LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

Grubenwasserpotenzialstudie Sachsen

Kategorisierung und Analyse von Grubenwässern in stillgelegten Bergwerken Sachsens hinsichtlich ihres geothermischen Potenzials

Abschlussbericht

TU BERGAKADEMIE FREIBERG

TUBAF
Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.

tTD technische THERMO DYNAMIK

Kategorisierung und Analyse von Grubenwässern in stillgelegten Bergwerken Sachsens hinsichtlich ihres geothermischen Potenzials

M. Sc. Tom Ebel, Dr.-Ing. Thomas Grab, Dipl.-Wi.-Ing. Lukas Oppelt, MBA Timm Wunderlich,

M. Sc. Fritz Raithel, Dipl.-Wi.-Ing. Willi Krause, Prof. Dr.-Ing. Tobias Fieback

(Institut für technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg)

unter Mitarbeit von Karina Hofmann, Sascha Görne, Dr. Isabelle Weber (LfULG)

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 16

2 Grundlagen 18

2.1 Nutzungsarten von Grubenwasseranlagen 18

2.1.1 Offene Systeme ohne Reinjektion 18

2.1.2 Offene Systeme mit Reinjektion 19

2.1.3 Geschlossene Systeme 23

2.2 Energetische Berechnungen 25

2.2.1 Offene Systeme ohne Reinjektion 25

2.2.2 Offene Systeme mit Reinjektion 26

2.2.3 Geschlossene Systeme 28

3 Methodik zur Standortbewertung 29

3.1 Informationsgrundlage und Standortauswahl 29

3.2 Standort Analyse und GIS Darstellungen 32

3.2.1 Untertägige Standortbewertung 33

3.2.2 Übertägige Standortbewertung 39

3.2.3 Potenzial-Layer 46

3.2.4 Weiterführende Literatur 47

4 Standortbewertungen potenzieller geothermischer Grubenwassernutzungen 49

4.1 Altenberg 49

4.1.1 Untertägige Standortbewertung 49

4.1.2 Übertägige Standortbewertung 53

4.1.3 Potenzial-Layer 54

4.1.4 Weiterführende Literatur 55

4.2 Annaberg-Buchholz 56

4.2.1 Untertägige Standortbewertung 56

4.2.2 Übertägige Standortbewertung 59

4.2.3 Potenzial-Layer 60

4.2.4 Weiterführende Literatur 61

4.3 Aue-Bad Schlema 62

4.3.1 Untertägige Standortbewertung 62

4.3.2 Übertägige Standortbewertung 65

4.3.3 Potenzial-Layer 66

4.3.4 Weiterführende Literatur 67

4.4 Bad Gottleuba-Berggießhübel 71

4.4.1 Untertägige Standortbewertung 71
4.4.2 Übertägige Standortbewertung 73
4.4.3 Potenzial-Layer 74
4.4.4 Weiterführende Literatur 75
4.5 Brand-Erbisdorf 75
4.5.1 Untertägige Standortbewertung 75
4.5.2 Übertägige Standortbewertung 77
4.5.3 Potenzial-Layer 78
4.5.4 Weiterführende Literatur 79
4.6 Ehrenfriedersdorf 80
4.6.1 Untertägige Standortbewertung 80
4.6.2 Übertägige Standortbewertung 84
4.6.3 Potenzial-Layer 85
4.6.4 Weiterführende Literatur 86
4.7 Freiberg 89
4.7.1 Untertägige Standortbewertung 89
4.7.2 Übertägige Standortbewertung 91
4.7.3 Potenzial-Layer 92
4.7.4 Weiterführende Literatur 93
4.8 Freital 97
4.8.1 Untertägige Standortbewertung 97
4.8.2 Übertägige Standortbewertung 101
4.8.3 Potenzial-Layer 102
4.8.4 Weiterführende Literatur 103
4.9 Hohenstein-Ernstthal 103
4.9.1 Untertägige Standortbewertung 103
4.9.2 Übertägige Standortbewertung 106
4.9.3 Potenzial-Layer 107
4.9.4 Weiterführende Literatur 108
4.10 Johanngeorgenstadt 108
4.10.1 Untertägige Standortbewertung 108
4.10.2 Übertägige Standortbewertung 111
4.10.3 Potenzial-Layer 112
4.10.4 Weiterführende Literatur 113
4.11 Marienberg 114

4.11.1 Untertägige Standortbewertung ... 114
4.11.2 Übertägige Standortbewertung ... 116
4.11.3 Potenzial-Layer ... 117
4.11.4 Weiterführende Literatur ... 118
4.12 Oelsnitz im Erzgebirge ... 124
4.12.1 Untertägige Standortbewertung ... 124
4.12.2 Übertägige Standortbewertung ... 126
4.12.3 Potenzial-Layer ... 127
4.12.4 Weiterführende Literatur ... 128
4.13 Schneeberg ... 132
4.13.1 Untertägige Standortbewertung ... 132
4.13.2 Übertägige Standortbewertung ... 134
4.13.3 Potenzial-Layer ... 135
4.13.4 Weiterführende Literatur ... 136
4.14 Zwickau ... 137
4.14.1 Untertägige Standortbewertung ... 137
4.14.2 Übertägige Standortbewertung ... 139
4.14.3 Potenzial-Layer ... 140
4.14.4 Weiterführende Literatur ... 141
4.15 Zusammenfassung ... 144
5 Grubenwasserprobenahmen und Einsatz mobiler Wärmepumpenversuchsstand 146
5.1 Grubenwasserprobenahmen und -analysen ... 146
5.2 Messversuche des mobilen Versuchsstands ... 148
5.2.1 Versuchsstandort 1 ... 150
5.2.2 Versuchsstandort 2 ... 157
5.2.3 Zusammenfassung der Versuchsstandexperimente ... 163
6 Iststandanalyse bestehender Anlagen ... 166
6.1 Herausforderungen - Planung und Bau ... 167
6.2 Herausforderungen - Betrieb ... 169
6.3 Zusammenfassung ... 176
7 Zusammenfassung und Ausblick ... 177
8 Handlungsempfehlungen für Planung, Errichtung und Betrieb einer Grubenwassergeothermieanlage ... 179
8.1 Einleitung ... 179
8.2 Grundlagen zur energetischen Bewertung ... 180

8.3 Rechtlicher Rahmen und Beantragung 183
8.3.1 Vorbereitung 185
8.3.2 Beantragung und Umsetzung 186
8.3.3 Anlagenbetrieb 188
8.4 Hinweise für den Bau und Betrieb von Grubenwassergeothermieanlagen 189
8.5 Fördermöglichkeiten 191
Literaturverzeichnis 196
A 1 Grubenwasserprobenahmen 208

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der offenen Grubenwassernutzung ohne Reinjektion und Entwässerung in Fließgewässer (TUBAF, 2024a) 19
Abbildung 2: Schema einer offenen Grubenwassernutzung mit Reinjektion (TUBAF, 2024a) 20
Abbildung 3: Schema einer offenen Grubenwassernutzung mit Reinjektion und Fließwegoptimierung (TUBAF, 2024a) 22
Abbildung 4: Schema einer offenen Grubenwassernutzung mit Reinjektion und überlagerter zusätzlicher Wasserströmung (TUBAF, 2024a) 23
Abbildung 5: Anlagenschema zur Grubenwassersonde vom Projekt Leon (VATER, 2012) 24
Abbildung 6: Großteil der in Sachsen vorhandenen potenziellen Hohlräume mit ausgewählten Analysegemeinden (SOBA, 2023a) 31
Abbildung 7: Vereinfachte schematische Darstellung der Layerzusammenführung im GIS 32
Abbildung 8: Hohlraumverschnitte in den Auswahlgemeinden 39
Abbildung 9: Vereinfachte Methodik zur Modellierung des Wärmebedarfs auf Basis der vorgestellten Datengrundlagen sowie des DBI-Gebäudeatlas (DBI GTI, 2023) 41
Abbildung 10: Genutzte Polygonstruktur, dargestellt für einen Ausschnitt der Stadt Ehrenfriedersdorf 43
Abbildung 11: Visualisierung der Polygonaufteilung bezüglich der aufsteigend geordneten Wärmebedarfe 44
Abbildung 12: Angepasste Darstellung des Wärmebedarfs in der Gemeinde Annaberg-Buchholz 45
Abbildung 13: Beispielhafte Darstellung der Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung in der Gemeinde Annaberg-Buchholz 47
Abbildung 14: Schematischer Grubenriss des Bergwerks Zinnwald/Cinovec, entnommen aus (SMWA, 2008) 50
Abbildung 15: Positionen der Wasserlösestolln in Zinnwald-Georgenfeld 51
Abbildung 16: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Altenberg 52
Abbildung 17: Übertägige Bewertung der Gemeinde Altenberg mit Zinnwald-Georgenfeld 54
Abbildung 18: Potenzial-Layer der Gemeinde Altenberg mit Zinnwald-Georgenfeld 55
Abbildung 19: Netzdiagramm zur Einordnung des Potenzials zur Grubenwassernutzung am Mundloch des neuen Bielastollens, beste Wertung außen, nach OPPELT et al. (2020) 56
Abbildung 20: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Annaberg-Buchholz 58
Abbildung 21: Übertägige Bewertung der Gemeinde Annaberg-Buchholz 60
Abbildung 22: Potenzial-Layer der Gemeinde Annaberg-Buchholz 61

Abbildung 23: Netzdiagramm zur Einordnung des Potenzials zur Grubenwassernutzung am Mundloch des Tiefen St.-Christoph-Stollens, beste Wertung außen, nach (OPPELT et al., 2020) 62
Abbildung 24: Schematischer Schnitt der Grube Schlema-Alberoda (WISMUT GMBH, 2016) 63
Abbildung 25: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Aue-Bad Schlema 64
Abbildung 26: Übertägige Bewertung der Gemeinde Aue-Bad Schlema 66
Abbildung 27: Potenzial-Layer der Gemeinde Aue-Bad Schlema 67
Abbildung 28: Zweigeteilte Karte des geologischen Aufbaus des Reviers mit wichtigen Erzlagern und Stollen, angefertigt um 1890 (FISCHER et al., 2020) 71
Abbildung 29: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Bad Gottleuba-Berggießhübel 72
Abbildung 30: Übertägige Bewertung der Gemeinde Bad Gottleuba-Berggießhübel 74
Abbildung 31: Potenzial-Layer der Gemeinde Berggießhübel 75
Abbildung 32: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Brand-Erbisdorf 76
Abbildung 33: Übertägige Bewertung der Gemeinde Brand-Erbisdorf 78
Abbildung 34: Potenzial-Layer der Gemeinde Brand-Erbisdorf 79
Abbildung 35: Übersichtsrisskarte des Ehrenfriedersdorfer Revieres (SOBA, 2022) 81
Abbildung 36: Seigerriss der Sohlen und Schächte im Sauberger Feld sowie dem Westfeld (HÖSEL et al., 1994) 81
Abbildung 37: Zeitliche Veränderung der Fe- und As-Speziesgehalte im Flutungswasser am Überlauf Gesenk 2. Sohle (KLEMM et al., 2015) 82
Abbildung 38: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Ehrenfriedersdorf 83
Abbildung 39: Übertägige Bewertung der Gemeinde Ehrenfriedersdorf 85
Abbildung 40: Potenzial-Layer der Gemeinde Ehrenfriedersdorf 86
Abbildung 41: Modell der Fließstrecke des Grubenwassers im Nordwestfeld (PRETZSCHNER et al., 1993) 87
Abbildung 42: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Freiberg 90
Abbildung 43: Übertägige Bewertung der Gemeinde Freiberg 92
Abbildung 44: Potenzial-Layer der Gemeinde Freiberg 93
Abbildung 45: Technisches Schema des untersuchten Grubenwasserwärmespeichers Himmelfahrt Fundgrube (Schaltung Beladung) (SCHABERG, 1998) 95
Abbildung 46: Logo für das Grubenwärmespeicherprojekt MineATES (TUBAF, 2022b) 96
Abbildung 47: Übersichtschema über die Reviere in Freital (GOERKE-MALLET et al., 2016) 98
Abbildung 48: Schematischer Schnitt durch die Grube Dresden-Gittersee (WISMUT GMBH, 2017a) 99
Abbildung 49: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Freital 100

