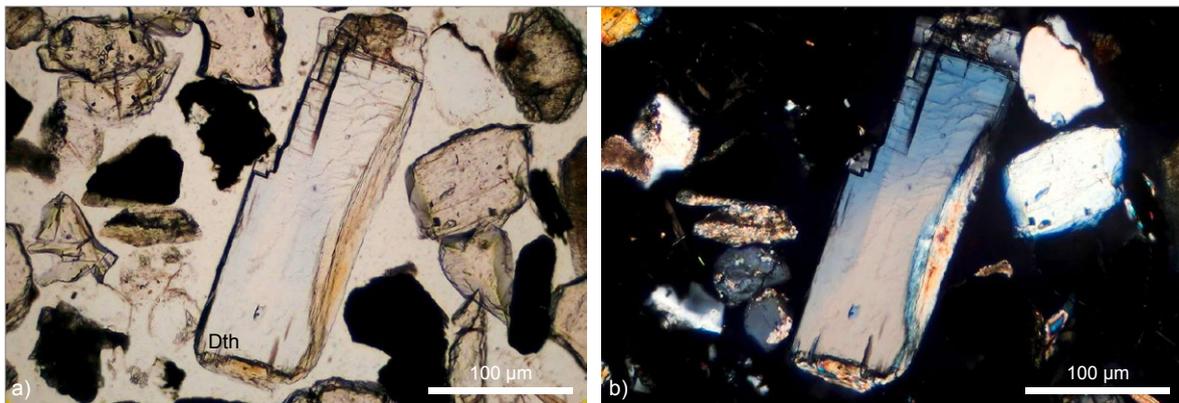


Abb. 83: a) Disthen im Durchlicht (18_HF-D), b) dito im Durchlicht (Nic-D). Sichtbar sind die gute, nahezu rechtwinklige Spaltbarkeit in alle drei Richtungen und anomale graugelbe-graubleue Interferenzfarben

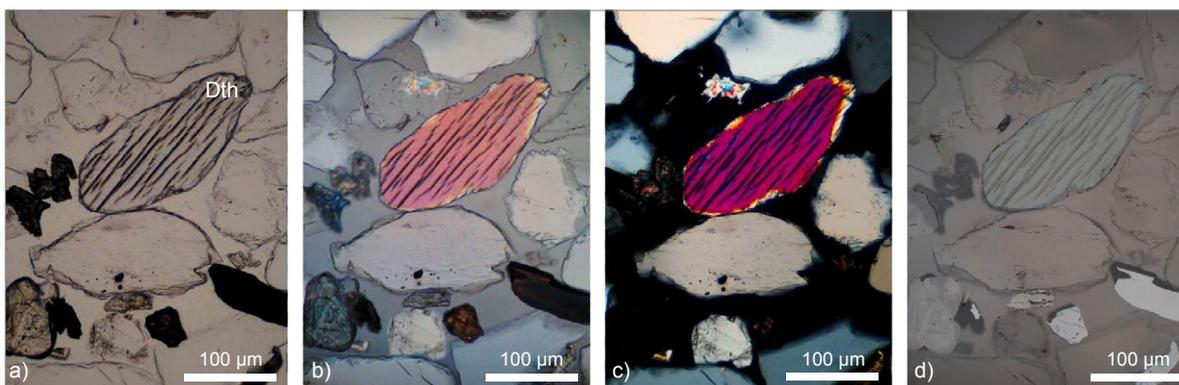


Abb. 84: a) Disthenkorn in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen (41) im a) Durchlicht (HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito in Durchlicht (Nic-D), d) Auflicht (HF-A) – sichtbar die parallelen Spaltrisse längs der C-Achse

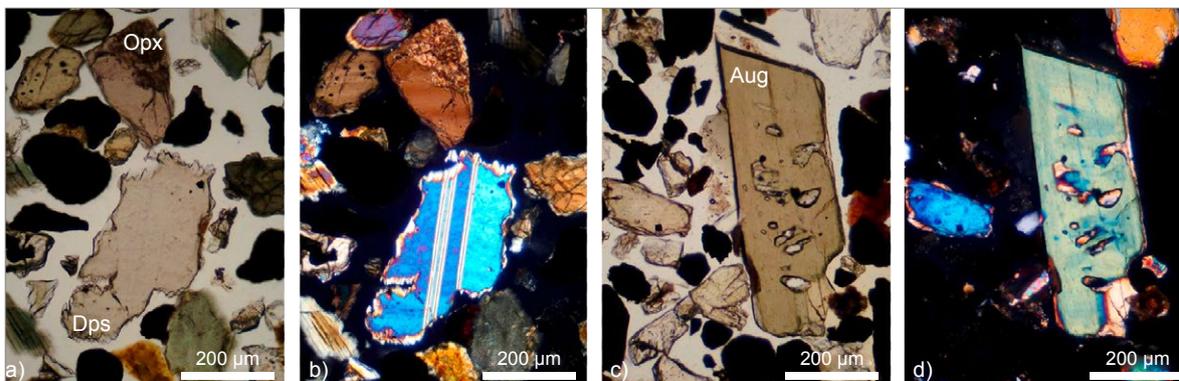


Abb. 85: Pyroxenpartikel unterschiedlicher Zusammensetzungen mit blass- und olivgrünlichen Färbungen, a) 38B im Durchlicht (HF-D), b) dito mit polysynthetischer Verzwilligung im polarisierten Licht, c) Augitkristall mit Einschlüssen (43BPL) im Durchlicht (HF-D), d) dito im Durchlicht (Nic-D) mit fleckig blau-grünlichen Interferenzfarben 2. Ordnung

Staurolith

Staurolith als typisches metamorphes Mineral zeigt in der Regel eine ockergelbe Färbung im Durchlicht. Die strohgelben Interferenzfarben 1. Ordnung überlagern sich mit der Eigenfarbe im polarisierten Licht.

Monazit

Monazit wurde in den Schliffen häufig nachgewiesen. Neben transparenten, hellfarbigen Kristallfragmenten mit deutlicher Spaltbarkeit kommen oft gut gerundete feinkörnige Partikel mit zum Teil kräftigen Farben und geringer Transparenz vor. Im

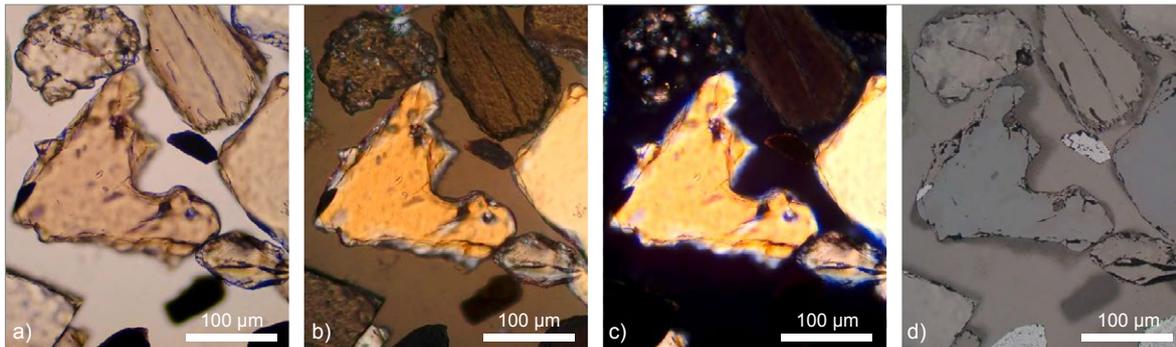


Abb. 86: Staurolithpartikel (24C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito im Auflicht (Nic-A), c) dito im Durchlicht (Nic-D), d) dito im Auflicht (HF-A)



Abb. 87: Monazitpartikel (48C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito Auflicht (Nic-A), c) dito Auflicht (HL-A)

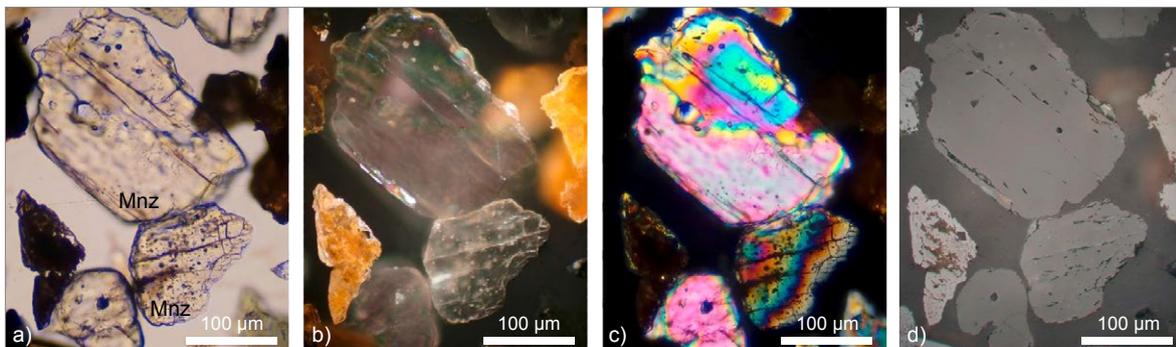


Abb. 88: Monazitpartikel (08C) in unterschiedlichen mikroskopischen Einstellungen, a) Durchlicht (HF-D), b) dito Auflicht (Nic-A), c) dito Durchlicht (Nic-D) mit auffälligen Interferenzfarben, d) dito Auflicht (HL-A)

polarisierten Licht treten häufig grünliche bis rosa-farbene Interferenzfarben auf (Abb. 87).

Turmalin

Turmalin kommt meist als Schörl vor. Im Dünnschliff zeigt er grüne bis bräunliche Farbtöne, oft mit ausgeprägter Zonierung quer zur C-Achse. Typisch sind ein ausgeprägter Pleochroismus und eine mittelhohe Doppelbrechung (Abb. 89). Die Interferenzfarben werden in der Regel durch die Eigenfarbe überlagert.

Pyrit und Markasit

Die Eisensulfid-Phasen Pyrit und Markasit treten häufig als authigene Bildungen framboidal bis

zellig auf, selten als echtes Schwermineral, regelmäßig mit oxidischen Umwandlungsprodukten. Markasit zeigt im Gegensatz zum isotropen Pyrit starke Anisotropieeffekte (hier nicht dargestellt).

6.3 Korngrößen und Kornformen der Wertminerale

6.3.1 Korngrößenverteilungen der Wertminerale

In Abbildung 91 und Abbildung 92 werden die Korngrößenverteilungen der betrachteten Wertminerale über alle untersuchten Proben dargestellt. Aus den Histogrammen ist ableitbar, dass nahezu 100 % aller Wertminerale im Bereich $< 300 \mu\text{m}$ zu finden sind.

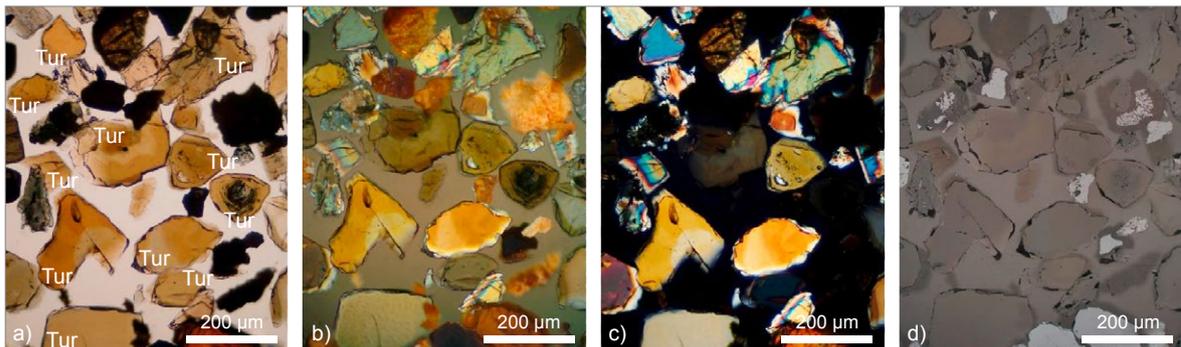


Abb. 89: Gruppe von Turmalinkristallen in unterschiedlichen optischen Einstellungen (08C), a) Durchlicht (HF-D), b) dito Auflicht (Nic-A), c) dito Durchlicht (Nic-D), d) dito Auflicht (HF-A)

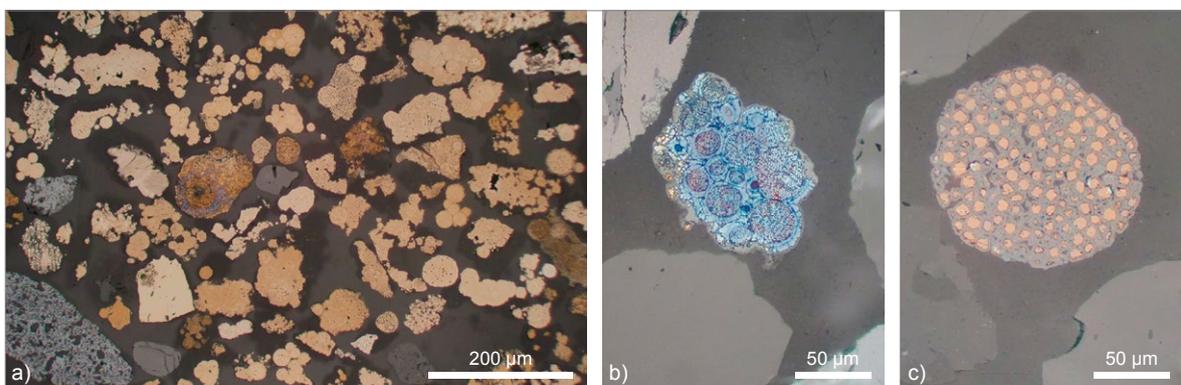


Abb. 90: Verschiedene Pyrite im Auflicht/Hellfeld, a) Gruppe von zum Teil framboidalen Pyrit- und Markasitaggregaten (24E), b) oberflächlich oxidiertes Pyritframboidaggregat mit Anlauf-farben (21), c) Pyritframboide mit partieller Umwandlung in Fe-Oxide (46)

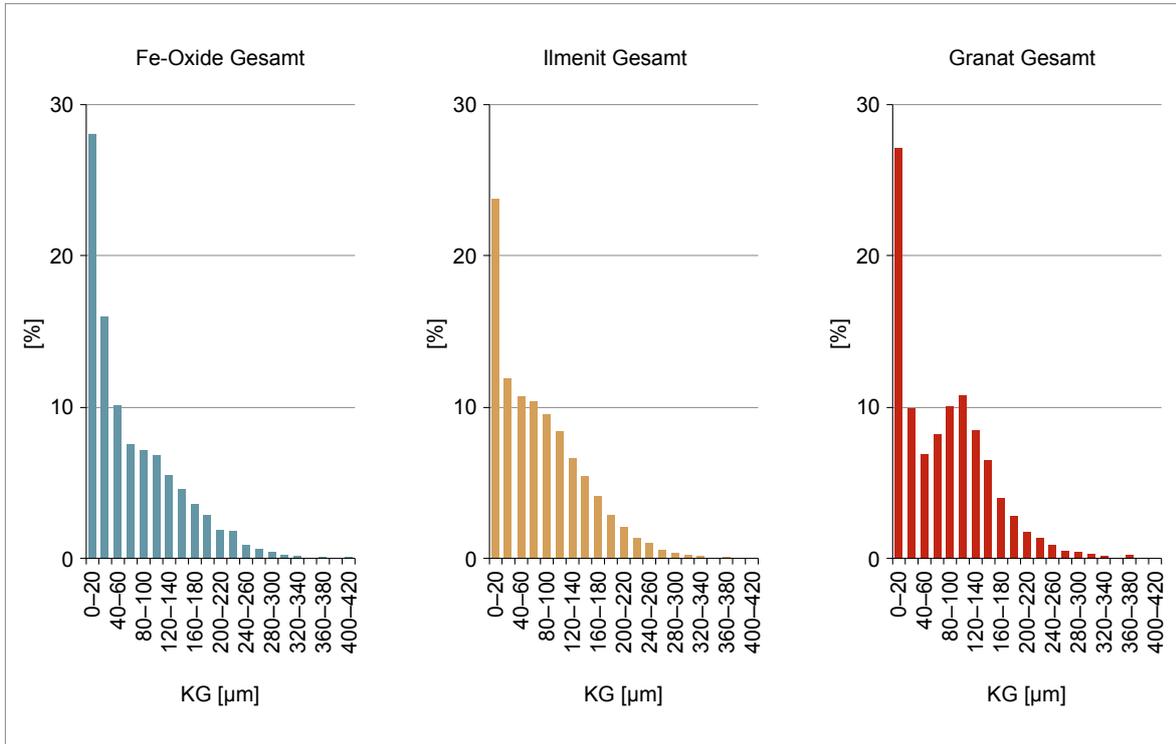


Abb. 91: Darstellung der mittleren Korngrößenverteilung der Fe-Oxide, Ilmenit-bürtigen Ti-Minerale und Granat in allen untersuchten Proben

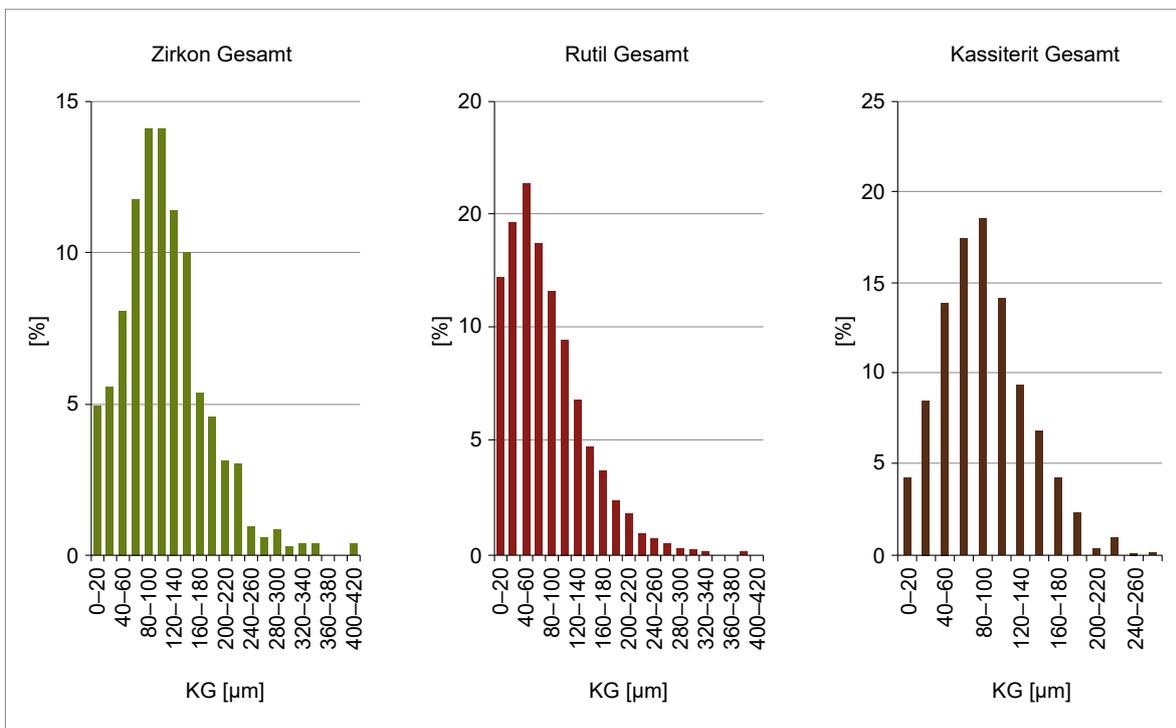


Abb. 92: Darstellung der mittleren Korngrößenverteilung von Zirkon, Rutil und Kassiterit in allen untersuchten Proben

Der größte Teil der Schwerminerale liegt in Form freier Mineralkörner/-Partikel vor. Dies ist sichtbar bei Kassiterit, Zirkon, Monazit, Topas, Turmalin ... z.T. auch Rutil (Abschnitt 6.2). In der Regel sind die Partikel der Schwerminerale normalverteilt (siehe Abb. 92 für Zirkon und Kassiterit).

Bei der Nassherdaufbereitung wird unter anderem auch der Anteil $< 60 \mu\text{m}$ kaum betrachtet und selten angereichert, da sie als Schlämngut in die Abgänge gelangen bzw. zum Teil nicht vorhanden sind. In Abbildung 91 wird jedoch ein sehr großer Teil der Fe-Oxide, Ilmenit, zum Teil auch Granat in der $< 30 \mu\text{m}$ Fraktion dargestellt. Die QEMSCAN erkennt in den Mineralen jeweils ca. 40 % in einer Kornfraktion $< 30 \mu\text{m}$. Das ist auf eine extreme Überinterpretation der $< 30 \mu\text{m}$ Fraktion durch QEMSCAN zurückzuführen. Zu den Korngrößen-/Partikelgrößenbestimmungen per QEMSCAN müssen deshalb Fehlerbetrachtungen einbezogen werden.

Im Falle der Fe-Ti-Phasen Ilmenit-Magnetit-Hämatit-Rutil-Titanit liegen Umwandlungsprodukte vor, die QEMSCAN nicht als eigenständige Partikel identifiziert. QEMSCAN kann zwischen Einzelkörnern und den innig verwachsenen Mineralpartikeln nicht unterscheiden. Dies führt zu Fehlinterpretationen in der automatischen Auswertung der QEMSCAN. Die Partikelangaben mit $< 30 \mu\text{m}$ durch die QEMSCAN sind deshalb mit Vorsicht zu betrachten. In der Regel ist die massenmäßige Verteilung der Partikel mit Verwachsungen zwischen den Fe-Ti-Mineralphasen wesentlich höher als die der reinen Phasen. Der Grund für den unüblich hohen Anteil der Partikel $< 30 \mu\text{m}$ liegt in vielfältigen innigen Verwachsungen im μm -Bereich und der Analysenroutine der QEMSCAN. Jeder sich chemisch vom Nachbarn abgrenzende Bereich wird als Einzelpartikel identifiziert. In Abschnitt 6.2 wurden zahlreiche Mineralfotos dargestellt, die monomineralische Magnetit-, Hämatit-, Ilmenit- und Granatpartikel zeigen, vor allem jedoch auch extrem feine Verwachsungen und Übergänge zwischen den genannten Mineralen.

Diese vielfältigen Übergänge der Fe-Ti-Phasen sind auch die Gründe, warum die Anreicherung von monomineralischen Konzentraten wie Magnetit, Ilmenit und Rutil mit den hier hergestellten Konzentraten nicht möglich ist.

Eine Trennung der paramagnetischen Ilmenitbürtigen Ti-Phasen wie Ilmenorutil, Pseudorutil, Pseudoilmenit, Pseudobrookit, Leukoxen, Titanit von reinem diamagnetischen Rutil wäre möglich gewesen, wenn die maximal mögliche magnetische Feldstärke bei den Aufbereitungsversuchen per Frantz-Magnetscheider angewendet worden wäre. Bei der Herstellung der Fraktionen in PERSCHL (2018) wurde der Schnitt zwischen para- und diamagnetischen Phasen bei 1,0 A festgelegt. Das führte dazu, dass auch schwach paramagnetische Mineralphasen in die „diamagnetischen Fraktionen“ übernommen wurden. Zur Trennung von para- und diamagnetischen Schwermineralen muss am Frantz-Magnetscheider die maximal mögliche Stromstärke (Feldstärke) eingestellt werden. So wurden auch die schwach paramagnetischen Fe-Ti-Phasen mit in die diamagnetischen Fraktionen und weiter in die elektrostatische Trennung übernommen.

Die mittleren lagerstätten-spezifischen Korngrößen der Wertminerale werden in Tabelle 11 dargestellt. Es werden auch alle Proben mit aufgenommen, in welchen Kassiterit nachgewiesen wurde.

Die vier Lagerstätten 08, 38, 41 und 60 wurden mit Fokussierung auf Kassiterit näher betrachtet, da sie im Vorfeld für die Kassiteritgewinnung als hoffig erachtet wurden. Die Korngrößenverteilungen und mittleren Korngrößen zum Kassiterit sind in Abbildung 93 dargestellt.

Im Mittel weist Probe 41 mit $128 \mu\text{m}$ die durchschnittlich größten Kassiteritpartikel auf, gefolgt von 08 und 38 mit ca. $110 \mu\text{m}$.

Die Abtrennung von Kassiterit mit einer durchschnittlichen Korngröße von $85 \mu\text{m}$ (Probe 60) ist schon grenzwertig, da die effektive Arbeit mit dem Nassherd in der Regel eine minimale Korngröße von $60 \mu\text{m}$ voraussetzt. Bei einer gezielten Aufbereitung zum Kassiterit sind diese Korngrößenverteilungen zu beachten.

Aus ökonomischen Gründen und absatzbedingt wird der Feinkornanteil in den Kies- und Sandlagerstätten oft nicht genutzt und in Spülteiche verbracht (Probe 38 $< 2 \text{mm}$). Generell sind die Feinanteile ($< 63 \mu\text{m}$) in den Kies- und Sandlagerstätten eher unerwünscht, da diese aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften in der Baubranche wenig Verwendung finden.

Tab. 11: Lagerstättenspezifische mittlere Korngrößen der Wertminerale (arithmetisches Mittel)

Lgst.	Gesamt Partikel	Fe-Oxide	Ilmenit	Granat	Rutil	Zirkon	Kassiterit
[µm]							
01	212	150	154	166	134	187	–
02	214	43	98	156	93	135	–
03KL	143	87	109	110	90	129	97
04	162	134	122	109	104	134	102
05	241	196	152	152	84	233	58
06	170	67	81	134	92	114	114
07	181	99	124	76	95	144	140
08/12	133	45	108	30	98	111	108
16	177	105	107	92	104	142	48
17KL	126	31	91	97	88	106	70
18	201	93	82	139	88	153	170
19	181	127	129	74	111	157	108
20KL	157	114	116	124	129	136	144
21	184	119	135	126	107	166	120
22	236	161	171	168	167	241	197
23/24	159	101	73	111	81	123	79
31	190	128	164	148	139	176	99
32	145	79	81	107	96	122	–
33	196	120	170	151	116	192	–
34KL	194	60	110	144	114	144	157
35KL	165	131	112	123	112	137	120
38	197	118	106	126	111	121	110
39	172	108	89	120	62	109	–
40	158	77	79	121	90	124	95
41	185	115	151	130	136	169	128
42	225	147	113	185	111	179	–
43	187	106	77	87	74	91	53
44	191	131	124	120	98	139	99
45	146	70	78	107	85	114	28
46	143	36	82	115	79	85	30
47	190	120	143	133	129	160	–
48	143	89	79	102	81	107	–
49	210	147	145	114	129	199	144
54	118	78	93	83	79	95	87
60	221	73	92	87	59	116	82
62	223	152	159	157	100	172	–
63KL	150	94	114	119	100	114	104
64	186	100	121	102	41	69	–
65	187	144	123	73	78	165	–
66	170	40	141	81	113	128	102
67	204	95	141	141	117	164	91
68KL	158	120	107	111	107	110	117

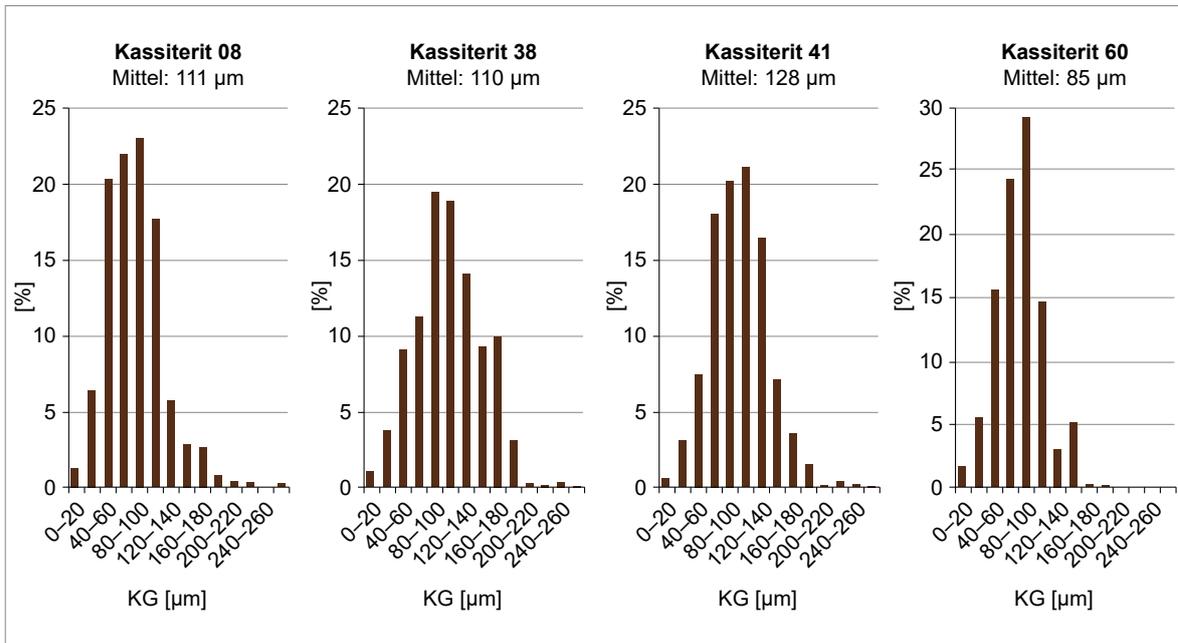


Abb. 93: Darstellung der Korngrößenverteilung von Kassiterit in den Proben der Lagerstätten 08, 38, 41 und 60

Die im Rahmen vorliegender Studie durchgeführten Analysen der spezifischen Korngrößen der Schwerminerale zeigt jedoch, dass gerade die Feinsandfraktion < 200 µm nahezu die komplette Wertmineralassoziation enthält. Bei zukünftiger Gewinnung der betrachteten Schwerminerale muss der Fokus deshalb speziell auf den Korngrößenbereich Feinsand, eventuell Mittelsand gerichtet werden. Diese Erkenntnisse haben natürlich auch einen nennenswerten Einfluss auf die Auslegung der Aufbereitungstechnik. Ist die Wertmineralfraktion, so wie in den vorliegenden Proben, hauptsächlich im Feinsand zu finden, dann kann dieser Anteil bei der Abtrennung der Korngrößenfraktion durch Siebung gezielt ausgeschleust werden. Damit können die Dimensionen der eingesetzten Anreicherungstechnik sowie Investitionsumfang und Betriebskosten verringert werden.

Für die Aufkonzentrierung der Schwerminerale mit Wendelscheider und Nassherd ist es aus aufbereitungstechnischer Sicht zwingend notwendig, ein möglichst enges Kornband einzuhalten (BUCH et al. 2018). In der Regel sollten die kleinste und die größte Korngröße im Verhältnis 1 : 2,5 bis 1 : 3 stehen. Im Wesentlichen ist dies bei den vorliegenden Proben gegeben und durch die Korngrößenanalysen nachgewiesen.

6.3.2 Kornformen – Formfaktoren Kreisförmigkeit und Seitenverhältnisse

Zur Beschreibung der Kornformen wurden die beiden Parameter Kreisförmigkeit und Seitenverhältnisse gewählt. Diese wurden per QEMSCAN aus den Dünnschliffen ermittelt. Die Beschreibung der beiden Faktoren erfolgt in Tabelle 12.

Ein Beispiel für die Formfaktoren gibt LITTLE (2016). Die verschiedenen Minerale werden in Bezug auf Kreisförmigkeit und Seitenverhältnisse in einem Diagramm dargestellt, um so die unterschiedlichen Formen zu klassifizieren (Abb. 94).

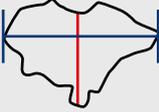
Das Bildraster in Abbildung 94 zeigt, dass stark verlängerte Partikel im Allgemeinen niedrige Rundheitswerte aufweisen und abgerundete Partikel Seitenverhältnisse nahe eins aufweisen. Bei unabhängiger Verwendung unterscheidet das Seitenverhältnis jedoch nicht zwischen gerundeten Partikeln und eckigen gleichwertigen Partikeln, die Kreisförmigkeit unterscheidet nicht zwischen länglichen Partikeln und eckigen gleichwertigen Partikeln. Beide Deskriptoren werden benötigt, um zwischen diesen Partikeln zu unterscheiden.

Die mittleren mineralspezifischen Werte beider Parameter wurden für die untersuchten Proben in Abbildung 95 aufgetragen.

Die mittleren Formfaktoren zeigen, dass alle der betrachteten Wertminerale bis auf Kassiterit und

Rutil bezüglich der Seitenverhältnisse nahezu isometrisch erscheinen, in der Kreisförmigkeit jedoch Differenzen auftreten. Kassiterit weist hierbei die größten Varianzen auf. Zirkon, der sonst oft in nadligen Kristallen vorkommt (siehe Abschnitt 6.2), zeigt hier nach den mittleren Kreisförmig-

Tab. 12: Faktoren zur Beschreibung der Kornformen – Kreisförmigkeit und Seitenverhältnisse

Darstellung	Beschreibung
	Kreisförmigkeit oder Rundheit: Verhältnis von Formfläche zur Kreisfläche mit einem Durchmesser, der dem maximalen Feret-Durchmesser entspricht. Angabe in dimensionsloser Einheit 0 bis 1, wobei 1 einer idealen Kreisfläche entspricht (Grafik nach LITTLE 2016, ULUSOY & YEKELER 2014, entspricht dem Formfaktor „Roundness“ nach ISO 9276-6; ASTM F1877-05).
	Seitenverhältnis: Kurze Achse zur langen Achse, wobei die lange Achse der maximale Abstand zwischen zwei Punkten auf der Partikelkontur und die kurze Achse die maximale Breite ist, die senkrecht zur langen Achse gemessen wird. Angabe in dimensionsloser Einheit 0 bis 1, wobei bei 1 die Achsen gleich lang sind (Grafik nach LITTLE 2016, ASTM F1877-05).

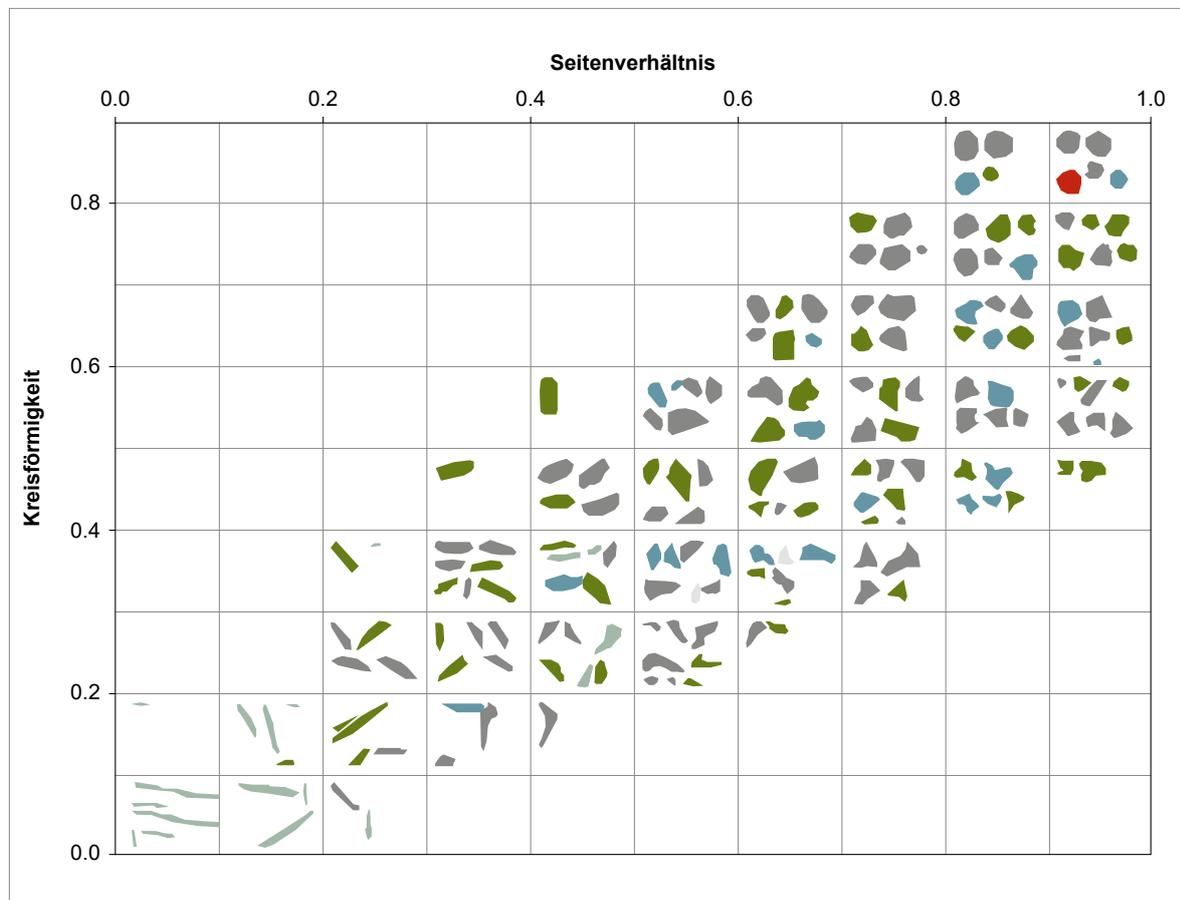


Abb. 94: Beispiel für die Darstellung der mittleren Formfaktoren Kreisförmigkeit und Seitenverhältnis (nach LITTLE 2016)

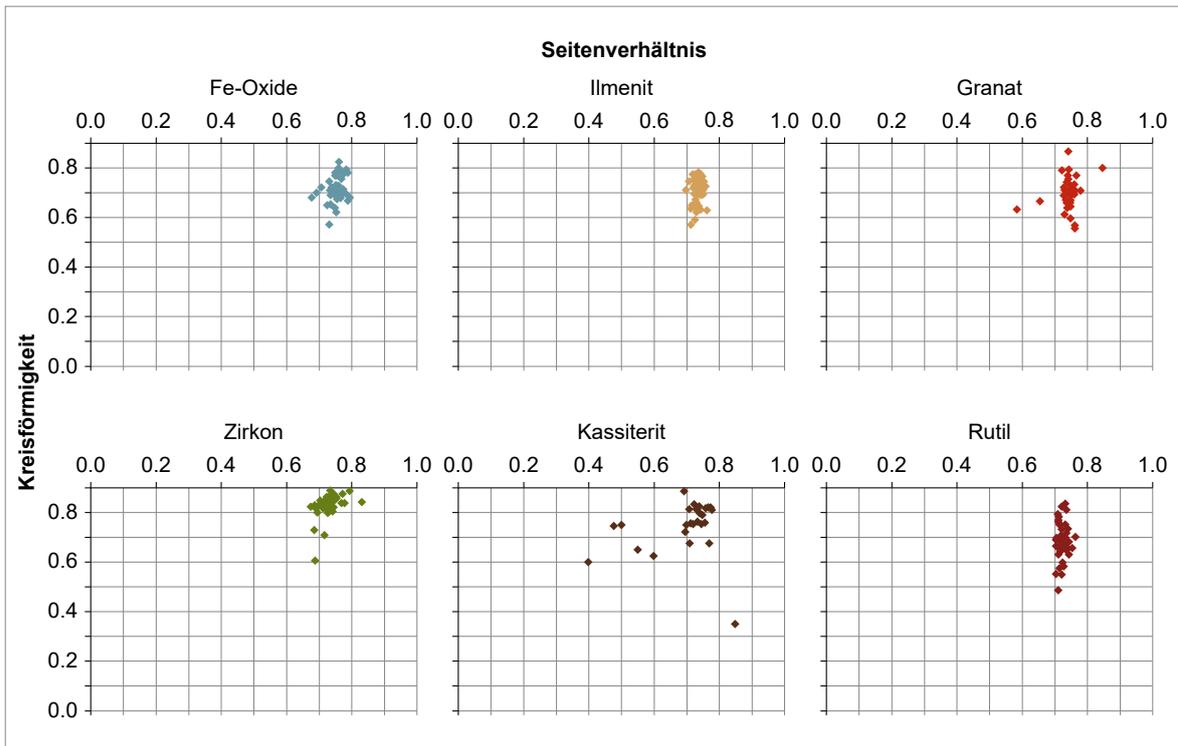


Abb. 95: Darstellung der mittleren Formfaktoren Kreisförmigkeit und Seitenverhältnis für alle untersuchten Proben für die Wertminerale (Skalen dimensionslos)

keiten und Seitenverhältnissen eher isometrisches Verhalten. Rutil tritt eher unregelmäßig in der Rundheit auf, ist in den Seitenverhältnissen jedoch sehr homogen.

Bezieht man die Rundheit und das Seitenverhältnis eher auf eine Auslegung des Rundungsgrades, dann kann man anhand der Mittelwerte eine mäßig bis gute Rundung der Schwermineralkörner feststellen, was auf einen längeren Transport der Körner hinweist.

Bei detaillierter Betrachtung der Formfaktoren in den mineralspezifischen Histogrammen der Einzelproben wird sehr schnell deutlich, dass die Vielfalt an Seitenverhältnissen und Kreisförmigkeit der Minerale viel höher ist, als die mittleren Faktoren darstellen können.

6.4 Ergebnisse der Aufbereitungsversuche an der RWTH

Ziel der Aufbereitungsversuche zur Gewinnung von Wertmineralen ist die Herstellung von mineralischen Produkten, welche in der Industrie als

Rohstoffe eingesetzt werden können. Dazu wurden entsprechende Aufbereitungsmethoden verwendet, die unter Abschnitt 4 beschrieben wurden.

Die Aufbereitung zur Gewinnung von Wertmineralen wurde anhand der Proben aus den Lagerstätten 08, 24, 38, 41, 43, 48, 60 und 64 testweise durchgeführt.

Mittels magnetischer und elektrostatischer Methoden wurden die Schwergutproben in Fraktionen zerlegt mit dem Hintergrund, bezüglich der physikalischen Mineraleigenschaften einzelne Wertminerale bevorzugt anzureichern.

In keinem der Aufbereitungstests konnten bisher annähernd Konzentrationen und Reinheiten der Wertminerale erzeugt werden, die nach ELSNER (2006) die Anforderungen der Industrie erfüllen. Eine pauschalisierte Aufbereitung ist nach dem durchgeführten Anreicherungsschema nur für erste Aussagen zur Qualität und Zusammensetzung der Einzelfraktionen möglich. Die nachfolgenden Ausführungen zeigen, wie die Schwerminerale unter entsprechenden Aufbereitungsbedingungen reagieren. Diese Informationen gilt es bei einer zukünft-

Tab. 13: Abkürzungen zu magnetischen und elektrostatischen Parametern

Abkürzung	Magnetische Eigenschaften	Elektrostatische Eigenschaften
fm	Ferromagnetisch	
pm	Paramagnetisch	
dm	Diamagnetisch	
HL		Halbleiter bei 80–90 °C
NL		Nichtleiter bei 80–90 °C
L		Elektrischer Leiter bei 80–90 °C
2HL		Halbleiter bei Raumtemperatur
2NL		Nichtleiter bei Raumtemperatur
2L		Elektrischer Leiter bei Raumtemperatur

tigen Aufbereitung so zu steuern, dass industriell nutzbare Konzentrate erzeugt werden können.

Die nachfolgenden Abkürzungen in Tabelle 13 in den Tabellen und Grafiken beziehen sich auf die magnetischen und elektrostatischen Eigenschaften der Minerale.

6.4.1 Probe 08

Die Probe 08 wurde in drei magnetische und fünf diamagnetische Fraktionen zerlegt mit dem Hintergrund, eine Mineralanreicherung bezüglich der magnetischen und elektrostatischen Eigenschaften zu erzielen. In Abbildung 96 ist zusätzlich die polyminerale Zusammensetzung als Vergleich zu den aufgetrennten Fraktionen dargestellt.

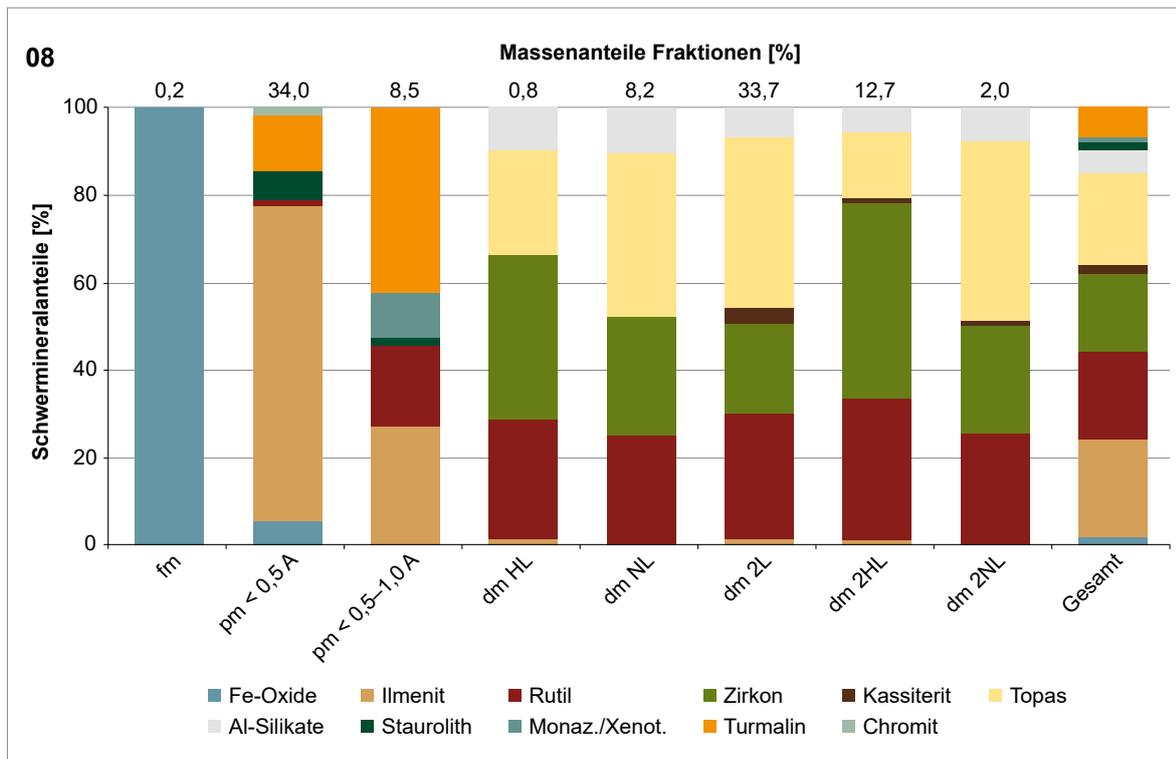


Abb. 96: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 08. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt

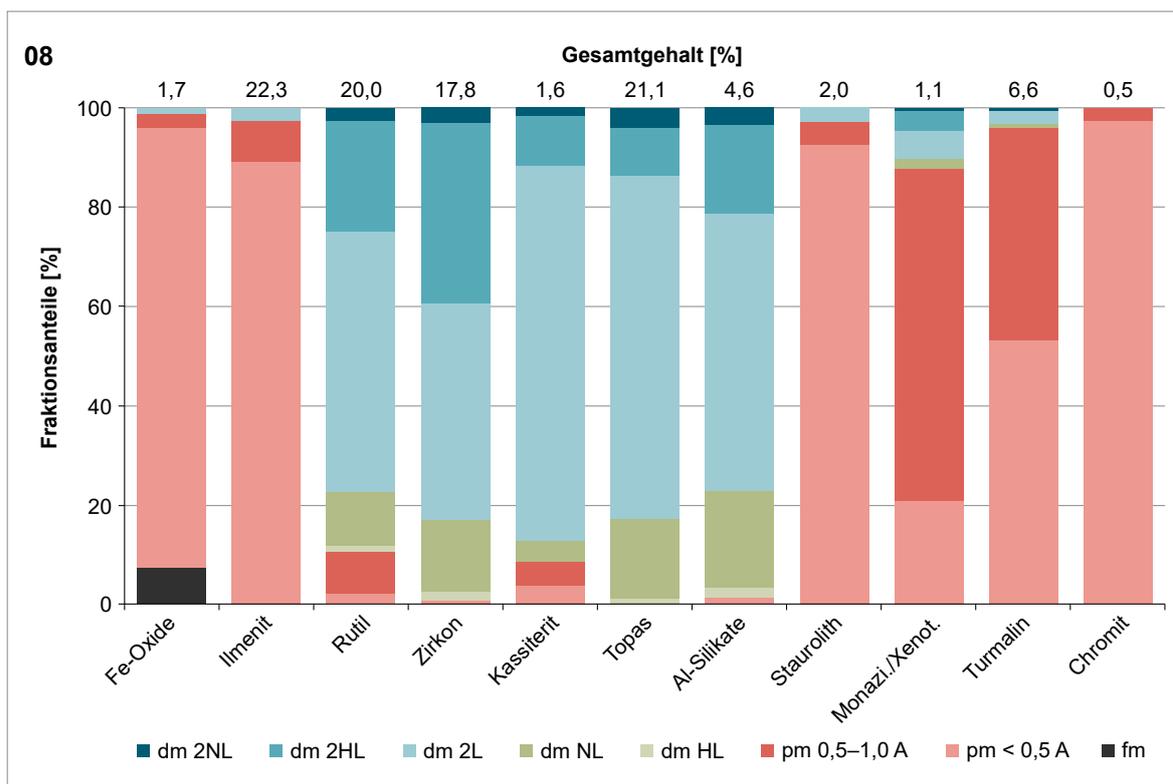


Abb. 97: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 14: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 08
(bezogen auf Abbildung 97) (Angaben in %)

08	fm	pm – paramagnetisch		dm – diamagnetisch					Ges.
		<0,5 A	0,5–1,0 A	HL	NL	2L	2HL	2NL	
Fe-Oxide	100,0	5,4	0,8	–	–	–	–	–	1,7
Ilmenit	–	70,7	25,8	1,1	0,9	1,3	1,2	0,9	22,3
Rutil	–	1,2	18,3	27,0	24,5	28,6	32,2	25,3	20,0
Zirkon	–	0,1	0,8	37,1	26,3	20,1	44,3	23,8	17,8
Kassiterit	–	0,2	1,0	0,8	0,6	3,6	1,3	1,4	1,6
Granat	–	0,5	0,6	–	–	–	–	–	0,2
Topas	–	–	0,1	23,3	36,7	38,4	14,6	40,1	21,1
Al-Silikate	–	0,1	0,4	9,7	10,0	6,9	5,6	7,7	4,9
Staurolith	–	6,6	1,3	–	–	0,2	–	–	2,0
Monaz./Xenot.	–	0,8	10,1	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	1,1
Turmalin	–	12,4	40,5	0,5	0,5	0,6	0,2	0,3	6,6
Chromit	–	1,8	0,2	–	–	–	–	–	0,5
Sonstige SM	–	–	0,1	–	0,1	–	0,1	0,1	0,0
Fraktionsanteil	0,2	33,9	8,5	0,8	8,2	33,7	12,7	2,0	100,0

Die ferromagnetische Fraktion ist mit 0,2 % Massenanteil der Gesamtprobe vernachlässigbar. Ilmenit, Turmalin, Monazit, Staurolith und Chromit werden in den paramagnetischen Fraktionen abgetrennt. Ilmenit kommt nach Abschnitt 6.2 hauptsächlich als kryptokristallines Ti-Fe-Oxidgemenge vor, teilweise verwachsen mit Rutil als Verwitterungsprodukt. Deshalb ist ein Teil des Rutils in der paramagnetischen Fraktion zu finden. In den diamagnetischen Fraktionen sollten die Minerale Zirkon in der NL-, Rutil in der 2NL- und Kassiterit in der 2L-Fraktion konzentriert werden. Sichtbar ist, dass Kassiterit nicht in der HL- und NL-Fraktion, dafür in den 2HL- und 2NL-Fraktionen vorkommt. In der 2L-Fraktion sollte der Kassiterit eigentlich stärker angereichert sein. Tendenzen zur Trennung sind vorhanden. Rutil und Zirkon werden in dieser Probe durch elektrostatische Verfahren nicht aufgetrennt. Überlagert wird die Konzentrierung der Wertminerale durch die starke Anwesenheit von Topas und Al-Silikaten.

Ein Teil des Kassiterits (ca. 10 %) ist in der paramagnetischen Fraktion zu finden. Als klassisches

diamagnetisches Mineral dürfte er eigentlich nicht in den pm-Fraktionen vorzufinden sein. Um die Gefahr von Ausbeuteverlusten zu verringern, müssen im Vorfeld der Gewinnung von Kassiterit unbedingt detailliertere weiterführende Aufbereitungsuntersuchungen durchgeführt werden.

6.4.2 Probe 23/24

Die Probe 24 wurde in fünf magnetische und fünf diamagnetische Fraktionen zerlegt, um die Verteilung und Konzentrierung der Schwerminerale bezüglich der physikalischen Eigenschaften zu testen (Abb. 98). Die ferromagnetische Fraktion wurde nicht näher untersucht und auf 100 % fm-Fraktion bezogen.

Ilmenit und Granat werden hauptsächlich in den starken bis mittelstarken paramagnetischen Fraktionen < 0,5 A konzentriert. Mit zunehmender Feldstärke werden Pyroxene/Amphibole, Turmalin, Epidot/Zoisit, Staurolith, zum Teil auch Fe-Sulfide abgetrennt.

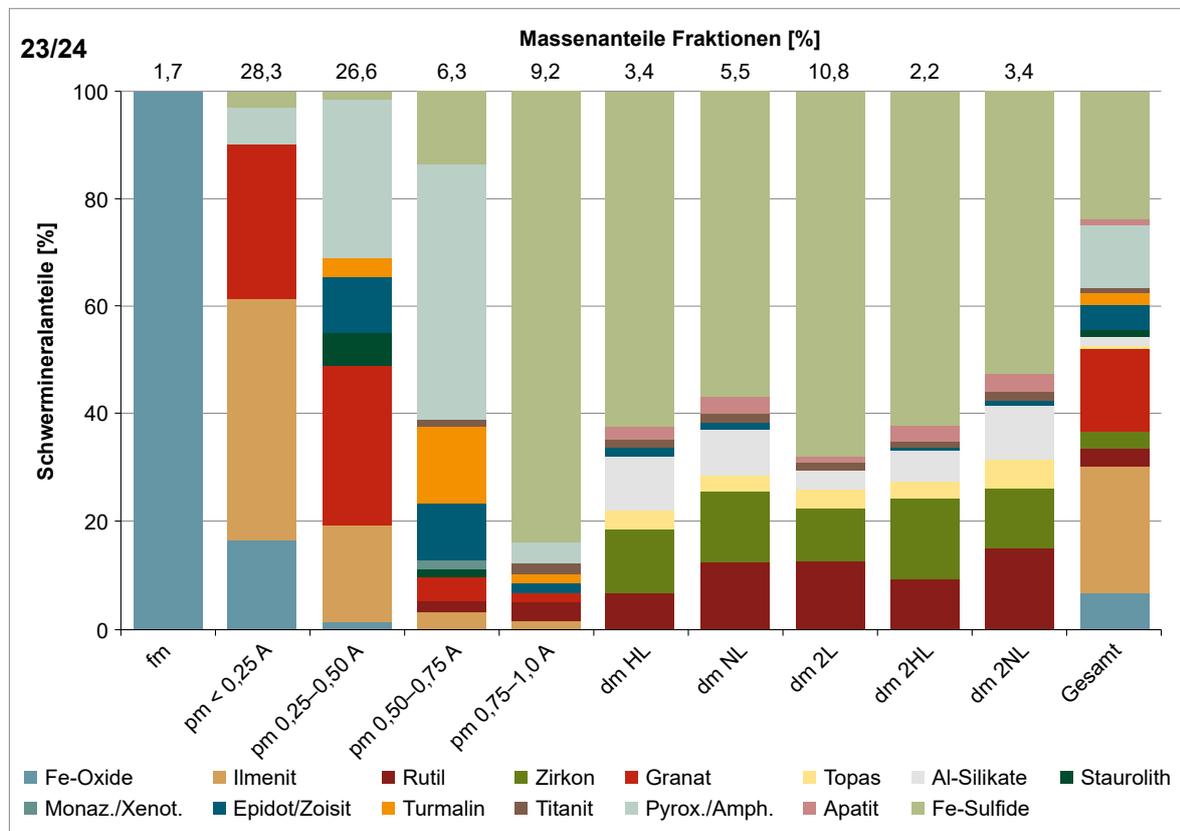


Abb. 98: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 24. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt

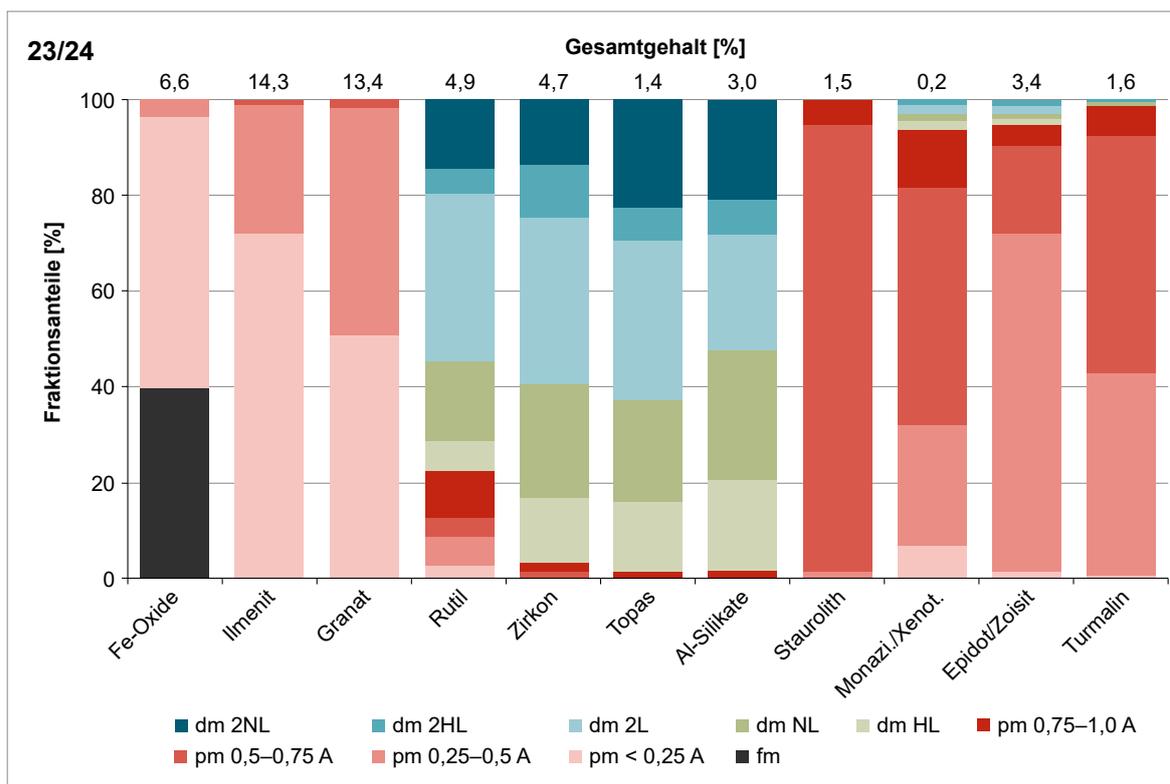


Abb. 99: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 15: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 24 (bezogen auf Abbildung 99) (Angaben in %)

23	fm	pm – paramagnetisch				dm – diamagnetisch					Ges.
		< 0,25 A	0,25–0,50 A	0,50–0,75 A	0,75–1,0 A	HL	NL	2L	2HL	2NL	
Fe-Oxide	100,0	16,1	1,2	–	–	–	–	–	–	–	6,6
Ilmenit	–	44,0	17,6	2,8	1,1	–	–	–	–	–	14,3
Rutil	–	0,4	0,9	2,1	4,1	6,5	11,9	12,3	9,6	14,7	4,9
Zirkon	–	–	–	–	0,7	11,6	12,9	10,0	14,3	11,1	4,7
Granat	–	28,8	28,9	4,5	1,3	–	–	–	–	–	13,4
Topas	–	–	–	–	–	3,7	3,5	2,7	2,9	5,2	1,4
Al-Silikate	–	–	–	–	–	9,9	8,4	3,9	5,6	9,5	3,0
Staurolith	–	–	6,3	1,4	–	–	–	–	–	–	1,5
Monaz./Xenot.	–	–	–	1,6	–	–	–	–	–	–	0,2
Epidot/Zoisit	–	–	10,2	10,5	1,8	1,4	1,1	–	–	–	3,4
Turmalin	–	–	3,0	14,2	1,3	–	–	–	–	–	1,6
Sonstige SM	–	10,1	31,1	62,3	88,9	66,4	61,5	70,1	66,4	57,8	44,9
Fraktionsanteil	3,2	28,3	26,6	6,8	9,2	3,4	5,5	10,8	2,2	3,4	100,0

Der größte Teil der diamagnetischen Fraktionen wird durch Fe-Sulfide gebildet (siehe Abschnitte 6.1.1.7 bzw. 6.2). Bei der elektrostatischen Trennung werden die Fe-Sulfide, Al-Silikate, Apatit und Topas durchgeschleift. Es findet weiterhin keine sichtbare Separation von Zirkon und Rutil statt.

Rutil und Zirkon werden zwar in den diamagnetischen Fraktionen angereichert, aber durch Topas und die Al-Silikate verdünnt. Rutil zeigt aufgrund von Verwachsungen mit Ilmenitumwandlungsprodukten eine deutliche Affinität zu den paramagnetischen Fraktionen.

6.4.3 Probe 38

Das Schwermineralkonzentrat der Probe 38 wurde in drei magnetische und drei diamagnetische Fraktionen aufgetrennt. Der ferromagnetische Anteil ist mit 12,2 % vertreten, wurde aber nicht separat analysiert.

Ilmenit wird in der gesamten paramagnetischen Fraktion bis 1,0 A abgetrennt, findet sich jedoch

auch in der diamagnetischen Fraktion in geringen Mengen wieder. Granat wird zusammen mit Ilmenit in der paramagnetischen Fraktion angereichert. Geringe Mengen von Granat werden jedoch auch in die diamagnetischen Fraktionen verschleppt. Die Fraktion pm < 0,5 A wird neben Ilmenit und Granat von Hornblende und Pyroxenen (33,7 %) dominiert, wobei der Anteil Letzterer in der Fraktion pm 0,5–1,0 A auf mehr als 52 % steigt (Abb. 100).

Ilmenit und Granat werden unspezifisch in den paramagnetischen Fraktionen angereichert, sind aber auch in den diamagnetischen Fraktionen enthalten (Abb. 101). Zirkon wird auf alle drei diamagnetischen Fraktionen verteilt. Ebenso Topas, Al-Silikate und Rutil. Bis auf Zirkon, welcher zu mehr als 40 % in der dm NL-Fraktion enthalten ist, findet keine nennenswerte Trennung der Schwerminerale nach den elektrischen Eigenschaften statt. Kassiterit wird außer in der diamagnetischen auch in der paramagnetischen Fraktion abgetrennt.

Im Falle einer Aufbereitung nach PERSCHL (2018) würden Ilmenit und Granat nicht voneinander

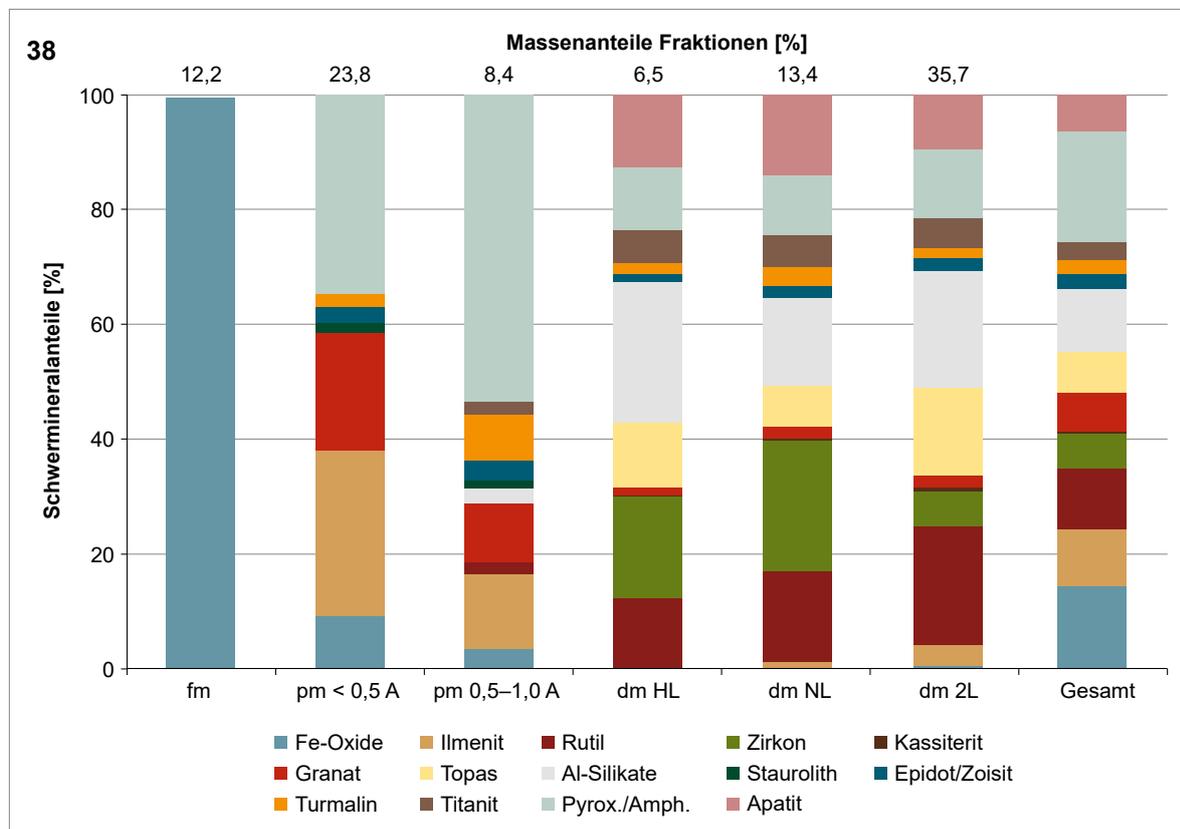


Abb. 100: Schwermineralzusammensetzung der Probe 38

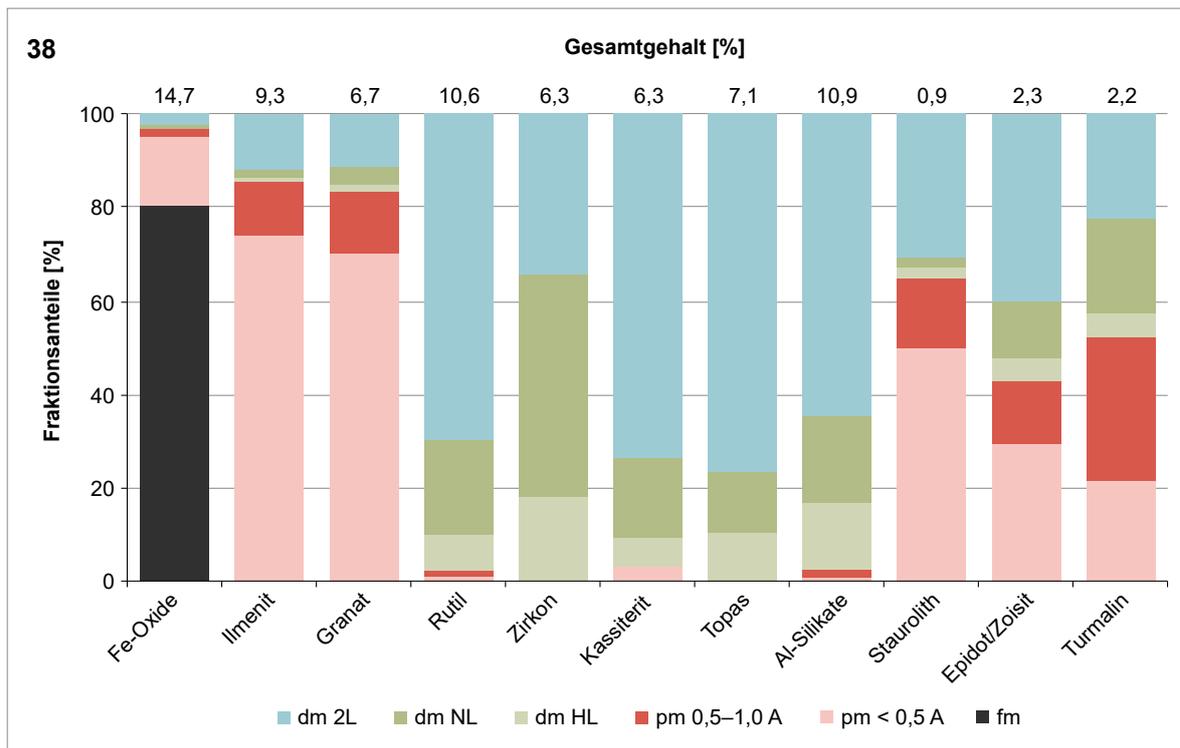


Abb. 101: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 16: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen in der Probe 38 (bezogen auf Abbildung 101) (Angaben in %)

38	fm	pm – paramagnetisch		dm – diamagnetisch			Ges.
		< 0,5 A	0,5–1,0 A	HL	NL	2L	
Fe-Oxide	100,0	9,2	3,6	0,4	0,5	1,1	14,7
Ilmenit	–	28,6	12,7	0,9	1,4	3,1	9,2
Rutil	–	0,5	1,8	12,5	15,8	20,6	10,5
Zirkon	–	–	0,1	17,2	22,4	6,0	6,2
Kassiterit	–	–	–	0,3	0,4	0,7	0,3
Granat	–	19,5	10,6	1,1	2,0	2,1	6,6
Topas	–	–	0,4	11,2	6,9	15,3	7,1
Al-Silikate	–	0,4	2,3	23,9	15,1	19,9	10,9
Staurolith	–	1,8	1,5	0,3	0,2	0,7	0,9
Monazit/Xenotim	–	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3
Epidot/Zoisit	–	2,8	3,6	1,6	2,0	2,5	2,3
Turmalin	–	2,0	7,9	1,7	3,2	1,4	2,2
Chromit	–	0,5	0,1	–	–	–	0,1
Sonstige SM	–	34,3	55,0	28,6	29,7	26,3	28,4
Fraktionsanteil	12,2	23,8	8,4	6,5	13,4	35,7	

getrennt werden und wären mit Turmalin, Epidot/ Zoisit, Staurolith verunreinigt. Rutil, Kassiterit und Zirkon würden durch Topas stark verdünnt.

Im Vorfeld einer möglichen Aufbereitung sollte hier speziell überprüft werden, warum Minerale wie Ilmenit und Turmalin in der diamagnetischen Fraktion wiedergefunden werden. Das wäre möglich, indem man an den Dünnschliffen die exakte Zusammensetzung der Phasen mittels REM oder Mikrosonde analysiert. Gegenwärtig lässt der hohe Anteil von typisch paramagnetischen Mineralen in der diamagnetischen Fraktion den Schluss zu, dass die am Frantz-Magnetscheider eingestellte Feldstärke (Äquivalent zur Stromstärke 1,0 A) nicht ausreichend war, die paramagnetischen Schwerminerale abzutrennen.

6.4.4 Probe 41

Das Schwermineralkonzentrat von Probe 41 lag in vier magnetischen und fünf diamagnetischen Fraktionen zur Analyse vor. Der ferromagnetische Anteil beträgt 1,3 % und wurde nicht weiter betrachtet. Ilmenit wird hauptsächlich in der paramagnetischen Fraktion bis 0,5 A angereichert und könnte in der pm 0,1–0,3 A als nahezu reine Phase abgetrennt werden (Abb. 102). Rutil zeigt teils paramagnetisches Verhalten, vermutlich als Verwitterungsprodukt von Ilmenit, wird aber hauptsächlich in der diamagnetischen Fraktion, zusammen mit Zirkon, konzentriert.

Zirkon findet sich in allen diamagnetischen Fraktionen wieder, jedoch mit überwiegender Präsenz in der NL-Fraktion, und wird durch Rutil und Topas verdünnt (Abb. 103).