Abbildung 50: Übertägige Bewertung der Gemeinde Freital 102
Abbildung 51: Potenzial-Layer der Gemeinde Freital 103
Abbildung 52: Grundriss der Lampertus Fundgrube in Hohenstein-Ernstthal (St. Lampertus Fundgrube, 2023) 104
Abbildung 53: Saigerriss der Lampertus Fundgrube in Hohenstein-Ernstthal (St. Lampertus Fundgrube, 2023) 104
Abbildung 54: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Hohenstein-Ernstthal 105
Abbildung 55: Übertägige Bewertung der Gemeinde Hohenstein-Ernstthal 107
Abbildung 56: Potenzial-Layer der Gemeinde Hohenstein-Ernstthal 108
Abbildung 57: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Johanngeorgenstadt 110
Abbildung 58: Übertägige Bewertung der Gemeinde Johanngeorgenstadt 112
Abbildung 59: Potenzial-Layer der Gemeinde Johanngeorgenstadt 113
Abbildung 60: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Marienberg 115
Abbildung 61: Übertägige Bewertung der Gemeinde Marienberg 117
Abbildung 62: Potenzial-Layer der Gemeinde Marienberg 118
Abbildung 63: wichtigste Strecken zwischen Rudolphschacht (Schacht 45) und Schacht 139, Seigerriss zeigt die Schnittfläche von A-B zu A´-B´ zum Jahre 1955 aus (Grimm et al., 2001) 121
Abbildung 64: Prinzipskizze der Grubenwasseranlage am Schacht 139 (Matthes, 2007) 123
Abbildung 65: Wärmeübertrager und Anlagentechnik unter Tage der Grubenwasseranlage am Schacht 139 im installierten Zustand (Matthes, 2007). 123
Abbildung 66: Schematische Darstellung des Grubengebäudes im Bereich Oelsnitz (LfULG, 2010) 124
Abbildung 67: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Oelsnitz im Erzgebirge 125
Abbildung 68: Übertägige Bewertung der Gemeinde Oelsnitz im Erzgebirge 127
Abbildung 69: Potenzial-Layer der Gemeinde Oelsnitz im Erzgebirge 128
Abbildung 70: Darstellung der mit dem Grossfüllort kommunizierenden Auffahrungen im Phyllitbereich im östlichen Grubenfeld nach Felix et al. (2007) 130
Abbildung 71: Ausschnitt eines Ergebnissteckbriefes des Projektes MareEn am Standort "Kaisergrubenschacht" in Gersdorf (Grab et al., 2024) 131
Abbildung 72: Schematische Darstellung des Schneeberger Grubengebäudes oberhalb des Markus-Semler-Stollns (Wismut GmbH, 2012b) 132
Abbildung 73: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Schneeberg 133
Abbildung 74: Übertägige Bewertung der Gemeinde Schneeberg 135
Abbildung 75: Potenzial-Layer der Gemeinde Schneeberg 136

Abbildung 76: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Zwickau 138
Abbildung 77: Übertägige Bewertung der Gemeinde Zwickau 140
Abbildung 78: Potenzial-Layer der Gemeinde Zwickau..... 141
Abbildung 79: Ergebniskarte der Potenzialuntersuchungen aller Auswahlgemeinden mit dargestellten potenziellen Hohlraumflächen (SOBA, 2023a) 144
Abbildung 80: Darstellung der Lage der Probenahmestandorte 148
Abbildung 81: Mobiler Wärmepumpenversuchsstand des Instituts für technische Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg 150
Abbildung 82: Fließschema des mobilen Wärmeübertragerversuchsstandes am Versuchsstandort 1..... 151
Abbildung 83: Ergebnisse der Feststoffanalyse der Ablagerungen auf den Wärmeübertrageroberflächen des Versuchsstandes (Versuchsreihe 1: 08.03.2023, Versuchsreihe 2: 24.05.2023)..... 152
Abbildung 84: Vergleich des Verlusts durch Fouling für die verschiedenen untersuchten Wärmeübertrageroberflächen (H=Heiz-Wärmeübertrager, C=Kühl-Wärmeübertrager)..... 153
Abbildung 85: Verschmutzungen im Zulauf des Wärmeübertragers nach Versuch 1 154
Abbildung 86: Ablagerungen auf der Wärmeübertragerplatte des Standardmaterials nach Versuch..... 154
Abbildung 87: Verschmutzungen auf der NiCr23Mo16Cu -Platte nach Versuch 1 im Kühl-Wärmeübertrager 154
Abbildung 88: Verschmutzungen auf der Platte mit türkiser Beschichtung nach Versuch 1 im Heiz-Wärmeübertrager..... 154
Abbildung 89: Verschmutzungen auf der NiMo16Cr15W -Platte nach Versuch 2 im Heiz-Wärmeübertrager 154
Abbildung 90: Verschmutzungen auf der Titan-Platte nach Versuch 2 im Kühlwärmeübertrager..... 154
Abbildung 91: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf den Foulingwiderstand und bei verschiedenen Foulingmechanismen (modifiziert nach VDI-GESELLSCHAFT, 2013)..... 156
Abbildung 92: Fließschema des mWPVS der TU Bergakademie Freiberg am Versuchsstandort 2..... 157
Abbildung 93: Übertragbare Heizleistung pro verschmutzten Plattenpaares über den Wärmeübertrager (Heizseite, Grubenwasser 1) 158

Abbildung 94: Ergebnisse der Versuchsreihe für die unterschiedlichen Materialien im WÜ auf der Kühlseite (Grubenwasser 2) 159
Abbildung 95: Ergebnisse der Feststoffanalysen der Ablagerungen in den Wärmeübertragern 159
Abbildung 96: Verschmutzungen auf der ersten AISI-316-Platte auf der Seite des Grubenwassers 160
Abbildung 97: Verschmutzung auf der AISI-316-Platte auf der Seite des Grubenwassers 2 160
Abbildung 98: Verschmutzung auf der ersten ABL-Türkis-Platte auf der Seite des Grubenwassers 2 160
Abbildung 99: Schema des Reinigungsmechanismus des Ultraschalls nach KIESER et al. (2011) 162
Abbildung 100: Grafik zum Abschätzen des energetischen Potenzials eines Grubenwasserstandorts anhand der Wassertemperatur und dem verfügbaren Volumenstrom 181
Abbildung 101: Schema einer Anlage mit Grubenwasserzirkulation in den Strecken (TUBAF, 2024a) 182
Abbildung 102: Orientierungsschema zum Ablauf einer Errichtung und Inbetriebnahme einer Grubenwassergeothermieanlage 184

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile einer offenen Grubenwassernutzung ohne Reinjektion bezogen auf Nutzungsvarianten 26
Tabelle 2: Abrufbare Informationen in der GIS-Karte 33
Tabelle 3: Individuelle Skalierung der untertägigen Bewertungsfaktoren 35
Tabelle 4: Wichtung nach dem Rangfolgeverfahren für die untertägigen Bewertungsfaktoren 38
Tabelle 5: Spezifische Wärmebedarfe je Gebäudetyp (Einfamilienhäuser – EFH sowie Mehrfamilienhäuser – MFH) in Bestandsgebäuden nach (IWU, 2015) 40
Tabelle 6: Rechnerische Festlegung der quantitiven Wärmeabnahmegrenzen für die GIS-Software 45
Tabelle 7: Polygoncharakterisierung für die Bewertung der Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung anhand der Grubenwasserpotenzial-Gesamtwertung 46
Tabelle 8: Übersicht zur weiterführenden Literatur in den Untersuchungsstandorten 48
Tabelle 9: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Altenberg/Zinnwald 53
Tabelle 10: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Annaberg-Buchholz 59
Tabelle 11: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Aue-Bad Schlema 65
Tabelle 12: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Berggießhübel 73
Tabelle 13: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Brand-Erbisdorf 77
Tabelle 14: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Ehrenfriedersdorf 84
Tabelle 15: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Freiberg 91
Tabelle 16: Bewertung des Freiberger Reviers für die geothermische Grubenwassernutzung aus (GRIMM et al., 2001) 96
Tabelle 17: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Freital 101
Tabelle 18: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Hohenstein-Ernstthal 106
Tabelle 19: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Johanngeorgenstadt 111
Tabelle 20: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Marienberg 116
Tabelle 21: Bewertung des Revierteils Lauta in Marienberg für die geothermische Grubenwassernutzung (GRIMM et al., 2001) 121
Tabelle 22: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Oelsnitz im Erzgebirge 126
Tabelle 23: Benötigte Wärmeleistung verschiedener Versorgungsgebiete im Stadtgebiet Oelsnitz/ Erzgebirge, entnommen aus FELIX et al. (2007) 129
Tabelle 24: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Schneeberg 134
Tabelle 25: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Zwickau 139

Tabelle 26: Bewertung des Zwickauer Reviers für die geothermische Grubenwassernutzung aus (GRIMM et al., 2001) 142
Tabelle 27: Auflistung der vorgenommenen Analyseverfahren und Parameter für jeden Probestandort 146
Tabelle 28: Vorbereitungsmatrix für die Messung von Grubenwasserparametern 147
Tabelle 29: Übersicht der Probenahmestandorte in den Auswahlgemeinden 147
Tabelle 30: Messwerte des mWPVS am Anfang und am Ende der Messperioden 152
Tabelle 31: In Sachsen errichtete Grubenwassergeothermieanlagen geordnet nach aktuellem Betriebsstatus (Stand 30.04.2024) 166
Tabelle 32: Aufgetretene Probleme bei der Planung und des Baus in bestehenden sächsischen Anlagen und Maßnahmen zur Vorbeugung und Beseitigung 167
Tabelle 33: Aufgetretene Probleme bei dem Betrieb in bestehenden sächsischen Anlagen und Maßnahmen zur Vorbeugung sowie zur Beseitigung 169
Tabelle 34: aufgetretene Probleme bei Grubenwasseranlagen und Maßnahmen zur Vorbeugung sowie zur Beseitigung 190
Tabelle 35: Auflistung einer Auswahl von Förderinitiativen für grubenwassergeothermische Systeme (Stand: 27.08.2024) 193

Tabellenverzeichnis im Anhang

Tabelle A 1: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 1 208
Tabelle A 2: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 2 209
Tabelle A 3: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 3 210
Tabelle A 4: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 4 211

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BBergG	Bundesberggesetz
BBW	Besucherbergwerk
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BSA	Bergschadenskundliche Analyse
CIP	Cleaning in Place (Reinigung vor Ort)
EE	Erneuerbare Energien
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
GeolDG	Geologiedatengesetz
GIS	Geoinformationssystem
GOK	Geländeoberkante
GW	Grubenwasser
hRFA	handgehaltener Röntgenfluoroeszenz-Analysator
JAZ	Jahresarbeitszahl
JTF	Just Transition Fund
KFW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
LSG	Landschaftsschutzgesetz
mWPVS	Mobiler Wärmepumpenversuchsstand
NHN	Normalhöhenull
NSG	Naturschutzgebiet
OW	Oberflächenwasser
PV	Photovoltaik
RAG	RAG Aktiengesellschaft
SAB	Sächsische Aufbaubank
SIB	Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement
SOBA	Sächsisches Oberbergamt
SMEKUL	Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft
TOC	Total organic carbon
TIC	Total inorganic carbon

TN	Total Nitrogen
TTD	Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (TU Bergakademie Freiberg)
TUBAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg
uWB	Untere Wasserbehörde
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VwVfG	Verwaltungsverfahrensgesetz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WP	Wärmepumpe
WÜ	Wärmeübertrager

1 Einleitung

Durch den europäischen Green Deal wurde beschlossen, dass bis zum Jahr 2030 der Anteil der regenerativen Energieerzeugung auf 40 % ansteigen soll (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2019). Im Jahr 2022 lag der Anteil am Primärenergieverbrauch in Deutschland bei 17,6 %. Im Bereich des Stromsektors konnte beispielsweise bereits eine Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien auf 51,8 % an der Bruttostromerzeugung erreicht werden (AGEE-STAT, 2024). Der Sektor der Wärmeversorgung liegt mit einem Anteil von 18,8 % hingegen unter dem Durchschnitt. Dies ist besonders unter dem Gesichtspunkt zu bewerten, dass über 50 % und damit der Großteil des Endenergieverbrauchs im Bereich der Wärmebereitstellung zu verorten ist (AG ENERGIEBILANZEN, 2023). Demnach können Maßnahmen zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien dort potentiell den größten Einfluss aufweisen. Insbesondere die Geothermienutzung stellt für die Wärmeversorgung ein erhebliches Potenzial dar, welches bisher noch nicht großflächig erschlossen wurde.