Kassiterit wird hauptsächlich in der 2L-Fraktion angereichert, zeigt jedoch auch schwach parama-

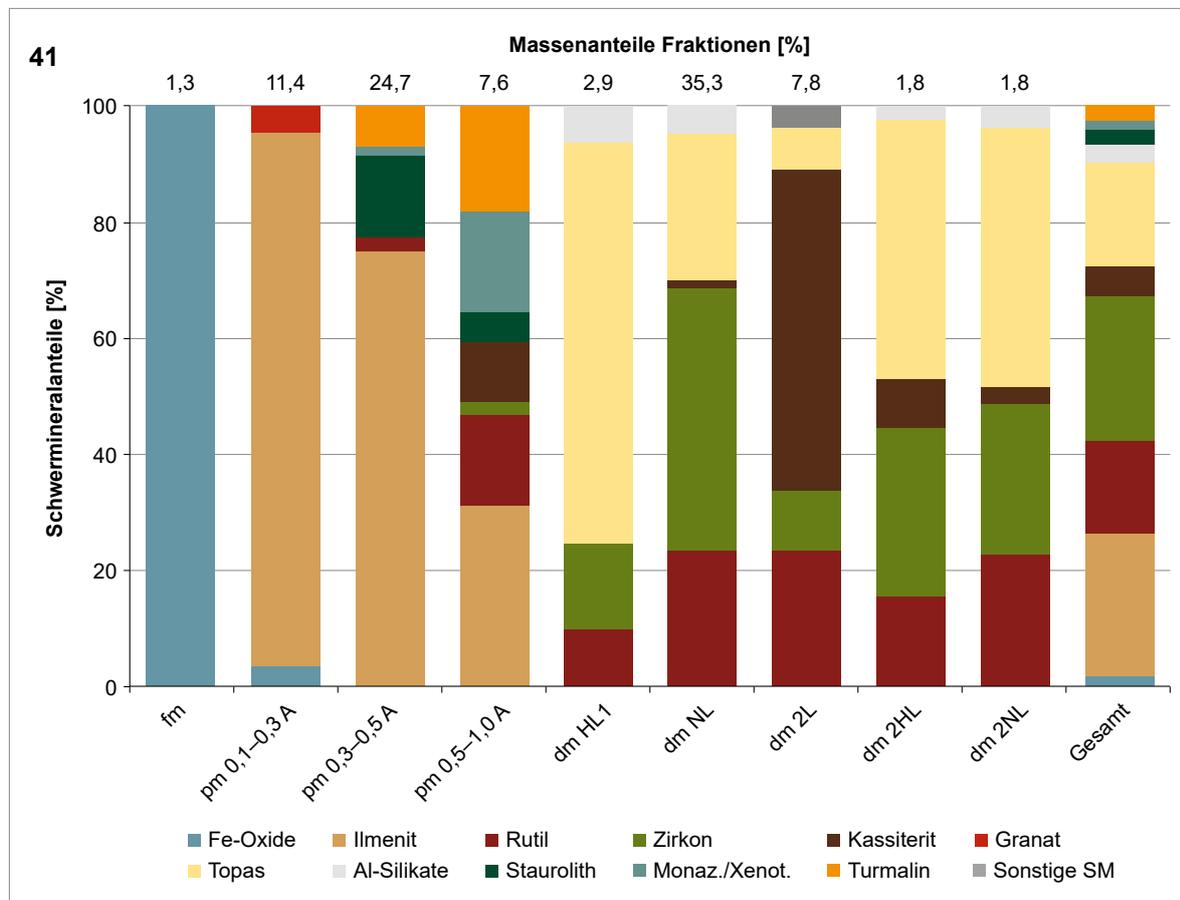


Abb. 102: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Nobitz. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt

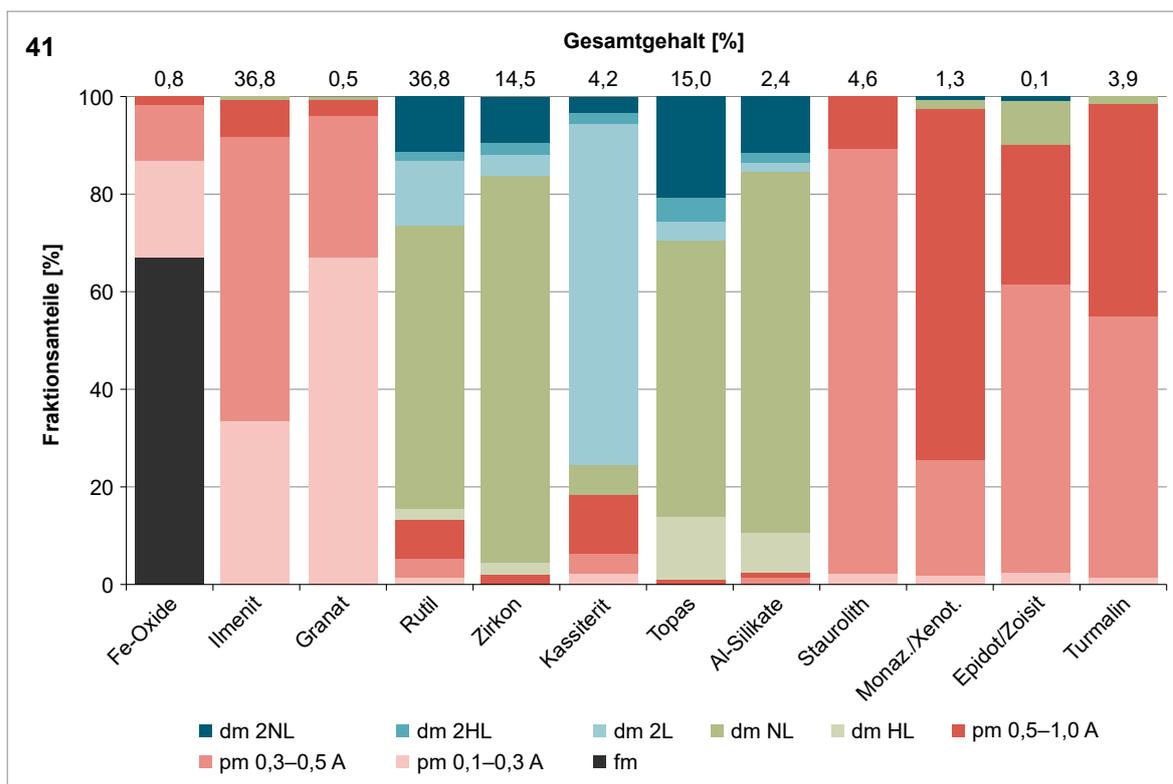


Abb. 103: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 17: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 41 (bezogen auf Abbildung 103) (Angaben in %)

41	fm	pm – paramagnetisch			dm – diamagnetisch					Ges.
		0,1–0, A	0,3–0,5 A	0,5–1,0 A	HL	NL	2L	2HL	2NL	
Fe-Oxide	100,0	3,3	0,9	0,5	–	–	–	–	–	1,5
Ilmenit	–	87,8	71,6	30,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	24,2
Rutil	–	0,9	2,5	15,1	9,8	23,5	23,3	15,3	22,7	15,9
Zirkon	–	0,4	0,4	2,4	14,7	44,5	10,2	28,4	25,7	24,2
Kassiterit	–	0,9	1,0	9,9	0,2	1,1	54,9	8,8	2,9	5,2
Granat	–	4,3	0,9	0,3	–	–	–	–	–	0,6
Topas	–	0,1	0,2	0,3	68,2	24,8	7,3	44,0	44,1	17,3
Al-Silikate	–	0,1	0,1	0,4	6,6	5,1	0,5	2,5	3,9	2,9
Staurolith	–	0,5	13,0	5,1	–	–	–	–	–	2,9
Monazit/Xenot.	–	0,2	1,7	17,1	0,1	0,1	–	–	0,1	1,5
Epidot/Zoisit	–	–	0,2	0,3	–	–	–	–	–	0,1
Turmalin	–	0,3	6,5	17,5	–	0,1	0,1	–	–	2,4
Chromit	–	0,8	0,9	0,3	–	–	–	–	–	0,3
Sonstige SM	–	0,2	0,1	0,5	0,2	0,5	3,5	0,7	0,4	0,6
Fraktionsanteil	1,3	11,4	24,7	7,6	2,9	35,3	7,8	1,8	7,2	100,0

gnetisches Verhalten. Sollte hier die Gewinnung von Kassiterit in Erwägung gezogen werden, so empfiehlt es sich, der magnetischen und elektrostatischen Aufbereitung eine „schärfere“ Dichtesortierung vorzuschalten, um schon in dieser Stufe einen höheren Anreicherungsgrad zu erreichen.

Monazit kann spezifisch durch Einstellung der Feldstärke entfernt oder angereichert werden. Ilmenit und Granat sind zusammen mit Staurolith, Monazit/Xenotim, Epidot/Zoisit und Turmalin in der gesamten paramagnetischen Fraktion wiederzufinden.

6.4.5 Probe 43

Die Probe 43 wurde jeweils in drei magnetische und drei diamagnetische Fraktionen zerlegt. In der ferromagnetischen Fraktion wurden neben Magnetit auch stark paramagnetischer Ilmenit und damit verwachsene Pyroxene/Amphibole abgetrennt. Geringe Mengen an Titanit sind als Verwitterungsprodukte des Ilmenits zu deuten.

Entgegen der Theorie reichert sich hier Zirkon in der Halbleiterfraktion an. Massemäßig ist er in der 2L-Fraktion zu finden, zusammen mit Rutil und Epidot. Die Anwesenheit von mehr als 80 % paramagnetischer Minerale in den diamagnetischen Fraktionen (Abb. 104) weist darauf hin, dass die vorhergehende magnetische Trennung mittels Frantz-Magnetscheider unvollständig ausgeführt wurde.

Aufbereitungstechnisch trifft das Gleiche zu wie bei Probe 38. Der hohe Anteil von typisch paramagnetischen Mineralen wie Granat, Pyroxenen/Amphibolen, Turmalin, Epidot/Zoisit, Fe-Oxide und Ilmenit in der diamagnetischen Fraktion lässt den Schluss zu, dass die am Frantz-Magnetscheider eingestellte Feldstärke nicht ausreichend war, um die paramagnetischen Schwerminerale abzutrennen.

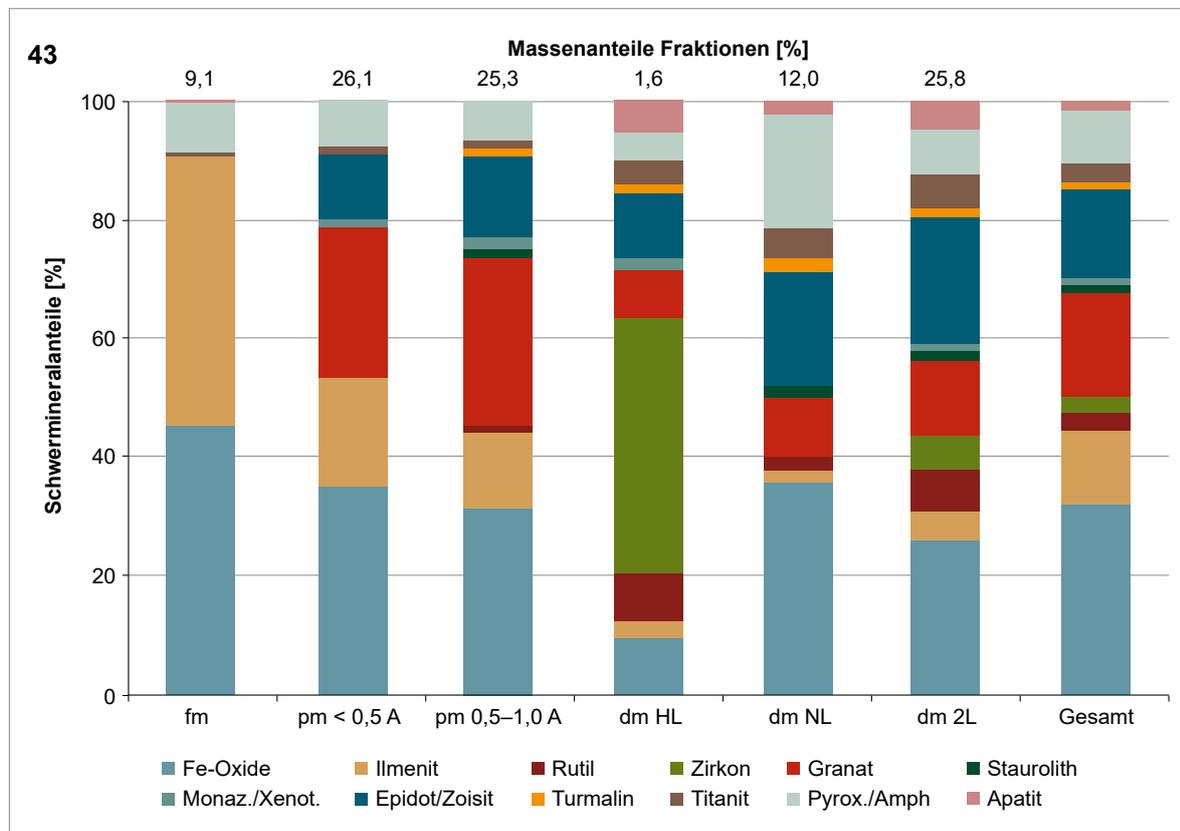


Abb. 104: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 43. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt.

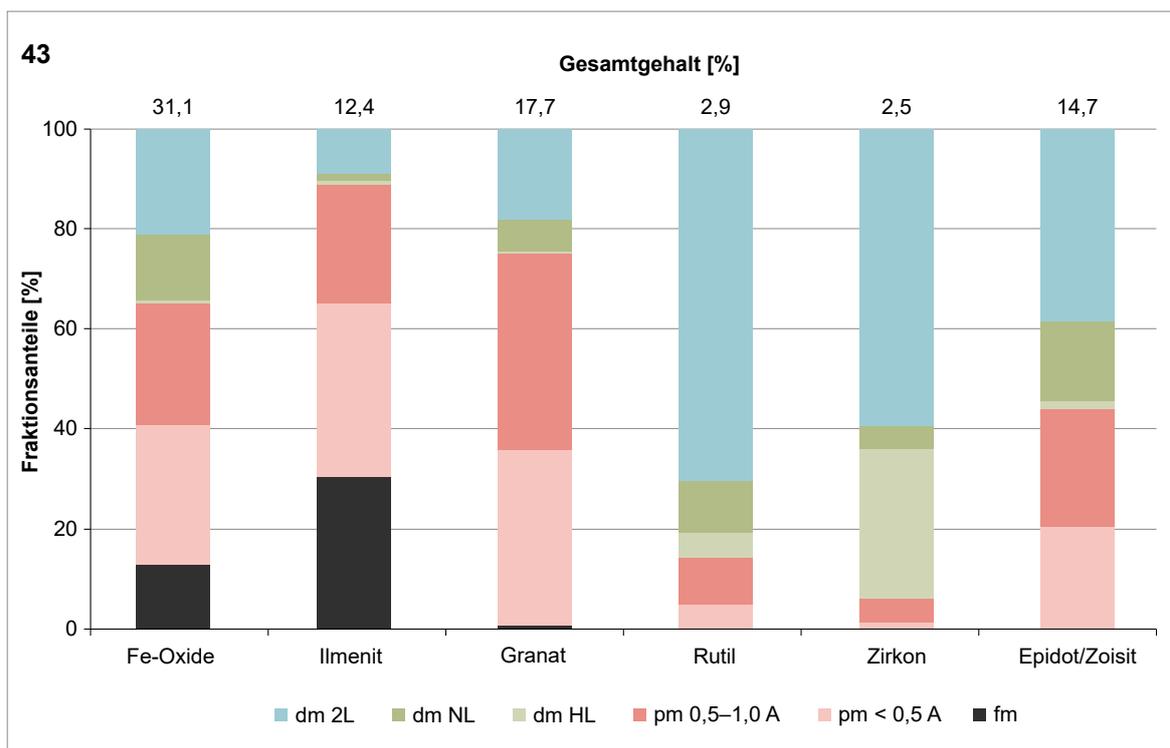


Abb. 105: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 18: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 43 (bezogen auf Abbildung 105) (Angaben in %)

43	fm	pm – paramagnetisch		dm – diamagnetisch			Ges.
		<0,5 A	0,5–1,0 A	HL	NL	2L	
Fe-Oxide	43,6	33,6	30,5	8,8	34,7	25,4	31,1
Ilmenit	43,7	17,5	12,7	2,6	1,6	4,6	12,4
Rutil	0,1	0,5	1,0	8,5	2,4	7,4	2,9
Zirkon	–	0,1	0,4	42,2	0,9	5,3	2,5
Granat	0,7	24,6	28,2	8,1	9,7	12,7	17,7
Al-Silikate	–	–	–	0,4	0,4	0,4	0,2
Staurolith	–	0,9	–	0,9	1,7	1,3	1,1
Monazit/Xenotim	0,1	1,2	2,2	1,7	0,7	1,4	1,3
Epidot/Zoisit	0,3	10,9	13,4	10,9	19,3	21,0	14,6
Turmalin	0,1	0,7	1,4	1,2	1,9	1,3	1,2
Chromit	2,0	1,1	0,8	0,2	0,3	0,4	0,8
Sonstige SM	9,4	8,9	8,3	14,5	26,3	18,6	14,1
Fraktionsanteil	9,1	26,1	25,3	1,6	12,0	25,8	

6.4.6 Probe 48

Die Probe 48 wurde in vier magnetische und eine diamagnetische Fraktion aufgetrennt (Abb. 106). Die ferromagnetische Fraktion wurde nicht weiter betrachtet. Es wird angenommen, dass diese hauptsächlich Magnetit enthält. Der größte Anteil an Granat findet sich zusammen mit Ilmenit und Fe-Oxiden in der stark paramagnetischen Fraktion wieder.

Mit gezielter Einstellung der magnetischen Feldstärke könnte der Anteil an Fe-Oxiden und Ilmenit weiter verringert, und damit der Granat als Wertmineral stärker konzentriert werden. Damit könnte der Granat als Wertmineral gewonnen werden.

Der größte Anteil der nicht nutzbaren Begleitminerale Epidot/Zoisit, Pyroxene/Amphibole, Titanit,

Turmalin und auch Fe-Sulfide (Pyrit) ist in den mittel- bis schwach paramagnetischen Fraktionen wiederzufinden.

Die Wertminerale Rutil und Zirkon werden, wie erwartet, in der diamagnetischen Fraktion angereichert, jedoch durch Titanit, Apatit und Fe-Sulfide verdünnt. Rutil zeigt zum Teil paramagnetisches Verhalten, was auf Umwandlungsprodukte aus Ilmenit zurückzuführen ist.

Als Wertmineral bietet sich in Probe 48 nur Granat an, wobei jedoch die Begleitminerale abgetrennt werden müssen. Die detaillierte Zusammensetzung der Schwerminerale nach Fraktionen erfolgt in Tabelle 19.

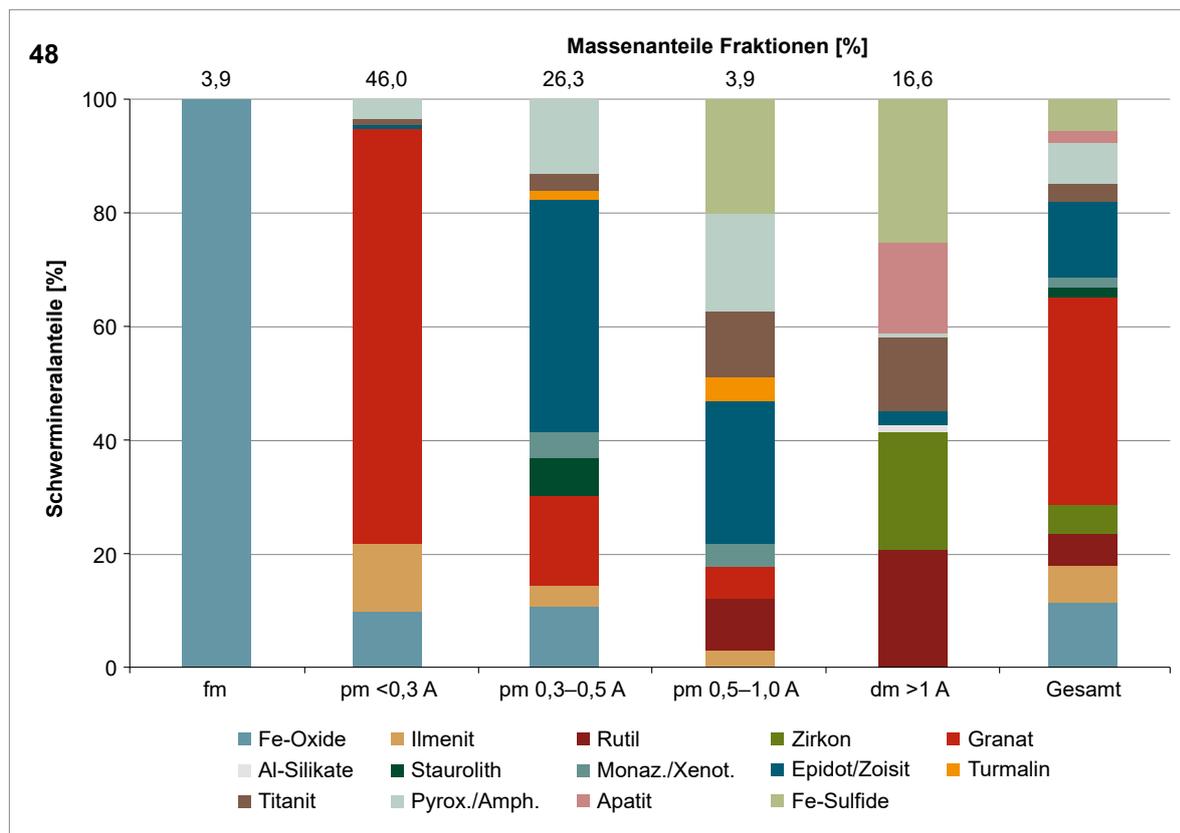


Abb. 106: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen in Probe 48

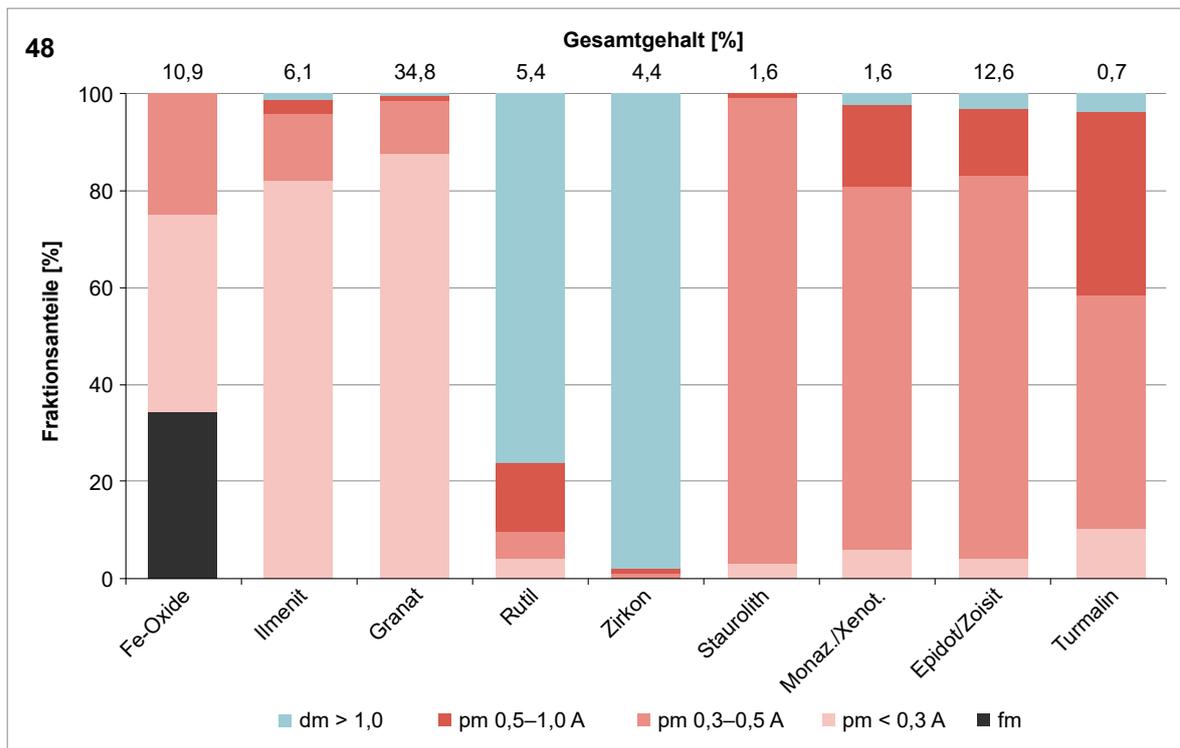


Abb. 107: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 19: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 48 (bezogen auf Abbildung 107) (Angaben in %)

48	fm	pm – paramagnetisch			dm – diamagnetisch	Ges.
		< 0,3 A	0,3–0,5 A	0,5–1,0 A	> 1 A	
Fe-Oxide	100,0	10,0	10,5	0,8	0,1	10,9
Ilmenit	–	11,5	3,4	2,9	0,4	6,1
Rutil	–	0,4	0,9	8,9	20,5	5,4
Zirkon	–	–	0,1	0,5	20,2	4,4
Granat	–	70,9	15,7	5,5	0,6	34,8
Al-Silikate	–	–	–	–	1,3	0,3
Staurolith	–	0,1	6,1	0,2	–	1,6
Monazit/Xenotim	–	0,2	4,7	3,8	0,2	1,6
Epidot/Zoisit	–	1,0	40,0	24,7	2,5	12,6
Turmalin	–	0,2	1,4	4,0	0,2	0,7
Chromit	–	0,5	0,5	–	–	0,4
Sonstige SM	–	5,1	16,8	48,6	53,8	21,3
Fraktionsanteil	3,9	46,0	26,3	7,3	16,6	

6.4.7 Probe 60

Die Probe 60 wurde in drei magnetische und drei diamagnetische Fraktionen aufgetrennt (Abb. 108). Der ferromagnetische Anteil kann mit 0,2 % vernachlässigt werden. Ilmenit hat den größten Anteil in den paramagnetischen Fraktionen und ist in der Fraktion < 0,5 A mit bis zu 80 % enthalten. Rutil zeigt ebenfalls paramagnetisches Verhalten, was auf ihn als Umwandlungsprodukt aus dem Ilmenit zurückgeführt werden kann.

Den größten Teil der diamagnetischen Fraktionen stellt der Topas. Er findet sich in allen elektrostatischen Fraktionen wieder und verdünnt die Wertminerale. Die elektrostatische Abtrennung des Zirkons in die NL-Fraktion fand nicht statt. Auch Rutil und Kassiterit zeigen keine Auftrennung. Kassiterit als elektrisch leitendes Mineral wird in allen diamagnetischen Fraktionen wiedergefunden

(Abb. 109). Ähnlich wie in Probe 08 zeigt dieser ebenfalls teilweise paramagnetisches Verhalten, welches bei der Auslegung einer zukünftigen Aufbereitung Beachtung finden muss.

Bei einer Gewinnung von Wertmineralen ist hier die Abtrennung von Topas durch vorherige scharfe Dichteseperation der wichtigste Punkt, ehe mit einer magnetischen und elektrostatischen Trennung weitergearbeitet werden kann.

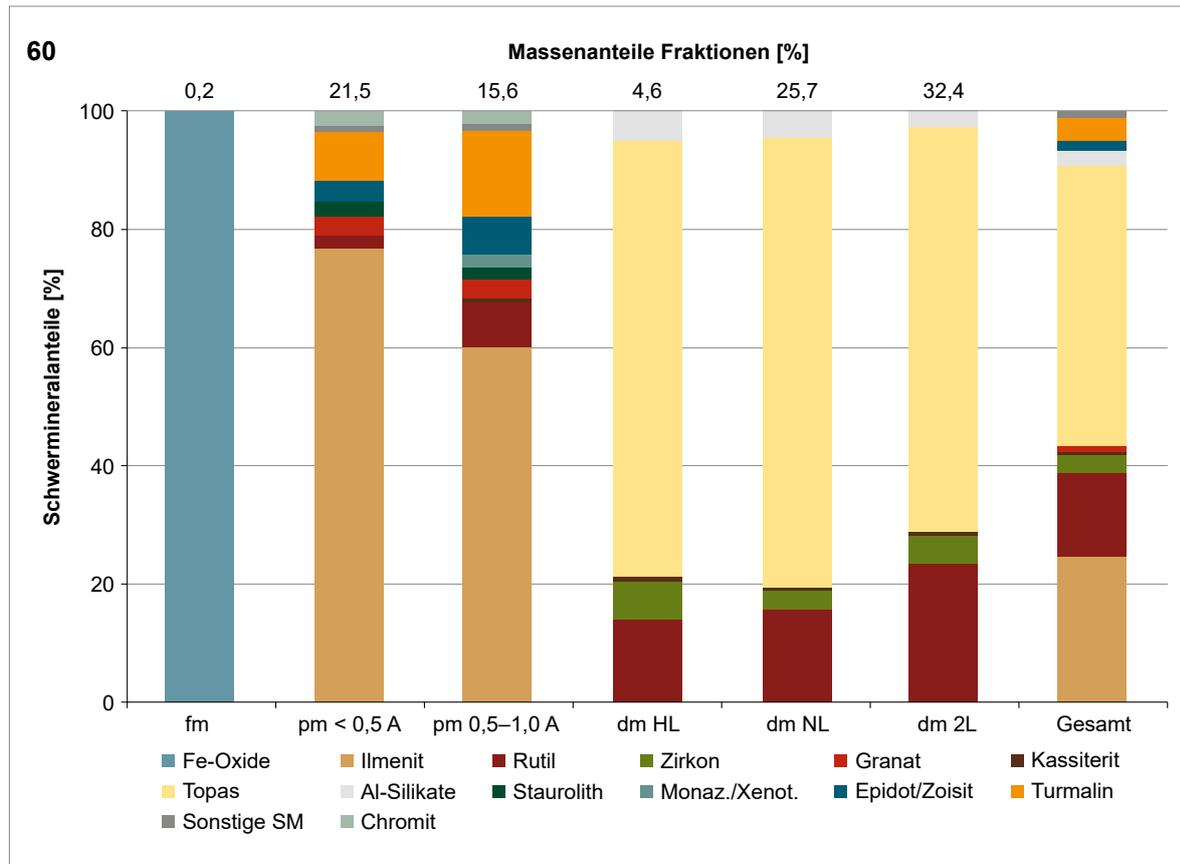


Abb. 108: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 60. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt

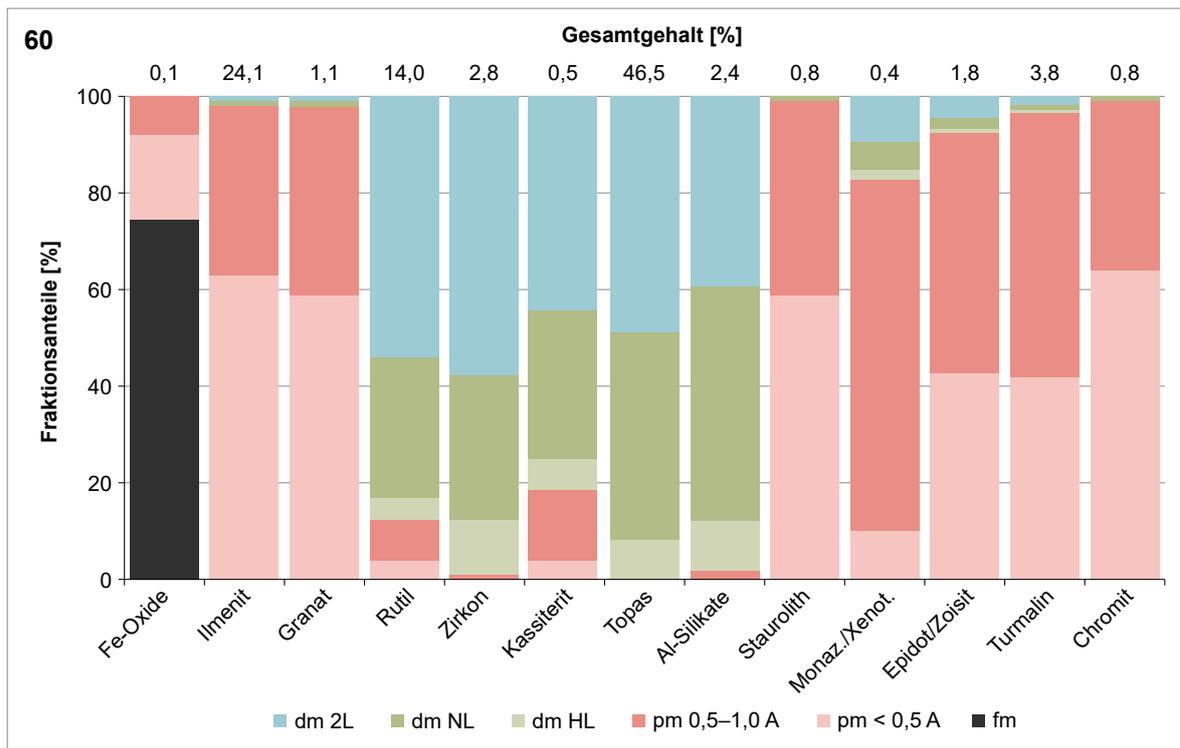


Abb. 109: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 20: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 60 (bezogen auf Abbildung 109) (Angaben in %)

60	fm	pm – paramagnetisch		dm – diamagnetisch			Ges.
		< 0,5 A	0,5–1,0 A	HL	NL	2L	
Fe-Oxide	100,0	0,2	0,1	–	–	–	0,1
Ilmenit	–	76,3	60,0	0,4	0,5	0,7	24,0
Rutil	–	2,0	7,7	13,7	15,6	23,1	14,0
Zirkon	–	–	0,1	6,3	2,9	4,5	2,8
Kassiterit	–	0,1	0,4	0,6	0,5	0,6	0,5
Granat	–	3,4	3,1	–	0,1	0,0	1,1
Topas	–	0,2	0,0	72,4	74,7	66,8	46,5
Al-Silikate	–	–	0,2	4,9	4,3	2,7	2,4
Staurolith	–	2,3	2,2	–	–	–	0,8
Monazit/Xenotim	–	0,2	2,2	0,2	0,1	0,1	0,4
Epidot/Zoisit	–	3,8	6,2	0,1	0,2	0,3	1,8
Turmalin	–	7,9	14,5	0,3	0,2	0,2	3,8
Chromit	–	2,4	1,9	–	–	–	0,8
Sonstige SM	–	1,1	1,4	0,9	0,8	0,9	1,0
Fraktionsanteil	0,2	21,5	15,6	4,6	25,7	32,4	

6.4.8 Probe 64

Die Probe 64 wurde in vier magnetische und drei diamagnetische Fraktionen aufgetrennt. Die ferromagnetische Fraktion mit 0,2 % wurde nicht weiter beachtet. Der größte Teil des Ilmenits, welcher mehr als 56 % des Gesamtkonzentrates beinhaltet, wird über den gesamten paramagnetischen Bereich verteilt.

Das Konzentrat besteht zu mehr als 90 % aus paramagnetischen Mineralen und könnte als Ti-Konzentrat verwertet werden, wenn vorher der Hämatit abgetrennt wird.

Die Probe beinhaltet einen nur sehr geringen Anteil diamagnetischer Minerale, wobei Baryt einen hohen Anteil an den diamagnetischen Fraktionen einnimmt. Zirkon und Rutil sind nur sehr untergeordnet zu finden. Zirkon wird aber, wie erwartet, in der Nichtleiterfraktion angereichert, findet sich jedoch auch in den anderen dm-Fraktionen wieder.

Die Anwesenheit von paramagnetischen Mineralen wie Ilmenit, Monazit und Turmalin in den diamagnetischen Fraktionen weist auf die unvollständige Auftrennung der pm- und dm-Fraktionen hin. Als mögliches Wertmineral würde der Ilmenit in Betracht gezogen werden können.

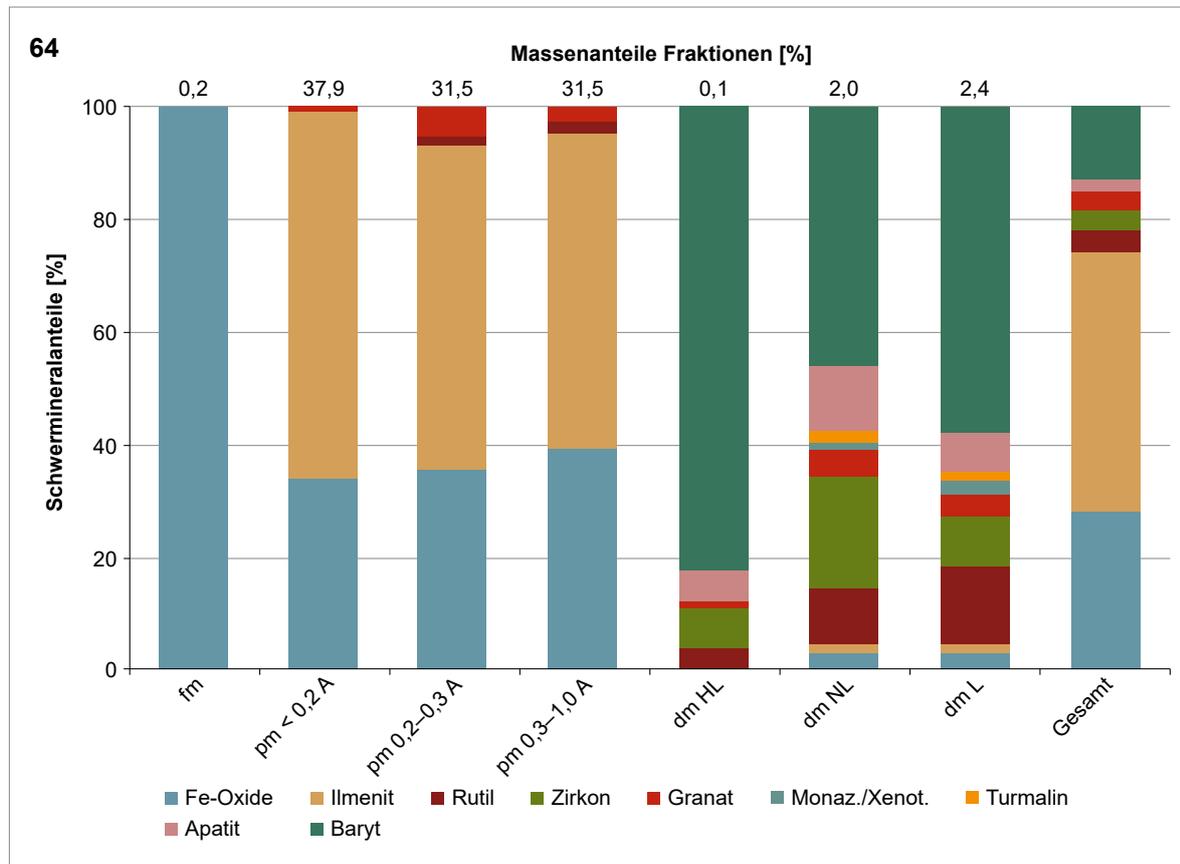


Abb. 110: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen von Probe 64. Anteile < 1 % werden nicht dargestellt

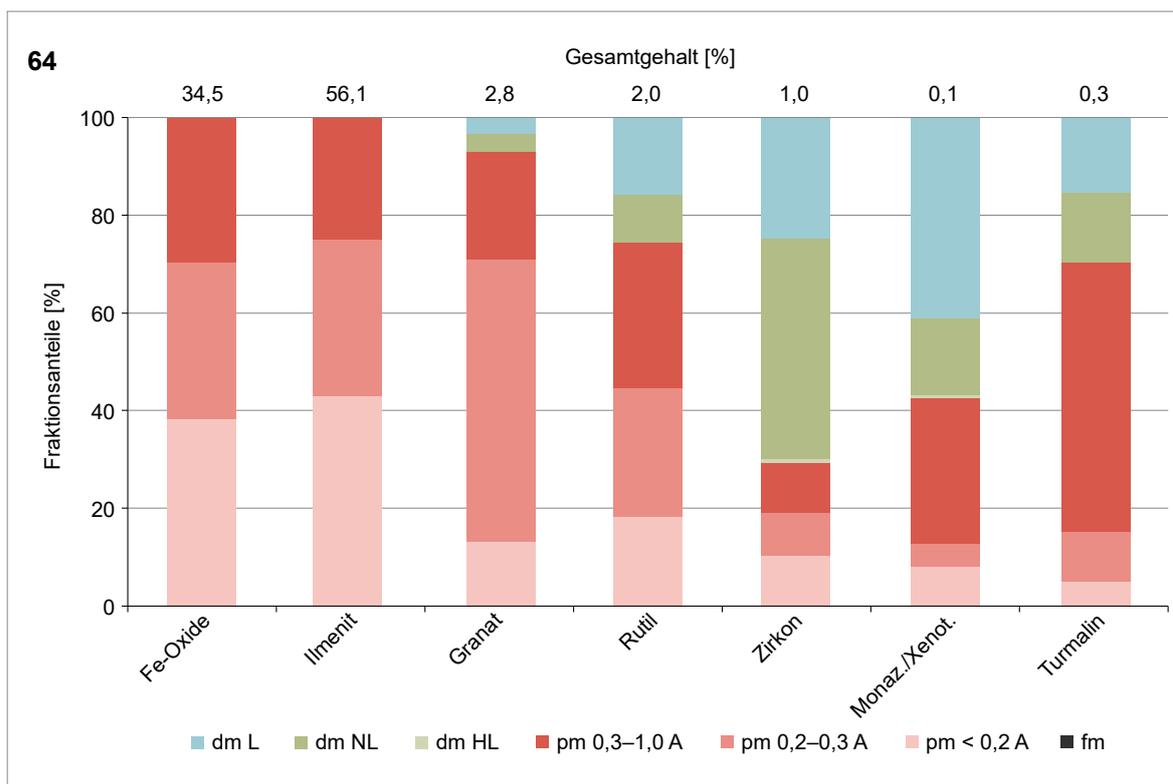


Abb. 111: Wiederfindung der Mineralanteile bezüglich physikalischen Verhaltens in den Fraktionen

Tab. 21: Mineralogische Zusammensetzung der Fraktionen der Probe 64 (bezogen auf Abbildung 111) (Angaben in %)

64	fm	pm – paramagnetisch			dm – diamagnetisch			Ges.
		< 0,2 A	0,2–0,3 A	0,3–1,0 A	HL	NL	L	
Fe-Oxide	100,0	34,0	35,7	38,9	0,9	3,3	3,2	34,5
Ilmenit	–	63,6	56,8	54,1	0,7	1,3	1,6	56,1
Rutil	–	1,0	1,7	2,4	4,1	9,7	13,5	2,0
Zirkon	–	0,2	0,2	0,3	6,6	18,9	8,4	1,0
Granat	–	1,0	5,2	2,5	1,2	4,6	3,7	2,8
Monazit/Xenot.	–	–	–	0,2	0,7	1,1	2,4	0,1
Epidot/Zoisit	–	–	–	0,2	–	0,2	0,2	0,1
Turmalin	–	–	0,1	0,6	0,8	1,9	1,7	0,3
Chromit	–	0,1	0,1	0,1	–	–	–	0,1
Baryt	–	–	–	–	77,8	43,8	55,7	2,3
Apatit	–	–	–	0,1	5,2	11,1	6,9	0,4
Fraktionsanteil	0,2	37,9	31,5	26,0	0,1	1,9	2,4	

6.5 Bewertung der Lagerstätten

6.5.1 Gehalte an Schwermineralen

Die Ermittlung der Gehalte an Schwermineralen in den zu betrachtenden Lagerstätten basiert auf den Werten, die in vorliegender Studie auf der Grundlage der Vorarbeiten der RWTH Aachen (PERSCHL 2018) erarbeitet wurden (Tabelle 22). Dabei ist zu beachten, dass die Rohgutproben zum größten Teil aus der laufenden Produktion entnommen wurden und nur eine stichprobenartige Momentaufnahme des Lagerstätteninventars darstellen.

Die folgenden Angaben zu Schwermineralmengen beruhen auf Daten von real hergestellten Schwergutkonzentraten und schließen die durch Aufbereitungsvorgänge entstehenden Verluste in Leichtfraktion und Middlings ein. Aufbereitungsverluste entstehen hauptsächlich in der Voranreicherung durch Wendelscheider und durch den Nassherd.

Abbildung 112 zeigt die Häufigkeiten der Schwermineralgehalte in der Korngrößenfraktion < 1 mm und der Gesamtkorngrößenfraktion. Danach enthalten die untersuchten Kies- und Sandlagerstätten in den Fraktionen < 1 mm hauptsächlich zwischen 0,1 und 0,4 %, im Mittel 0,23 % Schwerminerale. Bezogen auf die Gesamtmenge an Kies und Sand enthalten die Lagerstätten über alle Korngrößen im Mittel ca. 0,1 % Schwerminerale, bei einem Minimum von 0,01 % und einem Maximum von 0,72 %.

In Tabelle 22 sind den einzelnen Lagerstätten die Gesamt-Jahresproduktion, der Anteil und die Jahresproduktion der Fraktion < 1 mm sowie die Anteile an Schwergut und Schwermineralen an Siebgut < 1 mm und Kies zugeordnet.

Die Gehalte an Schwermineralen wurden aus Angaben von PERSCHL (2018) und den QEM-SCAN-Analysen des Schwerguts (SG) bestimmt. Die prozentualen Anteile der reinen Schwermineralgehalte (SM) wurden aus den Schwergutdaten abzüglich der Leichtmineralfraktion abgeleitet.

Die Konzentrationen an lagerstättenbezogenen Wertmineralen sind in Tabelle 23 dargestellt. Es fallen einige Lagerstätten mit vergleichsweise höheren Gehalten an Wertmineralen auf. Ilmenit ist vor allem in den Proben der Lagerstätten 05, 08, 31, 33, 44, 60 und 64 vertreten. Granat zeigt in den Lagerstätten im Alpenvorland und den Rheinterrassen mit 02, 06, 32, 39, 40 und 45 zum Teil sehr hohe Gehalte (Tabelle 23).

Zirkon und Rutil sind in den Proben 07, 08, 16 und 66 moderat angereichert. In diesen Lagerstätten werden tertiäre Kiese und Sande abgebaut, welche durch die Verwitterung instabiler Schwerminerale eine indirekte Anreicherung der stabilen Schwerminerale erfuhren. Kassiterit ist in den Lagerstätten 08, 19, 21, 31, 38, 60, 66 und 67 in geringen Konzentrationen enthalten. Bis auf 19 befinden sich die anderen Kassiterit-haltigen Lagerstätten in ehemaligen oder rezenten Flussläufen mit Ursprung im Erzgebirge.

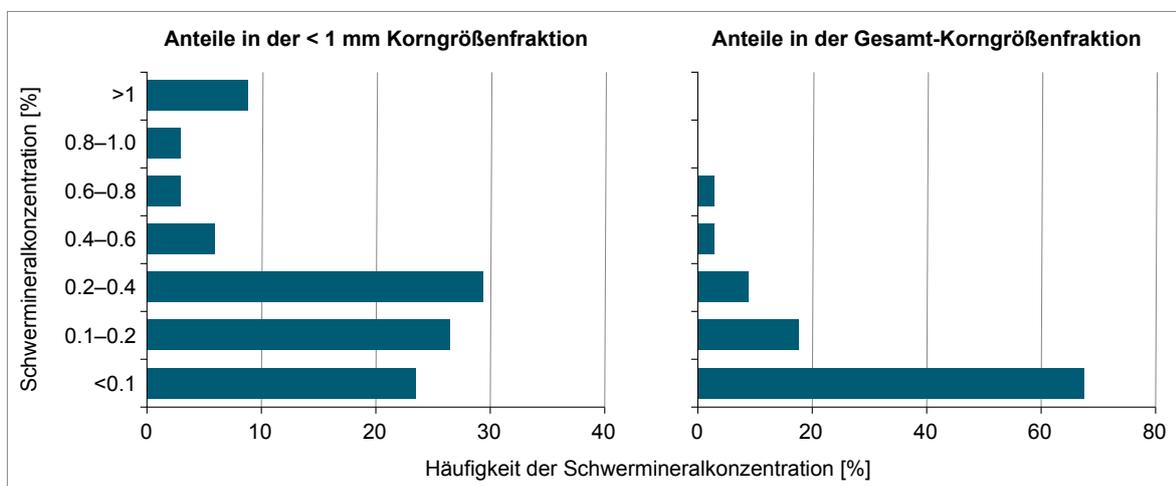


Abb. 112: Häufigkeitsverteilung der Schwermineralkonzentrationen (Anteile in der < 1 mm und Gesamtkorngrößenfraktion)

Tab. 22: Produktion an Kiesen und Sanden der untersuchten Lagerstätten, Anteile an Korngrößenfraktion < 1 mm und Schwergut (SG) – Datenaufnahme PERSCHL (2018), SM – leichtmineraalfreie Konzentrate

Id.-Nr.	Produktion	< 1 mm	< 1 mm	SG in < 1 mm	SM in < 1 mm	SM Ges. Rohgut
	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[%]	[%]
01	450.000	33,0	148.527	0,33	0,111	0,037
02	400.000	18,7	74.612	0,86	0,753	0,140
04	300.000	49,3	147.972	0,17	0,135	0,067
05	650.000	6,4	41.886	0,34	0,153	0,010
06	35.000	3,4	1.187	0,30	0,221	0,007
07	400.000	62,2	248.636	0,12	0,046	0,029
08/12	600.000	42,0	252.000	0,34	0,303	0,127
16	600.000	27,7	166.050	0,07	0,026	0,007
18	250.000	21,8	54.440	0,45	0,396	0,086
19	150.000	17,3	25.961	0,39	0,258	0,045
21	500.000	27,6	137.840	0,39	0,315	0,087
22	350.000	46,5	162.862	0,25	0,137	0,064
23/24	1.500.000	75,0	1.125.000	0,08	0,068	0,051
31	550.000	26,4	145.195	0,09	0,036	0,010
32	400.000	34,9	139.652	0,19	0,184	0,064
33	70.000	26,8	18.742	0,29	0,045	0,012
38	5.200.000	46,7	2.425.878	1,21	1,137	0,530
39	180.000	28,0	50.465	0,40	0,229	0,064
40	700.000	47,8	334.425	0,23	0,136	0,065
42	350.000	24,4	85.547	0,19	0,075	0,018
43	300.000	75,7	227.214	0,95	0,841	0,637
44	350.000	30,3	106.015	0,32	0,254	0,077
45	300.000	30,9	92.556	0,37	0,357	0,110
46	275.000	17,7	48.648	1,85	1,505	0,266
47	Bohrkerne	56,5	keine Angabe	0,89	0,359	0,203
48	800.000	72,9	583.136	0,43	0,383	0,279
49	550.000	42,2	232.084	0,21	0,143	0,060
60	1.375.000	25,0	343.709	0,55	0,498	0,125
62	450.000	32,5	146.223	0,08	0,034	0,011
64	750.000	10,2	76.868	1,86	1,317	0,135
65	kein Abbau	19,5	keine Angabe	0,39	0,142	0,028
66	200.000	19,3	38.660	0,07	0,036	0,007
67	700.000	34,1	238.728	0,15	0,130	0,044

Tab. 23: Konzentrationen der Wertminerale (SM) in der Korngrößenfraktion < 1 mm – bilanzierbare Proben (Rohgutmengen bekannt)

Id.-Nr.	Fe-Oxide	Ilmenit	Granat	Zirkon	Kassiterit	Rutil
	[%]					
01	22,0	16,7	27,8	1,5	–	2,6
02	0,9	6,3	72,2	0,3	–	3,0
04	41,3	16,3	7,9	13,3	–	5,0
05	27,4	36,1	16,5	1,1	–	1,3
06	2,0	4,9	74,0	0,5	–	2,4
07	1,2	17,5	0,6	16,6	–	17,5
08/12	1,3	34,0	0,2	18,5	2,1	18,3
16	6,0	11,2	0,7	19,3	–	20,9
18	6,1	7,1	55,1	0,6	–	2,1
19	28,6	26,9	10,9	2,9	2,0	3,8
21	9,7	24,5	37,8	1,6	0,3	3,1
22	12,0	15,8	40,9	0,7	–	4,4
23/24	7,0	22,3	15,0	3,1	–	4,2
31	8,9	40,6	20,1	6,4	0,3	5,7
32	11,9	14,6	52,9	3,4	–	3,7
33	16,8	35,2	11,7	5,0	–	5,6
38	14,7	9,2	6,6	6,2	0,3	10,5
39	11,6	12,6	45,0	0,4	–	2,2
40	4,8	7,8	45,5	1,3	–	3,0
42	59,6	15,8	14,5	2,4	–	1,1
43	31,1	12,4	17,7	2,5	–	2,9
44	33,2	31,4	12,4	4,6	–	3,9
45	5,7	10,4	52,6	3,2	–	2,9
46	0,6	9,4	71,6	0,5	–	3,4
47	4,7	20,2	19,3	1,7	–	4,8
48	10,9	11,8	36,4	3,7	–	4,2
49	28,6	26,9	10,8	3,2	–	4,3
60	0,0	24,0	1,1	2,8	0,4	14,0
62	27,5	24,4	16,7	5,2	–	2,7
64	34,5	56,1	2,8	1,0	–	2,0
65	24,3	16,9	15,6	0,8	–	2,8
66	1,0	43,0	0,7	22,1	0,5	16,5
67	4,6	28,7	29,8	3,2	0,1	4,3

Tab. 24: Konzentrationen der Wertminerale (SM) in der Korngrößenfraktion < 1 mm – nicht bilanzierbare Proben (Rohgutmengen nicht bekannt)

Id.-Nr.	Fe-Oxide	Ilmenit	Granat	Zirkon	Kassiterit	Rutil
	[%]					
03KL	9,0	43,0	21,2	10,6	0,4	2,3
17KL	1,4	38,2	44,6	5,9	–	4,5
20KL	16,8	16,4	4,8	35,3	0,3	4,1
34KL	1,3	12,7	76,8	1,0	0,1	2,3
35KL	48,7	25,7	2,1	11,7	8,3	1,1
41	0,8	36,8	0,6	14,5	4,2	14,4
54	3,5	33,9	3,6	31,8	10,8	5,6
63KL	7,1	39,5	25,5	13,5	0,3	3,1
68KL	34,7	33,5	2,4	10,9	8,7	1,6

In den nicht bilanzierbaren Proben (Tabelle 24) sind die Gehalte der betrachteten Wertminerale aufgrund einer intensiveren Dichte-Voranreicherung vergleichsweise höher. Vor allem die Konzentrationen an Kassiterit sind in den Proben 35KL, 41, 54 und 68KL stark erhöht. Die KL-Proben stellen allerdings Spezialfälle dar, die aufzeigen, wie sich die im Schwergut erzielbaren Gehalte der schweren Schwerminerale darstellen könnten, wenn eine „scharfe“ Dichteanreicherung mittels Nassherd stattfindet (siehe auch Abschnitt 6.7).

In Tabelle 25 werden lagerstättenbezogen die theoretisch erzielbaren Jahresmengen für einzelne Schwerminerale aufgezeigt. Für Lagerstätten, zu denen keine Angaben über die jährliche Gesamtproduktion vorlagen, wurden Annahmen zugrunde gelegt (siehe Fußnoten Tabelle 25).

(1) Für die Lagerstätte 08/12 wurden zehn separate Anreicherungen durchgeführt (Reihenproben), von welchen nur zwei näher untersucht wurden. Die Werte wurden gemittelt.

(2) Für Lagerstätte 38 wurde nur Material aus Bohrkernen aufbereitet. Zur Kalkulation angenommener Wertmineralmengen wurde die jährliche Produktion von 5,2 Mio. t Kies und Sand angesetzt, welche dem derzeitigen jährlichen Kies-Abbau des Betreibers entspricht.

(3) Für die Lagerstätte 65, welche sich im Moment nicht im Abbau befindet, wurden die Daten der

Nachbarlagerstätte 19 mit einer Produktion von ca. 150.000 t Kies und Sand angenommen.

In Tabelle 25 stechen einige Lagerstätten hervor, bei denen die mögliche Nutzung der Schwerminerale aufgrund höherer Mengen und der Schwermineralverteilung in Erwägung gezogen werden könnte. Die Lagerstätte 08 weist mit Ilmenit, Zirkon, Kassiterit und Rutil gewinnbare Mengen an beibrechenden Schwermineralen auf.

Aus Lagerstätte 38 könnte Kassiterit produziert werden. Die Angabe von 5,2 Mio. t/a Kies- und Sand (Tabelle 25) und 83 t/a theoretisch gewinnbaren Kassiterits beruht auf der jährlichen Gesamtproduktion der Lagerstätte und den Ergebnissen aus dem Material der Bohrungen. Dass in Lagerstätte 38 Kassiterit gewonnen werden könnte, zeigt die Gegenüberstellung zu Probe 35 (gleicher Standort), bei welcher die „scharfe“ Dichtentrennung zu höheren Kassiteritkonzentrationen führte. Nach Aussage der Betreiber wurde der Kassiterit schon testweise angereichert und daraus pyrometallurgisch Zinn hergestellt.

Zu den Kassiterit-hoffigen zählt auch Lagerstätte 41. Zu dieser liegen jedoch nur Konzentrationen aus den Vorkonzentraten vor, aber keine Angaben über die Ausgangskonzentrationen, sodass eine Bilanzierung nicht durchführbar ist. Da die Schwermineralverteilung von Lagerstätte 41 ähnlich der von Lagerstätte 08 ist, die Lagerstätte ebenfalls in tertiären Sanden und Kiesen abgebaut wird, werden beide als vergleichbar dargestellt.

Tab. 25: Theoretische Jahresproduktion an Wertmineralen aus den untersuchten Lagerstätten (Jahresmengen an < 0,5 t/a wurden nicht berücksichtigt)

Id.-Nr.	Fe-Oxide	Ilmenit	Granat	Zirkon	Kassiterit	Rutil
	[t/a]					
01	37	27	40	2	–	5
02	34	42	359	2	–	22
04	78	37	14	24	–	10
05	16	23	9	1	–	1
06	–	–	2	–	–	–
07	1	20	1	15	–	24
08/12	12	238	1	138	14	146
16	2	5	–	7	–	11
18	21	20	100	1	–	5
19	17	18	6	2	1	3
21	42	117	148	6	1	15
22	31	35	85	1	–	11
23/24	63	151	116	22	–	32
31	5	17	9	3	–	3
32	32	45	124	8	–	10
33	1	3	1	–	–	1
38	4.273	2.861	1.654	1.599	83	2.996
39	13	16	43	–	–	4
40	34	43	167	5	–	16
42	35	10	8	1	–	1
43	567	295	318	39	–	61
44	84	91	30	11	–	12
45	22	42	158	10	–	11
46	46	76	456	4	–	30
48	246	335	731	74	–	110
49	93	92	31	10	–	16
60	5	471	18	40	7	243
62	13	12	7	2	–	2
64	331	565	24	4	–	19
65	7	5	4	–	–	1
66	0	5	–	2	0,7	2
67	15	94	83	9	–	15

¹⁾ Für die Lagerstätte 08/12 wurden zehn separate Anreicherungen durchgeführt (Reihenproben), von welchen nur zwei näher untersucht wurden. Die Werte wurden gemittelt.

²⁾ Für Lagerstätte 38 wurde nur Material aus Bohrkernen aufbereitet. Zur Kalkulation angenommener Wertmineralmengen wurde die jährliche Produktion von 5,2 Mio. t Kies und Sand angesetzt, welche dem derzeitigen jährlichen Kies-Abbau des Betreibers entspricht.

³⁾ Für die Lagerstätte 65, welche sich im Moment nicht im Abbau befindet, wurden die Daten der Nachbarlagerstätte 19 mit einer Produktion von ca. 150.000 t Kies und Sand angenommen.

Die Lagerstätte 60 weist hohe Gehalte an Ilmenit und Rutil mit Kassiteritanteilen auf. Mittels scharfer Dichtentrennung könnten Kassiterit und Ilmenit gezielt aufkonzentriert werden. Das hätte jedoch zur Folge, dass leichte Schwerminerale, wie Rutil, dabei in die Abgänge gedrückt werden müssten (siehe auch Abschnitt 6.6/6.7) und damit Verluste an Rutil auftreten.

Aus der Lagerstätte 43 wären anhand der Übersichtsdaten Fe-Oxide, Ilmenit und Granat gewinnbar. Die Trennungserfolge der Minerale in Abschnitt 6.4 waren jedoch nicht zufriedenstellend, sodass es als schwierig angesehen wird, diesbezüglich Prognosen abzugeben.

Die Lagerstätte 64 hat ein gewisses Potenzial zur Gewinnung von Fe-Oxiden und Ilmenit. Hier hat jedoch die in PERSCHL (2018) angewandte Magnetscheidung nicht den erwarteten Erfolg gebracht (Abschnitt 6.4). Die mikroskopischen Untersuchungen weisen darauf hin, dass dies ein lagerstättenspezifisches Problem ist und innige Verwachsungen von Ilmenit mit Hämatit (Ilmenit-Hämatit-Entmischung) die Fraktionierung in monomineralische Konzentrate von Ilmenit und Fe-Oxide verhindern.

Bei einer möglichen Aufbereitung von Granat aus den Lagerstätten 02, 46 und 48 zu Granat-Strahlsand muss berücksichtigt werden, dass dieser möglichst wenig Fe-haltige Minerale enthalten sollte. Im Falle der Lagerstätte 48 ist der Granat schon mit ca. 75 % in der paramagnetischen Fraktion < 0,3 A enthalten. Bei erfolgreicher Abtrennung von Ilmenit und Fe-Oxiden kann der Anteil an Granat wesentlich erhöht werden.

In Bezug auf eine mögliche Kassiteritgewinnung sind die Lagerstätten 08 und 41 die hoffigsten, da sie sich durch einen relativ hohen Kassiteritgehalt auszeichnen und aufgrund einer günstigen Schwermineralverteilung mittels Dichtentrennung, magnetischer und elektrostatischer Scheidung am besten aufkonzentrierbar sind.

Für die nachfolgende ökonomische Bewertung wurden nur die Lagerstätten in Betracht gezogen, die entsprechend der Datenlage auch abbauwürdige Kassiteritmengen aufwiesen. Dazu zählen die Lagerstätten 08, 38, 41 und 60.

6.6 Aufbereitungsstrategien

6.6.1 Aufbereitungsschemata

Wie die vorhergehenden Abschnitte aufzeigten, ist die Gewinnung von beibrechenden Schwermineralen aus Kies- und Sandlagerstätten abhängig vom lagerstättenspezifischen Schwermineralinventar und seinen stofflichen Eigenschaften. Die Schwermineralgehalte der Lagerstätten variierten sehr stark. Das wird deutlich, wenn man die Ergebnisse der Aufbereitung mittels Wendelscheider, Nassherd, Magnetscheidung und elektrostatischer Trennung (PERSCHL 2018) auswertet. Die Auftrennung von Schwermineralgemischen wurde zum Teil erzielt, das Ziel, monomineralische Fraktionen zu erzeugen, wurde jedoch nicht erreicht. Eine Aufbereitung von Schwermineralen aus Kies- und Sandlagerstätten muss deshalb immer lagerstätten- und mineralspezifisch ausgelegt werden.

Wie in Abschnitt 6.5.3 abschließend bemerkt, wurden für die nachfolgenden aufbereitungstechnischen und ökonomischen Bewertungen nur die Lagerstätten in Betracht gezogen, die entsprechend der Datenlage auch abbauwürdige Kassiteritmengen aufwiesen. Das sind die Lagerstätten **08, 38, 41** und **60**.

Für die Kassiteritanreicherung an diesen Standorten wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Wendelscheider
2. Nassherd 1. Stufe
3. Nassherd 2. Stufe („scharfe“ Abtrennung)
4. Nassmagnetscheider (Abtrennung ferromagnetischer Minerale bei 0,01–0,1 Tesla)
5. Trocknung der Konzentrate
6. Bandmagnetscheider (Abtrennung paramagnetischer Minerale bei > 1 Tesla)
7. Elektrostatische Abtrennung Zirkon (diamagnetische Fraktion bei höherer Temperatur)
8. Elektrostatische Trennung Rutil – Kassiterit (diamagnetische Fraktion bei Raumtemperatur)

Abbildung 113 zeigt das Schema der Aufbereitungsschritte, welches für die Anreicherung von Kassiterit an diesen vier Lagerstätten zur Anwendung kommen sollte. Die Dimensionierung der einzelnen Aufbereitungsstufen sowie die Wahl der Parameter müssen dabei für jede Lagerstätte individuell erfolgen. So kann z. B. die Abtrennung der

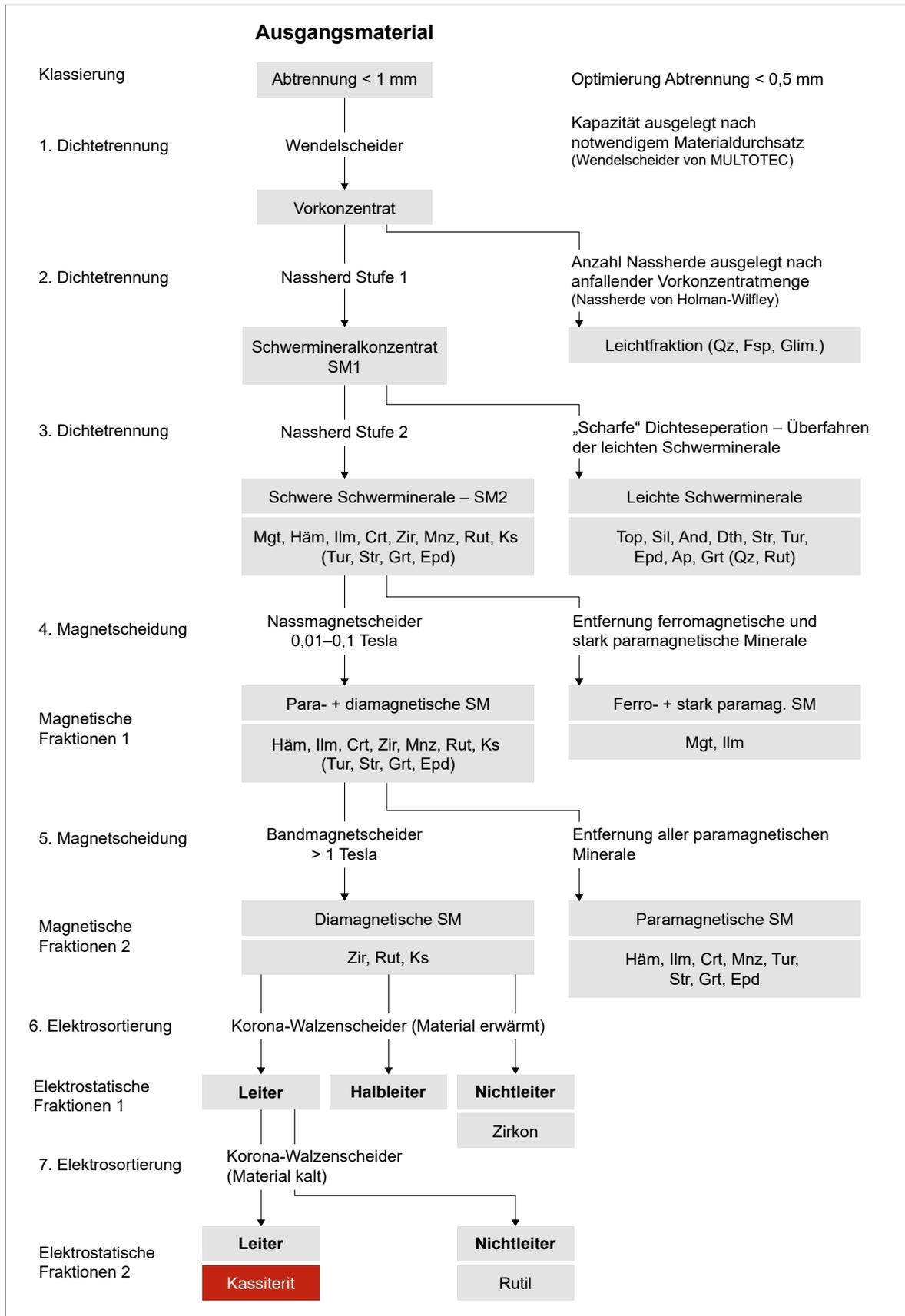


Abb. 113: Generelles Fließschema zur Anreicherung von Kassiterit aus den Lagerstätten 08, 38, 41 und 60

ferromagnetischen Fraktion in Lagerstätte 08, 41 und 60 entfallen, in Lagerstätte 38 hingegen ist sie zwingend notwendig.

Nach der Klassierung wird die Kombination aus Wendelscheider und zwei Nassherdstufen als notwendig erachtet. Die nach dem Wendelscheider angeordneten Nassherde (2. Dichtentrennung, Stufe 1) sollen eine zweite Voranreicherung mit Abtrennung der gesamten Leichtmineralfraktion beinhalten (Schwermineralkonzentrat SM1).

Die eigentliche „scharfe“ Abtrennung der leichten Schwerminerale findet in der dritten Aufbereitungsstufe auf einem kleineren Nassherd statt (Schwere Schwerminerale SM2). Dabei müssen alle Schwerminerale $< 4,5 \text{ g/cm}^3$ in die Abgänge gedrückt werden. Übrig bleibt ein Konzentrat, welches hauptsächlich Ilmenit, Magnetit/Hämatit, Monazit, Kassiterit, Zirkon und Rutil enthält. Diese Verfahrensweise wird als notwendig erachtet, um vor allem den in den Lagerstätten 08, 41 und 60 reichlich vorkommenden Topas durch „Überfahren“ drastisch zu reduzieren. Gelingt das nicht, kann Topas in den nachfolgenden Sortierstufen nicht mehr erfolgreich entfernt werden und führt letztendlich zur Verdünnung des angestrebten Kassiteritkonzentrates.

Den Nassherden schließt sich die Abtrennung der ferromagnetischen Fraktion, hauptsächlich Magnetit und stark paramagnetischer Ilmenit, mittels Nassmagnetscheider an (4. Magnetscheidung). Für die Lagerstätten 08, 41 und 60 wird sie, wie bereits erwähnt, aufgrund zu geringer Mengen als nicht notwendig erachtet.

Für die weitere Aufbereitung ist zunächst die Trocknung des Materials notwendig. Nach Trocknung der Konzentrate werden alle paramagnetischen Minerale mittels Bandmagnetscheider entfernt (5. Magnetscheidung). Die geläufigen Bandmagnetscheider weisen sehr hohe Feldstärken auf mit $> 1,0$ Tesla, sind sehr effektiv und wartungsarm. Außer einem elektrischen Antrieb sind weitere energieintensive Bauteile nicht notwendig. Die Aufgabe des Konzentrates erfolgt über eine Vibrationsrinne. In dieser Stufe werden lagerstättenspezifisch, in Abhängigkeit des Anteils an paramagnetischer Fraktion (pm), weitere Massenreduktionen und Anreicherungen um Faktoren zwischen 1,3 und 3,3 erreicht. Dabei werden hauptsächlich Ilmenit bzw. Ilmenit-bürtige Fe-Ti-Minerale sowie Beimengungen von Epidot, Turmalin, Staurolith, Granat und Monazit entfernt, die durch die vorhergehende „scharfe“ Dichteseperation nicht erfasst wurden. Die nach dem Bandmagnetscheider anfallenden Konzentrate sollten theoretisch nur noch Rutil, Zirkon und Kassiterit enthalten.

Tab. 26: Anzahl der notwendigen Spiralen bei gegebenem jährlichen Durchsatz

Lagerstätte	Durchsatz [t/a < 1 mm]	Einzelspiralen [Stk]	TRIPLE-Start [Stk]
38	2.426.000	420	140
08	250.000	48	16
41	165.000	36	12
60	340.000	60	20

Tab. 27: Geschätzte Anzahl der notwendigen Nassherde bei anfallendem Vorkonzentrat aus den Wendelscheidern

Lagerstätte	Vorkonzentrat [t/a < 1 mm]	Anzahl Nassherde – SM1 [Stk]	Nassherd „scharfe“ Anreicherung – SM2 [Stk]
38	121.300	15	3
08	12.500	2	1 (klein)
41	8.250	1	1 (klein)
60	17.000	2	1 (klein)

Die Auftrennung der drei Minerale im Korona-Walzenscheider (KW) erfolgt durch Abtrennung des Zirkons unter Aufheizung (6. Elektrosortierung warm, Nichtleiterfraktion) und des Rutil unter Raumtemperatur im kalten Zustand (7. Elektrosortierung kalt, Nichtleiterfraktion). Der Kassiterit wird als Leiter vom nichtleitenden Rutil getrennt.

6.6.2 Auslegung der Aufbereitungstechnik

Die Auslegung der Aufbereitungstechnik erfolgte auf der Grundlage der lagerstättenspezifischen Fördermengen und den Trennergebnissen, die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelt wurden. Nach Klassierung des Rohgutes sind als erste Aufbereitungsstufe Wendelscheider vorgesehen (Abb. 113). Die erforderliche Kapazität der Wendelscheider wurde in Abhängigkeit der jeweils betrachteten Lagerstätte mit 165.000 bis 2.454.000 t/a (Tabelle 22) nach den Angaben von PERSCHL (2018) anhand der zu erwartenden Mengen an Sandfraktion < 1 mm ausgelegt.

Der Voranreicherung durch die Wendelscheider kommt eine Hauptaufgabe zu, da diese die hauptsächlich Massenreduzierung übernehmen. Die Wendelscheider erlauben eine Reduzierung der jeweiligen Massenströme um den Faktor 20. Gleichzeitig findet eine Anreicherung der Schwermineralkonzentration um den Faktor 20 statt. Vorgeschlagen werden Wendelscheider der Firma MULTOTEC, welche langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Dichtentrennung haben. Deren Anlagen werden weltweit vertrieben und dienen in diversen Ländern sowohl der Schwermineralanreicherung als auch der Quarzsandreinigung.

Die von MULTOTEC vorgeschlagenen Wendelscheider wurden in Triple-Start-Bauweise mit drei ineinander verschachtelten Spiralen und jeweils sieben Gängen geplant. Bezüglich des notwendigen Durchsatzes an Fraktion < 1 mm wurde die folgende Anzahl an Wendeln bzw. Spiralen für die Lagerstätten ausgelegt:

Die Kapazität der Nassherde, als zweite Anreicherungsstufe, wurde an den Massenstrom aus den Wendelscheidern angepasst (Abbildung 113 Nassherde Stufe 1). Hierbei wurde auf die führende Firma HOLMAN-WILFLEY gesetzt. Bezüglich der Massenströme wären bei einer Kapazität

von 2,5 t/h für die Durchsätze bei 08, 41 und 60 jeweils ein bis zwei Herde notwendig. Bei 38 müssen entsprechend der anfallenden Vorkonzentrationen mehrere Nassherde parallel installiert werden (Tabelle 27). Die vorgeschlagenen Herde haben eine Deckfläche von 7,5 m² (1,6 x 4,9 m) und können korngrößenabhängig bis zu 2,5 t verarbeiten. Da durch die geringe Korngröße der Schwerminerale von < 200 µm ein geringerer Durchsatz zu erwarten ist, wurde eine Doppeldeckvariante gewählt. Die Auslegungsparameter müssen bei solch geringen Korngrößen durch Tests ermittelt werden.

Die folgende „scharfe“ Anreicherung bedarf nur noch ein bis drei Nassherde geringerer Kapazität, da die Menge an Aufgabegut mit zunehmender Anreicherung stetig abnimmt.

Der „scharfen“ Dichtentrennung schließt sich die Entfernung der ferromagnetischen Fraktion (fm) mittels Labor-Nassmagnetscheider im Feldstärkebereich zwischen 0,01 und 0,1 Tesla an.

Der Energiebedarf der sich an den Nassmagnetscheider anschließenden Trocknung wurde auf der Grundlage spezifischer Kennzahlen anhand der zu verdampfenden Wassermenge ermittelt.

Bandmagnetscheider und Korona-Walzenscheider wurden für einen Durchsatz von 0,5 t/d ausgelegt. Diese Kapazität reicht aus, um die berechneten Mengen an Schwermineralkonzentrationen durchzusetzen, und entspricht der Größe handelsüblicher Laboranlagen. Als Korona-Walzenscheider eignet sich hierbei eine Laboranlage der Firma HAMOS. Angesichts der Anlagengröße ist aus ökonomischen Gründen in Erwägung zu ziehen, die nach dem Nassherd lokal anfallenden Vorkonzentrate zentral zu erfassen und dort bis zum Kassiterit aufzubereiten.

6.7 Lagerstättenspezifische Aufbereitung

Die Darstellung der in den unterschiedlichen Aufbereitungsstufen erreichbaren Konzentrationen der einzelnen Minerale in Tabelle 29 bis Tabelle 32 beruhen sowohl auf experimentellen (Anreicherungsstufe 2) als auch auf theoretisch aus der Mineralzusammensetzung ermittelten Konzentrationen und Massenreduktionen (Anreicherungs-

stufen 3 bis 7). Eine Überprüfung der Ergebnisse muss durch entsprechende Tests an Großproben durchgeführt werden. In den Tabellen wurde das Verhalten der verschiedenen Schwerminerale bei der „scharfen“ Dichtentrennung durch verschiedene Farben überblicksmäßig dargestellt (siehe Beispiel Tabelle 28).