Ein besonderes Potenzial zur Nutzung geothermischer Wärme entsteht durch die bergbaubedingten Veränderungen des Erdkörpers. Durch vom Menschen erschaffene Hohlraumsysteme entstanden große wärmeübertragende Flächen. Diese Hohlräume weisen teilweise beträchtliche Mengen an gesammeltem Wasser auf, welches für eine Wärmenutzung erschlossen werden kann. Durch die weiträumigen untertägigen Strukturen kann das sogenannte Grubenwasser effizienter die Wärme aus dem Gestein aufnehmen. Damit entsteht im Vergleich zur klassischen oberflächennahen Geothermie ein erhöhtes Regenerationsvermögen der Wärmequelle. Gleichzeitig ist das Risiko kein nutzbares Wasser anzutreffen (Fündigkeitsrisiko) im Vergleich zur Tiefengeothermie geringer, da zu erschließende Gebiete meist risskundlich dokumentiert beziehungsweise noch begehbar sind. Weiterhin könnten Schächte dazu genutzt werden, Rohrleitungen für den Wärmetransport über Tage einzubringen, was weniger Kosten verursacht, als Bohrungen neu abzuteufen (LANUV, 2018; TUBAF, 2022a).

Dennoch gibt es gleichermaßen auch Nachteile gegenüber einer klassischen geothermischen Nutzung mit Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren. Je nach technischer Realisierung und vorliegenden Gegebenheiten muss teilweise ein erheblicher Pumpaufwand betrieben werden, um die Grubenwässer zu heben. Weiterhin ist die Einbringung von systemrelevanter Technik wie zum Beispiel Wärmeübertrager unter Tage oftmals mit einem größeren finanziellen und logistischen Aufwand verbunden. Zusätzlich besitzt die chemische Beschaffenheit der Grubenwässer einen mitunter großen Einfluss auf technische Bauteile. Werden diese Herausforderungen jedoch beachtet und Erfahrungen aus bereits operativen Grubenwassergeothermieanlagen implementiert, so bietet sich durch die Nutzung dieser nachhaltigen lokalen Energieressource ein großes Potenzial.

Wenngleich die geothermische Nachnutzung von Bergwerken nicht dazu in der Lage ist, flüssige oder biogene Brennstoffe bei der Wärmebereitstellung vollständig abzulösen, so kann sie doch einen essenziellen Beitrag in den Bergbauregionen leisten. Die vorliegende Studie untersucht aus diesem Grund fokussiert das geothermische Potenzial von Grubenwässern in Sachsen.

Das Hauptziel der Studie ist es, die Erschließung der Grubenwassergeothermie als Wärmeversorgungsoption zu vereinfachen und zu fördern. Dazu werden Erkenntnisse aus der Literatur und praktischen Erfahrungsberichten zusammengetragen und aufgearbeitet. Gleichzeitig werden ausgewählte Standorte analysiert und durch ein Bewertungssystem eingeordnet. Folglich wird das geothermische Grubenwasserpotenzial abgeleitet. Die Ergebnisse werden in einem Geoinformationssystem (GIS) dargestellt, was eine schnelle und benutzerfreundliche Handhabung ermöglicht. An zwei Standorten wird ein mobiler Wärmepumpenversuchsstand zur Detailuntersuchung eingesetzt. Mit diesem werden Kenntnisse zum praktischen Anlagenbetrieb gewonnen und Verschmutzungen können analysiert werden. Zum Abschluss werden Handlungsempfehlungen erarbeitet. Diese erleichtern potentiellen Anlagenplanern, Energieversorgern sowie Gemeinden und Städten die Umsetzung einer solchen Anlage anhand von praktischen Hinweisen in der Beantragungsphase. Weiterhin werden technische Besonderheiten herausgestellt und eine Übersicht über Förderprogramme gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Nutzungsarten von Grubenwasseranlagen

Die Grubenwassergeothermie bietet ein besonderes Potenzial zur Nutzung geothermischer Wärme. Durch den Bergbau sind Hohlraumsysteme entstanden, welche große, untertägige Flächen aufweisen. Diese besitzen den Vorteil, dass durch das Wasser eine hohe Gesteinsmasse kontaktiert und somit ein guter Wärmeübergang ermöglicht wird. Um das Wärmeleistungspotenzial nutzbar zu machen, können verschiedene Arten der Erschließung angewandt werden (Grab et al., 2018). In dieser Studie werden grundlegend drei Arten der geothermischen Grubenwassernutzungsformen unterschieden, welche nachfolgend genannt und erklärt werden. Diese sind:

- offene Systeme ohne Reinjektion,
- offene Systeme mit Reinjektion,
- geschlossene Systeme.

Der Hauptunterschied zwischen offenen und geschlossenen Systemen ist, dass in offenen Systemen das Grubenwasser als primäres Wärmeträgermedium aktiv zirkuliert wird, während in geschlossenen Systemen der Wärmetransport durch ein Sekundärfluid, wie zum Beispiel Sole, realisiert ist. In offenen Systemen wird das Grubenwasser somit aktiv zu einem Wärmeübertrager gefördert. Vorhandene Grubenwassersysteme sind oft als offene Systeme ausgeführt, da so mit verhältnismäßigem Aufwand eine große Leistung durch einen hohen Förderstrom bereitgestellt werden kann (Oppelt et al., 2021). In geschlossenen Systemen gelangt das Grubenwasser über natürliche Strömungen an die Bauteile (zum Beispiel Rohrschlangen in einem Stollen).

Offene Systeme können zusätzlich noch in Systeme unterteilt werden, in denen das Wasser nach der energetischen Nutzung in ein Oberflächengewässer abgeschlagen (offene Systeme ohne Reinjektion) oder wieder in das Grubengebäude verbracht wird (offene Systeme mit Reinjektion). Nachfolgend sind diese Systemmöglichkeiten genauer betrachtet.

2.1.1 Offene Systeme ohne Reinjektion

Offene Systeme ohne Reinjektion, welche das Grubenwasser nutzen und nicht in das Grubengebäude reinjizieren sind zum Beispiel Systeme, die das Wasser aus Entwässerungsstollen nutzen. Dort kann das Wasser anschließend direkt erneut in den Stollen oder ein Fließgewässer abgeschlagen werden. Auch können Grubenwässer aus tieferen Strecken gepumpt und in übertägige Fließgewässer abgeschlagen werden. Die Beobachtung der Grubenwasserbelastung ist dabei essenziell, um den Gewässerschutz zu gewährleisten. Der Chemismus des Grubenwassers bringt in Verbindung mit dem Volumenstrom des

Fließgewässers Aussagen über die maximale sichere Einleitkapazität. Ein potenzieller Vorteil der offenen Nutzung ohne Reinjektion ist hingegen das nutzbare Temperaturniveau. Dieses bleibt durch die stetige Förderung von Grubenwasser nahezu konstant im Ausgangszustand und es ist kein Abkühleffekt zu verzeichnen wie bei offenen Systemen mit Reinjektion. Eine Grundvoraussetzung, um das so gewinnbare Potenzial umsetzen zu können, ist jedoch eine entsprechende Wasserverfügbarkeit. Insbesondere bei der Erschließung gefluteter Strecken muss durch Pumptests festgestellt werden, welche hydraulische Anbindung an der Extraktionsstelle in der Grube vorliegt. Ein geringer Abfall des Grubenwasserspiegels in der Bohrung deutet auf eine gute Anbindung zum restlichen gefluteten Grubenraum hin. Ein Schema der offenen Grubenwassernutzung ohne Reinjektion ist in Abbildung 1 dargestellt.

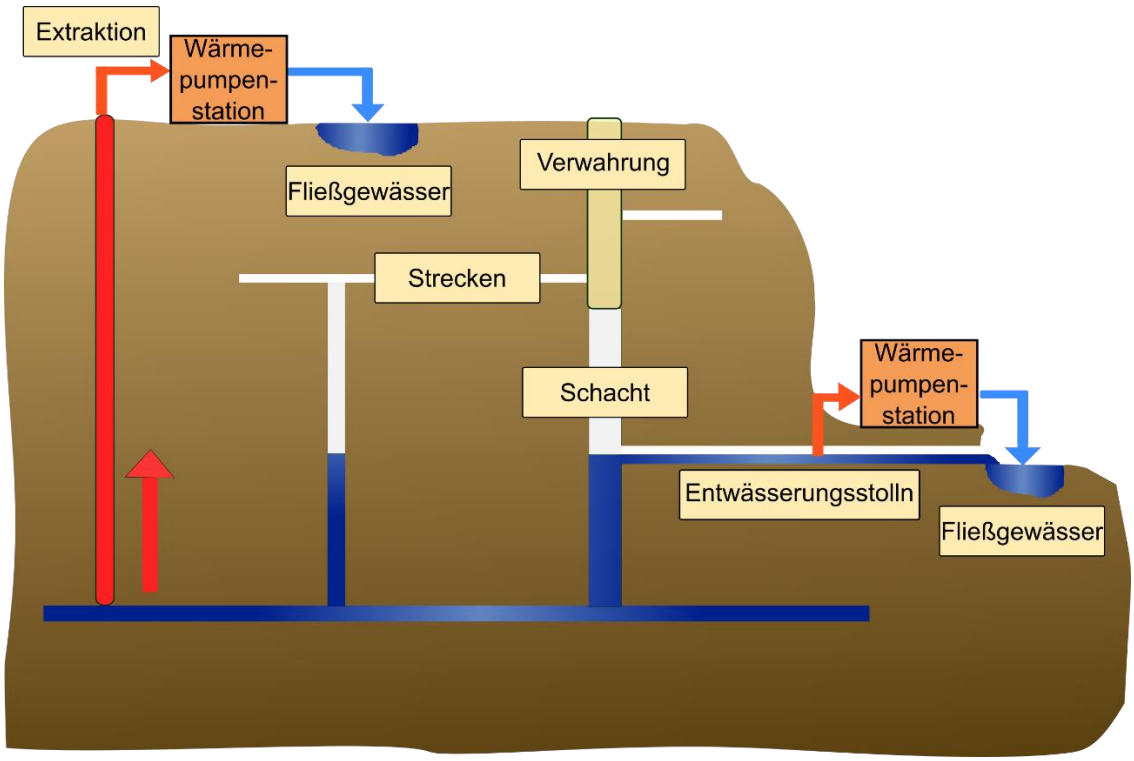


Abbildung 1: Schema der offenen Grubenwassernutzung ohne Reinjektion und Entwässerung in Fließgewässer (TUBAF, 2024a)