Tab. 28: Verhalten der verschiedenen Schwerminerale bei der „scharfen“ Dichtentrennung

Mineral wird konzentriert
Mineral wird konzentriert, gelangt aber auch in die Abgänge
Mineral wird in die Abgänge gedrückt

Tab. 29: Lagerstätte 38 – Anreicherungsfaktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen (Norm. – Normierung auf 100 %)

Notwendige Gesamt-anreicherung: Theor. Faktor: 25042	Anreicherungsstufe								
	Orig.	1	2	3	Norm.	4	5	6	7
		WS	1. NH	2. NH		Nassm.	Bandm.	KW	KW
Schwermineral						fm	pm	dia w.	dia k.
Fe-Oxide	0,1774	3,55	14,7	427	32,3				
Ilmenit	0,1114	2,23	9,2	268	20,3	30,0			
Rutil	0,1271	2,54	10,5	306	23,2	34,2	49,8	70,7	
Zirkon	0,0752	1,50	6,2	181	13,7	20,3	29,5		
Kassiterit	0,0040	0,08	0,33	9,6	9,6	14,2	20,7	29,3	100
Granat	0,0801	1,60	6,6	193					
Topas	0,0860	1,72	7,1	207					
Al-Silikate	0,1319	2,64	10,9	317					
Staurolith	0,0106	0,21	0,9	25					
Monazit/Xenotim	0,0035	0,07	0,3	8	0,6	0,9			
Epidot/Zoisit	0,0272	0,54	2,3	65					
Turmalin	0,0269	0,54	2,2	65					
Titanit	0,0392	0,78	3,3	94					
Amphibole	0,0845	1,69	7,0	203					
Ortho-Pyroxene	0,1457	2,91	12,1	351					
Apatit	0,0718	1,44	6,0	173					
Chromit	0,0016	0,03	0,1	4	0,3	0,4			
Relative Anreicherung durch Entfernung der fm-, pm-Fraktion, Zirkon und Rutil [%]						fm	pm	Zirkon	Rutil
						32,3	31,4	29,5	70,7
Massenreduktion gemäß Faktor auf [t/a]	2.426.000	121.300	29.229	1.008		650	431	293	83
Anreicherungs-faktor		20	4,1	29		1,55	1,51	1,47	3,51

Die größten Unsicherheiten in den Berechnungen zu den Tabelle 29 bis Tabelle 32 bestehen in den Annahmen, die zur Anreicherungsstufe „scharfe“ Anreicherung auf dem 2. Nassherd getroffen wurden. Die für eine exakte Prognose benötigten Vergleichsdaten fehlen, insbesondere das Abtrennverhalten einzelner Minerale in Abhängigkeit von Dichte und Korngröße. Der Aufbereitungsschritt ist mit dem „Überfahren“ der leichten Schwerminerale verbunden. Diese dient dazu, die leichten Schwerminerale soweit wie möglich aus dem Kassiteritkonzentrat zu entfernen. Alle Minerale mit Dichte < 4,5 g/cm³ müssen möglichst quantitativ in die Abgänge gedrückt werden. Die Fe-Oxide, Ilmenit, Zirkon, Monazit und Chromit reichern sich über-

durchschnittlich an, gehen aber ebenfalls mit in die Abgänge. Kassiterit als schwerstes Mineral wird komplett weiter angereichert (Annahme, da es das schwerste Mineral ist). In Tabelle 29 bis Tabelle 32 sind die scharfen Anreicherungen daran ersichtlich, dass Konzentrationen > 100 % auch bei den Schwermineralen > 4,5 g/cm³ berechnet wurden. Um die nachfolgende weitere Konzentrierung theoretisch weiterzuverfolgen, wurde eine Normierung auf 100 % nach der 3. Anreicherungsstufe durchgeführt. Diese beinhaltet die Konzentrationen der schweren Schwerminerale gemäß abnehmenden Mineraldichten unter der Voraussetzung, dass der Kassiterit aufgrund seiner hohen Dichte vollständig übernommen wurde.

Tab. 30: Lagerstätte 08 – Anreicherungs-faktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen

Notwendige Gesamt-anreicherung:	Anreicherungsstufe								
	Orig.	1	2	3	Norm.	4	5	6	7
		WS	1. NH	2. NH		Nassm.	Bandm.	KW	KW
Theor. Faktor: 13251						fm	pm	dia w.	dia k.
Schwermineral	[%]								
Fe-Oxide	0,0026	0,05	0,8	15	0,8	0,8			
Ilmenit	0,1066	2,13	31,4	627	32,0	32,0			
Rutil	0,0641	1,28	18,8	377	3,1	3,1	4,9	6,5	
Zirkon	0,0559	1,12	16,4	328	15,3	15,3	24,4		
Kassiterit	0,0075	0,15	2,2	44,4	44,4	44,4	70,7	93,5	100
Granat	0,0005	0,01	0,1	3	0,1	0,1			
Topas	0,0469	0,94	13,8	276					
Al-Silikate	0,0163	0,33	4,8	96					
Staurolith	0,0070	0,14	2,0	41	1,0	1,0			
Monazit/Xenotim	0,0055	0,11	1,6	32	1,6	1,6			
Turmalin	0,0240	0,48	7,1	141	0,7	0,7			
Chromit	0,0032	0,06	0,9	19	0,9	0,9			
Relative Anreicherung durch Entfernung der fm-, pm-Fraktion, Zirkon und Rutil [%]						fm	pm	Zirkon	Rutil
						0,0	37,2	24,4	6,5
Massenreduktion gemäß Faktor auf [t/a]	250.000	12.500	850	42,5		42,5	25,1	17,8	14,9
Anreicherungs-faktor		20	15	20		1,00	1,69	1,41	1,20

6.7.1 Lagerstätte 38

In Tabelle 29 wurden die Anreicherungsstufen, die Massenreduktion, Anreicherungsfaktoren und resultierenden Mineralkonzentrationen für die Fraktion < 1 mm aus der Lagerstätte 38 dargelegt. Die Originalkonzentrationen der Schwerminerale im Aufgabegut (Orig.) wurden aus den in Stufe 2 analysierten Konzentrationen und den durch PERSCHL (2018) bestimmten Schwergutmengen ermittelt. Nach der 2. Anreicherungsstufe ist die

scharfe Dichtentrennung (kalkuliert mit Faktor > 29) zwingend notwendig, um die leichten Schwerminerale möglichst vollständig abzutrennen. Dass dies möglich ist, zeigt die Auswertung der Ergebnisse der Probe 35KL, für die eine solche scharfe Dichtentrennung nachgewiesen wurde.

Die folgenden Anreicherungsfaktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen ergeben sich mineralspezifisch aus den Anreicherungsstufen zur Entfernung der ferromagnetischen Fraktion

Tab. 31: Lagerstätte 60 – Anreicherungsfaktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen

Notwendige Gesamtanreicherung:	Anreicherungsstufe								
	Orig.	1	2	3	Norm.	4	5	6	7
		WS	1. NH	2. NH		Nassm.	Bandm.	KW	KW
Theor. Faktor: 39066						fm	pm	dia w.	dia k.
Schwermineral	[%]								
Fe-Oxide	0,0004	0,01	0,07	1	0,2	0,2			
Ilmenit	0,1321	2,64	24,05	481	65,8	65,8			
Rutil	0,0770	1,54	14,01	280	13,7	13,7	44,4	59,5	
Zirkon	0,0156	0,31	2,84	57	7,8	7,8	25,3		
Kassiterit	0,0026	0,05	0,47	9,3	9,3	9,3	30,3	40,5	100,0
Granat	0,0062	0,12	1,14	23					
Topas	0,2557	5,11	46,53	931					
Al-Silikate	0,0131	0,26	2,39	48					
Staurolith	0,0042	0,08	0,77	15					
Monazit/Xenotim	0,0024	0,05	0,43	9	1,2	1,2			
Epidot/Zoisit	0,0097	0,19	1,77	35					
Turmalin	0,0208	0,42	3,79	76					
Titanit	0,0016	0,03	0,29	6					
Amphibole	0,0018	0,04	0,34	7					
Apatit	0,0019	0,04	0,34	7					
Chromit	0,0042	0,08	0,76	15	2,1	2,1			
Relative Anreicherung durch Entfernung der fm-, pm-Fraktion, Zirkon und Rutil [%]						fm	pm	Zirkon	Rutil
						0,0	69,2	25,3	59,5
Massenreduktion gemäß Faktor auf [t/a]	340.000	17.000	1.868	93		93	27,6	19,0	6,9
Anreicherungsfaktor		20	9,1	20		1,00	3,37	1,45	2,70

(im weiteren Sinne Fe-Oxide) und der nachfolgenden paramagnetischen Fraktion durch den Bandmagnetscheider. Mittels Bandmagnetscheider können Ilmenit, Hämatit, Monazit und Chromit entfernt werden. Für die Herstellung eines monomineralischen Kassiteritkonzentrates muss die Gesamtanreicherung mit dem Faktor 25042 erfolgen. Dieser Anreicherungsfaktor entspricht der Kassiteritanreicherung vom Originalsand < 1 mm bis zum fertigen Konzentrat.

Die Anreicherungsfaktoren nach der 1. und 2. Nassherdstufe wurden abgeleitet aus den Daten von Perschl (2018) und der Probe 35. Nach Abtrennung von Zirkon und Rutil bleibt theoretisch ein Kassiteritkonzentrat übrig, mit der Masse von ca. 83 t. Es wurden hier keine Verluste durch die Dichtesortierung und paramagnetische Fraktion mit einbezogen. Diese werden bei den Kostenschätzungen in Abschnitt 6.8 berücksichtigt.

6.7.2 Lagerstätte 08

In Tabelle 30 sind die Anreicherungsschritte, die Massenreduktion, Anreicherungsfaktoren und resultierenden Mineralkonzentrationen für die Fraktion < 1 mm aus Lagerstätte 08 gezeigt. In Ermangelung von Vergleichsdaten wurde für die 3. Anreicherungsstufe ein Anreicherungsfaktor von 20 angenommen. Da die Konzentration aus der 1. Nassherdstufe schon relativ hoch ist, ergeben sich bereits in der 2. Nassherdstufe sehr hohe Kassiteritkonzentrationen mit Verunreinigungen durch Ilmenit und Zirkon. Die ferromagnetische Fraktion wurde aufgrund zu geringer Gehalte nicht mit kalkuliert.

Die Entfernung des Ilmenits in der 5. Anreicherungsstufe führt nach Tabelle 30 schon zu Kassiteritkonzentraten, welche nach weitergehender Reduzierung des Zirkongehaltes nahezu verkaufswürdig wären. Nach Entfernung von Zirkon und Rutil werden theoretisch ca. 14,9 t/a Kassiteritkonzentrat erzeugt. Aufbereitungsverluste werden später im Rahmen der Kostenschätzungen in Abschnitt 6.8 berücksichtigt. Für den Erhalt von monomineralischem Kassiteritkonzentrat muss die Anreicherung über den gesamten Prozess mit dem Faktor 13251 erfolgen.

Nach Entfernung von Zirkon und Rutil bleibt theoretisch ein Kassiteritkonzentrat übrig mit der

Masse von ca. 14,9 t. Verluste durch die Aufbereitung werden bei den Kostenschätzungen in Abschnitt 6.8 berücksichtigt.

6.7.3 Lagerstätte 60

Tabelle 31 führt die Anreicherungsschritte, die dabei erzielbaren Massenreduktionen und Anreicherungsfaktoren sowie die resultierenden Mineralkonzentrationen für die Fraktion < 1 mm aus Lagerstätte 60 auf. Als kritisch könnte sich bei dieser Lagerstätte der sehr hohe Gehalt an Topas erweisen (fast die Hälfte nach dem 1. NH), der unbedingt durch „scharfe“ Anreicherung minimiert sein muss. Die Entfernung der fm-Fraktion entfällt. Die Probe zeichnet sich weiterhin bei moderaten Zirkon- und Rutilgehalten durch einen sehr hohen Ilmenitgehalt von > 60 % (nach 2. NH) aus. Eine Konzentration auf verkaufsfähige Produkte kann erst durch Abtrennung des Rutils in der letzten Anreicherungsstufe erreicht werden.

Für eine komplette Konzentrierung des Kassiterits muss eine Gesamtanreicherung mit dem Faktor 39066 erfolgen. Nach Abtrennung von Rutil sollte ein Kassiteritkonzentrat übrigbleiben, mit der Masse von ca. 6,9 t/a.

6.7.4 Lagerstätte 41

In Tabelle 32 wurden die Anreicherungsschritte, die Massenreduktion, Anreicherungsfaktoren und resultierenden Mineralkonzentrationen für die Fraktion < 1 mm aus Lagerstätte 41 berechnet. Für die Probe existieren keine Ausgangsdaten zur eingesetzten Menge an Fraktion < 1 mm (Orig.). Da die Probe und Lagerstätte ähnlich der von 08 ist, wurden ähnliche Parameter zugrunde gelegt und wurde die Anreicherung bezüglich der mineralspezifischen Eigenschaften berechnet. Die Anreicherung von Kassiterit ist nach der 1. Nassherdstufe schon sehr hoch mit 4,2 %. Es wurde hier mit einem Anreicherungsfaktor von zehn durch die 2. Nassherdstufe gerechnet. Der Anteil Topas in der 1. Nassherdstufe ist moderat, sollte aber nach der 2. Nassherdstufe minimiert sein. Eine Entfernung der fm-Fraktion kann vernachlässigt werden. Ein verkaufsfähiges Kassiteritkonzentrat mit 76 % würde nach Tabelle 32 schon nach Abtrennung des Zirkons möglich sein, dann aber mit entsprechendem Rutilanteil.

Tab. 32: Lagerstätte 41 – Anreicherungs-faktoren, Konzentrierungen und Massenreduktionen bezüglich der ermittelten Anreicherungsstufen

Schwermi- neral	Anreicherungsstufe								
	Orig.	1	2	3	Norm.	4	5	6	7
		WS	1. NH	2. NH		Nassm.	Bandm.	KW	KW
		fm	pm	dia w.		dia k.			
	[%]								
Fe-Oxide			0,8	8	0,7	0,7			
Ilmenit			36,8	368	30,7	30,7			
Rutil			14,4	144	12,0	12,0	17,8	21,7	
Zirkon			14,5	145	12,1	12,1	17,9		
Kassiterit			4,2	42,3	42,3	42,3	62,7	76,3	97,4
Granat			0,6	6					
Topas			15,0	150					
Al-Silikate			2,4	24					
Staurolith			4,6	46					
Monazit/Xenotim			1,3	13	1,1	1,1			
Turmalin			3,9	39					
Chromit			0,6	6	0,5	0,5			
Pyrit			0,7	7	0,6	0,6	0,9	1,1	1,4
Relative Anreicherung durch Entfernung der fm-, pm-Fraktion, Zirkon und Rutil [%]						fm	pm	Zirkon	Rutil
						0,0	32,4	17,9	21,7
Massenreduktion gemäß Faktor auf [t/a]	165.000	8.250	561	28		28	17,9	14,0	9,9
Anreicherungs-faktor		20	14,7	20		1,00	1,56	1,28	1,41

Anhand der Ergebnisse in Abschnitt 6.4 sind vermutlich geringe Mengen an Pyrit im Kassiteritkonzentrat zu erwarten. Pyrit kann aufgrund seiner hohen Dichte, der magnetischen und elektrischen Eigenschaften erfahrungsgemäß nicht mehr aus dem Kassiteritkonzentrat entfernt werden.

Die in Tabelle 32 ermittelte Menge Kassiteritkonzentrat von 9,9 t/a beruht auf Annahmen, die aus den Daten der Probe 08 abgeleitet wurden. Mit dieser Kassiteritmenge wurden auch die lagerstättenspezifischen Kostenschätzungen durchgeführt.

6.8 Ökonomische Bewertung

In der ökonomischen Bewertung sind die in 6.7 dargestellten Aufbereitungsszenarios mit investiven Kosten, Betriebskosten und Erlösen hinterlegt.

Die Kostenschätzungen beruhen sowohl auf den Ergebnissen der Schwermi-neralanalysen und den daraus abgeleiteten Aussagen als auch auf den in den Abschnitten 6.6 und 6.7 getroffenen Annahmen. Die vorliegende Kostenschätzung kann deshalb nur eine erste, sehr grobe Orientierung zur Wirtschaftlichkeit der Gewinnung von beibrechenden Wertmineralen aus Kies- und Sandlagerstätten geben, im Speziellen zur Gewinnung von Kassiterit.

In die ökonomischen Betrachtungen flossen die Erlöse ein, die auf der Grundlage der in Abschnitt 6.7 ermittelten jährlichen Kassiteritmengen sowie des gegenwärtigen Weltmarktpreises berechnet wurden. Die Preise für Kassiteritkonzentrate richten sich einerseits nach dem Zinninhalt, andererseits wird ein Abschlag für Transport- und Raffineriekosten von 5 bis 10 % angerechnet (Net Smelter Return – NSR).

Gehandelt werden hauptsächlich Konzentrate mit > 60 % Zinngehalt, was einer Kassiteritkonzentration von > 76 % entspricht. Im vorliegenden Fall wird eine Kassiteritkonzentration von > 89 % gefordert. Deshalb wurde die Aufbereitung auf möglichst hohe Kassiteritkonzentrate ausgerichtet.

Für die Wertkalkulation wurde einerseits ein Kassiterit-bürtiger Zinnpreis von 17.430 €/t

Tab. 33: Orientierende Kostenschätzung zur Gewinnung von Kassiterit aus den Lagerstätten 38, 08, 41 und 60

1. Orientierende Kostenschätzung						
Nr.	Lagerstätte (ID)		38	08	41	60
1.1	Rohstoffvorlauf (Sandfraktion < 1 mm)	[t/a]	2.426.000	250.000	165.000	340.000
	Wertstoffinhalt (Kassiterit)	[t/a]	83,3	14,4	9,5	6,9
	gewinnbare Menge Kassiterit (90 %)	[t/a]	75,0	13,0	8,6	6,2
1.2	Erzielbare Erlöse					
	Weltmarktpreis abzüglich NSR ¹⁾	[€/t]	15.678	15.678	15.678	15.678
	Verkaufserlös Kassiteritkonzentrat	[€/a]	1.176.054	203.931	134.538	97.583
	Weltmarktpreis abzüglich NSR ²⁾	[€/t]	20.326	20.326	20.326	20.326
	Verkaufserlös Kassiteritkonzentrat	[€/a]	1.523.810	264.233	174.320	126.438
1.3	Betriebsdaten					
	Durchsatz Rohstoffvorlauf	[t/a]	2.426.000	250.000	165.000	340.000
	Zwei Schichten, Mo. – Fr., Feiertage ausgenommen					
	Anlagenauslastung	[%]	80	80	80	80
	Aktive Betriebstage pro Jahr	[d]	204	204	204	204
	Aktive Betriebsstunden pro Jahr	[h]	3.264	3.264	3.264	3.264
	Erforderliche Anlagenkapazität (WS)	[t/h]	743,2	76,6	50,6	104,2
1.4	Energieaufnahme					
	Wendelscheider	[kW]	525	77,5	37,5	77,5
	Nassherde Stufe 1 (1. NH)	[kW]	90,0	6,0	6,0	6,0
	Nassherde Stufe 2 (2. NH)	[kW]	9,0	1,5	1,5	1,5
	Nassmagnetscheider (Nassm.)	[kW]	2,0	fällt weg	fällt weg	fällt weg
	Trockner	[kW]	121,6	8,0	5,2	17,3
	Bandmagnetscheider (Bandm.)	[kW]	1,0	1,0	1,0	1,0
	Korona-Walzenscheider (KW)	[kW]	5,0	5,0	5,0	5,0
	Elektrische Leistung gesamt	[kW]	752,6	96,5	55,7	105,8

¹⁾ Preisermittlung aus <http://www.asianmetal.com> vom 01.11.2020 abzüglich 10 % NSR

²⁾ Preisangabe aus DERA (2021) vom 24.03.2021 abzüglich 10 % NSR

(Stand 01.11.2020, <http://www.asianmetal.com>) und ein derzeit aktueller mit 22.584 €/t (Stand 24.03.2021) angesetzt (DERA 2021). Abzüglich des NSR (10 %) ergeben sich daraus 15.678 €/t Sn (Stand 01.11.2020, <http://www.asianmetal.com>) und 20.326 €/t Sn (Stand 24.03.2021).

Wurden die Aufbereitungsverluste bei der Herstellung der Kassiteritkonzentrate in Abschnitt 6.7 noch nicht berücksichtigt, so fließen sie nun in die ökonomischen Betrachtungen mit ein. Dabei wird von einer Verlustrate in Höhe von 10 % des Gesamtgehaltes von Kassiterit im Rohgut ausgegangen (Tabelle 33, 1.2).

Die jährliche Anlagenauslastung wurde mit 3.264 Betriebsstunden pro Jahr im Doppelschichtbetrieb angesetzt, bei 80 % Anlagenauslastung und jeweils einer Person zur Anlagenführung/-bedienung pro Schicht (Tabelle 33, 1.3).

Der Energiebedarf der kompletten Aufbereitung wurde bestimmt aus den Energieverbräuchen der einzelnen Verbraucher (Slurry-Pumpen, Antriebseinheiten Nassherde, Magnetscheider, Elektrostatische Aufladung) und dem Energiebedarf der Trocknungseinheit. Der Energieverbrauch des Trockners wurde abgeleitet aus LAYER et al. (1999), wobei der spezifische Energieverbrauch eines Trockners inklusive aller Energieverluste

auf den zu verdampfenden Wasseranteil bezogen wird. Für die nachfolgenden Kostenschätzungen wurde nach der Nassmagnetscheidung bzw. nach der 2. Nassherdstufe ein Wasseranteil in Höhe von 20 % (Tabelle 33, 1.4) angesetzt.

Die Auslastung von Bandmagnetscheider und Korona-Walzenscheider, selbst als Laboranlagen, ist nur temporär gegeben, da die Menge der erzeugten Konzentrate unter der möglichen Kapazität der Laboranlagen liegt. Auf eine zeitliche Aufschlüsselung der Energiekosten von Bandmagnetscheider und Korona-Walzenscheider wurde verzichtet.

Die in Tabelle 34 dargestellten Investitions- und Betriebskosten wurden auf der Grundlage der lagerstättenbezogenen Massenbilanzen sowie der Dimensionierung der maßgeblichen Aufbereitungsanlagen ermittelt. Notwendige Investitionen müssen für Wendelscheider, Nassherde, Nassmagnetscheider (nur 38), Trockner und Zwischenlager (Silo) für die produzierten Schwermineralkonzentrate getätigt werden. Zur Erzeugung eines verkaufsfähigen Kassiteritkonzentrates sind Bandmagnetscheider und Korona-Walzenscheider notwendig (Tabelle 34).

Wie bereits erwähnt, ist angesichts der pro Lagerstätte jährlich anfallenden geringen Konzen-

Tab. 34: Schätzung der Investment- und Betriebskosten

2.1 Hauptausrüstungen						
Nr.	Beschreibung		38	08	41	60
2.1.1	Komplette Wendelscheidereinheit inkl. Slurry-Pumpe, Verteiler, Hydrozyklon und Wendelscheiderbank (WS)	[€]	1.484.000	160.000	119.000	216.000
2.1.2	Nassherdeinheit inkl. Slurry-Pumpe und Verteiler (1. NH)	[€]	450.000	94.000	94.000	94.000
2.1.3	Nassherd klein „scharfes“ anreichern (2. NH)	[€]	69.000	14.000	14.000	14.000
2.1.4	Nassmagnetscheider (Nassm.)	[€]	60.000	kein fm	kein fm	kein fm
2.1.5	Trockner	[€]	60.000	60.000	60.000	60.000
2.1.6	Silo für getrocknetes Zwischenprodukt	[€]	25.000	15.000	15.000	15.000
2.1.7	Bandmagnetscheider inkl. Nebenaggregate	[€]	25.000	25.000	25.000	25.000
2.1.8	Korona-Walzenscheider inkl. Aggregate	[€]	100.000	100.000	100.000	100.000
Zwischensumme Hauptausrüstung		[€]	2.273.000	468.000	427.000	524.000

2.2 Planung und Montage						
Nr.	Beschreibung		38	08	41	60
2.2.1	Montage inkl. Rohrleitung und Nebenaggregate, BMSR und Verkabelung (40 % von HA)	[€ psch]	909.200	88.400	72.000	110.800
2.2.2	Erschließung, Infrastruktur (Strom, Wasser, Abwasser)	[€ psch]	100.000	50.000	50.000	50.000
2.2.3	Planungsleistungen	[€ psch]	120.000	60.000	60.000	60.000
Zwischensumme Planung u. Montage			1.129.200	198.400	182.000	220.800
2.2.4	Gesamtinvestiton		3.402.200	666.400	609.000	744.800
	Angenommene Nutzungsdauer 10 Jahre					
2.2.5	Jährliche AfA	[€/a]	340.220	66.640	60.900	74.480

2.3 Betriebskosten						
Nr.	Beschreibung		38	08	41	60
2.3.1	Energieverbrauch	[kWh/a]	2.456.486	314.976	181.805	345.331
	Strompreis (0,27 EUR/kWh)	[€/kWh]	0,27	0,27	0,27	0,27
	Kosten Elektroenergie	[€/a]	663.251	85.044	49.087	93.239
2.3.2	Personalkosten					
	Betreiben der Anlage	VbE	4	1	1	1
	Bruttolohn inkl. Nebenkosten und Overhead	[€/a]	85.000	85.000	85.000	85.000
	Jährliche Personalkosten		340.000	85.000	85.000	85.000
Zwischensumme Betriebskosten			[€/a] 1.003.251	170.044	134.087	178.239

2.4 Zusammenstellung der jährlichen Gesamtkosten						
Beschreibung		38	08	41	60	
AfA	[€/a]	340.220	66.640	60.900	74.480	
Betriebskosten	[€/a]	1.003.251	170.044	134.087	178.239	
Erlöse (Sn-Preis 17.430 €/t)	[€/a]	1.176.054	203.931	134.538	97.583	
Erlöse (Sn-Preis 22.584 €/t)	[€/a]	1.523.810	264.233	174.320	126.438	
Betriebsergebnis (Sn-Preis 17.430 €/t)	[€/a]	-167.417	-32.753	-60.449	-155.137	
Betriebsergebnis (Sn-Preis 22.484 €/t)	[€/a]	180.339	27.549	-20.667	-126.282	

Tab. 35: Betriebsergebnisse ohne Investmentkosten von Bandmagnet- und Korona-Walzenscheider

Beschreibung		38	08	41	60
Betriebsergebnis (Sn-Preis 17.430 €/t)	[€/a]	-29.947	-1.915	-32.079	-116.103
Betriebsergebnis (Sn-Preis 22.484 €/t)	[€/a]	317.809	58.387	7.703	-87.248

tratmengen zu prüfen, ob eine zentrale Anlage (Trocknung, Magnetscheidung, elektrostatische Trennung) aus Kostengründen günstiger wäre.

In Auswertung der Betriebsergebnisse ist nur für die Lagerstätten 08 und 38 bei entsprechend hohem Kassiterit-bürtigem Zinnpreis ein positives Betriebsergebnis zu erzielen.

Ohne Investanteil für Bandmagnet- und Korona-Walzenscheider und ohne Trocknung würde das Betriebsergebnis die in Tabelle 35 berechneten Werte ergeben.

Demnach ist ersichtlich, dass bei der Lagerstätte 60 keine Möglichkeit besteht, ein positives Betriebsergebnis zu erzielen. Im Falle von 38, 08 und 41 wäre bei entsprechendem Sn-Preis ein kostendeckendes Betriebsergebnis möglich. Die notwendige Konzentrierung des Kassiterits müsste dann jedoch in Lohnarbeit durch eine zentrale Aufbereitung durchgeführt werden. Die Transportkosten zur zentralen Aufbereitungsfirma wurden nicht berücksichtigt. Hierbei sind ebenso Rücklagen für zukünftige Investitionen nicht enthalten.

Ob das berechnete Betriebsergebnis ausreicht, um ein marktfähiges Produkt herzustellen, ist mit den vorliegenden Daten nicht zu prognostizieren.

Die Daten aus Tabelle 35 lassen abschätzen, dass eine zentrale Aufbereitung gegenwärtig kaum finanzielle Vorteile bringt.

In Tabelle 36 wurden die jährlichen Mengen an Kassiterit berechnet, die notwendig wären, um in den entsprechenden Lagerstätten bei gegebenem Materialdurchsatz und Zinnpreis ein kostendeckendes Betriebsergebnis zu erwirtschaften.

Nur im Falle der Lagerstätten 08 und 38 wäre bei entsprechend hohem Zinnpreis ansatzweise ein kostendeckendes Betriebsergebnis zu erzielen. In allen anderen Lagerstätten ist mit finanziellen Verlusten zu rechnen, da die gewinnbare Menge an Kassiterit nicht ausreicht, um kostendeckend zu arbeiten.

Tabelle 37 gibt an, welche durchschnittliche Kassiteritkonzentration die Fraktion < 1 mm enthalten müsste, um ein kostendeckendes Betriebsergebnis zu erzielen.

Daraus ist ableitbar, dass für einen kostendeckenden Betrieb im Rohgut < 1 mm pauschal ein Mindestgehalt an Kassiterit von 0,01 % für die untersuchten Lagerstätten ansetzbar sein sollte. Diese Werte könnten auf ähnliche Lagerstätten in der Umgebung übertragbar sein.

Tab. 36: Notwendige zu gewinnende jährliche Kassiteritmengen für ein kostendeckendes Betriebsergebnis

Beschreibung		38	08	41	60
Basis Sn-Preis 17.430 €/t	[t/a]	85,6	15,1	12,4	16,1
Basis Sn-Preis 22.484 €/t	[t/a]	66,1	11,6	9,6	12,4

Tab. 37: Notwendige Kassiteritkonzentration in der Fraktion < 1 mm bei den entsprechenden jährlichen Durchsätzen für ein kostendeckendes Betriebsergebnis

Beschreibung		38	08	41	60
Basis Kassiteritpreis 17.430 €/t Sn	[%]	0,0035	0,0060	0,0075	0,0047
Basis Kassiteritpreis 22.484 €/t Sn	[%]	0,0027	0,0047	0,0058	0,0037

7 Zusammenfassung

Mit dem Ziel, beibrechende Wertminerale zu gewinnen, wurden 40 Kies- und Sandlagerstätten in Deutschland im Einzugsgebiet der Elbe, des Rheins, der Donau, des Mains und der Weser auf ihren Schwermineralgehalt hin untersucht. Im gleichen Zuge war zu ermitteln, ob sich daraus ökonomische Vorteile für die Betreiber der Lagerstätten ergeben könnten. Im Speziellen wurden die Minerale Magnetit, Ilmenit, Granat, Zirkon, Rutil und Kassiterit betrachtet. Die jeweiligen Stichproben wurden aus dem laufenden Betrieb der Kieswerke entnommen und durch Dichtentrennung, Magnetscheidung und elektrostatische Trennung zu Schwermineralkonzentraten aufbereitet.

Die mineralogische und partikelspezifische Analyse der Schwermineralzusammensetzung erfolgte per QEMSCAN, optischer Auflicht- und Durchlichtmikroskopie. Es wurden alle relevanten Schwerminerale mikroskopisch und fotografisch erfasst.

Das Ziel, monomineralische Proben zu erzeugen, war aufgrund von zu geringen Schwermineralmengen, Unstetigkeiten in der Aufbereitungstechnologie und Verwachsungen der Schwerminerale untereinander nicht möglich.

Generell zeichnen sich regionalgeologisch sehr unterschiedliche Wertmineralkonzentrationen und -zusammensetzungen ab. Im Einzugsgebiet der Donau, Isar, Inn und des Oberrheins dominiert Granat mit 45 bis 75 % am Schwermineralanteil. Höhere natürliche Rutil- und Zirkonkonzentrationen wurden nur in den tertiären Lagerstätten angetroffen. Ilmenit und Fe-Ti-Umwandlungsprodukte kommen in vielen Lagerstätten mit bis zu 45 % Masseanteil vor. Im Zuge der bisherigen Aufbereitungstests konnten daraus jedoch keine industriell verwertbaren Produkte erzeugt werden. Die Wertmineralbilanzen der untersuchten Lagerstätten wurden aufgrund der anfallenden jährlichen Mengen und zu erzielenden Preise als ökonomisch wenig relevant eingeschätzt.

Aufgrund erhoffter ökonomischer Vorteile und seines Wertmineralpreises wurde der Fokus vorliegender Untersuchungen auf Lagerstätten gerichtet, in welchen Kassiterit als Schwermineral nachgewiesen wurde. Die Kassiterit-höffigen Lagerstätten befinden sich im unmittelbaren nörd-

lichen Erzgebirgsvorland und werden hauptsächlich in tertiären Sanden und Kiesen abgebaut, in denen die betrachteten Wertminerale in vorkonzentrierter Form vorliegen können. Vier Lagerstätten wurden durch PERSCHL (2018) beprobt und im Rahmen vorliegender Studie in Hinsicht auf ihren Kassiteritgehalt sowie die theoretisch abbaubaren Mengen näher betrachtet. Für jede dieser Lagerstätten wurden detaillierte lagerstättenspezifische Aufbereitungsstrategien entwickelt und Massenbilanzen erstellt und wurde eine ökonomische Bewertung vorgenommen.

Anhand der untersuchten Stichproben und der darauf basierenden ökonomischen Bewertung der Kosten für die Aufbereitung nach unterschiedlichen Kriterien ist eine ökonomische Gewinnung von Kassiterit kaum möglich. Für jede der vier betrachteten Lagerstätten wird ein Minimum an Kassiterit von ca. 0,01 Masse-% benötigt (Fraktion < 1 mm), um ein positives Betriebsergebnis zu erzielen. Dieser Wert wird in drei der betrachteten Lagerstätten nicht erreicht. Für die Lagerstätte 08 wäre ein positives Betriebsergebnis denkbar bei langfristig höheren Zinn-Weltmarktpreisen.

Zusätzlich wurde die Möglichkeit betrachtet und bewertet, die Vorkonzentrate aus den einzelnen Lagerstätten in einer zentralen Aufbereitungsanlage weiter zu verarbeiten. Auch hier ist die Wirtschaftlichkeit nur bedingt gegeben.

Aufgrund der lagerstättenspezifischen Unterschiede, insbesondere in Hinsicht auf Schwermineralgehalt und -zusammensetzung sowie das Vorliegen von Mineralverwachsungen, sollten auf jeden Fall weitere Tests mit dem Ziel durchgeführt werden, das Ausbringen einzelner Schwermineralfraktionen, insbesondere des Kassiterits, deutlich zu verbessern.

Alternativ in Frage käme dafür z. B. die passive Kassiteritgewinnung mittels Mattengewinnung nach der Methode, die von der Firma Löka zur Schwermineralgewinnung eingesetzt wird. Die durch Löka durchgeführte Methode der scharfen Dichteanreicherung per Nassherd führte zu hohen Zirkon- und Kassiteritkonzentrationen aus mehreren Lagerstätten (35, 68). Für dieses Verfahren können jedoch bisher keine Bilanzen berechnet werden. Diese Verfahrensweise sollte in Zukunft trotzdem diskutiert werden, da sie technologisches Potenzial beinhaltet.

8 Literatur

ALLENBERG, A., WOLF, D., ANDERSEN, J., ROLLINSON, G., BORG, G., PRÄGER, R. & STEDINGK, K. (2012): Untersuchung der Schwermineral-Spektren in Terrassenablagerungen der Elbe, Saale und Weißen Elster (Sachsen-Anhalt). *Mitteilungen zu Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt*, Band 17; S. 95–128; Halle.

BÖHME, R. & THALHEIM, K. (2002): Gold und Schwerminerale aus den Elbeschottern der Kiesgrube in Dresden-Zschieren/Sachsen. – In: *Gold in Deutschland und Österreich, Beiträge der Arbeitstagung im Museum Korbach am 9. und 10. September 2000*, S. 155–160; Korbach.

BUCH, T., MARBLER, H., GOLDMANN, S., HAUBRICH, F. & TRINKLER, M. (2018): Investigation of tin and tantalum ores from the Rondônia Tin Province, northern Brazil, to develop optimized processing technologies. *DERA-Rohstoffinformationen* 37: 160 S.; Berlin.

DERA (2021): Preismonitor Februar 2021. – Herausgeber: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 14 S.; Berlin.

DOPPLER, G., HEISSIG, K. & REICHENBACHER, B. (2005): Die Gliederung des Tertiärs im süddeutschen Molassebecken. *Newsletters on Stratigraphy*, 41 (1–3) 359–375; Berlin-Stuttgart.

EISSMANN, L. (1975): Das Quartär der Leipziger Tieflandsbucht und angrenzender Gebiete um Saale und Elbe. Modell einer Landschaftsentwicklung am Rande der europäischen Kontinentalvereisung. – *Schriftenreihe geol. Wiss.*, Berlin Nr. 2; 228 S.; Berlin.

EISSMANN, L. (1997): Das quartäre Eiszeitalter in Sachsen und Nordostthüringen. – *Altenburger naturwiss. Forsch.* 8: S. 1–98; Altenburg.

ELSNER, H. (2006): Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden – Teil 12 Schwerminerale, Ilmenit, Leukoxen, Rutil, Zirkon, Monazit und Xenotim, Staurolith, Granat, Chromit, Magnetit. *Geologisches Jahrbuch*, Reihe H, Heft 13, Herausgeber: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 143 S., 80 Tabellen, 4 Fotografien, 2. Abbildungen; Hannover.

ELSNER, H. (2010): Heavy Minerals of Economic Importance (Ilmenite and Leucoxene, Rutile, Zircon, Monazite and Xenotime, Kyanite, Sillimanite and Andalusite, Staurolite, Garnet, Chromite, Magnetite, Cassiterite, Columbite-Tantalite, Wolframite and Scheelite); *Assessment Manual*, 218 pp.; Hannover.

ELSNER, H. & LEHMANN, U. (2014): Das Gold der Eder – Geschichte mit Zukunft? *Geologisches Jahrbuch Hessen*, 138, 5–13; Wiesbaden.

ERDMANNSDÖRFFER, O. H. (1938): Eklogit im Schwarzwald und seine retrograde Umwandlung. *The Journal of Geology*, Vol. 46, No. 3, Part 2, 438–447 pp.; Chicago.

ERZLABOR (2020): Mündliche Mitteilungen über die analytischen Grenzen der QEMSCAN und dessen automatischer Auswertesoftware.

FELIX-HENNINGSSEN, P., SPIES, E.-D. & ZAKOSEK, H. (1991): Genese und Stratigraphie periglazialer Deckschichten auf der Hochfläche des Ost-Hunsrücks (Rheinisches Schiefergebirge. Eiszeitalter u. Gegenwart, Vol. 41, 56–69; Hannover.

GD-NRW (2021): Persönliche Mitteilungen zu Kiessandlagerstätten in Nordrhein-Westfalen. *Geologischer Dienst von Nordrhein-Westfalen*.

GK1000 (1997): Geologische Übersichtskarte 1:1000000 von Deutschland – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR; Hannover.

GROSSE, R. & FISCHER, J. (1989): Zu Altersstellung und Verlauf der frühelsterkaltzeitlichen Flüsse in der Leipziger Tieflandsbucht und des angrenzenden Raumes. *Mauritiana (Altenburg)* 12, 2; S. 205–224; Altenburg.

HENNINGSSEN, D. (1980): Schwerminerale vulkanischer Herkunft in quartären Flußablagerungen der Weser und Leine, *E&G Quaternary Sci. J.*, 30; S. 63–72; Hannover.

HLNUG (2021): Persönliche Mitteilungen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie – Dezernat G4 Rohstoffgeologie und Geoenergien.

HOMANN, W. (2011): Die sedimentären Goldvorkommen im Variszischen Gebirge; T. 4: Gold und

Schwerminerale aus dem Eisenberg-Edergebiet und benachbarten Regionen des Ostrheinischen Schiefergebirges (German). S. 44–52; Dortmund.

JAKOBS (2021): Spezifische Angebote zu Nassherden der Firma Holman-Wilfley zu den Lagerstätten 08FL, 38MB, 41NO und 60STB. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH; Freiberg.

JUNGE, F. W., DUCKHEIM, W., MORGENSTERN, P. & MAGNUS, M. (2001): Sedimentologie und Geochemie obereozän-unteroligozäner Typusprofile aus dem Weißelsterbecken (Tagebau Espenhain); *Mauritiana* (Altenburg) 18, 1, ISSN 0233-173X; S. 25–59; Altenburg.

KLOSTERMANN, J. (1992): Das Quartär der Niederrheinischen Bucht. 200 S.; Krefeld.

LAGB (2021): Persönliche Mitteilungen zu Kies- und Sandlagerstätten in Sachsen-Anhalt. Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.

LAHUSEN, L. G. & MORTEANI, G. (1987): The cassiterite deposit of Büchig (F.R.G.). *Erzmetall* 40 (1), S. 32–39.

LAYER, G., MATULA, F., SALLER, A. & RAHN, R. (1999): Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse. Forschungsbericht – Forschungsstelle für Energiewirtschaft München, Auftraggeber Umweltbundesamt, 203 S.; München.

LBEG (2021): Persönliche Mitteilungen zur Kies- und Sandlagerstätte Stolzenau in Niedersachsen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen.

LBGR (2021): Persönliche Mitteilungen zur Kies- und Sandlagerstätte Mühlberg in Brandenburg. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg.

LfULG-SACHSEN (2021): Persönliche Mitteilungen zu Kiessandlagerstätten in Sachsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen.

LfU-BAYERN (2021): Persönliche Mitteilungen zu Kiessandlagerstätten im Südraum Bayerns. Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LGB-RLP (2021): Persönliche Mitteilungen zu Kiessandlagerstätten in Rheinland-Pfalz. Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz.

LGRB-BW (2021): Persönliche Mitteilungen zu Kiessandlagerstätten in Baden-Württemberg. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg.

LITHOLEX (2009): Mittelrhein-Hauptterrassen-Formation. Datensatz-Nr. 1000004.

LITTLE, L., WIESE, J., BECKER, M., MAINZA, A. & ROSS, V. (2016): Investigating the effects of particle shape on chromite entrainment at a platinum concentrator. *Minerals Engineering*, Volumes 96–97; <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.003>; S. 46–52; Elsevier.

LOSSEN, K. A. (1882): Über die Abhängigkeit der Ausfüllungsmassen der Unterharzer Erz-, Fluss- und Quarzgangspalten von der Lage dieser Spalten zu dem Granitstocke des Rammbergs und seiner Contactzone. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* Band 34 Heft 1 (1882), S. 660–663; Stuttgart.

MANGE, M. & WRIGHT, D. (2007): *Heavy Minerals in Use*. Elsevier Science, Vol. 58, 1st Edition, 1328 S.; Elsevier.

MAURER, H. & BUCHNER, E. (2007): Rekonstruktion fluvialer Systeme der Oberen Süßwassermolasse im Nordalpinen Vorlandbecken SW-Deutschlands. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 158/2, S. 249–270; Stuttgart.

MENGELING, H. (1986) mit Beiträgen von Büchner, K.-H., Fauth, H., Frisch, U., Imamoglu, A. E., Langer, A., Lebküchner, H., Schlüter, W. & Tüxen, J.: Erläuterungen zu Blatt 3514 Vörden.– *Geol. Kt. Niedersachsen*. <1 : 25 000>, Erl., 3514: 125 S., 35 Abb., 5 Tab., 7 Kt.; Hannover.

MÜLLER, A., ORTMANN, R. & EISSMANN, L. (1988): Die Schwerminerale im fluviatilen Quartär des mittleren Saale-Elbe-Gebietes – Ein Beitrag zur mitteleuropäischen Flussgeschichte. *Mauritianum, Altenburger Naturwissenschaftliche Forschungen* 4, 70 S.; Altenburg.

- MULTOTEC (2021): Spezifische Angebote zu Wendelscheideranlagen der Lagerstätten 08FL, 38MB, 41NO und 60STB. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH; Freiberg.
- NORDNORDWEST/WIKIPEDIA (2021): Flusseinzugsgebiete Deutschland. – URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deutschland_Flussgebietseinheiten.png. – URI: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode> [Stand 29.11.2022].
- PERSCHL, M. (2018): Aufbereitung von beibrechenden Wertmineralen – Rohstoffwirtschaftliche Studie zu den Aufbereitungs- und Nutzungsmöglichkeiten von Wertmineralen (Schwerminerale und Edelmetalle), die bei der Gewinnung und Aufbereitung von Kiesen und Sanden in Kies- und Sandwerken in Deutschland beibrechend mitgewonnen werden können. Abschlussbericht Phase I, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), 40 S.; Aachen.
- POSTEL, A. W. & LUFKIN, H. M. (1942): Additional data on the Delesse-Rosiwal method. *American Mineralogist*, 27 (5): 335–343; Philadelphia.
- RÖSLER, H. J. & LANGE, H. (1975): Geochemische Tabellen. 2. überarbeitete Auflage, 700 S., 314 Bilder, 1 Beilage; Leipzig.
- SCHADE, M. (2001): Gold in Thüringen – Thüringer Wald, Schiefergebirge, Frankenwald. Thüringer Landesanstalt für Geologie, 386 S.; Weimar.
- SHALA, B. (2001): Jungquartäre Talgeschichte des Rheins zwischen Krefeld und Dinslaken. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 231 S.; Düsseldorf.
- STANDKE, G., ESCHER, D., FISCHER, J. & RASCHER, J. (2010): Das Tertiär Nordwestsachsens – Ein geologischer Überblick. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). – URL: <http://www.publikationen.sachsen.de>; 162 S.; Freiberg. [Stand 08.02.2021].
- STEDINGK, K. (2002): Rohstoffbericht 2002 – Verbreitung, Gewinnung und Sicherung mineralischer Rohstoffe in Sachsen-Anhalt. Mitteilung zur Geologie von Sachsen-Anhalt. Beiheft 5, 173 S.; Halle, Calbe.
- THOSTE V. (1974): Die Niederterrassen des Rheins vom Neuwieder Becken bis in die Niederrheinische Bucht. – Dissertation, Univ. Köln: 130 S.; Köln.
- TLUBN (2021): Persönliche Mitteilungen zu Kies-sandlagerstätten in Thüringen. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz.
- TURK, P. G., LOHSE, H. H., SCHÜRMAN, K. & LIPPOLD, H. J. (1984): Petrographische und Kalium-Argon-Untersuchungen an basischen tertiären Vulkaniten zwischen Westerwald und Vogelsberg. *Geologische Rundschau*, Vol. 73, S. 599–617; Stuttgart.
- UNGER, H. J. (1983): Versuch einer Neugliederung der Oberen Süßwassermolasse. – *Geologisches Jahrbuch*, A 67: S. 5–35; Stuttgart.
- UNGER, H.J. (1989): Die Lithozonen der Oberen Süßwassermolasse Südostbayerns und ihre vermutlichen zeitlichen Äquivalente gegen Westen und Osten. – *Geologica Bavarica*, 94: S. 195–237; München.
- VOIGT, T. & MEISEL, S. (2014): Metamorpher Glaukonit in altpaläozoischen Sedimenten des Schwarzbürger Antiklinoriums (Thüringer Schiefergebirge). *Beitr. Geol. Thüringen N.F.* 21 S. 99–114; Jena.
- WEIDENFELLER, M. (2009): Mittelrhein-Hauptterrassen-Formation. Litholex, Datensatz-Nr. 1000004.
- WOLF, L. & SCHUBERT, G. (1992): Die spättertiären bis elstereiszeitlichen Terrassen der Elbe und ihrer Nebenflüsse und die Gliederung der Elster-Kaltzeit in Sachsen: und weitere Arbeiten zur Geologie und Lagerstättegeologie Sachsens. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Bereich Boden und Geologie, Vol. 4, 72 S.; Freiberg.
- WOTRUBA, H. (2009): Gewinnung von Schwermineralen aus Kies- und Sandlagerstätten. *Aggregates International* 04/2009. – URL: http://publications.rwth-aachen.de/record/132007/files/24_Gewinnung_von_Schwermineralen_aus_Kies-_und_Sandlagerstätten_2009.pdf; S. 6–15; Aachen.

Spezialliteratur Mikroskopie und Mineralogie (Kapitel 6.2)

- ABDALLA, H. M., MATSUEDA, H., OBEID, M. A. & TAKAHASHI, R. (2008): Chemistry of cassiterite in rare metal granitoids and the associated rocks in the Eastern Desert, Egypt. – In: *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 103(5), S. 318–326.
- AHMED, S. S., MIAH, M. Y., QUMRUZZAMANA, C., ZAMAN, M. N., ALAM, A. K. M. B. & BISWAS, P. K. (2010): Alteration and Exsolution Characteristics of Ilmenites of Moheskhal Island, Chittagong, Bangladesh. – In: *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research* 45(1), S. 17–26.
- ALLEN, F. M. & BUSECK, P. R. (1988): XRD, FTIR, and TEM studies of optically anisotropic grossular garnets. – In: *American Mineralogist* 73 (5-6), S. 568–584.
- ANAND, R. R. & GILKES, R. J. (1984): Weathering of ilmenite in a lateritic pallid zone. – In: *Clays and Clay Minerals* 32, S. 363–374.
- ANTAO, S. M. (2015): Crystal chemistry of birefringent hydrogrossular. – In: *Physics and Chemistry of Minerals* 42(6), S. 455–474.
- AUBRECHT, R., SÝKORA, M., UHER, P., LI, X.-H., YANG, Y.-H., PUTIŠ, M. & PLAŠIENKA, D. (2017): Provenance of the Lunz Formation (Carnian) in the Western Carpathians, Slovakia: Heavy mineral study and in situ LA-ICP-MS U-Pb detrital zircon dating. – In: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 471, S. 233–253.
- BALAN, E., NEUVILLE, D. R., TROCELLIER, P., FRITSCH, E., MULLER, J. P. & CALAS, G. (2001): Metamictization and chemical durability of detrital zircon. – In: *American Mineralogist* 86(9), S. 1025–1033.
- BAUMANN, L. & LEEDER, O. (1991): Einführung in die Auflichtmikroskopie. – Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, 408 S.; Leipzig.
- BEIRAU, T., NIX, W. D., BISMAYER, U., BOATNER, L. A., ISAACSON, S. G. & EWING, R. C. (2016): Anisotropic mechanical properties of zircon and the effect of radiation damage. – In: *Physics and Chemistry of Minerals* 43(9), S. 627–638.
- BOFFA BALLARAN, T., CARPENTER, M. A., GEIGER, C. A. & KOZIOL, A. M. (1999): Local structural heterogeneity in garnet solid solutions. – In: *Physics and Chemistry of Minerals* 26(7), S. 554–569.
- CARROLL, D. (1953): Weatherability of zircon. – In: *Journal of Sedimentary Research* 23(2), S. 106–116.
- CHENG, Y., SPANDLER, C., KEMP, A., MAO, J., RUSK, B., HU, Y. & BLAKE, K. (2019): Controls on cassiterite (SnO₂) crystallization: Evidence from cathodoluminescence, trace-element chemistry, and geochronology at the Gejiu Tin District. – In: *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* 104(1), S. 118–129.
- COIL, F. (1933): Chemical composition of leucocene in the permian of oklahoma. – In: *The American Mineralogist* 18, S. 62–65.
- CORFU, F., HANCHAR, J. M., HOSKIN, P. W. & KINNY, P. (2003): 16. Atlas of zircon textures. – In: *Zircon. Reviews in mineralogy and geochemistry* 53, S. 469–500.
- COX, F. C. (1969): Inclusions in garnet: discussion and suggested mechanism of growth for syntectonic garnets. – In: *Geological Magazine* 106(1), S. 57–62.
- CRESSEY, G. (1978): Exsolution in almandine-pyrope-grossular garnet. – In: *Nature*, 271(5645), S. 533–534.
- DILL, H.G., MELCHER, F., FÜSSL, M. & WEBER, B. (2006): Accessory minerals in cassiterite: A tool for provenance and environmental analyses of colluvial-fluvial placer deposits (NE Bavaria, Germany). – In: *Sedimentary Geology* 191, S. 171–189.
- EVANS, A. M. (Ed.) (1982): Metallization Associated with Acid Magmatism. Vol. 6. – 385 S., John Wiley & Sons Ltd.; Chichester – New York – Brisbane – Toronto – Singapore.
- FEDO, C. M., SIRCOMBE, K. N. & RAINBIRD, R. H. (2003): 10. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. – In: *Zircon. Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53, S. 277–304.

- FINCH, R. J. & HANCHAR, J. M. (2003): Structure and chemistry of zircon and zircon-group minerals. – In: *Zircon. Reviews in mineralogy and geochemistry* 53, S. 1–25.
- FLEISCHER, M. (1937): The relation between chemical composition and physical properties in the garnet group. – In: *American Mineralogist* 22 (6), S. 751–759.
- FRANDSEN, C., BURTON, B. P., RASMUSSEN, H. K., MCENROE, S. A. & MØRUP, S. (2010): Magnetic clusters in ilmenite-hematite solid solutions. – In: *Physical Review B* 81, 24423-1-224423-5.
- GEIGER, C. A. (2016): A tale of two garnets: The role of solid solution in the development toward a modern mineralogy. – In: *American Mineralogist* 101(8), S. 1735–1749.
- GOMES, O. D. M. & PACIORNIK, S. (2008): Iron ore quantitative characterisation through reflected light-scanning electron co-site microscopy. – In: *International Congress for Applied Mineralogy, Brisbane, 9*, S. 699–702.
- GREAVES, G., STEVENSON, B. G. & TAYLOR, R. G. (1971): Magnetic Cassiterites from Herberton, North Queensland, Australia. – In: *Economic Geology* 66, S. 480–487.
- GREY, I. E., STEINIKE, K. & MACRAE, C. M. (2013): Kleberite, $\text{Fe}^{3+}\text{Ti}_6\text{O}_{11}(\text{OH})_5$, a new ilmenite alteration product, from Königshain, northeast Germany. – In: *Mineralogical Magazine* 77, S. 45–55.
- GREY, I. E., WATTS, J. A. & BAYLISS, P. (1994): Mineralogical nomenclature: pseudorutile revalidated and neotype given. – In: *Mineralogical Magazine* 58, S. 597–600.
- GRIGSBY, J. D. (1990): Detrital magnetite as a provenance indicator. – In: *Journal of Sedimentary Research* 60(6), S. 940–951.
- GRUBB, P. L. C. & HANNAFORD, P. (1966): Magnetism in Cassiterite: Its Source and Paragenetic Significance as Exemplified by a Prominent Malayan Tin Deposit. – In: *Mineralium Deposita* 2, S. 148–171.
- HANAOR, D. A. & SORRELL, C. C. (2011): Review of the anatase to rutile phase transformation. – In: *Journal of Materials Science* 46(4), S. 855–874.
- HARRISON, R. J. & PUTNIS, A. (1999): The magnetic properties and crystal chemistry of oxide spinel solid solutions. – In: *Surveys in Geophysics* 19(6), S. 461–520.
- HARRISON, R. J. & REDFERN, S. A. T. (2001): Short- and long-range ordering in the ilmenite-hematite solid solution. – In: *Physics and Chemistry of Minerals* 28, S. 399–412.
- HARRISON, R. J., REDFERN, S. A. T. & SMITH, R. I. (2000): In-situ study of the R3 to R3c phase transition in the ilmenite-hematite solid solution using time-of-flight neutron powder diffraction. – In: *The American Mineralogist* 85, S. 194–205.
- HATANO, Y. (1976): Paragenesis of oxide minerals in some emery ores. – In: *Mining Geology* 26(135), S. 13–19.
- HINTON, R. W. & UPTON, B. G. J. (1991): The chemistry of zircon: variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. – In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55(11), S. 3287–3302.
- HOSKING, K. F. G., STANLEY, C. J. & CAMM, G. S. (1988): The Occurrence, Nature and Genesis of Wood Tin in South-West England. – In: *Transactions of the Royal Geological Society of Cornwall* 21, S. 153–212.
- HUGO, V. E. & CORNELL, D. H. (1991): Altered ilmenites in Holocene dunes from Zululand, South Africa: petrographic evidence for multistage alteration. – In: *South African Journal of Geology* 94(5/6), S. 365–378.
- ISHIHARA, S. (1977): The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. – In: *Mining geology* 27(145), S. 293–305.
- JÄRVELILL, J.-I., KALLASTE, T., KLEESMENT, A., PAJUSAAR, S. & RAUKAS, A. (2019): Provenance of heavy minerals in the Quaternary deposits of the Lemme outcrop, Estonia, based on optical microscopy, X-ray diffractometry and scanning electron microscope microanalysis. – In: *Estonian Journal of Earth Sciences* 68(2), S. 76–87.
- KASAMA, T., MCENROE, S. A., OZAKI, N., KOGURE, T. & PUTNIS, A. (2004): Effects of nanoscale exsolution in hematite-ilmenite on the acquisition of

- stable natural remanent magnetization. – In: *Earth and Planetary Science Letters* 224, S. 461–475.
- KEMPE, U., TRINKLER, M., PÖPPL, A. & HIMCINSCHI, C. (2016): Coloration of natural zircon. – In: *The Canadian Mineralogist* 54, S. 635–660.
- KRIPPNER, A., MEINHOLD, G., MORTON, A. C. & VON EYNATTEN, H. (2014): Evaluation of garnet discrimination diagrams using geochemical data of garnets derived from various host rocks. – In: *Sedimentary Geology* 306, S. 36–52.
- LINDSLEY, D. H. (1965): Iron-Titanium Oxides. – In: *Carnegie Institution of Washington Yearbook*, 1964, S. 144–148 (zit. in: Lawrence J. Corsa III (1977): *The Oxidation of Ilmenite: a Kinetic Study*. – Thesis MSci, Blacksburg/Virginia, 70 S.).
- LITTLE, W. M. (1960): Inclusions in cassiterite and associated minerals. – In: *Economic Geology* 55(3), S. 485–509.
- LUCASSEN, F., KOCH-MÜLLER, M., TARAN, M. & FRANZ, G. (2013): Coupled H and Nb, Cr, and V trace element behavior in synthetic rutile at 600 C, 400 MPa and possible geological application. – In: *American Mineralogist* 98(1), S. 7–18.
- LUFKIN, J. L. (1977): Chemistry and mineralogy of wood-tin, Black Range, New Mexico. – In: *American Mineralogist* 62(1-2), S. 100–106.
- LUVIZOTTO, G. L., ZACK, T., TRIEBOLD, S. & VON EYNATTEN, H. (2009): Rutile occurrence and trace element behavior in medium-grade metasedimentary rocks: example from the Erzgebirge, Germany. – In: *Mineralogy and Petrology* 97(3-4), S. 233–249.
- MANGE, M. A. & MAURER, H. F. W. (1991): *Schwerminerale in Farbe*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 148 S.
- MANNING, P. G. (1967): The optical absorption spectra of the garnets almandine-pyrope, pyrope, and spessartine and some structural interpretations of mineralogical significance. – In: *The Canadian Mineralogist* 9(2), S. 237–251.
- MCCARTY, K. F., MONTI, M., NIE, S., SIEGEL, D. A., STARODUB, E., EL GABALY, F., MCDANIEL, A. H., SHAVORSKIY, A., TYLISZCZAK, T., BLUHM, H., BARTELT, N. C. & DE LA FIGUERA, J. (2014): Oxidation of magnetite (100) to hematite observed by in situ spectroscopy and microscopy. – In: *The Journal of Physical Chemistry C* 118(34), S. 19768–19777.
- MACKENZIE, W.S. & GUILFORD, C. (1981): *Atlas gesteinsbildender Minerale in Dünnschliffen*. – 99 S., Ferdinand Enke Verlag; Stuttgart.
- MEINHOLD, G. (2010): Rutile and its applications in earth sciences. – In: *Earth-Science Reviews* 102(1-2), S. 1–28.
- MORTON, A. C., WHITHAM, A. G. & FANNING, C. M. (2005): Provenance of Late Cretaceous to Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: Integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data. – In: *Sedimentary Geology* 182, S. 3–28.
- MÜCKE, A. (1989): *Anleitung zu Erzmikroskopie mit einer Einführung in die Erzpetrographie*. – 187 S., Ferdinand Enke Verlag; Stuttgart.
- MÜCKE, A. (2016): Magnetit, Hämatit, Goethit, Lepidokrokit, Limonit und deren wechselseitige Beziehung. – In: *Der Aufschluss* 67(1), S. 16–27.
- MÜCKE, A. & CABRAL, A. R. (2005): Redox and nonredox reactions of magnetite and hematite in rocks. – In: *Chemie der Erde – Geochemistry* 65(3), S. 271–278.
- MÜCKE, A. & CHAUDHURI, J. N. B. (1991): The continuous alteration of ilmenite through pseudorutile to leucoxene. – In: *Ore Geology Reviews* 6, S. 25–44.
- MURAO, S. & FURUNO, M. (1991): Silica-bearing cassiterite from the Akenobe Mine. – In: *Mining Geology* 41(1), S. 25–28.
- NASDALA, L., HANCHAR, J. M., KRONZ, A. & WHITEHOUSE, M. J. (2005): Long-term stability of alpha particle damage in natural zircon. – In: *Chemical Geology* 220(1-2), S. 83–103.
- NEIVA, A. M. (1996): Geochemistry of cassiterite and its inclusions and exsolution products from tin and tungsten deposits in Portugal. – In: *The Canadian Mineralogist*, 34(4), S. 745–768.

- NOVAK, G. A. & GIBBS, G. V. (1971): The crystal chemistry of the silicate garnets. – In: *The American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* 56(5-6), S. 791–825.
- PAVLOVA, G. G., PALESSKY, S. V., BORISENKO, A. S., VLADIMIROV, A. G., SEIFERT, T. & PHAN, L. A. (2015): Indium in cassiterite and ores of tin deposits. – In: *Ore Geology Reviews*, 66, S. 99–113.
- PETERMANN, T. & SEIFERT, T. (2014): Trace element-rich cassiterite ('wood tin') from Central Saxony, Germany. – In: *EGU General Assembly Conference Abstracts, Geophysical Research Abstracts* 16, S. 6578.
- PETROCHENKOV, D. A. & CHISTYAKOVA, N. I. (2011): Mineralogy of Wood Tin from the Dzhalinda deposit. – In: *New Data on Minerals* 46, S. 55–60.
- PICHLER, H. & SCHMITT-RIEGRAF, C. (1987): *Gesteinsbildende Minerale im Dünnschliff*. – 230 S., Ferdinand Enke Verlag; Stuttgart.
- PIRARD, E. & LEBICHOT, S. (2004): Image Analysis of Iron Oxides under the Optical Microscope. – In: *Applied Mineralogy: Developments in Science and Technology* 1, S. 153–156.
- PIRKLE, F. L. & PODMEYER, D. A. (1993): Zircon: Origin and uses. – In: *SME Transactions (Society for Mining, Metallurgy & Exploration)* 292, S. 9.
- PRACEJUS, B. (2015): *The Ore Minerals under the Microscope - An Optical Guide. Atlases in Geoscience* 3. – 2. Aufl., 1098 S., Elsevier Science & Technology, Amsterdam etc.
- PRICE, G. D. (1981): Diffusion in the titanomagnetite solid solution series. – In: *Mineralogical Magazine* 44(334), S. 195–200.
- RABBIA, O. M. & HERNÁNDEZ, L. B. (2012): 10. Mineral chemistry and potential applications of natural-multi-doped hydrothermal rutile from porphyry copper deposits. – In: *Rutile: Properties, Synthesis and Application*; Low, I.-M. (Ed.), S. 209–228.
- RAMDOHR, P. (1960): *Die Erzminerale und ihre Verwachsungen*. – 3. Aufl., 1089 S., Akademie-Verlag; Berlin.
- ROBINSON, P., HARRISON, R. J., McENROE, S. A. & HARGRAVES, R. B. (2004): Nature and origin of lamellar magnetism in the hematite-ilmenite series. – In: *The American Mineralogist* 89, S. 725–747.
- SALATA, D. (2013): Garnet provenance in mixed first-cycle and poly-cycle heavy-mineral assemblages of the Ropianka and Menilite formations (Skole Nappe, Polish Flysch Carpathians): constraints from chemical composition and grain morphology. – In: *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 83, S. 161–177.
- SALJE, E. K. H., CHROSC, J. & EWING, R. C. (1999): Is "metamictization" of zircon a phase transition? – In: *American mineralogist* 84(7–8), S. 1107–1116.
- SCHÄFER, J. & DÖRR, W. (1997): Heavy-mineral analysis and typology of detrital zircons; a new approach to provenance study (Saxothuringian flysch, Germany). – In: *Journal of Sedimentary Research* 67(3), S. 451–461.
- SEKIYA, T., YAGISAWA, T., KAMIYA, N., DAS MULMI, D., KURITA, S., MURAKAMI, Y. & KODAIRA, T. (2004): Defects in anatase TiO₂ single crystal controlled by heat treatments. – In: *Journal of the Physical Society of Japan* 73(3), S. 703–710.
- SHANNON, R. D., PASK, J. A. (1964): Topotaxy in the anatase-rutile transformation. – In: *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* 49(11–12), S. 1707–1717.
- SHIGA, Y. (1988): Silician magnetite from the Kamaishi mine. – In: *Mining Geology* 38(211), S. 437–440.
- STRUNZ, H. (1982): *Mineralogische Tabellen*. – 8. Aufl., 621 S., Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.; Leipzig.
- SUGGATE, S. M. & HALL, R. (2014): Using detrital garnet compositions to determine provenance: a new compositional database and procedure. – In: *Geological Society, London, Special Publications* 386(1), S. 373–393.
- TAKÉUCHI, Y. & HAGA, N. (1976): Optical anomaly and structure of silicate garnets. – In: *Proceedings of the Japan Academy* 52(5), S. 228–231.

- TAN, W., LIU, P., HE, H. P., WANG, C. Y. & LIANG, X.L. (2016): Mineralogy and Origin of Exsolution in Ti-rich Magnetite from Different Magmatic Fe-Ti Oxide-Bearing Intrusions. – In: *The Canadian Mineralogist* 54, S. 539–553.
- TEMPLE, A. K. (1966): Alteration of Ilmenite. – In: *Economic Geology* 61, S. 695–714.
- TEUFER, G. & TEMPLE, A. K. (1966): Pseudorutile – a new mineral intermediate between ilmenite and rutile in the alteration of ilmenite. – In: *Nature* 211, S. 179–181.
- TOLOSANA-DELGADO, R., VON EYNATTEN, H., KRIPNER, A. & MEINHOLD, G. (2018): A multivariate discrimination scheme of detrital garnet chemistry for use in sedimentary provenance analysis. – In: *Sedimentary Geology* 375, S. 14–26.
- TRIEBOLD, S. (2011): The geochemistry of detrital rutile. Implications for sedimentary provenance studies and the reconstruction of metamorphic conditions. – 307 S., Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen (unveröffentlicht).
- TRIEBOLD, S., LUVIZOTTO, G. L., TOLOSANA-DELGADO, R., ZACK, T. & VON EYNATTEN, H. (2011): Discrimination of TiO₂ polymorphs in sedimentary and metamorphic rocks. – In: *Contributions to Mineralogy and Petrology* 161(4), S. 581–596.
- TRÖGER, W. E. (1956): *Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. Teil 1 Bestimmungstabellen.* – 147 S., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung; Stuttgart.
- VAISH, A. K., NAYAK, B., MEHROTRA, S. P. & GUPTA, R. C. (2007): The Ni-Cr-Co bearing magnetite ore of Nagaland, India – its mineralogical characteristics. – In: *Journal of Metallurgy and Materials Science* 49(4), S. 215–220.
- VON GRUENEWALDT, G., KLEMM, D. D., HENCKEL, J. & DEHM, R. M. (1985): Exsolution features in titanomagnetites from massive magnetite layers and their host rocks of the upper zone, eastern Bushveld Complex. – In: *Economic Geology* 80(4), S. 1049–1061.
- WAERENBORGH, J. C., FIGUEIRAS, J., MATEUS A. & CONÇALVES, M. (2002): Nature and mechanism of ilmenite alteration: a Mössbauer and X-ray diffraction study of oxidized ilmenite from the Beja-Acebuches Ophiolite Complex (SE Portugal). – In: *Mineralogical Magazine* 66(3), S. 423–432.
- WAGNER, P. A. (1926): Wood tin-gel replacement of cassiterite. – In: *Economic Geology* 21(7), S. 727–731.
- WINCHELL, H. (1958): The composition and physical properties of garnet. – In: *The American Mineralogist* 43, S. 595–600.
- WORT, M. J. & JONES, M. P. (1980): X-ray diffraction and magnetic studies of altered ilmenite and pseudorutile. – In: *Mineralogical Magazine* 43, S. 659–663.
- ZACK, T. & KOOIJMAN, E. (2017): Petrology and geochronology of rutile. – In: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 83(1), S. 443–467.
- ZHANG, M., SALJE, E. K., FARNAN, I., GRAEME-BARBER, A., DANIEL, P., EWING, R. C., CLARK, A. M. & LEROUX, H. (2000): Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study. – In: *Journal of Physics: Condensed Matter* 12(8), S. 1915–1925.



Anhang

Anlage 1: Beprobte Lagerstätten, Bundesland, Flusseinzugsgebiet	158
Anlage 2: Probeliste mit Kürzeln für Schliffe und Fraktionen	159
Anlage 3: QEMSCAN-Mineral-Datenbank	161

Beprobte Lagerstätten, Bundesland, Flusseinzugsgebiet

Kürzel Lagerstätte	Bundesland	Rezentes Flusssystem
01	Sachsen-Anhalt	Elbe
02	Bayern	Isar
03	Bayern	Donau
04	Bayern	Main
05	Sachsen-Anhalt	Bode
06	Baden-Württemberg	Donau
07	Hessen	Eder
08/12	Sachsen	Zwickauer Mulde
16	Hessen	Eder
17	Bayern	Isar-Donau
18	Baden-Württemberg	Rhein
19	Thüringen	Saale
20	Bayern	Main
21	Sachsen	Weißer Elster
22	Sachsen	Vereinigte Mulde
23/24	Sachsen-Anhalt	Schwarze Elster
31	Sachsen-Anhalt	Vereinigte Mulde
32	Baden-Württemberg	Rhein
33	Sachsen	Neiße
34	Bayern	Isar
35	Brandenburg	Elbe
38	Brandenburg	Elbe
39	Bayern	Inn
40	Rheinland-Pfalz	Rhein
41	Thüringen	Pleiße
42	Thüringen	Unstrut
43	Rheinland-Pfalz	Rhein
44	Sachsen	Weißer Elster
45	Baden-Württemberg	Rhein
46	Bayern	Isar
47	Sachsen	Elbe
48	Nordrhein-Westfalen	Rhein
49	Sachsen-Anhalt	Weißer Elster
54/60	Thüringen	Alter Elster-/Saalelauf
62	Niedersachsen	Weser
63	Bayern	Donau
64	Thüringen	Helme
65	Thüringen	Saale
66	Nordrhein-Westfalen	Rhein
67	Sachsen-Anhalt	Saale
68	Sachsen	Elbe

Probeliste mit Kürzeln für Schlicke und Fraktionen

(farbig hinterlegte Proben wurden in Fraktionen zerlegt)

Lfd.-Nr.	Kürzel Lgst.	Polymin. Konz./ Fraktionen		Id.-Nr. Schlicke	Lfd.-Nr.	Kürzel Lgst.	Polymin. Konz./ Fraktionen		Id.-Nr. Schlicke
1	01	polymineralisch		BGR-001	37	34KL	polymineralisch		BGR-034
2	02	polymineralisch		BGR-002	38	35KL	polymineralisch		BGR-035
3	03KL	polymineralisch		BGR-003	39	38	pm	<0,5 A	BGR-38B
4	04	polymineralisch		BGR-004	40	38	pm	0,5–1,0 A	BGR-38C
5	05	polymineralisch		BGR-005	41	38	dm	HL	BGR-38D
6	06	polymineralisch		BGR-006	42	38	dm	NL	BGR-38E
7	07	polymineralisch		BGR-007	43	38	dm	2L	BGR-38F
8	08	polymineralisch		BGR-008	44	39	polymineralisch		BGR-039
9	08	pm	<0,5 A	BGR-8B	45	40	polymineralisch		BGR-040
10	08	pm	0,5–1,0 A	BGR-8C	46	41	polymineralisch		BGR-041
11	08	dm	HL	BGR-8D	47	41	pm	0,1–0,3 A	BGR-41B
12	08	dm	NL	BGR-8E	48	41	pm	0,3–0,5 A	BGR-41C
13	08	dm	2L	BGR-8F	49	41	pm	0,5–1,0 A	BGR-41D
14	08	dm	2HL	BGR-8G	50	41	dm	HL1	BGR-41E
15	08	dm	2NL	BGR-8H	51	41	dm	NL1	BGR-41F
16	12	polymineralisch		BGR-012	52	41	dm	2L	BGR-41G
17	16	polymineralisch		BGR-016	53	41	dm	2HL	BGR-41H
18	17KL	polymineralisch		BGR-017	54	41	dm	2NL	BGR-41I
19	18	polymineralisch		BGR-018	55	42	polymineralisch		BGR-042
20	19	polymineralisch		BGR-019	56	43	fm	Magnetit	BGR-43A
21	20KL	polymineralisch		BGR-020	57	43	pm	<0,5 A	BGR-43B
22	21	polymineralisch		BGR-021	58	43	pm	0,5–1,0 A	BGR-43C
23	22	polymineralisch		BGR-022	59	43	dm	HL	BGR-43D
24	23	polymineralisch		BGR-023	60	43	dm	NL	BGR-43E
25	24	pm	<0,25 A	BGR-24B	61	43	dm	2L	BGR-43F
26	24	pm	0,25–0,50 A	BGR-24C	62	44	polymineralisch		BGR-044
27	24	pm	0,50–0,75 A	BGR-24D	63	45	polymineralisch		BGR-045
28	24	pm	0,75–1,0 A	BGR-24E	64	46	polymineralisch		BGR-046
29	24	dm	HL	BGR-24F	65	47	polymineralisch		BGR-047
30	24	dm	NL	BGR-24G	66	48	polymineralisch		BGR-048
31	24	dm	2L	BGR-24H	67	48	pm	<0,3 A	BGR-48B
32	24	dm	2HL	BGR-24I	68	48	pm	0,3–0,5 A	BGR-48C
33	24	dm	2NL	BGR-24K	69	48	pm	0,5–1,0 A	BGR-48D
34	31	polymineralisch		BGR-031	70	48	dm	>1 A	BGR-48E
35	32	polymineralisch		BGR-032	71	49	polymineralisch		BGR-049
36	33	polymineralisch		BGR-033	72	54	polymineralisch		BGR-054

Lfd.-Nr.	Kürzel Lgst.	Polymin. Konz. / Fraktionen		Id.-Nr. Schliffe
73	60	pm	BS <0,5 A	BGR-60B
74	60	pm	BS 0,5–1,0 A	BGR-60C
75	60	dm	BS HL	BGR-60D
76	60	dm	BS NL	BGR-60E
77	60	dm	BS 2L	BGR-60F
78	62	polymineralisch		BGR-062
79	63KL	polymineralisch		BGR-063
80	64	pm	<0,2 A	BGR-64B
81	64	pm	0,2–0,3 A	BGR-64C
82	64	pm	0,3–1,0 A	BGR-64D
83	64	dm	HL	BGR-64E
84	64	dm	NL	BGR-64F
85	64	dm	L	BGR-64G
86	65	polymineralisch		BGR-065
87	66	polymineralisch		BGR-066
88	67	polymineralisch		BGR-067
89	68KL	polymineralisch		BGR-068