2.1.2 Offene Systeme mit Reinjektion

Einer der hauptsächlichen Gründe, welche das Einleiten des energetisch genutzten Grubenwassers verbietet, ist die bereits genannte Belastung des Grubenwassers durch gelöste und mitgeführte Stoffe. Durch die Standzeiten und die Temperatur des Grubenwassers kommt es in Bergwerken zu einer natürlichen Lösung von Mineralien aus dem Gestein. Bei einer hohen Mineralisation oder vorhandener Radioaktivität dürfen die anstehenden Wässer oftmals nicht ohne Vorbehandlung mit Oberflächenwasser in Kontakt kommen. Trotz dieser mitgeführten Stoffe kann die Nutzung des Grubenwassers durch

eine Reinjektion dennoch ohne Vorbehandlung ökologisch sicher durchgeführt werden. Durch Entnahme und anschließende Rückführung in die Grube entsteht bei gegebener hydraulischer Verbindung von der Reinjektionsbohrung zur Förderbohrung ein Wasserkreislauf. Besitzt die betreffende Grube keine eigene natürliche Strömung, wird nahezu die gesamte geförderte Wassermenge wieder zur Förderbohrung über die Hohlräume zurückfließen. Dabei regeneriert es seine Temperatur durch den Gesteinskontakt. So wiedererwärmt kann es, an der Förderbohrung angekommen, erneut genutzt werden. Eine Skizze dieses Systems kann der Abbildung 2 entnommen werden.

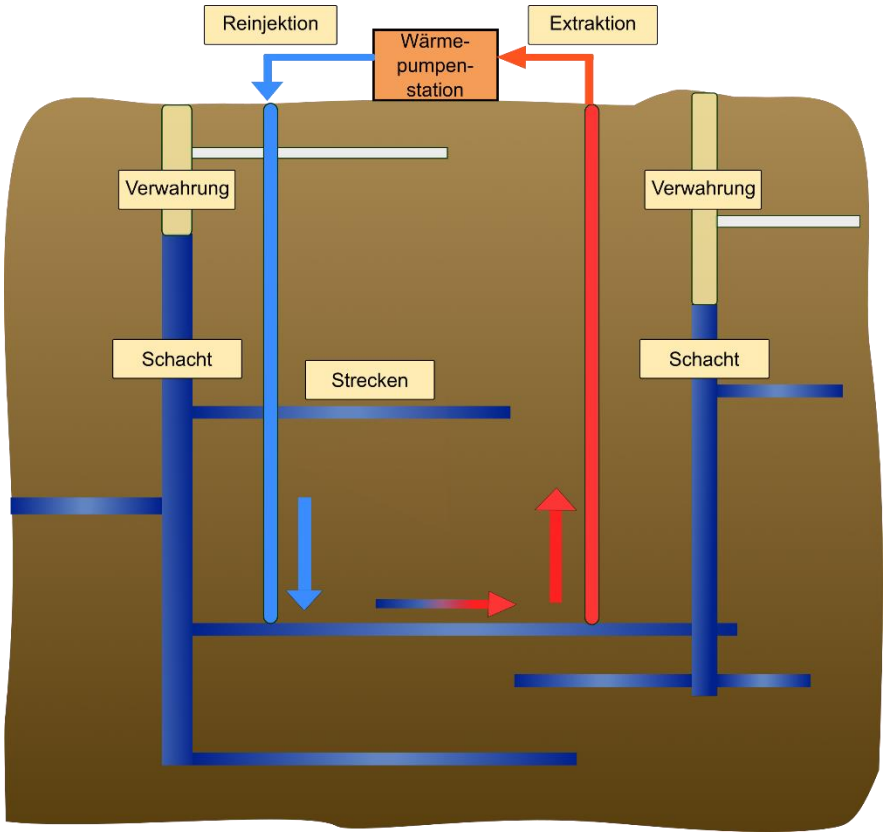


Abbildung 2: Schema einer offenen Grubenwassernutzung mit Reinjektion (TUBAF, 2024a)

Das Wärmepotenzial in einem solchen Kreislauf hängt dabei signifikant von der Wasser- und Gesteinstemperatur ab. Dadurch kann geschlussfolgert werden, dass tiefere Sohlen durch eine höhere Temperatur mitunter ein höheres Wärmepotenzial aufweisen. Bei der Nutzung solcher Bergwerksbereiche ist jedoch ebenfalls die Konzentration der gelösten Stoffe zu beachten. Tiefere Grubenwässer können durch diese ein höheres Verschmutzungsrisiko für Anlagenteile darstellen, was gleichermaßen mit erhöhten Wartungskosten einhergeht. Erstreckt sich der Wasserkreislauf zwischen Reinjektions- und Förderbohrung über mehrere Sohlen, so kann außerdem durch die Umwälzung das Gleichgewicht der Grubenwasserschichtung zwischen den Sohlen gestört werden (MUGOVA et al., 2018). Auch in oberflächennahen Sohlen können so unerwartet belastete Wässer auftreten. Die bestehende Grubenwassereinleitung in Oberflächengewässer stellt unter diesen Umständen eine Gefahr dar und müsste somit erneut einem Monitoring unterzogen werden. Aufgrund dieser Umstände müssen vor der Nutzung mehrere

Sohlen im Bergwerk Kenntnisse über deren Wasserbeschaffenheit zu Rate gezogen werden. Ist dies nicht möglich, ist eine Nutzung flacherer Sohlen zur Reduktion der genannten Risiken vorzuziehen (GRAB, 2018).

Analytische Voruntersuchungen konnten neben der Wassertemperatur außerdem einen hohen Einfluss der Fließweglänge auf das nutzbare Wärmepotenzial feststellen (TUBAF, 2022a). Sensitivitätsanalysen innerhalb der Stoffeigenschaften des Gesteins und des Wassers hingegen ergaben eine geringe Auswirkung auf das energetische Potenzial (zum Beispiel Dichte oder spezifische Wärmekapazität). Auch wenn verschiedene Gesteinstypen unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, weist eine abgekühlte Gesteinsmasse nach langer Zeit einen isolierenden Effekt auf. In der Praxis bedeutet dies, dass umso länger einer Gesteinsschicht Wärme entzogen wurde, gleichermaßen weniger Wärme an das Grubenwasser nachströmen kann. Es sollte aus diesem Grund primär darauf abgezielt werden, über einen längeren Fließweg eine größere Gesteinsfläche zu erschließen. Eine Fließwegoptimierung kann unter anderem künstlich durch das Einbringen von hydraulischen Blockaden wie Betonverfüllungen (zum Beispiel Betonpackern) vorgenommen werden. Mit dieser Methode können Förder- und Reinjektionsbohrungen ebenfalls verhältnismäßig nah in dieselbe Strecke verbracht werden, wobei durch den Packer ein direktes Zurückfließen verhindert wird. Dieses Prinzip ist in Abbildung 3 dargestellt.

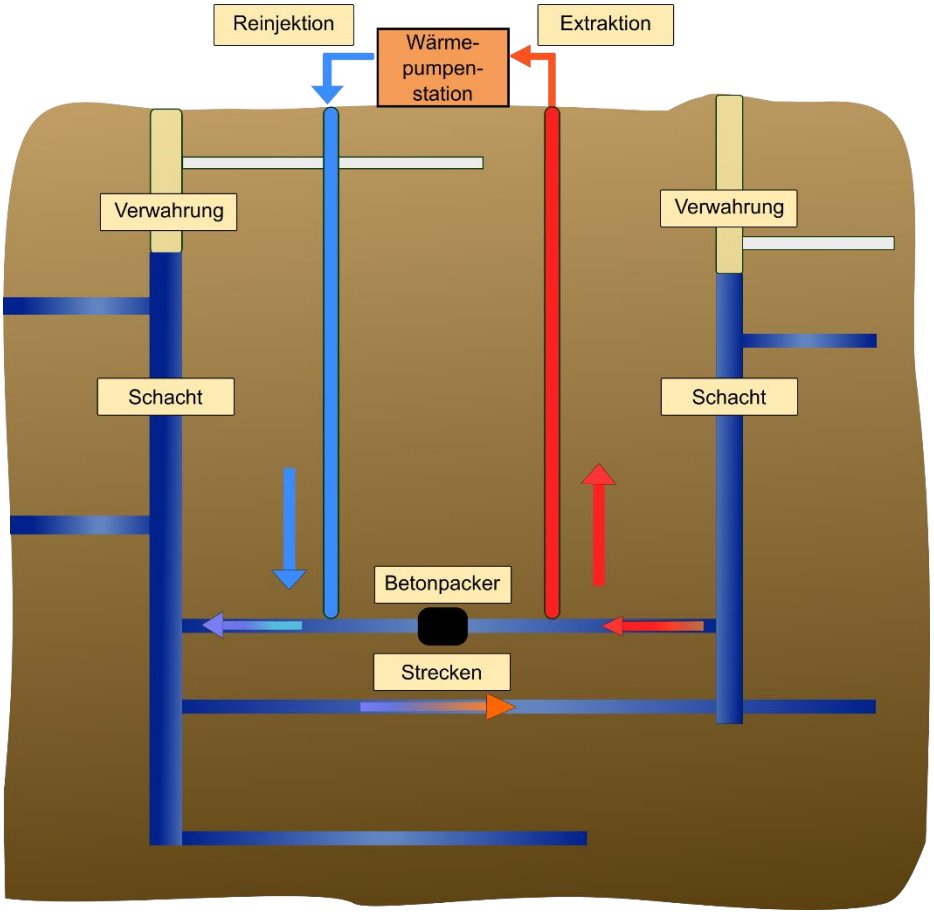


Abbildung 3: Schema einer offenen Grubenwassernutzung mit Reinjektion und Fließwegoptimierung (TUBAF, 2024a)

Letztlich gilt es ebenfalls noch zu erläutern, dass sich auch bei einem System mit Reinjektion nicht zwingend ein vollständig geschlossener Wasserkreislauf ausbildet. Es ist den hydrodynamischen Verhältnissen entsprechend ebenfalls möglich, dass Grubenwasser durch natürliche Strömungen aus anderen Teilen des Bergwerks zufließt. Ein Teil des thermisch genutzten Wassers kann dadurch ebenfalls nach dem Reinjizieren in andere Grubenbereiche abfließen. Da das neu zufließende Grubenwasser an der Förderbohrung noch nicht abgekühlt wurde, bringt es die Wärme des Ausgangstemperaturniveaus mit. Das Wärmepotenzial wird durch eine solche Sekundärströmung somit positiv beeinflusst. Diese Situation kann beispielsweise durch infiltrierendes Oberflächenwasser zustande kommen, welches über das Streckensystem und tiefer liegende Entwässerungsstollen aus dem Bergwerk geleitet wird. Ebenfalls kann anliegendes Grundwasser zu einer Strömung führen. Diese Fälle sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