QEMSCAN-Mineral-Datenbank

Schwermineralgehalte wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert (farbig hinterlegte Proben wurden in Fraktionen zerlegt)

Lagerstätte	01	02	03	04	05	06	07	08	08	08
Dünnschliff	BGR-001	BGR-002	BGR-003	BGR-004	BGR-005	BGR-006	BGR-007	BGR-008	BGR-8B	BGR-8C
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	≤0,5	0,5–1
Quarz	57,06	2,49	1,52	18,24	49,95	9,75	59,75	10,01	0,28	1,59
Feldspäte	7,01	0,47	0,33	1,14	2,45	1,68	0,64	0,01	–	0,01
Glimmer	1,55	0,54	0,29	0,97	2,44	0,58	0,29	0,11	0,12	0,22
Karbonate	0,59	8,84	1,31	0,05	0,15	14,23	0,03	–	–	–
Sekundärminerale	0,14	0,08	0,04	0,08	0,10	0,06	0,62	0,40	0,39	2,10
Gesamt Leichtfraktion	66,35	12,42	3,49	20,48	55,09	26,29	61,34	10,53	0,79	3,92

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/ Brookit	2,55	2,99	2,25	4,95	1,26	2,39	17,47	18,75	1,23	17,98
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	–	–	0,01	–	0,22
Ilmenit	6,56	3,52	32,72	4,78	24,20	2,76	12,76	1,94	6,72	0,67
Mn-Ilmenit	0,10	0,06	0,17	0,15	0,15	0,04	0,06	0,02	0,09	0,02
Ilmenit-(Mn)	0,03	0,01	0,03	–	0,08	–	0,02	–	–	–
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	–	–	–	0,01	–
Fe-Ti Oxide	0,97	0,64	3,18	0,49	4,87	0,45	0,74	0,32	0,79	0,23
Fe/Ti 0-0.4	1,81	0,48	0,41	2,13	0,90	0,29	1,81	12,07	23,75	17,78
Fe/Ti 0.4-0.8	2,24	0,44	1,39	3,03	2,01	0,22	0,98	7,41	17,66	2,93
Fe/Ti 3.4-3.8	0,23	0,04	0,21	0,06	0,08	0,06	–	0,01	0,06	0,01
Fe/Ti 3.8-4.2	0,23	0,05	0,26	0,06	0,08	0,07	–	0,01	0,05	0,01
Fe/Ti 4.2-4.6	0,20	0,05	0,32	0,06	0,10	0,08	0,01	0,01	0,05	0,01
Fe/Ti 4.6-5.0	0,20	0,06	0,33	0,06	0,10	0,08	0,01	0,01	0,04	–
Fe/Ti 5.0-5.4	0,17	0,06	0,33	0,06	0,10	0,06	0,01	–	0,04	–
Fe/Ti 5.4-5.8	0,17	0,06	0,29	0,05	0,08	0,06	–	–	0,03	–
Fe/Ti 5.8-10	0,74	0,29	1,44	0,38	0,77	0,30	0,03	0,04	0,28	0,03
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,03	0,01	0,02	0,04	0,05	0,01	0,05	0,18	0,23	0,38
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	0,64	0,06	0,08	0,84	0,31	0,05	0,13	6,47	13,72	2,69
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	1,24	0,22	0,72	3,53	0,90	0,10	0,49	2,56	5,89	0,74
Zirkon	1,47	0,32	10,54	13,27	1,06	0,49	16,57	16,31	0,13	0,77
Zirkon-(Hf)	–	–	0,03	0,01	–	–	0,01	0,05	–	–
Chromit	0,03	–	0,08	0,10	–	0,02	0,06	0,06	0,14	0,02
Magnesiochromit	0,23	0,12	0,08	0,26	0,08	0,04	6,50	0,86	1,69	0,18
Kassiterit	–	–	0,39	0,06	0,05	0,07	0,15	2,21	0,18	0,99

Lagerstätte	01	02	03	04	05	06	07	08	08	08
Dünnschliff	BGR-001	BGR-002	BGR-003	BGR-004	BGR-005	BGR-006	BGR-007	BGR-008	BGR-8B	BGR-8C
Mineral Masse (%)	Poly	≤0,5	0,5–1							
Korund	0,13	–	0,09	–	–	0,01	0,09	0,26	0,02	0,06
Hämatit	2,88	0,09	1,72	0,62	2,50	0,10	0,03	0,01	0,02	–
Ti-Hämatit	0,40	0,09	0,44	0,33	0,26	0,19	0,02	0,04	0,27	0,04
Magnetit	0,47	0,01	0,41	0,09	0,39	0,02	–	–	–	–
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	0,03	–	0,01	0,04	–	–	–	–	0,01	–
Goethit	0,60	–	0,09	2,58	0,62	0,09	0,05	0,02	0,22	0,03
Limonit	1,71	0,13	0,21	2,74	2,78	0,31	0,15	0,09	0,97	0,17
Fe-Oxide	15,74	0,55	6,13	34,88	20,46	1,28	0,95	0,60	3,90	0,51
Gahnit	–	–	0,03	0,02	–	–	–	0,02	0,08	0,15
Hercynit	0,03	0,13	0,01	–	–	0,03	0,01	0,05	0,12	0,02
Spinell	–	–	–	–	–	–	0,01	0,01	0,03	0,01
Chamosit	0,44	0,18	0,03	0,06	1,31	0,32	0,05	0,01	0,01	0,20
Titanit/Sphen	0,87	1,00	0,32	0,46	4,64	0,98	0,10	–	–	0,03
Epidot	6,06	5,16	0,36	6,14	2,04	4,87	0,04	0,02	0,07	0,17
SEE-Epidot (CeL)	0,03	0,05	0,01	0,01	0,05	0,05	–	–	–	–
Zoisit	0,23	0,33	0,02	0,16	0,03	0,28	–	–	–	–
Almandin	12,49	29,16	8,72	4,13	6,86	25,89	0,16	0,04	0,22	0,06
Almandin (Mg-Ca)	9,98	39,01	11,34	1,54	1,78	44,17	0,23	0,01	0,04	0,03
Almandin- Spessartin	0,47	0,36	0,21	0,14	0,49	0,44	–	–	–	–
Spessartin	0,13	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Almandin-Pyrop	1,74	1,37	0,47	1,07	2,60	1,35	0,02	0,02	0,04	0,02
Almand.-Pyrop- Grossular	0,03	0,02	–	0,01	–	0,02	–	–	–	–
Grossular	0,64	0,56	0,06	0,51	1,52	0,45	0,01	0,01	0,01	0,04
Andradit	–	0,02	–	–	1,34	0,01	–	–	–	–
Granat1	1,51	0,61	0,24	0,33	1,52	0,67	0,15	0,06	0,18	0,42
Granat2	0,64	0,82	0,11	0,19	0,18	0,68	–	–	–	–
Schörl	0,57	0,25	0,04	0,27	1,01	0,20	18,91	3,85	9,64	8,51
Dravit	0,03	–	–	0,02	–	0,02	0,29	0,12	0,03	2,05
Turmalin	1,21	0,15	0,04	0,34	0,39	0,34	14,66	3,06	2,70	29,74
Topas	3,48	0,07	0,01	0,01	0,54	0,01	0,07	13,75	–	0,12
Andalusit/Kyanit/ Silliman.	1,34	0,92	0,10	0,01	0,28	0,26	0,15	4,79	0,08	0,41
Aktinolith	0,17	0,04	0,02	0,01	0,15	0,08	–	–	–	–

Lagerstätte	01	02	03	04	05	06	07	08	08	08
Dünnschliff	BGR-001	BGR-002	BGR-003	BGR-004	BGR-005	BGR-006	BGR-007	BGR-008	BGR-8B	BGR-8C
Mineral Masse (%)	Poly	≤0,5	0,5–1							
Hornblende	4,45	2,06	0,36	0,86	1,57	4,00	0,05	–	0,01	0,03
Ferrohornblende	0,20	0,49	0,14	0,03	0,13	0,63	–	–	–	–
Na-Ca-Amphibol	–	–	–	–	0,03	–	–	–	–	–
Ca-Amphibol 1	0,74	0,48	0,03	0,13	0,13	0,27	0,01	–	–	–
Amphibol X	0,17	0,01	–	–	0,88	–	–	–	–	–
Orthopyroxen En87	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Orthopyroxen En75	0,20	0,02	0,01	0,02	0,39	0,15	0,01	–	–	–
Orthopyroxen En50	0,07	–	–	–	0,03	–	–	–	–	–
Diopsid	6,33	0,12	0,01	0,01	2,76	0,09	0,04	–	–	0,01
Staurolith	2,01	4,84	0,46	0,03	0,18	2,63	0,79	2,04	6,63	1,30
Beryll	0,10	–	–	0,02	0,05	0,01	0,21	0,01	–	0,01
Apatit	0,27	0,54	0,12	1,63	0,46	0,94	0,06	–	–	–
Apatit in Ilmenit	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–	–
Monazit-(Ce)	0,13	0,55	10,79	5,11	0,18	0,22	1,09	1,13	0,18	9,80
Monazit-(La)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Monazit-(Nd)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cheralit-(Ce)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xenotim	–	–	0,10	0,50	–	0,02	0,07	0,43	0,59	0,07
Florencit-(Ce)	–	–	–	–	–	–	0,09	0,05	0,01	0,09
Florencit-(La)	–	–	–	–	–	–	0,06	–	–	0,04
Baryt	–	–	–	–	–	–	0,02	–	–	–
Pyrit	0,37	0,06	0,34	0,01	1,42	0,06	–	–	–	–
Galenit	–	–	–	–	–	–	3,18	–	–	–

Lagerstätte	08	08	08	08	08	12	16	17	18	19
Dünnschliff	BGR-8D	BGR-8E	BGR-8F	BGR-8G	BGR-8H	BGR-012	BGR-016	BGR-017	BGR-018	BGR-019
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	≤0,5	0,5–1						
Quarz	58,93	55,07	14,12	25,90	20,89	10,87	62,21	0,74	3,42	23,80
Feldspäte	0,03	0,06	0,01	0,03	0,02	0,01	0,56	0,11	1,70	6,41
Glimmer	0,07	0,10	0,12	0,12	0,12	0,11	0,26	0,31	1,34	3,34
Karbonate	–	0,01	–	–	–	–	–	0,46	5,36	0,10
Sekundärminerale	0,25	0,35	0,40	0,23	0,41	0,29	0,52	0,04	0,10	0,26
Gesamt Leichtfraktion	59,28	55,58	14,66	26,29	21,44	11,28	63,55	1,66	11,92	33,92

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/ Brookit	26,86	24,34	28,48	32,10	25,19	17,71	20,86	4,54	2,06	3,80
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	0,04	–	–	–	–
Ilmenit	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	2,65	4,77	30,28	2,84	20,36
Mn-Ilmenit	–	–	–	–	–	0,02	0,03	0,35	0,13	0,09
Ilmenit-(Mn)	–	–	–	–	–	–	–	0,03	–	0,02
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	0,01	–	–	–	–
Fe-Ti Oxide	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,57	0,51	1,97	1,08	3,35
Fe/Ti 0-0.4	1,01	0,79	0,98	1,10	0,81	13,20	2,44	0,52	0,43	0,54
Fe/Ti 0.4-0.8	0,03	0,02	0,12	0,03	0,03	10,20	1,48	1,02	0,45	0,30
Fe/Ti 0.8-1.2	–	–	–	–	–	0,22	0,10	0,53	0,08	0,12
Fe/Ti 1.2-1.8	–	–	–	–	–	0,16	0,31	0,29	0,13	0,13
Fe/Ti 1.8-2.2	–	–	–	–	–	0,05	–	0,09	0,06	0,05
Fe/Ti 2.2-2.6	–	–	–	–	–	0,04	–	0,10	0,08	0,04
Fe/Ti 2.6-3.0	–	–	–	–	–	0,02	0,03	0,11	0,08	0,06
Fe/Ti 3.0-3.4	–	–	–	–	–	0,02	0,03	0,15	0,08	0,06
Fe/Ti 3.4-3.8	–	–	–	–	–	0,01	0,03	0,21	0,09	0,07
Fe/Ti 3.8-4.2	–	–	–	–	–	0,01	–	0,30	0,10	0,09
Fe/Ti 4.2-4.6	–	–	–	–	–	0,01	–	0,33	0,10	0,10
Fe/Ti 4.6-5.0	–	–	–	–	–	0,01	–	0,31	0,10	0,11
Fe/Ti 5.0-5.4	–	–	–	–	–	0,01	–	0,26	0,10	0,12
Fe/Ti 5.4-5.8	–	–	–	–	–	0,01	–	0,19	0,10	0,11
Fe/Ti 5.8-10	–	–	–	–	–	0,07	0,03	0,61	0,73	0,65
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09	0,07	0,03	0,03	0,02
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	0,02	0,02	0,10	0,02	0,06	5,99	0,31	0,07	0,08	0,06
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	–	–	0,03	–	0,01	3,09	1,03	0,37	0,23	0,19
Zirkon	36,94	26,12	19,96	44,17	23,69	20,40	19,18	5,89	0,63	2,89

Lagerstätte	08	08	08	08	08	12	16	17	18	19
Dünnschliff	BGR-8D	BGR-8E	BGR-8F	BGR-8G	BGR-8H	BGR-012	BGR-016	BGR-017	BGR-018	BGR-019
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	≤0,5	0,5–1
Zirkon-(Hf)	0,03	0,02	0,02	0,04	0,02	0,05	0,07	–	–	–
Chromit	–	–	–	–	–	0,02	0,17	0,18	0,04	0,59
Magnesiochromit	–	–	–	–	–	0,38	2,92	0,16	0,35	0,50
Kassiterit	0,76	0,62	3,57	1,27	1,42	1,92	–	0,03	0,08	2,02
Korund	0,36	0,44	0,52	0,18	0,40	0,21	–	–	0,04	0,11
Hämatit	–	–	–	–	–	0,01	0,34	0,03	1,15	3,52
Ti-Hämatit	–	–	–	–	–	0,07	0,10	0,61	0,26	1,49
Magnetit	–	–	–	–	–	–	0,03	0,01	0,16	0,52
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,05
Goethit	–	–	–	–	–	0,05	0,27	0,01	0,04	1,53
Limonit	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,46	0,38	0,22	0,70	3,41
Fe-Oxide	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	1,23	4,84	0,47	3,77	17,78
Gahnit	–	0,02	–	–	–	0,04	0,07	–	–	–
Hercynit	–	0,01	0,01	–	0,01	0,02	0,03	0,01	0,04	0,05
Spinell	–	–	–	–	–	0,01	–	–	–	–
Chamosit	–	0,01	–	–	0,01	0,01	0,03	0,07	0,63	0,85
Titanit/Sphen	–	–	–	0,01	–	–	0,27	0,41	4,22	2,60
Epidot	–	0,01	0,01	–	–	0,06	0,03	0,66	13,12	7,85
SEE-Epidot (CeL)	–	–	–	–	–	–	–	0,02	0,10	0,04
Zoisit	–	–	–	–	–	–	–	0,11	0,36	0,06
Almandin	0,01	0,01	0,01	–	0,01	0,17	0,14	16,29	17,48	3,41
Almandin (Mg-Ca)	–	–	–	–	–	0,01	0,31	25,89	31,01	4,53
Almandin- Spessartin	–	–	–	–	–	–	–	0,40	0,58	0,02
Spessartin	–	–	–	–	–	–	0,03	–	–	–
Almandin-Pyrop	–	–	–	–	–	0,02	0,03	0,93	1,58	1,55
Almand.-Pyrop- Grossular	–	–	–	–	–	–	–	–	0,04	0,02
Grossular	–	–	–	–	–	–	–	0,08	1,41	0,54
Andradit	–	–	–	–	–	–	–	–	0,20	0,01
Granat1	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,06	0,21	0,63	0,85	0,44
Granat2	–	–	–	–	–	–	–	0,30	1,56	0,27
Schörl	0,08	0,06	0,16	0,04	0,06	2,74	19,76	0,10	0,13	0,56
Dravit	0,06	0,08	0,03	0,07	0,05	0,12	0,21	–	–	0,02
Turmalin	0,37	0,37	0,42	0,13	0,17	2,28	15,09	0,05	0,24	0,30

Lagerstätte	20	21	22	23	24	24	24	24	24	24
Dünn-schliff	BGR-020	BGR-021	BGR-022	BGR-023	BGR-24B	BGR-24C	BGR-24D	BGR-24E	BGR-24F	BGR-24G
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	Poly	Poly	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1	HL	NL
Quarz	2,54	16,83	39,45	12,30	0,57	0,90	1,51	1,21	72,28	48,90
Feldspäte	0,44	1,37	4,03	1,03	0,15	0,31	0,93	0,64	3,39	2,58
Glimmer	0,22	0,84	1,33	0,47	0,24	0,72	0,80	0,78	0,22	0,23
Karbonate	0,27	0,01	–	0,56	–	0,01	0,02	0,22	0,25	0,93
Sekundärminerale	0,02	0,21	0,20	0,14	0,04	0,18	1,06	0,10	0,08	0,10
Gesamt Leichtfraktion	3,49	19,27	45,01	14,49	1,00	2,13	4,32	2,95	76,21	52,75

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/Brookit	4,13	3,10	4,42	4,18	0,37	0,84	2,12	4,08	6,47	11,91
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	0,01	0,01	–	–	–
Ilmenit	5,39	13,28	6,64	10,24	26,41	1,86	0,11	0,06	0,01	0,01
Mn-Ilmenit	0,11	0,24	0,21	0,35	0,74	0,17	0,01	0,01	–	–
Ilmenit-(Mn)	0,01	0,01	–	0,01	0,02	–	–	–	–	–
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe-Ti Oxide	0,71	1,03	0,80	0,70	1,61	0,24	0,05	0,02	–	–
Fe/Ti 0-0.4	1,00	2,41	1,87	2,44	1,99	5,21	2,03	0,90	0,08	0,17
Fe/Ti 0.4-0.8	2,58	3,14	2,84	3,22	5,78	4,55	0,14	0,04	–	–
Fe/Ti 0.8-1.2	0,08	0,26	0,12	0,12	0,30	0,01	–	–	–	–
Fe/Ti 1.2-1.8	0,21	0,20	0,12	0,12	0,18	0,03	–	–	–	–
Fe/Ti 1.8-2.2	0,11	0,06	0,04	0,10	0,07	0,03	–	–	–	–
Fe/Ti 2.2-2.6	0,11	0,06	0,04	0,14	0,08	0,03	–	–	–	–
Fe/Ti 2.6-3.0	0,11	0,07	0,06	0,17	0,09	0,03	–	–	–	–
Fe/Ti 3.0-3.4	0,11	0,08	0,06	0,22	0,09	0,03	–	–	–	–
Fe/Ti 3.4-3.8	0,12	0,10	0,08	0,24	0,09	0,03	–	–	–	–
Fe/Ti 3.8-4.2	0,14	0,10	0,08	0,21	0,10	0,02	–	–	–	–

Lagerstätte	20	21	22	23	24	24	24	24	24	24
Dünnschliff	BGR-020	BGR-021	BGR-022	BGR-023	BGR-24B	BGR-24C	BGR-24D	BGR-24E	BGR-24F	BGR-24G
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	Poly	Poly	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1	HL	NL
Fe/Ti 4.2-4.6	0,15	0,12	0,08	0,19	0,10	0,02	–	–	–	–
Fe/Ti 4.6-5.0	0,14	0,11	0,08	0,15	0,10	0,02	–	–	–	–
Fe/Ti 5.0-5.4	0,16	0,11	0,08	0,11	0,10	0,02	–	–	–	–
Fe/Ti 5.4-5.8	0,15	0,10	0,08	0,09	0,09	0,01	–	–	–	–
Fe/Ti 5.8-10	0,97	0,67	0,41	0,33	0,63	0,08	0,01	–	–	–
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,01	0,06	0,04	0,08	0,07	0,24	0,12	0,03	–	0,01
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	0,45	0,67	0,64	0,99	1,20	2,35	0,16	0,02	–	–
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	3,57	1,55	1,36	2,04	4,10	2,57	0,12	0,03	–	–
Zirkon	35,17	1,63	0,70	3,09	0,02	0,12	0,26	0,75	11,60	12,86
Zirkon-(Hf)	0,14	–	–	–	–	–	–	–	0,01	0,01
Chromit	0,18	0,09	0,21	0,05	0,07	0,11	–	–	–	–
Magnesi-ochromit	0,33	0,37	0,16	0,16	0,10	0,45	0,02	–	–	–
Kassiterit	0,28	0,32	0,04	–	–	–	0,04	0,03	0,01	–
Korund	–	0,06	0,10	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,16	0,11
Hämatit	3,14	1,32	2,47	0,47	0,42	0,13	0,01	–	–	–
Ti-Hämatit	0,40	0,40	0,18	0,55	0,40	0,09	0,01	–	–	–
Magnetit	0,42	0,29	0,33	0,11	0,07	0,02	–	–	–	–
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	0,04	0,01	–	0,08	0,07	–	–	–	–	–
Goethit	0,30	0,26	0,29	0,45	1,56	0,04	–	–	–	–
Limonit	0,58	0,59	0,56	1,07	2,88	0,11	0,01	0,01	0,01	–
Fe-Oxide	11,86	6,83	8,10	4,21	10,71	0,77	0,04	0,02	–	0,01
Gahnit	–	–	0,08	0,05	–	0,08	0,05	0,01	–	–
Hercynit	–	0,03	0,06	0,03	–	0,07	0,02	–	–	–
Spinell	–	–	0,04	0,01	–	0,03	0,05	0,06	–	–
Chamosit	0,04	0,28	0,27	0,16	0,04	0,32	0,19	0,06	0,02	0,04
Titanit/ Sphen	0,15	0,51	0,43	0,93	0,43	0,32	1,09	2,35	1,38	1,95

Lagerstätte	20	21	22	23	24	24	24	24	24	24
Dünnschliff	BGR-020	BGR-021	BGR-022	BGR-023	BGR-24B	BGR-24C	BGR-24D	BGR-24E	BGR-24F	BGR-24G
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	Poly	Poly	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1	HL	NL
Orthopyroxen En75	0,06	0,12	0,08	0,19	0,11	0,68	0,14	0,01	0,02	0,01
Orthopyroxen En50	–	0,34	0,08	0,14	0,22	0,33	0,01	–	–	–
Diopsid	0,02	0,19	0,31	4,05	3,86	8,71	43,22	3,27	0,09	0,13
Staurolith	–	1,38	3,90	1,38	0,09	6,23	1,44	0,02	–	0,01
Beryll	–	0,02	0,06	–	–	–	0,01	–	0,12	0,03
Apatit	0,25	0,78	0,62	1,01	0,06	0,08	0,33	0,36	2,49	3,32
Apatit in Ilmenit	–	–	–	0,01	0,01	–	–	–	–	–
Monazit-(Ce)	19,32	0,40	0,16	0,12	0,02	0,13	1,59	0,28	0,08	0,05
Monazit-(La)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Monazit-(Nd)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cheralit-(Ce)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xenotim	0,99	0,03	–	0,06	0,03	0,08	–	–	–	–
Florencit-(Ce)	–	–	–	0,01	–	–	0,02	0,01	–	0,01
Florencit-(La)	–	–	–	–	–	–	–	–	0,02	0,01
Baryt	0,01	0,02	–	–	–	–	–	–	0,02	–
Pyrit	0,05	1,52	–	23,77	2,81	1,31	13,34	82,25	61,99	55,82
Galenit	–	–	–	–	–	–	0,01	–	–	–

Lagerstätte	24	24	24	31	32	33	34	35	38	38
Dünnschliff	BGR-24H	BGR-24I	BGR-24K	BGR-031	BGR-032	BGR-033	BGR-034	BGR-035	BGR-38B	BGR-38C
Mineral Masse (%)	2L	2HL	2NL	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	<0,5	0,5–1
Quarz	15,63	41,72	32,12	54,63	1,66	80,44	0,64	1,58	1,12	12,23
Feldspäte	1,03	2,86	1,83	4,02	0,35	3,00	0,07	0,34	0,59	2,36
Glimmer	0,22	0,27	0,21	0,68	0,63	0,58	0,27	0,23	1,61	6,51
Karbonate	0,25	0,55	0,18	0,04	0,69	0,35	0,62	0,11	–	0,02
Sekundärminerale	0,10	0,09	0,14	0,10	0,06	0,13	0,04	0,02	0,29	1,12
Gesamt Leichtfraktion	17,23	45,51	34,48	59,47	3,39	84,49	1,64	2,28	3,61	22,25

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/ Brookit	12,29	9,62	14,76	5,71	3,66	5,49	2,33	1,07	0,45	1,81
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	–	–	–	0,01	–
Ilmenit	0,01	–	0,01	20,56	7,67	19,15	8,99	13,00	17,80	8,80
Mn-Ilmenit	–	–	–	0,34	0,21	0,28	0,06	0,13	0,27	0,07
Ilmenit-(Mn)	–	–	–	–	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe-Ti Oxide	–	–	0,01	1,97	1,13	1,04	0,93	1,33	1,20	0,53
Fe/Ti 0-0.4	0,15	0,12	0,22	3,94	0,47	2,95	0,22	0,68	1,91	0,93
Fe/Ti 0.4-0.8	0,01	–	0,01	6,53	0,52	5,07	0,33	1,75	2,16	0,68
Fe/Ti 0.8-1.2	–	–	–	0,25	0,16	0,21	0,18	0,28	0,25	0,15
Fe/Ti 1.2-1.8	–	–	–	0,17	0,27	0,35	0,14	0,43	0,25	0,11
Fe/Ti 1.8-2.2	–	–	–	0,03	0,14	0,10	0,04	0,22	0,14	0,04
Fe/Ti 2.2-2.6	–	–	–	0,03	0,16	0,08	0,05	0,26	0,16	0,05
Fe/Ti 2.6-3.0	–	–	–	0,03	0,18	0,07	0,07	0,32	0,18	0,06
Fe/Ti 3.0-3.4	–	–	–	0,03	0,22	0,07	0,08	0,37	0,18	0,06
Fe/Ti 3.4-3.8	–	–	–	0,06	0,26	0,05	0,12	0,40	0,19	0,06
Fe/Ti 3.8-4.2	–	–	–	0,06	0,29	0,08	0,16	0,43	0,19	0,06
Fe/Ti 4.2-4.6	–	–	–	0,06	0,30	0,07	0,19	0,44	0,17	0,06
Fe/Ti 4.6-5.0	–	–	–	0,06	0,30	0,07	0,19	0,44	0,16	0,05
Fe/Ti 5.0-5.4	–	–	–	0,06	0,27	0,07	0,16	0,42	0,14	0,05
Fe/Ti 5.4-5.8	–	–	–	0,06	0,23	0,09	0,14	0,42	0,13	0,04
Fe/Ti 5.8-10	–	–	–	0,28	1,40	0,63	0,43	3,58	0,70	0,31
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	–	–	0,01	0,08	0,02	0,11	0,01	0,01	0,04	0,02
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	–	–	–	1,69	0,08	1,56	0,02	0,13	0,73	0,14
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	–	–	–	4,14	0,25	2,72	0,15	0,65	1,55	0,40

Lagerstätte	24	24	24	31	32	33	34	35	38	38
Dünnschliff	BGR-24H	BGR-24I	BGR-24K	BGR-031	BGR-032	BGR-033	BGR-034	BGR-035	BGR-38B	BGR-38C
Mineral Masse (%)	2L	2HL	2NL	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	<0,5	0,5–1
Zirkon	10,02	14,22	11,10	6,33	3,42	4,98	1,05	11,63	0,03	0,14
Zirkon-(Hf)	0,01	0,01	0,01	0,03	–	–	–	0,04	–	–
Chromit	–	–	–	0,14	0,29	–	0,03	0,13	0,06	0,03
Magnesiochromit	–	–	–	0,37	0,86	0,95	0,14	0,13	0,43	0,12
Kassiterit	0,08	0,09	0,03	0,25	–	–	0,10	8,33	0,05	–
Korund	0,08	0,17	0,01	0,31	–	0,01	–	–	–	0,02
Hämatit	–	–	–	2,33	1,24	1,06	0,21	16,10	0,82	0,36
Ti-Hämatit	–	–	–	0,11	0,92	0,44	0,19	0,98	0,61	0,23
Magnetit	–	–	–	0,39	0,26	0,22	0,03	2,37	0,17	0,07
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	–	–	–	–	0,01	–	0,03	0,08	0,02	0,01
Goethit	–	–	–	0,11	0,26	0,69	0,01	0,39	0,32	0,16
Limonit	–	0,01	–	0,59	0,89	1,30	0,11	1,10	0,90	0,26
Fe-Oxide	–	0,01	–	5,34	8,25	12,90	0,68	27,65	6,29	2,51
Gahnit	–	–	–	–	–	0,26	–	–	0,07	–
Hercynit	–	–	–	0,03	0,01	0,07	0,01	–	0,03	0,02
Spinell	–	0,06	0,01	–	0,01	0,02	–	–	0,07	0,12
Chamosit	0,01	0,01	0,02	0,11	0,23	0,12	0,04	0,02	0,25	0,24
Titanit/Sphen	1,17	1,23	2,09	0,53	2,19	0,32	0,18	0,12	0,54	1,92
Epidot	0,19	0,25	0,35	4,84	4,24	6,39	0,37	0,16	2,67	3,14
SEE-Epidot (CeL)	–	–	–	0,03	0,08	0,01	0,02	–	0,04	0,02
Zoisit	0,32	0,44	0,52	0,20	0,07	0,30	0,06	–	0,03	0,45
Almandin	0,01	0,01	0,03	9,17	13,37	5,04	22,07	1,05	7,61	3,73
Almandin (Mg-Ca)	–	–	–	6,89	34,37	3,02	51,99	0,71	8,30	2,59
Almandin- Spessartin	–	–	–	0,48	0,70	0,28	0,47	0,04	0,63	0,19
Spessartin	–	–	–	0,03	–	0,02	–	–	0,02	–
Almandin- Pyrop	–	0,01	0,01	0,98	1,13	0,38	1,14	0,13	0,84	0,52
Almand.-Pyrop- Grossular	–	–	–	–	0,01	0,01	–	–	0,06	0,02
Grossular	0,13	0,13	0,17	0,84	0,80	1,26	0,11	0,02	0,70	2,85
Andradit	–	–	–	0,11	0,10	0,13	–	–	0,04	0,12
Granat1	–	0,01	0,01	0,93	1,12	0,96	0,65	0,09	0,78	0,42

Lagerstätte	38	38	38	39	40	41	41	41	41	41
Dünnschliff	BGR-38D	BGR-38E	BGR-38F	BGR-039	BGR-040	BGR-041	BGR-41B	BGR-41C	BGR-41D	BGR-41E
Mineral Masse (%)	HL	NL	2L	Poly	Poly	Poly	0,1–0,3	0,3–0,5	0,5–1	HL
Quarz	1,19	1,84	2,93	13,22	15,99	10,50	0,22	0,50	1,32	9,25
Feldspäte	0,34	0,50	0,68	4,44	3,96	0,05	0,04	0,01	0,05	0,05
Glimmer	1,07	1,38	1,57	3,62	2,38	0,17	0,07	0,09	0,43	0,15
Karbonate	0,04	0,08	0,01	21,29	18,33	–	–	–	–	–
Sekundärminerale	0,91	0,97	1,06	0,28	0,15	0,35	0,12	0,33	0,96	0,43
Gesamt Leichtfraktion	3,55	4,78	6,25	42,84	40,81	11,07	0,45	0,93	2,77	9,88

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/Brookit	12,49	15,75	20,54	2,20	2,96	14,36	0,92	2,37	14,57	9,75
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	0,02	–	0,08	0,42	–
Ilmenit	0,52	0,81	2,06	8,51	3,32	4,00	25,10	2,71	0,73	–
Mn-Ilmenit	–	0,01	0,02	0,02	0,14	0,05	0,25	0,10	0,04	–
Ilmenit-(Mn)	–	–	–	0,01	–	–	0,01	–	–	–
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	–	0,01	0,01	–	–
Fe-Ti Oxide	0,06	0,09	0,16	1,16	1,06	0,44	1,52	0,26	0,14	–
Fe/Ti 0-0.4	0,22	0,29	0,40	0,68	0,53	14,09	23,52	29,79	16,91	0,12
Fe/Ti 0.4-0.8	0,04	0,05	0,17	0,56	0,49	6,62	18,19	12,00	3,45	0,01
Fe/Ti 0.8-1.2	0,01	0,02	0,04	0,17	0,08	0,04	0,34	0,02	0,01	–
Fe/Ti 1.2-1.8	0,01	0,02	0,02	0,12	0,20	0,04	0,14	0,01	0,01	–
Fe/Ti 1.8-2.2	–	0,01	–	0,04	0,06	0,01	0,04	0,01	–	–
Fe/Ti 2.2-2.6	–	0,01	0,01	0,04	0,06	0,01	0,05	–	–	–
Fe/Ti 2.6-3.0	–	0,01	0,01	0,04	0,06	0,01	0,05	–	–	–
Fe/Ti 3.0-3.4	–	0,01	0,01	0,04	0,08	0,01	0,04	–	–	–
Fe/Ti 3.4-3.8	–	0,01	0,01	0,05	0,08	0,01	0,04	–	–	–
Fe/Ti 3.8-4.2	–	0,01	0,01	0,07	0,10	0,01	0,04	–	–	–
Fe/Ti 4.2-4.6	–	0,01	–	0,09	0,10	0,01	0,04	–	–	–
Fe/Ti 4.6-5.0	–	–	0,01	0,10	0,10	0,01	0,05	–	–	–
Fe/Ti 5.0-5.4	–	–	–	0,10	0,08	0,01	0,05	–	–	–
Fe/Ti 5.4-5.8	–	–	–	0,08	0,10	0,01	0,05	–	–	–
Fe/Ti 5.8-10	0,01	0,01	0,02	0,33	0,65	0,07	0,41	0,03	–	–
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,40	0,33	1,08	0,77	–

Lagerstätte	38	38	38	39	40	41	41	41	41	41
Dünnschliff	BGR-38D	BGR-38E	BGR-38F	BGR-039	BGR-040	BGR-041	BGR-41B	BGR-41C	BGR-41D	BGR-41E
Mineral Masse (%)	HL	NL	2L	Poly	Poly	Poly	0,1–0,3	0,3–0,5	0,5–1	HL
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	0,01	0,01	0,04	0,05	0,10	8,42	11,05	21,16	7,04	–
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	0,03	0,03	0,09	0,16	0,26	2,39	6,37	4,11	1,10	–
Zirkon	17,18	22,30	6,01	0,42	1,28	14,38	0,40	0,40	2,40	14,68
Zirkon-(Hf)	0,01	0,02	0,01	–	–	0,06	–	–	–	0,01
Chromit	0,01	–	–	0,01	0,12	0,21	0,22	0,09	0,02	–
Magnesiochromit	0,02	–	0,01	0,02	0,45	0,41	0,62	0,85	0,23	–
Kassiterit	0,29	0,42	0,68	–	0,06	4,22	0,94	0,98	9,88	0,23
Korund	0,07	0,19	0,29	0,02	–	0,16	0,04	–	0,03	0,34
Hämatit	0,05	0,03	0,11	0,86	0,98	0,22	0,39	0,11	0,05	–
Ti-Hämatit	0,02	0,03	0,02	0,25	0,22	0,02	0,22	0,02	0,01	–
Magnetit	0,01	0,01	0,02	0,23	0,10	0,02	0,07	0,02	0,01	–
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	–	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–
Goethit	0,02	0,03	0,05	0,39	0,04	0,01	0,09	0,02	0,01	–
Limonit	0,03	0,06	0,08	0,94	0,41	0,02	0,17	0,07	0,06	–
Fe-Oxide	0,28	0,30	0,79	8,78	2,94	0,52	2,40	0,66	0,32	–
Gahnit	0,02	0,07	0,06	–	–	0,09	–	0,22	0,31	–
Hercynit	–	0,01	0,02	0,11	0,06	0,07	0,02	0,14	0,06	–
Spinell	–	0,01	0,02	–	–	–	–	–	–	–
Chamosit	0,05	0,08	0,07	1,45	1,47	0,01	0,02	0,01	0,09	–
Titanit/Sphen	5,76	5,51	5,13	2,81	4,77	–	0,04	–	0,01	–
Epidot	0,94	1,25	1,56	6,51	19,00	0,05	0,01	0,22	0,31	–
SEE-Epidot (CeL)	0,01	–	0,01	0,06	0,12	–	–	–	–	–
Zoisit	0,64	0,76	0,94	0,33	0,51	0,01	–	–	0,02	–
Almandin	0,30	0,41	0,33	22,18	13,37	0,21	1,61	0,26	0,05	–
Almandin (Mg-Ca)	0,25	0,45	0,62	17,73	23,87	0,22	1,78	0,43	0,05	–
Almandin-Spessartin	0,01	0,06	0,04	0,38	0,49	0,01	0,14	–	–	–
Spessartin	–	0,01	–	–	0,02	–	0,03	–	–	–
Almandin-Pyrop	0,03	0,06	0,05	1,95	2,26	0,04	0,26	0,09	0,04	–
Almand.-Pyrop-Grossular	–	–	0,02	0,04	0,04	–	–	0,01	–	–

Lagerstätte	38	38	38	39	40	41	41	41	41	41
Dünnschliff	BGR-38D	BGR-38E	BGR-38F	BGR-039	BGR-040	BGR-041	BGR-41B	BGR-41C	BGR-41D	BGR-41E
Mineral Masse (%)	HL	NL	2L	Poly	Poly	Poly	0,1–0,3	0,3–0,5	0,5–1	HL
Grossular	0,43	0,89	0,87	0,58	1,53	0,01	0,02	0,02	0,06	–
Andradit	–	–	–	0,01	0,29	0,01	–	–	–	–
Granat1	0,09	0,09	0,10	0,80	0,94	0,06	0,45	0,06	0,09	–
Granat2	0,02	0,01	0,08	0,61	2,00	–	0,03	0,01	0,01	–
Schörl	0,39	0,70	0,46	0,37	0,33	2,28	0,26	5,30	5,16	0,01
Dravit	0,10	0,24	0,08	0,01	0,02	0,09	–	0,01	0,71	–
Turmalin	1,17	2,30	0,83	0,30	0,47	1,55	0,02	1,20	11,52	0,02
Topas	11,16	6,91	15,21	0,04	–	14,92	0,13	0,22	0,35	67,92
Andalusit/ Kyanit/Silliman.	23,86	15,06	19,78	0,43	0,14	2,44	0,09	0,05	0,38	6,54
Aktinolith	0,21	0,41	0,27	0,23	0,22	–	–	–	–	–
Hornblende	1,79	1,80	2,12	6,45	4,46	0,01	0,06	0,05	0,03	–
Ferrohorn- blende	0,02	0,01	0,02	0,30	0,31	–	0,01	–	–	–
Na-Ca- Amphibol	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–	–
Ca-Amphibol 1	0,04	0,03	0,24	0,67	0,49	–	–	0,05	–	–
Amphibol X	0,06	0,06	0,05	0,02	0,02	–	–	–	–	–
Orthopyroxen En87	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–	–
Orthopyroxen En75	0,02	0,14	0,98	0,30	0,27	–	0,01	–	0,02	–
Orthopyroxen En50	–	0,02	0,05	0,01	–	–	0,01	–	–	–
Diopsid	8,34	7,57	8,05	0,32	0,26	–	–	–	–	–
Staurolith	0,29	0,16	0,74	4,84	1,04	4,56	0,54	12,93	5,10	0,02
Beryll	0,04	0,05	0,05	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Apatit	12,14	13,70	9,18	2,59	1,73	0,01	–	–	0,03	0,05
Apatit in Ilmenit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Monazit-(Ce)	0,24	0,40	0,17	0,59	2,06	1,02	0,03	0,34	16,57	0,05
Monazit-(La)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Monazit-(Nd)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cheralit-(Ce)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xenotim	–	0,01	–	–	0,08	0,23	0,20	1,36	0,41	–
Florencit-(Ce)	–	0,01	0,04	–	0,02	0,04	–	–	0,03	0,02
Florencit-(La)	0,01	0,01	0,01	–	0,02	–	–	–	0,01	0,02

Lagerstätte	38	38	38	39	40	41	41	41	41	41
Dünnschliff	BGR-38D	BGR-38E	BGR-38F	BGR-039	BGR-040	BGR-041	BGR-41B	BGR-41C	BGR-41D	BGR-41E
Mineral Masse (%)	HL	NL	2L	Poly	Poly	Poly	0,1–0,3	0,3–0,5	0,5–1	HL
Baryt	0,02	0,02	0,02	–	–	–	–	–	–	–
Pyrit	0,09	0,15	–	0,32	0,10	0,71	0,02	0,01	0,37	0,16
Galenit	0,02	0,02	–	0,07	–	–	–	–	–	0,01

Lagerstätte	41	41	41	41	42	43	43	43	43	43
Dünnschliff	BGR-41F	BGR-41G	BGR-41H	BGR-41I	BGR-042	BGR-43A	BGR-43B	BGR-43C	BGR-43D	BGR-43E
Mineral Masse (%)	NL	2L	2HL	2NL	Poly	Mgt	<0,5	0,5–1	HL	NL
Quarz	39,69	1,25	6,72	6,71	41,60	0,21	0,98	1,52	11,48	19,64
Feldspäte	0,18	0,01	0,02	0,06	9,70	1,57	0,50	0,68	1,03	2,59
Glimmer	0,15	0,11	0,08	0,11	0,83	0,83	0,95	1,33	1,02	1,80
Karbonate	–	0,01	–	–	8,46	0,01	–	0,03	1,15	1,00
Sekundärminerale	0,22	0,11	0,26	0,29	0,04	0,06	0,11	0,17	0,12	0,26
Gesamt Leichtfraktion	40,26	1,50	7,07	7,17	60,63	2,67	2,54	3,74	14,79	25,29

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/Brookit	23,41	23,25	15,31	22,61	1,11	0,09	0,49	0,99	8,46	2,36
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ilmenit	0,01	0,02	–	–	4,90	4,38	10,49	6,33	1,03	0,38
Mn-Ilmenit	–	–	–	–	0,23	0,03	0,24	0,23	0,04	0,02
Ilmenit-(Mn)	–	–	–	–	–	0,17	0,02	0,01	–	–
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe-Ti Oxide	–	–	–	–	0,55	0,64	1,13	0,93	0,17	0,17
Fe/Ti 0-0.4	0,27	0,20	0,12	0,16	0,58	0,22	0,63	0,73	0,44	0,31
Fe/Ti 0.4-0.8	0,02	0,01	0,01	0,01	1,37	0,24	1,03	0,86	0,20	0,20
Fe/Ti 0.8-1.2	–	–	–	–	0,20	0,27	0,26	0,14	0,03	0,02
Fe/Ti 1.2-1.8	–	–	–	–	0,47	2,57	0,25	0,19	0,04	0,03
Fe/Ti 1.8-2.2	–	–	–	–	0,29	0,33	0,11	0,10	0,02	0,02
Fe/Ti 2.2-2.6	–	–	–	–	0,29	0,37	0,10	0,11	0,02	0,03
Fe/Ti 2.6-3.0	–	–	–	–	0,32	0,50	0,11	0,11	0,02	0,02
Fe/Ti 3.0-3.4	–	–	–	–	0,35	0,69	0,12	0,12	0,02	0,02
Fe/Ti 3.4-3.8	–	–	–	–	0,41	0,91	0,14	0,14	0,03	0,02
Fe/Ti 3.8-4.2	–	–	–	–	0,47	0,99	0,17	0,17	0,02	0,02
Fe/Ti 4.2-4.6	–	–	–	–	0,44	1,08	0,19	0,19	0,03	0,02
Fe/Ti 4.6-5.0	–	–	–	–	0,44	1,19	0,20	0,19	0,03	0,02
Fe/Ti 5.0-5.4	–	–	–	–	0,41	1,48	0,18	0,18	0,03	0,02
Fe/Ti 5.4-5.8	–	–	–	–	0,35	1,87	0,16	0,16	0,02	0,02
Fe/Ti 5.8-10	–	–	–	–	3,04	25,64	0,93	0,95	0,16	0,07
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,01	0,01	–	0,01	–	–	0,02	0,02	0,02	0,02
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	0,02	0,01	0,01	0,01	0,12	0,01	0,18	0,18	0,06	0,09
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	–	–	–	–	0,55	0,05	0,80	0,64	0,18	0,13

Lagerstätte	41	41	41	41	42	43	43	43	43	43
Dünnschliff	BGR-41F	BGR-41G	BGR-41H	BGR-41I	BGR-042	BGR-43A	BGR-43B	BGR-43C	BGR-43D	BGR-43E
Mineral Masse (%)	NL	2L	2HL	2NL	Poly	Mgt	<0,5	0,5–1	HL	NL
Zirkon	44,26	10,20	28,34	25,60	2,42	0,01	0,11	0,43	42,07	0,88
Zirkon-(Hf)	0,03	0,01	0,02	0,02	–	–	–	–	0,03	–
Chromit	–	–	–	–	0,09	0,69	0,22	0,16	0,02	–
Magnesiochromit	–	–	–	–	0,09	1,26	0,83	0,62	0,16	0,33
Kassiterit	1,08	54,88	8,77	2,89	–	–	–	–	0,01	–
Korund	0,44	0,03	0,19	0,21	–	–	–	–	0,01	0,03
Hämatit	–	–	–	–	14,07	3,58	1,35	1,31	0,31	0,64
Ti-Hämatit	–	–	–	–	0,99	6,88	0,58	0,56	0,10	0,07
Magnetit	–	–	–	–	1,34	0,83	0,21	0,19	0,04	0,05
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	–	–	–	–	0,06	5,30	0,04	0,04	0,02	0,07
Goethit	–	–	–	–	0,90	0,62	2,02	1,70	0,55	2,36
Limonit	–	–	–	–	2,80	1,79	2,49	2,59	0,84	3,44
Fe-Oxide	–	–	–	–	39,35	24,50	26,81	24,05	6,94	27,97
Gahnit	0,02	–	–	0,05	–	–	–	–	–	–
Hercynit	–	–	–	–	–	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03
Spinell	–	–	–	–	–	0,01	–	–	–	0,01
Chamosit	–	–	–	–	0,12	0,26	0,22	0,27	0,15	0,35
Titanit/Sphen	–	–	–	0,01	0,03	0,72	1,02	1,56	4,20	5,18
Epidot	0,01	–	–	–	0,29	0,30	10,79	13,14	10,37	18,23
SEE-Epidot (CeL)	–	–	–	–	–	0,03	0,09	0,08	0,05	0,09
Zoisit	0,01	–	–	0,01	–	0,01	0,03	0,12	0,50	0,93
Almandin	–	–	–	–	10,27	0,17	6,34	7,00	1,61	1,97
Almandin (Mg-Ca)	–	–	–	–	2,25	0,11	13,76	16,35	4,27	3,38
Almandin- Spessartin	–	–	–	–	0,23	–	0,38	0,28	0,05	0,07
Spessartin	–	–	–	–	–	–	0,01	0,01	–	–
Almandin-Pyrop	–	–	–	–	1,46	0,06	0,59	0,77	0,24	0,62
Almand.-Pyrop- Grossular	–	–	–	–	–	–	0,02	0,02	0,01	0,02
Grossular	–	–	–	–	0,06	0,11	1,00	1,28	1,09	1,94
Andradit	–	–	–	–	–	0,07	0,32	0,19	0,03	0,10
Granat1	–	–	–	–	0,20	0,10	0,70	0,75	0,21	0,32
Granat2	–	–	–	–	0,03	0,04	1,40	1,43	0,54	1,21
Schörl	0,01	0,04	0,01	0,01	0,44	0,05	0,46	0,67	0,45	0,97

Lagerstätte	41	41	41	41	42	43	43	43	43	43
Dünnschliff	BGR-41F	BGR-41G	BGR-41H	BGR-41I	BGR-042	BGR-43A	BGR-43B	BGR-43C	BGR-43D	BGR-43E
Mineral Masse (%)	NL	2L	2HL	2NL	Poly	Mgt	<0,5	0,5–1	HL	NL
Dravit	0,03	–	0,01	–	–	–	–	0,02	0,04	0,02
Turmalin	0,04	0,01	0,03	0,02	0,35	0,01	0,25	0,75	0,68	0,85
Topas	24,66	7,31	43,90	44,02	–	–	–	–	0,10	0,18
Andalusit/Kyanit/Silliman.	5,03	0,48	2,53	3,89	0,06	–	0,01	–	0,35	0,38
Aktinolith	–	–	–	–	0,03	0,04	0,06	0,05	0,07	0,15
Hornblende	–	–	–	–	0,47	1,70	2,36	2,06	1,16	3,57
Ferrohornblende	–	–	–	–	0,03	0,09	0,23	0,26	0,08	0,20
Na-Ca-Amphibol	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ca-Amphibol 1	–	–	–	–	0,03	0,02	0,20	0,23	0,10	0,21
Amphibol X	–	–	–	–	0,06	0,05	0,06	0,05	0,02	0,12
Orthopyroxen En87	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Orthopyroxen En75	–	–	–	–	0,06	0,58	0,89	0,81	0,49	1,79
Orthopyroxen En50	–	–	–	–	–	0,01	0,02	–	–	0,02
Diopsid	–	–	–	–	0,20	5,43	3,88	2,97	2,61	12,15
Staurolith	–	–	–	–	–	0,03	0,92	1,18	0,93	1,74
Beryll	0,05	–	0,01	0,01	0,06	–	–	–	0,01	0,02
Apatit	0,09	0,01	0,06	0,06	1,05	0,71	0,09	0,19	5,50	2,65
Apatit in Ilmenit	–	–	–	–	–	0,01	0,01	–	–	–
Monazit-(Ce)	0,09	0,01	0,03	0,04	0,18	0,07	1,16	1,98	1,69	0,66
Monazit-(La)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Monazit-(Nd)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cheralit-(Ce)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xenotim	–	–	–	–	–	–	0,07	0,16	0,04	0,04
Florencit-(Ce)	0,01	–	0,01	–	0,06	–	–	–	–	–
Florencit-(La)	–	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–
Baryt	–	–	–	–	2,13	–	–	–	0,01	–
Pyrit	0,37	3,46	0,63	0,32	0,85	0,02	0,01	0,01	0,05	–
Galenit	–	0,05	–	–	–	–	–	–	0,15	–

Lagerstätte	43	44	45	46	47	48	48	48	48	48
Dünnschliff	BGR-43F	BGR-044	BGR-045	BGR-046	BGR-047	BGR-048	BGR-48B	BGR-48C	BGR-48D	BGR-48E
Mineral Masse (%)	2L	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	<0,3	0,3–0,5	0,5–1	>1
Quarz	15,44	16,47	1,50	2,18	54,87	6,01	0,88	1,45	2,67	27,04
Feldspäte	1,95	1,44	0,46	0,32	3,33	0,95	0,37	1,19	2,40	2,16
Glimmer	1,91	1,94	0,70	0,56	1,30	1,31	0,75	1,58	3,48	1,20
Karbonate	1,53	0,38	0,84	15,51	-	1,44	0,03	0,40	3,67	6,33
Sekundärminerale	0,17	0,28	0,07	0,07	0,21	0,11	0,06	0,17	0,38	0,07
Gesamt Leichtfraktion	21,00	20,51	3,57	18,64	59,71	9,82	2,10	4,79	12,60	36,79

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/ Brookit	7,34	3,88	2,88	3,44	4,78	4,19	0,39	0,86	8,82	20,48
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ilmenit	1,58	19,43	5,67	6,82	10,29	5,10	5,43	0,69	0,36	0,02
Mn-Ilmenit	0,07	0,25	0,22	0,09	0,19	0,21	0,22	0,07	0,03	–
Ilmenit-(Mn)	–	0,03	0,01	–	–	0,01	0,01	–	–	–
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe-Ti Oxide	0,48	2,21	0,91	1,00	1,11	1,07	1,12	0,58	0,56	0,05
Fe/Ti 0-0.4	0,70	1,65	0,42	0,42	2,42	0,79	0,57	0,85	1,53	0,31
Fe/Ti 0.4-0.8	0,38	2,30	0,45	0,41	2,31	0,86	0,96	0,47	0,14	0,01
Fe/Ti 0.8-1.2	0,06	0,40	0,12	0,08	0,19	0,11	0,10	0,03	0,01	–
Fe/Ti 1.2-1.8	0,10	0,31	0,15	0,03	0,19	0,20	0,16	0,05	0,02	–
Fe/Ti 1.8-2.2	0,05	0,11	0,07	0,01	0,08	0,07	0,08	0,02	–	–
Fe/Ti 2.2-2.6	0,04	0,12	0,08	0,01	0,11	0,08	0,07	0,01	–	–
Fe/Ti 2.6-3.0	0,04	0,12	0,09	–	0,14	0,09	0,08	0,01	–	–
Fe/Ti 3.0-3.4	0,05	0,14	0,12	–	0,11	0,10	0,10	0,01	–	–
Fe/Ti 3.4-3.8	0,05	0,16	0,15	0,01	0,11	0,13	0,12	0,01	–	–
Fe/Ti 3.8-4.2	0,06	0,17	0,15	0,01	0,11	0,16	0,15	0,01	–	–
Fe/Ti 4.2-4.6	0,07	0,19	0,16	0,01	0,08	0,17	0,17	0,01	–	–
Fe/Ti 4.6-5.0	0,06	0,19	0,16	0,01	0,08	0,19	0,17	0,01	–	–
Fe/Ti 5.0-5.4	0,06	0,20	0,15	0,01	0,08	0,20	0,16	0,01	–	–
Fe/Ti 5.4-5.8	0,05	0,18	0,14	0,01	0,05	0,21	0,14	0,01	–	–
Fe/Ti 5.8-10	0,26	1,46	0,83	0,05	0,49	1,23	0,74	0,10	0,02	–
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,02	0,05	0,02	0,03	0,08	0,04	0,02	0,04	0,07	0,01
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	0,10	0,46	0,08	0,07	0,68	0,17	0,18	0,15	0,05	0,01
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	0,29	1,15	0,24	0,25	1,25	0,55	0,71	0,26	0,06	–

Lagerstätte	43	44	45	46	47	48	48	48	48	48
Dünnschliff	BGR-43F	BGR-044	BGR-045	BGR-046	BGR-047	BGR-048	BGR-48B	BGR-48C	BGR-48D	BGR-48E
Mineral Masse (%)	2L	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	<0,3	0,3–0,5	0,5–1	>1
Zirkon	5,28	4,62	3,18	0,54	1,71	3,68	0,03	0,06	0,54	20,15
Zirkon-(Hf)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,01
Chromit	0,01	0,15	0,20	0,01	–	0,13	0,09	0,01	–	–
Magnesiochromit	0,40	0,14	0,73	0,07	0,14	0,61	0,45	0,46	–	–
Kassiterit	–	0,14	–	–	–	–	–	–	–	0,01
Korund	0,02	0,03	–	–	–	0,01	–	0,01	–	0,05
Hämatit	0,62	3,80	0,55	0,01	0,60	0,83	0,58	0,48	0,01	–
Ti-Hämatit	0,20	0,74	0,48	0,03	0,27	0,64	0,48	0,07	0,02	–
Magnetit	0,08	0,80	0,10	–	0,11	0,15	0,12	0,06	–	–
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	0,03	0,04	–	–	–	0,11	0,04	–	–	–
Goethit	1,54	0,98	0,11	0,01	0,14	0,35	0,42	0,55	0,01	–
Limonit	2,23	2,34	0,54	0,16	0,30	1,20	1,48	1,09	0,41	0,04
Fe-Oxide	20,63	24,36	3,87	0,37	3,23	7,58	6,87	8,11	0,30	0,08
Gahnit	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,01
Hercynit	0,01	0,01	0,02	0,04	0,05	0,03	0,04	0,07	–	–
Spinell	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Chamosit	0,35	0,32	0,38	0,27	0,24	0,50	0,34	1,02	0,81	0,17
Titanit/Sphen	6,12	1,79	3,29	1,25	1,60	3,12	1,05	2,81	11,33	12,41
Epidot	20,03	4,83	10,81	4,76	3,88	10,97	0,98	39,17	23,30	1,20
SEE-Epidot (CeL)	0,08	0,02	0,11	0,03	0,03	0,09	0,06	0,28	0,05	–
Zoisit	0,83	0,06	0,16	0,44	0,33	0,22	–	0,07	1,13	1,29
Almandin	2,17	5,27	15,47	20,94	7,14	11,39	22,71	1,25	0,26	0,06
Almandin (Mg-Ca)	6,05	4,38	31,11	46,77	7,87	19,77	42,34	5,40	0,25	0,01
Almandin-Spessartin	0,10	0,19	0,53	0,53	0,52	0,39	0,87	–	–	–
Spessartin	–	0,03	0,01	–	0,08	–	0,02	–	–	–
Almandin-Pyrop	0,38	0,69	1,36	1,29	0,95	1,11	1,78	0,75	0,34	0,06
Almand.-Pyrop-Grossular	0,03	0,01	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,05	0,02	–
Grossular	1,92	0,53	1,22	0,31	0,98	1,06	0,43	3,07	4,13	0,37
Andradit	0,17	0,06	0,18	0,01	0,08	0,50	0,49	0,39	0,01	–
Granat1	0,37	0,63	1,06	0,84	1,11	0,67	1,31	0,53	0,29	0,07
Granat2	1,50	0,53	1,40	0,66	0,43	1,34	0,69	4,11	0,18	–
Schörl	0,60	0,76	0,18	0,25	2,17	0,32	0,15	0,86	0,73	0,05

Lagerstätte	49	54	60	60	60	60	60	62	63	64
Dünnschliff	BGR-049	BGR-054	BGR-60B	BGR-60C	BGR-60D	BGR-60E	BGR-60F	BGR-062	BGR-063	BGR-64B
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	<0,5	0,5–1	HL	NL	2L	Poly	Poly	<0,2
Quarz	25,46	6,44	0,32	0,37	26,61	17,59	5,81	51,92	1,38	0,79
Feldspäte	3,98	0,36	0,04	0,06	0,33	0,26	0,06	5,36	0,21	0,61
Glimmer	1,95	0,21	0,15	0,28	0,19	0,25	0,26	0,74	0,20	3,51
Karbonate	0,38	–	–	–	–	0,01	–	0,01	0,25	–
Sekundärminerale	0,18	0,06	0,23	0,59	0,65	0,71	0,63	0,09	0,02	0,15
Gesamt Leichtfraktion	31,95	7,07	0,75	1,29	27,78	18,82	6,76	58,12	2,06	5,06

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/Brookit	4,30	5,59	2,00	7,22	13,58	15,41	22,63	2,71	3,13	0,96
Ilmenorutil	–	0,01	0,03	0,44	–	0,02	0,01	–	–	–
Ilmenit	14,77	21,18	28,71	14,35	0,02	0,01	0,01	10,30	28,35	29,11
Mn-Ilmenit	0,18	0,45	0,67	0,53	–	–	–	0,21	0,30	0,08
Ilmenit-(Mn)	0,02	0,02	0,02	0,01	–	–	–	0,03	0,02	0,01
Ti-reicher Ilmenit	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–	–
Fe-Ti Oxide	2,29	2,03	1,78	0,99	–	–	0,01	1,04	2,55	1,98
Fe/Ti 0-0.4	1,41	1,99	18,27	21,66	0,32	0,43	0,54	1,94	0,49	3,42
Fe/Ti 0.4-0.8	2,27	3,36	11,79	9,54	0,01	0,01	0,06	3,29	1,63	17,22
Fe/Ti 0.8-1.2	0,24	0,35	0,51	0,17	–	–	–	0,27	0,35	0,69
Fe/Ti 1.2-1.8	0,28	0,12	0,17	0,05	–	–	–	0,74	0,22	1,39
Fe/Ti 1.8-2.2	0,13	0,03	0,01	0,01	–	–	–	0,21	0,11	0,52
Fe/Ti 2.2-2.6	0,13	0,05	0,01	0,01	–	–	–	0,21	0,14	0,41
Fe/Ti 2.6-3.0	0,16	0,05	0,01	0,01	–	–	–	0,21	0,15	0,33
Fe/Ti 3.0-3.4	0,18	0,05	0,01	0,01	–	–	–	0,19	0,18	0,27
Fe/Ti 3.4-3.8	0,18	0,06	0,01	0,01	–	–	–	0,19	0,26	0,23
Fe/Ti 3.8-4.2	0,19	0,07	0,01	0,01	–	–	–	0,21	0,32	0,20
Fe/Ti 4.2-4.6	0,23	0,08	0,01	0,01	–	–	–	0,24	0,38	0,18
Fe/Ti 4.6-5.0	0,23	0,08	0,01	0,01	–	–	–	0,24	0,37	0,17
Fe/Ti 5.0-5.4	0,23	0,08	0,01	0,02	–	–	–	0,29	0,35	0,15
Fe/Ti 5.4-5.8	0,24	0,09	0,01	0,01	–	–	–	0,29	0,31	0,14
Fe/Ti 5.8-10	1,96	0,82	0,09	0,11	–	–	–	2,10	1,62	1,05
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,03	0,05	0,42	0,64	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	0,39	0,81	7,44	6,84	0,02	0,02	0,05	0,50	0,15	0,59
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	1,12	2,06	6,25	4,75	–	0,01	0,04	1,65	1,17	5,43
Zirkon	3,20	31,66	0,01	0,08	6,28	2,90	4,43	5,15	13,51	0,22

Lagerstätte	49	54	60	60	60	60	60	62	63	64
Dünnschliff	BGR-049	BGR-054	BGR-60B	BGR-60C	BGR-60D	BGR-60E	BGR-60F	BGR-062	BGR-063	BGR-64B
Mineral Masse (%)	Poly	Poly	<0,5	0,5–1	HL	NL	2L	Poly	Poly	<0,2
Zirkon-(Hf)	0,02	0,08	–	–	0,01	–	–	–	0,03	–
Chromit	0,18	0,21	0,32	0,26	–	–	–	0,05	0,19	0,04
Magnesiochromit	0,18	0,45	2,11	1,63	0,03	0,02	–	1,65	0,24	0,02
Kassiterit	0,10	10,79	0,07	0,43	0,61	0,54	0,62	–	0,26	–
Korund	0,02	0,01	0,01	0,04	0,91	1,30	1,86	–	–	–
Hämatit	7,42	0,74	0,03	0,01	–	–	–	6,13	1,35	4,32
Ti-Hämatit	0,54	0,18	0,06	0,05	–	–	–	0,88	0,50	1,47
Magnetit	0,89	0,13	0,01	–	–	–	–	1,06	0,28	0,68
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	0,05	0,01	–	–	–	–	–	0,08	0,01	0,11
Goethit	0,36	0,03	–	–	–	–	–	0,32	0,06	0,80
Limonit	1,23	0,10	0,01	0,01	–	–	–	1,01	0,19	3,13
Fe-Oxide	18,07	2,28	0,13	0,08	–	–	–	17,99	4,72	23,44
Gahnit	–	0,02	0,03	0,16	–	–	–	0,03	–	–
Hercynit	–	0,01	0,04	0,03	–	–	–	0,03	0,01	–
Spinell	–	–	0,02	0,02	–	–	–	0,03	–	–
Chamosit	0,21	0,01	0,02	0,05	–	–	–	0,11	0,03	0,03
Titanit/Sphen	1,20	0,39	0,12	0,36	0,34	0,31	0,33	0,96	0,26	0,01
Epidot	16,36	2,51	3,76	6,11	0,06	0,12	0,12	4,14	0,26	0,03
SEE-Epidot (CeL)	0,02	0,01	0,01	0,01	–	–	–	0,03	0,01	–
Zoisit	0,15	0,09	–	0,05	0,07	0,07	0,13	0,27	0,01	–
Almandin	3,10	1,06	0,50	0,29	–	–	–	6,74	9,82	0,81
Almandin (Mg-Ca)	4,43	1,42	0,93	0,84	–	–	–	6,34	14,40	0,03
Almandin- Spessartin	0,16	0,14	0,16	0,12	–	–	–	0,48	0,31	–
Spessartin	–	0,01	0,05	0,01	–	–	–	0,03	–	–
Almandin-Pyrop	0,65	0,13	0,15	0,11	–	–	–	0,77	0,50	0,09
Almand.-Pyrop- Grossular	0,02	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–
Grossular	0,99	0,28	0,41	0,81	0,01	0,04	0,03	0,66	0,03	–
Andradit	0,11	0,03	0,05	0,07	–	–	–	0,03	–	–
Granat1	0,76	0,31	0,77	0,52	0,01	–	–	1,22	0,26	0,03
Granat2	0,55	0,25	0,34	0,33	–	–	–	0,42	0,13	–
Schörl	0,93	0,33	6,89	8,68	0,07	0,06	0,06	0,98	0,03	0,01
Dravit	0,02	0,01	–	0,17	0,03	0,02	0,02	0,03	–	–

Lagerstätte	64	64	64	64	64	65	66	67	68
Dünnschliff	BGR-64C	BGR-64D	BGR-64E	BGR-64F	BGR-64G	BGR-065	BGR-066	BGR-067	BGR-068
Mineral Masse (%)	0,2–0,3	0,3–1	HL	NL	L	Poly	Poly	Poly	Poly
Quarz	1,29	4,07	65,40	72,00	71,76	45,53	47,10	10,96	2,28
Feldspäte	1,05	2,84	15,12	15,21	13,83	13,38	0,82	1,14	0,56
Glimmer	5,24	10,11	2,25	2,66	3,02	3,97	0,22	1,28	0,31
Karbonate	–	0,01	0,02	0,02	0,02	0,30	0,71	0,05	0,01
Sekundärminerale	0,25	0,41	0,14	0,18	0,16	0,30	0,26	0,22	0,04
Gesamt Leichtfraktion	7,84	17,44	82,93	90,07	88,79	63,49	49,11	13,66	3,20

Schwermineraldaten wurden bezüglich Leichtfraktion korrigiert

Rutil/Anatas/Brookit	1,73	2,36	4,05	9,28	13,04	2,72	16,45	4,25	1,57
Ilmenorutil	–	–	–	–	–	–	0,03	0,04	0,01
Ilmenit	20,88	21,16	0,17	0,25	0,42	11,94	31,20	15,55	18,00
Mn-Ilmenit	0,17	0,05	–	–	–	0,14	0,21	0,23	0,18
Ilmenit-(Mn)	0,04	0,05	–	–	–	0,01	0,14	0,02	0,02
Ti-reicher Ilmenit	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe-Ti Oxide	1,62	1,72	0,02	0,06	0,05	2,13	1,83	1,28	1,01
Fe/Ti 0-0.4	7,82	9,64	0,30	0,60	0,65	0,60	1,90	2,42	0,32
Fe/Ti 0.4-0.8	12,57	10,15	0,10	0,17	0,19	0,26	2,21	4,06	0,95
Fe/Ti 0.8-1.2	1,35	1,59	0,01	0,02	0,02	0,08	0,87	0,34	0,23
Fe/Ti 1.2-1.8	3,11	3,47	0,01	0,02	0,06	0,11	2,41	0,34	0,40
Fe/Ti 1.8-2.2	1,06	1,02	0,01	–	–	0,04	0,18	0,12	0,31
Fe/Ti 2.2-2.6	0,68	0,62	0,01	–	0,01	0,04	0,03	0,09	0,72
Fe/Ti 2.6-3.0	0,45	0,39	0,01	–	–	0,04	0,01	0,09	1,27
Fe/Ti 3.0-3.4	0,31	0,26	–	0,02	–	0,05	–	0,09	1,50
Fe/Ti 3.4-3.8	0,23	0,18	–	–	0,01	0,06	–	0,09	1,45
Fe/Ti 3.8-4.2	0,17	0,14	–	–	0,01	0,07	–	0,10	1,26
Fe/Ti 4.2-4.6	0,14	0,12	–	–	0,01	0,09	–	0,11	1,03
Fe/Ti 4.6-5.0	0,11	0,10	–	–	–	0,10	0,01	0,12	0,78
Fe/Ti 5.0-5.4	0,10	0,09	–	0,01	0,01	0,10	–	0,12	0,62
Fe/Ti 5.4-5.8	0,08	0,07	–	–	–	0,08	–	0,11	0,48
Fe/Ti 5.8-10	0,53	0,50	0,01	0,02	0,02	0,44	0,03	0,88	2,22
Fe/Ti 0-0.2 (Mn)	0,09	0,14	–	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	0,01
Fe/Ti 0.2-0.4 (Mn)	1,08	0,83	0,01	0,01	0,02	0,06	0,48	0,68	0,12
Fe/Ti 0.4-0.6 (Mn)	4,21	1,59	–	0,02	0,04	0,11	1,36	1,70	0,59
Zirkon	0,22	0,33	6,50	18,09	8,08	0,83	22,02	3,18	10,91

Lagerstätte	64	64	64	64	64	65	66	67	68
Dünnschliff	BGR-64C	BGR-64D	BGR-64E	BGR-64F	BGR-64G	BGR-065	BGR-066	BGR-067	BGR-068
Mineral Masse (%)	0,2–0,3	0,3–1	HL	NL	L	Poly	Poly	Poly	Poly
Zirkon-(Hf)	–	–	–	0,01	–	–	0,02	–	0,01
Chromit	0,01	–	–	–	–	0,27	0,23	0,10	0,03
Magnesiochromit	0,08	0,07	–	–	–	0,17	1,68	0,28	0,14
Kassiterit	–	–	–	–	–	–	0,55	0,10	8,72
Korund	–	–	–	–	–	–	0,04	0,16	–
Hämatit	3,85	3,34	0,04	0,09	0,10	2,49	0,02	0,43	5,45
Ti-Hämatit	2,18	2,24	0,03	0,01	0,06	0,92	0,74	0,55	2,97
Magnetit	0,57	0,41	–	0,03	0,01	0,34	0,01	0,08	1,16
Ti-Mn-Magnetit/ Hämatit	0,12	0,10	–	–	–	0,01	0,02	0,01	0,32
Goethit	0,80	0,95	0,02	0,02	0,05	1,68	0,03	0,08	0,39
Limonit	4,34	5,76	0,29	1,20	0,88	2,82	0,03	0,28	1,31
Fe-Oxide	23,78	26,01	0,54	1,85	1,98	15,60	0,17	3,16	23,00
Gahnit	–	–	–	–	–	–	–	0,01	0,03
Hercynit	–	–	–	–	–	–	0,03	0,03	–
Spinell	–	–	–	–	–	–	0,03	–	–
Chamosit	0,09	0,36	0,55	1,63	1,44	1,51	0,02	0,20	0,12
Titanit/Sphen	–	0,11	0,13	0,68	0,11	2,42	0,16	0,81	0,16
Epidot	–	0,21	0,02	0,20	0,20	22,54	0,77	9,94	0,09
SEE-Epidot (CeL)	–	–	–	0,01	–	0,05	–	0,03	0,01
Zoisit	–	–	–	0,02	0,01	0,26	0,01	0,11	0,01
Almandin	4,37	1,58	0,33	1,30	1,00	5,00	0,08	10,55	1,03
Almandin (Mg-Ca)	0,32	0,20	0,09	0,44	0,32	5,37	0,30	14,17	0,80
Almandin-Spessartin	0,04	–	–	0,02	0,01	0,05	0,01	0,29	0,09
Spessartin	–	–	–	–	–	–	–	0,01	–
Almandin-Pyrop	0,39	0,48	0,36	0,97	0,93	1,93	0,01	1,59	0,17
Almand.-Pyrop- Grossular	–	–	–	–	0,01	0,06	–	0,04	–
Grossular	–	0,01	0,01	0,26	0,07	1,39	0,14	1,17	0,03
Andradit	–	–	–	–	–	0,12	–	0,11	0,01
Granat1	0,07	0,16	0,39	1,43	1,27	0,60	0,07	0,96	0,23
Granat2	–	0,03	–	0,01	0,01	0,79	0,04	0,80	0,02
Schörl	0,05	0,23	0,26	0,71	0,62	0,80	4,31	1,15	0,10
Dravit	0,01	0,02	0,25	0,23	0,32	0,01	0,08	0,02	–
Turmalin	0,03	0,31	0,31	0,88	0,68	0,53	3,81	0,63	0,02

Lagerstätte	64	64	64	64	64	65	66	67	68
Dünnschliff	BGR-64C	BGR-64D	BGR-64E	BGR-64F	BGR-64G	BGR-065	BGR-066	BGR-067	BGR-068
Mineral Masse (%)	0,2–0,3	0,3–1	HL	NL	L	Poly	Poly	Poly	Poly
Topas	–	–	0,88	0,01	0,01	–	0,19	6,92	0,04
Andalusit/Kyanit/Silliman.	–	–	–	–	0,01	0,03	0,09	1,05	0,04
Aktinolith	–	–	–	0,01	–	0,42	–	0,11	0,01
Hornblende	0,01	0,10	0,17	0,51	0,38	7,49	0,10	3,06	0,39
Ferrohornblende	0,01	–	–	–	0,01	0,23	–	0,19	0,02
Na-Ca-Amphibol	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ca-Amphibol 1	–	0,04	0,01	0,01	–	0,47	–	1,00	0,03
Amphibol X	–	0,01	–	–	–	0,13	–	–	0,01
Orthopyroxen En87	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Orthopyroxen En75	0,07	0,19	0,62	2,12	1,74	0,41	0,07	0,05	0,19
Orthopyroxen En50	–	–	–	–	–	–	–	0,01	0,02
Diopsid	–	0,08	0,07	0,04	–	0,93	0,01	0,23	0,78
Staurolith	–	–	–	–	–	–	2,20	1,87	0,04
Beryll	–	0,02	0,74	2,68	2,05	0,19	0,10	0,02	–
Apatit	0,04	0,13	5,09	10,67	6,63	0,33	0,09	0,73	0,33
Apatit in Ilmenit	0,01	0,01	–	–	–	–	–	–	0,02
Monazit-(Ce)	0,02	0,07	0,71	1,01	1,92	1,14	1,93	0,50	5,32
Monazit-(La)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Monazit-(Nd)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cheralit-(Ce)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xenotim	–	0,09	–	0,01	–	–	0,21	–	0,26
Florencit-(Ce)	–	–	–	0,03	0,19	–	0,04	–	–
Florencit-(La)	–	–	–	0,02	0,18	–	0,02	–	–
Baryt	–	0,05	76,85	41,93	53,77	0,35	–	0,09	0,01
Pyrit	–	0,03	–	0,37	0,36	–	0,11	0,12	0,10
Galenit	–	–	–	–	–	0,01	–	0,11	–

**Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)**

Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin
Tel.: +49 30 36993 211
dera@bgr.de
www.deutsche-rohstoffagentur.de

ISBN: 978-3-948532-64-2 (PDF)
ISSN: 2193-5319