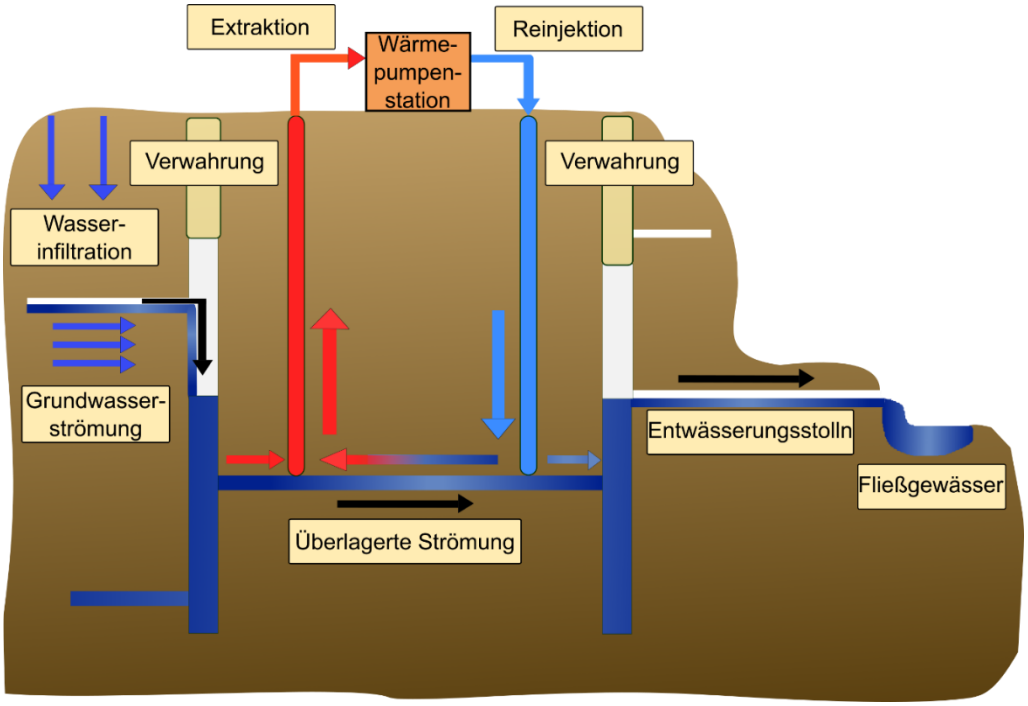


Abbildung 4: Schema einer offenen Grubenwassernutzung mit Reinjektion und überlagerter zusätzlicher Wasserströmung (TUBAF, 2024a)

Zusammenfassend sind die wichtigsten Parameter für das geothermische Potenzial einer offenen Grubenwasseranlage mit Reinjektion beschrieben:

- Temperatur,
- Fließweg,
- zusätzliche Wasserströmungen.

Diese sollten für eine Anlage nach Möglichkeit maximiert werden, um die größtmögliche Energiemenge langfristig zu erschließen. Weitere Parameter wie die Stoffeigenschaften des Gesteins und der geothermische Wärmestrom sollten ebenfalls beachtet werden, wobei diese in Voruntersuchungen jedoch eine untergeordnete Auswirkung auf das Wärmepotenzial bewiesen (TUBAF, 2022a).

2.1.3 Geschlossene Systeme

Geschlossene Systeme bieten gegenüber offenen Systemen den Vorteil, dass das Grubenwasser von kosten- und wartungsintensiven technischen Bauteilen weitestgehend abgekoppelt ist. Die Wärme des Grubenwassers wird dort beispielsweise durch einfache Rohrschlangen genutzt. Auch wenn durch das Systemdesign geringere Wartungskosten anfallen, so ist das energetische Potenzial eines geschlossenen Systems limitiert. Ein die Wärmenutzung begrenzender Faktor ist der Wärmeübergangskoeffizient im Wärmeübertrager zwischen Grubenwasser und Sekundärfluid. Durch die freie Überströmung in geschlossenen Systemen stellt sich dieser auf geringeren Niveaus ein als in offenen Systemen, bei denen

das Wasser aktiv durch einen Wärmeübertrager geführt wird. So ist eine deutlich höhere Übertragungsfläche erforderlich, um eine äquivalente Heiz- oder Kühlleistung abzudecken. Weiterhin besteht das Risiko, dass eine langsame Strömung zu einer geringen Temperaturdifferenz führt, was den Wärmestrom weiter beeinträchtigt. Daher sollten geschlossene Systeme lediglich für kleine Quartiere oder Versorgungskonzepte größerer Einzelgebäude in Betracht gezogen werden. Die genaue Wärmeleistung muss in jedem Fall durch eine Einzelfallbetrachtung bestimmt werden.

Eine Form der Systemausführung kann das gezielte Einbringen von Sonden in Teile des Grubengebäudes darstellen. Dadurch kann die Temperaturdifferenz sowie eine potenziell anliegende Grubenwasserströmung genutzt werden und die Temperaturregeneration ist begünstigt. Dies führt zu einer höheren, maximal nutzbaren Leistung und einer höheren erreichbaren Anlageneffizienz. Ein Beispiel hierfür ist ein in Aue-Bad Schlema umgesetztes Geothermiesondenprojekt. Dort wurden Koaxialsonden bis in die oberste geflutete Sohle des Bergwerks verbracht. Sie entziehen somit sowohl dem Gestein als auch dem Grubenwasser Energie. Das Grubenwasser ist dabei als ergiebiger vermutet, da in diesem Bergwerksteil eine Strömung herrscht, welche stetig warmes Grubenwasser an der Sonde vorbeiführt (STEYER et al., 2024). Ein Schema der Anlage ist in Abbildung 5 nach (VATER, 2012) aufgeführt.

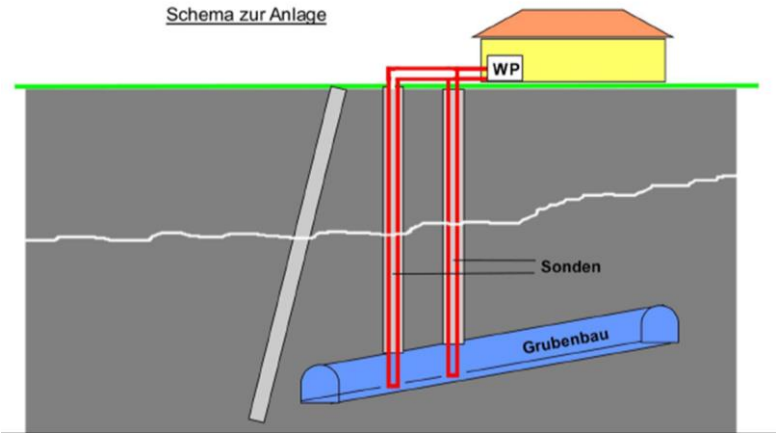


Abbildung 5: Anlagenschema zur Grubenwassersonde vom Projekt Leon (VATER, 2012)

Eine weitere solche Umsetzungsmethode kann das komplette Einlassen von wärmeübertragenden Elementen in ein kontinuierlich durchströmten Grubenteil sein. Als Beispiel hierfür kann die Stollennutzung unter dem Rathaus der Stadt Bad Ems genannt werden. Unter diesem wurden im "Stadtstollen" PE-Rohre verbracht, wodurch die Wärme des dort vorhandenen Grubenwasserstroms genutzt wird. Mit einem Volumenstrom von 100 m^3/h und einer Temperatur von ca. 25 °C bietet der Stollen ein kontinuierliches Wärmepotenzial. In einer Vorstudie zur Realisierung wurde auf eine spezifische Wärmeaufnahme von etwa 100 W pro Meter für wassergesättigte Bodenhorizonte verwiesen, wodurch sich mit der benötigten Heizleistung die entsprechende Länge der Rohre im Stollen ableiten lassen lässt (VDI 4640, 2021; ENERGIEATLAS RHEINLAND-PFALZ, 2018; IGEM, 2010).

Es ist wichtig zu beachten, dass bei Anlagen, welche größere Gebäude oder Gebäudekomplexe versorgen, durch den geringeren Wärmeübergang der im Grubenwasser befindlichen Bauteile eine entsprechend hohe Übertragungsfläche gewährleistet werden muss. Insbesondere unter dem Aspekt, dass Ablagerungen und Sedimentation an den wärmeübertragenden Teilen auftreten können, sollte eine abgestimmte Überdimensionierung essenzieller Bestandteil der Planung sein.

Insgesamt ist die Umsetzung geschlossener Grubenwasseranlagen bisher nur in wenigen Projekten erfolgt, was sich unter anderem mit den notwendigen Voraussetzungen begründen lässt. Der Zugang zum Grubenwasser, um großflächig Bauteile einzubringen sowie eine stete Strömung können hier unter anderem genannt werden. Sind gute Rahmenbedingungen gegeben, so können geschlossene Systeme jedoch eine effiziente Alternative zur offenen Grubenwassernutzung bieten.

2.2 Energetische Berechnungen

2.2.1 Offene Systeme ohne Reinjektion

Das Wärmepotenzial des Grubenwassers kann in offenen Anlagen ohne Reinjektion unter der Annahme von konstanten Grubenwassertemperaturen vergleichsweise einfach abgeschätzt werden. Die Berechnung kann mittels der Gleichung (1) durchgeführt werden.

$$\dot{Q}_{GW} = \dot{V}_{GW} \cdot \rho_{GW} \cdot c_{p,GW} \cdot \Delta T_{GW} \qquad (1)$$

$\dot{Q}_{GW}$ *Wärmeleistung [W]*
$\dot{V}_{GW}$ *Volumenstrom Grubenwasser [m³/s]*
ρ_{GW} *Dichte Grubenwasser [kg/m³]*
$c_{p,GW}$ *spezifische Wärmekapazität Grubenwasser [kJ/(kg·K)]*
ΔT_{GW} *Abkühlung des Grubenwassers [K]*

Bei der Nutzung von Entwässerungsstollen (siehe Abbildung 1) steht somit maximal der greifbare Volumenstrom der Entwässerung zur Verfügung. Dieser kann jedoch abhängig von den saisonalen Gegebenheiten variieren. Da diese Schwankungen schwer generalisierbar sind, sollte ein Nutzungsvorhaben für einen Entwässerungsstollen stets die saisonale Schwankung des Volumenstroms einbeziehen. Mit der jahreszeitlichen Schwankung des Durchflusses kann ebenfalls eine Variation der Wassertemperatur einhergehen. Auch diese sollte idealerweise über einen längeren Zeitraum gemessen werden.

Ist es durch eine ungenügende Abnehmerstruktur oder einen zu geringen Durchfluss nicht sinnvoll, einen Entwässerungsstollen zu nutzen, so können geflutete Strecken zur Wasserbereitstellung genutzt

werden. Eine Strecke wird dabei über eine Bohrung erschlossen und das Wasser aus ihr über Tage gefördert, wo es nach der energetischen Nutzung in ein Fließgewässer abgeschlagen wird (OPPELT et al., 2021). Wichtig ist dabei die chemische Zusammensetzung des Grubenwassers zu beachten, da Wässer aus tiefen Strecken mitunter eine beträchtliche Mineralisation aufweisen können (MUGOVA et al., 2018). Des Weiteren kann eine große Hubdistanz vom Grubenwasserlevel nach über Tage einen hohen Energieeinsatz bedeuten. Die somit notwendige Pumpleistung steht als Aufwand der entnommenen Wärme als Nutzen gegenüber. Um diesbezüglich die maximale Effizienz zu gewährleisten sollte in den Wärmeübertragern das Grubenwasser im Heizfall so weit wie möglich abgekühlt werden.

Abschließend sind Nutzungsvarianten im offenen Kreislauf ohne Reinjektion in Tabelle 1 gegenübergestellt. Die Vorteile und Nachteile sind generell als Trends zu verstehen und können sich unter besonderen Standortgegebenheiten anders darstellen.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile einer offenen Grubenwassernutzung ohne Reinjektion bezogen auf Nutzungsvarianten

Nutzungsvariante	Vorteile	Nachteile
Entwässerungsstollen	▪ geringere Erschließungskosten, ▪ geringere Pumpkosten, ▪ keine zusätzliche Gewässergefährdung	▪ limitierter Durchfluss, ▪ limitierte Temperatur, ▪ Standortgebunden
Streckennutzung	▪ höheres Temperaturniveau, ▪ potenziell höheres Fördervolumen möglich, ▪ Wasserhaltung möglich, ▪ potenziell stoffliche Nutzung, ▪ Berücksichtigung Abnehmerstruktur	▪ hohe Erschließungskosten, ▪ hohe Pumpkosten, ▪ Beeinflussung von höherliegenden Wasserkörpern möglich

2.2.2 Offene Systeme mit Reinjektion

In offenen Systemen mit Reinjektion wird Grubenwasser kontinuierlich aus einem Grubenteil entnommen und nach der Nutzung wieder an einer anderen Stelle in das Bergwerk verbracht. Das Grubenwasser wird zumeist von Unterwasserpumpen gefördert, die am Grund der Förderbohrung installiert sind. Der durch sie erbrachte Fördervolumenstrom führt zu einem Unterdruck in der Förderstrecke und neues Grubenwasser strömt nach. Ist die Reinjektionsbohrung über Wasserwegsamkeiten (zum Beispiel Strecken, Schächte, poröses Gestein) mit dem Ort der Förderbohrung hydraulisch verbunden, so bildet sich ein Kreislauf aus. Über den Fließweg durch die untertägigen Strukturen nimmt es erneut Energie aus dem Gestein auf oder gibt sie im Kühlfall daran ab.

Um eine solche Anlage adäquat auszulegen, muss eine Bewertung durchgeführt werden, welche Leistung über den Betriebszeitraum der Anlage nachhaltig genutzt werden kann. Der limitierende Faktor der maximal entziehbaren Wärme ist dabei die Rückgabetemperatur in das Grubengebäude. Aufgrund

von fehlenden Standards hinsichtlich geothermisch genutzten Grubenwassers ist es zielführend, sich an den Rückgabetemperaturen für Grundwasseranlagen zu orientieren. Dort liegt die praktische Begrenzung der Einleittemperatur bei mindestens 5 °C und maximal 20 °C (HOFMANN, 2023). Bei einer Wärmenutzung darf das Wasser somit nicht unter 5 °C abgekühlt werden, was die minimale Temperatur des reinjizierten Wassers limitiert. Kann sich die Temperatur des Grubenwassers unter Tage durch das Zurückströmen zur Entnahmebohrung nicht adäquat regenerieren, so besteht die Gefahr, dass die Leistung der Grubenwasseranlage gedrosselt werden muss, um die Temperaturauflagen einzuhalten. Da die Versorgungssicherheit der angeschlossenen Gebäude so gefährdet wird, gilt es dies bereits in der Anlagenauslegung zu vermeiden. Sollten im Grubengebäude natürliche Grubenwasserströmungen herrschen, so beeinflussen diese ebenfalls die Kapazität der Grubenwasseranlage maßgeblich.

In der Vorplanung einer Anlage muss daher bewertet werden, ob die Wärme- und Kältelasten über die Lebensdauer der Anlage adäquat gedeckt werden können. Die Bewertung kann anhand von thermodynamischen Modellen unterschiedlicher Komplexität vorgenommen werden. Diese müssen mindestens folgende Energietransportprozesse abbilden:

- im strömenden Grubenwasser (Konvektion),
- zwischen Grubenwasser und Gestein (konvektiver Wärmeübergang),
- im Gestein (Wärmeleitung).

Auch wenn das exakte numerische Nachbilden des Bergwerks zu den detailliertesten Ergebnissen führt, so ist dieser Ansatz aufgrund der hohen Anforderungen an Modellerstellung und Modellberechnung meist nicht empfehlenswert. Abhilfe schaffen Modelle, welche die oben beschriebenen Prozesse auf vereinfachter Ebene abstrahieren. Diese können analytisch oder numerisch ausgeführt sein und bieten eine verbesserte Zugänglichkeit bei geringeren Berechnungszeiten. Da diese die Prozesse vereinfachen, müssen Genauigkeitseinbußen in Kauf genommen werden, welche bei der Ergebnisbewertung jedoch berücksichtigt werden können.

Erste fallspezifische Modelle wurden beispielsweise von RODRIGUEZ et al. (2009) und GHOREISHI-MADISEH et al. (2012) entwickelt. Diese wurden in Projekten bereits zur Erstellung von Berechnungswerkzeugen verwendet und stehen öffentlich zur Verfügung (ATHRESH et al., 2019). Vergleiche mit praxisgetreueren Modellfällen deuten jedoch auf die Notwendigkeit hin, diese weiterzuentwickeln und zu verfeinern (KRAUSE, 2024). Dies wird derzeit unter anderem an der TU Bergakademie Freiberg (TUBAF, 2024b) und der britischen Durham University (DURHAM UNIVERSITY, 2023) umgesetzt.

2.2.3 Geschlossene Systeme

Geschlossene Grubenwassersysteme werden meist vereinfacht berechnet, da die geringen Anlagenleistungen einen hohen Modellaufwand nicht rechtfertigen. Wird das System mit eingebrachten Rohrschlangen umgesetzt, kann die notwendige Rohrfläche bei bekannten Stoffwerten der Rohre, des Zwischenkreisfluids und des Grubenwassers für eine spezifische Leistung errechnet werden.

$$A = \frac{\dot{Q}_{GW}}{k \cdot \overline{\Delta T}} \qquad (2)$$

A *benötigte Wärmeübertragerfläche im Grubenwasser*
$\dot{Q}_{GW}$ *benötigte Wärme-/Kälteleistung [W]*
k *Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²·K)]*
$\overline{\Delta T}$ *mittlere Temperaturdifferenz Grubenwasser-Zwischenkreisfluid*

Für die Berechnung muss eine mittlere Temperaturdifferenz zwischen dem Grubenwasser und dem wärmetransportierendem Fluid des Zwischenkreislaufs angenommen werden. Diese Annahme kann hinreichend genau begründet werden, wenn eine Strömung im Grubenwasser vorherrscht. Auch der Wärmedurchgangskoeffizient wird von der Grubenwasserströmung limitiert, da grubenwasserseitig geringere Reynoldszahlen als in den Rohren zu erwarten sind. Zieht man den Fall der Flüssigkeit-Flüssigkeit-Wärmeübertragung in einem Rohrbündelwärmeübertrager zum Vergleich heran, so können Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen 150 und 1200 W/(m²·K) geschätzt werden. Da im Gegensatz zu Wärmeübertragern eine freie Überströmung der Bauteile vorherrscht, ist jedoch grundsätzlich der untere Wert als konservative Orientierung anzunehmen. In Fällen, bei denen eine Erdwärmesonde genutzt wird, an der nur in einem Teilbereich Grubenwasser kontaktiert wird, muss der Wärmeentzug aus dem Gestein für ein belastbares Ergebnis mitbeachtet werden. Der energetische Nutzen setzt sich in diesem Fall aus Gestein und Grubenwasser zusammen.

3 Methodik zur Standortbewertung

3.1 Informationsgrundlage und Standortauswahl

In Sachsen existieren verschiedene Reviere in denen ein geothermisches Grubenwasserpotenzial vermutet werden kann. Um die im Studienumfang zu untersuchenden Standorte auszuwählen, wurden verschiedene Informationsquellen verwendet. Folgende stellten sich als wichtig für die Informationsbeschaffung heraus.

- Archiv des Lehrstuhls für technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg,
- Internet zur Recherche des vorhandenen Informationsmaterials zu Bergwerken,
- Gemeindekommunikation / Gemeindearchive,
- Archiv der Wismut GmbH,
- Hohlraumkarte des sächsischen Oberbergamtes (SOBA, 2023a).

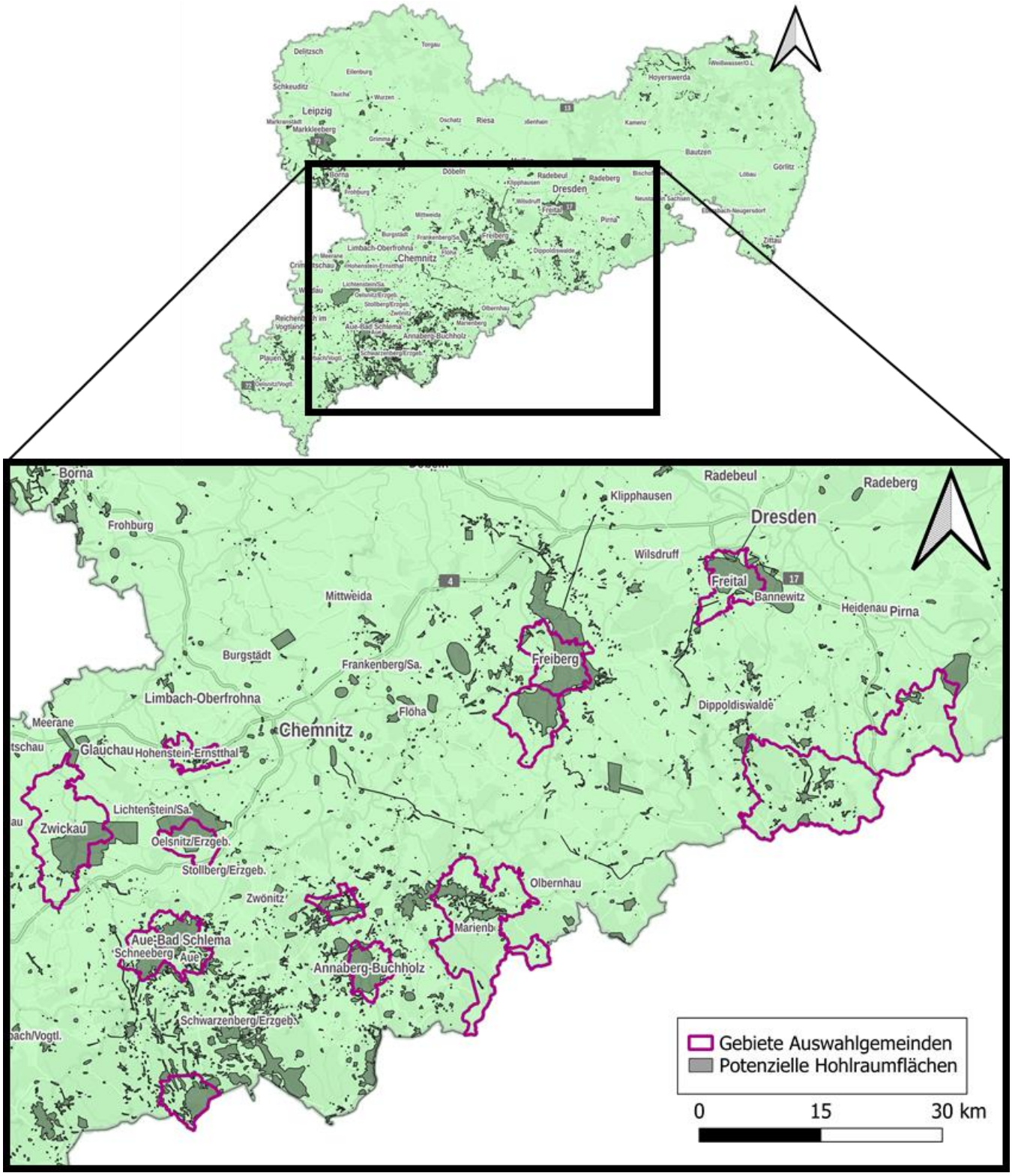
Im Archiv des Lehrstuhls für technische Thermodynamik befindet sich zum Großteil Literatur aus den Gebieten Ehrenfriedersdorf (ROTTLUFF, 1993; ROTTLUFF, 1998; MÜLLER et al., 2001; MERKEL et al., 2010), Freiberg (HUBER, 1990; GRIMM et al., 2001; BÜTTNER et al., 2010; KONRAD et al., 2010; KRANZ, 2011; MARTIN et al., 2015), Zwickau (HOFFMANN, 2010a; RÖDER, 2015) und Marienberg (MEIER et al., 2006; MATTHES, 2007; MEIER, 2013). Da in diesen Städten und Gemeinden bereits grubenwassergeothermische Anlagen umgesetzt wurden, sind diese essenzielle Betrachtungsstandorte. Auch für das Brander Revier gibt es Untersuchungen, welche auf eine gute Nutzbarkeit der geothermischen Ressourcen hindeuten (HUBER, 1990; GRIMM et al., 2001). In Aue-Bad Schlema ergeben sich durch den Bergbau vorteilhafte Rahmenbedingungen, die eine ausgeweitete Nutzung begünstigen und weshalb der Standort in die Betrachtung aufgenommen wurde (C&E, 2001; HÄHNE et al., 2002; C&E, 2003; VATER, 2012; WISMUT GMBH, 2012a; GRIMM et al., 2001; RESOURCE PROJECT, 2011).

Informationen über den Archivbestand hinaus wurden über verschiedene Wege recherchiert. Ein wichtiges Kriterium ist dabei die Auffindbarkeit von Informationsmaterial zu den Revieren, anhand dessen eine quantifizierte Bewertung stattfinden kann. Neben der digitalen Archivrecherche wurden Besucherbergwerke und die Stadtverwaltungen der Gemeinden kontaktiert, um Informationen zu dem lokalen Revier anzufragen. Gemeinden, die dies betraf und die in die Auswahl aufgenommen wurden, sind Schneeberg, Hohenstein-Ernstthal, Johanngeorgenstadt, Annaberg-Buchholz und Berggießhübel. Auch in der Gemeinde Altenberg stellen sich Nutzungspotenziale positiv dar. Insbesondere im Revierteil Zinnwald könnte künftig der Bergbau auf Lithium aufgenommen werden, was eine aktive Grubenwassernutzung während des Bergbaus ermöglichen würde (ZINNWALD LITHIUM, 2024). Zuletzt wurden die

Steinkohlereviere Freital und Oelsnitz als Standorte einbezogen, da durch den Bergbau dort Hohlräume von mehreren Millionen Kubikmetern entstanden sind, die somit ein großes Erschließungspotenzial bieten (WISMUT GMBH, 2006; SOBA, 2018). Die gewählten Untersuchungsgemeinden sind nachfolgend aufgelistet.

- Altenberg,
- Aue-Bad Schlema,
- Annaberg-Buchholz,
- Bad Gottleuba-Berggießhübel,
- Brand-Erbisdorf,
- Ehrenfriedersdorf,
- Freiberg,
- Freital,
- Hohenstein-Ernstthal,
- Johanngeorgenstadt,
- Marienberg,
- Oelsnitz im Erzgebirge,
- Schneeberg,
- Zwickau.

Dass die gewählten Gemeinden einen großen Teil der in ganz Sachsen durch den Bergbau geschaffenen Hohlräume abdecken, kann durch eine Überlagerung der sächsischen Hohlraumkarte gezeigt werden. Die gewählten 14 Gemeinden sind nachfolgend mit der Hohlraumkarte in Abbildung 6 dargestellt (SOBA, 2023a).



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 6: Großteil der in Sachsen vorhandenen potenziellen Hohlräume mit ausgewählten Analysegemeinden (SOBA, 2023a)

3.2 Standort Analyse und GIS Darstellungen

Nachfolgend wird der Prozess beschrieben, durch den die ausgewählten Gemeinden und Städte bewertet wurden und wie die Informationen dargestellt werden. Die Bewertung untergliedert sich zunächst in den untertägigen sowie den übertägigen Bereich. Dort werden die standortspezifischen Gegebenheiten der Bergwerksstrukturen sowie die in vorliegenden Abnehmerstrukturen bewertet. Durch diese zweigeteilte Bewertung entsteht eine Ausgangsbasis, um die Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung zu beschreiben, welche den dritten Gliederungspunkt "Potenzial-Layer" beschreibt. Abschließend wird weiterführende Literatur zum Bereich der Grubenwassergeothermie in dem entsprechenden Untersuchungsstandort gegeben.

Da ein gesetztes Ziel der Grubenwasserpotenzialstudie Sachsen die Erstellung einer interaktiven Geoinformationssystem-Karte (GIS-Karte) ist, werden alle Ergebnisse in grafischen Dateien ausgegeben. Diese enthalten auf ein Koordinatensystem bezogene Informationen, welche sich über topographischen Karten darstellen lassen. Mit diesen sogenannten "Layern" können nachfolgend ebenfalls Verarbeitungsschritte durchgeführt werden. Aus den Unter-Tage-Layern entstehen in Kombination mit den Über-Tage-Layern die Potenzial-Layer. Zusammen mit den Daten der innerhalb der Studie durchgeführten Grubenwasserprobenahmen (siehe Kapitel 5.1) entsteht die Grundlage für eine GIS-Karte, welche diese Informationen vereint. Der vereinfachte Prozess der Layer-Verarbeitung, welcher in dieser Studie verwendet wurde, ist in Abbildung 7 dargestellt.

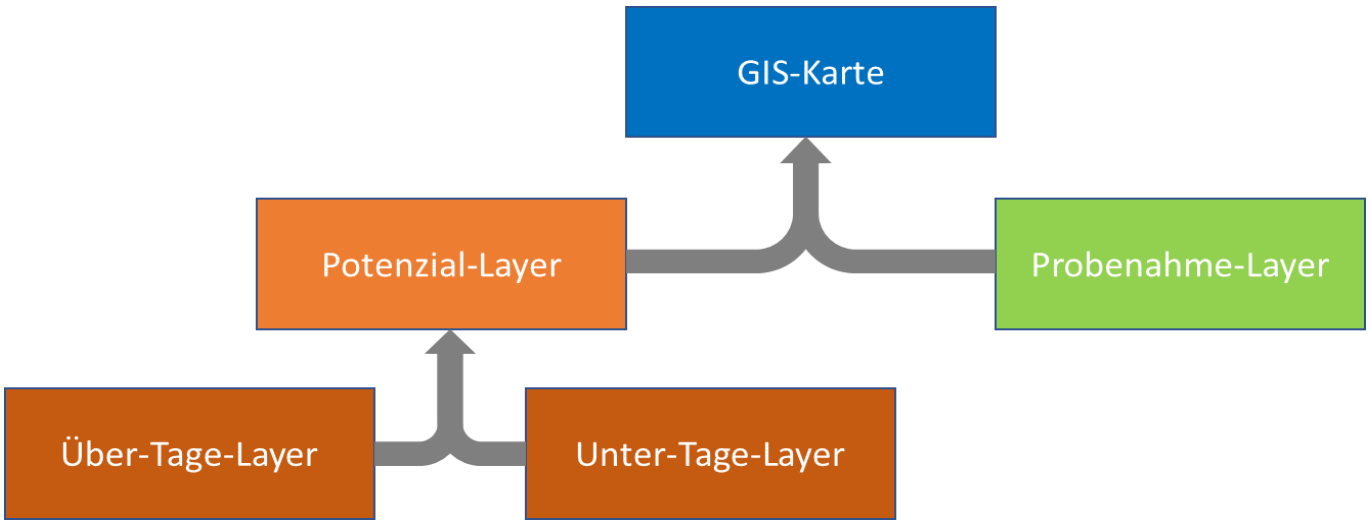


Abbildung 7: Vereinfachte schematische Darstellung der Layerzusammenführung im GIS

Die in den Layern gespeicherten relevanten Informationen sind nachfolgend in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Abrufbare Informationen in der GIS-Karte

GIS-Datei	Detailgrad (Geometrie)	Relevante Informationen
Unter-Tage-Layer	Gemeindegebiet (Fläche)	▪ Bewertungsparameter, ▪ Unter-Tage-Gesamtwertung (1-5)
Über-Tage-Layer	0,25 km² Polygone (Fläche)	▪ Wärmebedarf in Clustern pro Jahr [kWh]
Potenzial-Layer (Eignung geothermische Grubenwassernutzung)	0,25 km² Polygone (Fläche) und Hohlraumpolygone (Fläche)	▪ Wärmebedarf in Clustern pro Jahr [kWh], ▪ Über-Tage-Bewertung in Clustern (1-5), ▪ Unter-Tage-Gesamtwertung, (1-5) ▪ Grubenwasserpotenzial-Gesamtwertung (1-5)
Probenahme-Layer	Messkoordinaten (Punkt)	▪ Probenahmeparameter (siehe Kap. 5.1)

Die relevanten Informationen in den Layern geben den Endbenutzern eine erste Basis, auf der Entscheidungen für potenzielle Grubenwassernutzungsstandorte getroffen werden können. Auch wenn sie zur Eingrenzung eines Anlagenstandortes dienen, sollte für jedes konkrete Projekt eine Machbarkeitsstudie durchgeführt werden. Nachfolgend wird das Verfahren der untertägigen Standortbewertung (Unter-Tage-Layer) der übertägigen Standortbewertung (Über-Tage-Layer) sowie das Ableiten des Potenzial-Layers beschrieben. Ebenfalls wird die Darstellung dieser beschrieben.

3.2.1 Untertägige Standortbewertung

Die individuellen Gegebenheiten der Grube müssen für jeden ausgewählten Standort separat betrachtet werden. In anderen Untersuchungen wurden unterschiedliche Vorgehensweisen für die Bewertung eines solchen Untertagepotenzials gewählt. Diese reichen von der standortspezifischen und genau quantifizierten Berechnung der in einem definierten Wasserkörpes nutzbaren Energiemenge (LANUV, 2018) bis hin zur Zusammenfassung verschiedener allgemeiner Parameter der Grube zu einer skalierten Punktebewertung (GRIMM et al., 2001). Da die sächsischen Grubenreviere ein hohes Maß an Heterogenität aufweisen, konnten im Umfang der Studie keine standortgenauen Berechnungen durchgeführt werden. Es wird in Anlehnung an das Vorgehen in GRIMM et al. (2001) auf eine verallgemeinerte Bewertung eines jeden Reviers zurückgegriffen, welche anhand von definierten Bewertungsparametern und Gewichtungsfaktoren durchgeführt wird. Dies gewährleistet, dass alle gewählten Gemeinden und Städte untersucht werden können. Die Bewertungsparameter werden nachfolgend genannt und ihre Bedeutung für grubenwassergeothermische Anlagen kurz erläutert.

Alter

Das Alter eines Bergwerks lässt Aussagen bezüglich des Zustandes des Ausbaus der Bergwerksstrukturen und dem Zustand der Wasserwegsamkeiten zu. Ein älteres Bergwerk weist potenziell mehr Verbrüche auf, was sich auf den Grubenwasserkreislauf einer Anlage im erwartbaren Fließweg auswirkt.

Entwässerungssystem

Der Parameter bezeichnet in diesem Kontext in erster Linie die noch vorhandenen Wasserlösestollen. Er bezieht sich auf die verfügbare Wassermenge, welche durch solche Stollen aus dem Bergwerk gelöst wird. Große Entwässerungssysteme führen aus den Revieren ganzjährig Grubenwasser ab und ermöglichen insbesondere in Oberflächennähe eine erleichterte Nutzung.

Geflutete Teufe

Je nach Entwässerungsniveau stellt sich in Bergwerken ein nahezu konstantes Wasserlevel in dem Grubenbau ein. Der Abstand zur Tagesoberfläche kann sich durch die benötigte Pumpenleistung direkt auf die Anlagenkosten auswirken. Ebenfalls bedingt eine größere geflutete Teufe einen höheren Aufwand hinsichtlich der Bohrung und der Verrohrung.

Hohlraumvolumen

Das Hohlraumvolumen korreliert mit der geothermisch verfügbaren Menge an Grubenwasser. Weiterhin deutet ein größeres Hohlraumvolumen auf eine größere Ausdehnung des Bergwerks hin, was eine vielfältigere Auswahl an Standorten mit sich ziehen kann.

Risswerkkenntnis

Risswerke sind Darstellungen der untertägigen bergbaulichen Strukturen. Diese in Karten, Querschnitten und Pläne enthaltenen Informationen sind essenziell, um Grubenwasser zu erschließen.

Temperatur

Das Erdreich unterliegt einem geothermisch bedingten Temperaturgradienten. Dies bedeutet einen Temperaturanstieg von durchschnittlich 3 °C pro 100 m. Tiefe Bergwerke besitzen daher auf tiefergelegenen Sohlen tendenziell eine höhere Wassertemperatur, was die Effizienz einer Grubenwasseranlage zur Wärmebereitstellung positiv beeinflussen kann. Diese Temperaturen verbleiben jedoch oft in diesen Bereichen, so dass Temperaturen der obersten Sohlen primär von der Temperatur der eindringenden Oberflächenwässer bestimmt werden. Oberflächennahe Grubenwässer tendieren in der sächsischen Region daher zu einer Temperatur zwischen 9 °C und 11 °C (LFULG, 2016; GREIF et al., 2007).

Wasserchemie

Die Chemie des Grubenwassers betrifft anlagentechnische sowie rechtliche Aspekte. Anlagentechnisch führt eine hohe Fracht von gelösten und ungelösten Stoffen im Wasser zu höheren Verschleißerscheinungen, wie zum Beispiel Ablagerungen (Fouling) an Wärmeübertragerteilen. Rechtlich kann der Gewässerschutz durch die Grubenwassernutzung berührt sein, sollte das Grubenwasser in Oberflächenwasser gelangen und dort zu Grenzwertüberschreitungen führen.

Zugänglichkeit

Die Zugänglichkeit des Bergwerkssystems bezieht sich auf die Erschließungsmöglichkeiten des Grubenwassers. Komplett verwahrte Bergwerke sind in dieser Hinsicht eingeschränkt, während aktive Bergwerke oft eine Zugänglichkeit der zu nutzenden Grubenwasserbereiche gewährleisten können und dadurch den Erfolg einer anlagentechnischen Umsetzung steigern.

Um diese Kriterien für jedes Revier quantifizieren zu können, wird eine Bewertungsskala eingeführt. Diese erstreckt sich von 1 bis 5, wobei eine niedrigere Zahl jeweils eine schlechtere Bewertung darstellt. Um alle Kriterien in dieser Skala zu bewerten, müssen feste Grenzen etabliert werden, nach welchen eine objektive Basis für die Bewertung und den Vergleich der Reviere untereinander geschaffen werden kann. Nachfolgend sind in Tabelle 3 die gewählten Grenzen spezifiziert und die Wahl kurz erläutert.

Tabelle 3: Individuelle Skalierung der untertägigen Bewertungsfaktoren

Bewertungs-faktor	Quantitativer Bewertungsmaß-stab	Begründung des Bewertungsmaßstabs
Alter	1 - vor 1500 2 - 1500 - 1700 3 - 1700 - 1800 4 - 1800 - 1945 5 - ab 1945	Dieses Kriterium beschreibt, in welcher Periode der größte Anteil des Bergbaus in einem Revier stattgefunden hat. Jüngere Perioden deuten auf eine umfangreichere Informationslage und einen besseren untertägigen Zustand der Strukturen hin. Des Weiteren vergrößern sich die Streckenquerschnitte, was zu einer größeren erschließbaren Gesteinsfläche führt (WAGENBRETH, 1984).
Entwässe-rungssystem	1 - nicht vorhanden 2 - dezentrales Entwässerungssys-tem, <10 m^3/h 3 - dezentrales Entwässerungssys-tem, 10 m^3/h - 100m^3/h 4 - zentrales Entwässerungs-system, > 100 m^3/h - 500 m^3/h 5 - zentrales Entwässerungs-system, > 500 m^3/h	Die niedrigste Bewertung erhalten Reviere ohne Entwässerungssysteme (beispielsweise diffuser Grubenwasseraustritt). Je nach Größe des Volumenstroms wird das Entwässerungssystem entsprechend bewertet. Ein höherer Volumenstrom führt zu einer höheren potenziell nutzbaren Wärmeleistung. Die höchste Bewertungsstufe beginnt ab einer Leistung größer als 2 MW (ΔT = 5K).

Bewertungs-faktor	Quantitativer Bewertungsmaß-stab	Begründung des Bewertungsmaßstabs
geflutete Teufe	1 - > 200 m 2 - 150 - 200 m 3 - 100 - 150 m 4 - 50 - 100 m 5 - < 50 m	Die Distanzen zwischen dem Grubenwasserspiegel und der Geländeoberkante haben großen Einfluss auf die Betriebskosten einer Grubenwasseranlage. Ab 200 m Höhendifferenz wird die schlechteste Bewertung gegeben, welche in gleichen Intervallen mit verringertem Flutungsabstand ansteigt. Eine höhere Bewertung bedeutet einen geringeren Pumpaufwand.
Hohlraum-volumen	1 - bis 10.000 m^3 2 - bis 50.000 m^3 3 - bis 100.000 m^3 4 - bis 1.000.000 m^3 5 - ab 1.000.000 m^3	Die geringste Bewertung startet bei 10.000 m^3, da dieses Volumen vergleichbar mit größeren künstlich gefertigten Wärmespeichern ist (OCHS et al., 2015). Die obere Bewertungsgrenze wurde bei 1.000.000 m^3 festgelegt, da eine noch größere Wassermobilisation in diesem Bereich als nicht mehr wahrscheinlich eingeschätzt werden kann.
Risswerk-kenntnis	1 - Keine Kenntnisse vorhanden 2 - Kenntnisse nur in analogen Karten vor 1800 vorhanden 3 - Kenntnisse nur in analogen Karten vor und nach 1800 vorhanden 4 - Kenntnisse digital in georeferenzierten Karten vorhanden 5 - Kenntnisse digital vektorisiert vorhanden	Die Bewertung umfasst das Alter und das Format der Rissinformationen. Durch die Gründung der TU Bergakademie Freiberg 1765 und die markscheiderische Ausbildung wurde die Vermessung der Gruben in Sachsen zuverlässiger, so dass 1800 als erster Zwischenpunkt der Risswerksbewertung zählt (WAGENBRETH, 2008). Genauigkeit und Informationsgrad sind in neueren Karten zumeist höher. Darüber hinaus wird eine höhere Bewertung für das Datenformat (analog, digital, georeferenziert, vektorisiert) der Risswerke vergeben.
Temperatur (am Flutungs-spiegel)	1 - < 12 °C 2 - 12 °C - 15 °C 3 - 15 °C - 20 °C 4 - 20 °C - 25 °C 5 - > 25 °C	Die Temperatur von Grubenwasser variiert mit der Tiefe, dem zuströmenden Wasser, sowie evtl. vorhandenen Durchmischung/Konvektionen im Bergwerk. Dabei entspricht die niedrigste Bewertung einer Grubenwassertemperatur von bis zu 12 °C wie sie oft in Oberflächennähe zu finden ist (LFULG, 2016; GREIF et al., 2007). Die obere Grenze orientiert sich dabei an vorhandenen Standorten in Sachsen, wie Aue-Bad Schlema , wo durch konvektive Wärmetransportprozesse Temperaturen über 25 °C in der oberen Sohle erreicht werden.

Bewertungs-faktor	Quantitativer Bewertungsmaß-stab	Begründung des Bewertungsmaßstabs
Wasser-che-mie (des greif-baren Was-sers)	1 - Wasser sehr stark belastet (ra-dioaktiv) 2 - Wasser stark belastet (starke Mineralisierung) 3 - Wasser moderat belastet (moderate Mineralisierung) 4 - Wasser gering belastet (geringe Mineralisierung) 5 - Trinkwasserqualität	Die Wasserchemie in den Bergwerken ist oft sehr komplex und je nach Zusammensetzung wirken sich die mitgeführten Stoffe unterschiedlich auf die Anlagenteile aus. Eine genaue Angabe von Grenzwerten zur Einteilung ist für diese Studie nicht umsetzbar. Die Einteilung erfolgt daher nach weichen Kriterien, welche sich nach Infor-mationen in der Literatur richten.
Zugänglich-keit	1 - komplett verwahrt, Schacht-aufwältigung unwahrschein-lich 2 - komplett verwahrt, Schacht-aufwältigung möglich 3 - Verwahrungsprozess laufend 4 - Teile der Grube verwahrt, andere aktiv 5 - Grube zum Großteil aktiv	Zugänglichkeit wird in verschiedene Aufwälti-gungs- und Befahrbarkeitsoptionen geteilt. Die niedrigste Bewertung ist dadurch gekennzeich-net, dass sicherheitstechnische Aspekte das Auf-schließen von verwahrten Schachtröhren oder Stollen verwehren. Die höchste Bewertung wird bei vollständig aktiven Bergwerken gegeben, bei denen die Zugänglichkeit möglicher Orte einer Grubenwassernutzung gegeben ist.

Weiterhin ist wichtig zu erwähnen, dass die einzelnen Kriterien untereinander unterschiedlich gewichtet werden müssen. So ist beispielsweise eine hohe Bewertung der Risswerkkenntnis als wichtiger einzustufen als eine hohe Bewertung des Hohlraumvolumens des Reviers. Wichtigere, gut bewertete Einflussfaktoren können auf diese Weise den negativen Einfluss von geringer gewichteten Einflussfaktoren ausgleichen. Um eine Wichtung vorzunehmen, wurde das Rangfolgeverfahren angewendet (WARTZACK, 2020). Dieses ermöglicht, durch den Vergleich aller Bewertungskriterien untereinander, spezifische Wichtungsfaktoren einzuführen. Die Wichtung wurde mit den zuständigen Behörden und Ämtern besprochen und konkretisiert, um eine möglichst ganzheitliche Betrachtung zu gewährleisten. Anhand von Tabelle 4 wird das Verfahren erläutert. Zunächst werden alle Bewertungsfaktoren in einer Matrix aufgestellt. Anschließend wird zeilenweise der Zeilenbewertungsfaktor gegenüber dem Spaltenbewertungsfaktor verglichen und abgeschätzt, welcher Parameter allgemein einen höheren Einfluss auf das grubenwassergeothermische Potenzial aufweist. Ist der Zeilenbewertungsfaktor einflussreicher als der Spaltenbewertungsfaktor, wird die Zelle mit "1" markiert, andernfalls mit "0". Trifft in der Diagonalen der Bewertungsparameter auf sich selbst, kann kein Vergleich erfolgen und die Zelle wird mit einem "X" markiert. Anschließend wird eine Gesamtbewertung durchgeführt, indem die Anzahl der Einsen pro Zeile aufaddiert wird. Um zu vermeiden, dass ein Bewertungsfaktor eine Bewertung von 0 erhält, werden die Gesamtpunktzahlen anschließend um 1 nach oben korrigiert. Aus den sich ergebenden Korrekturwerten werden die Wichtungsfaktoren über eine Verhältnisrechnung aus Teilpunktzahl zu Gesamtpunktzahl ermittelt.

Tabelle 4: Wichtung nach dem Rangfolgeverfahren für die untertägigen Bewertungsfaktoren

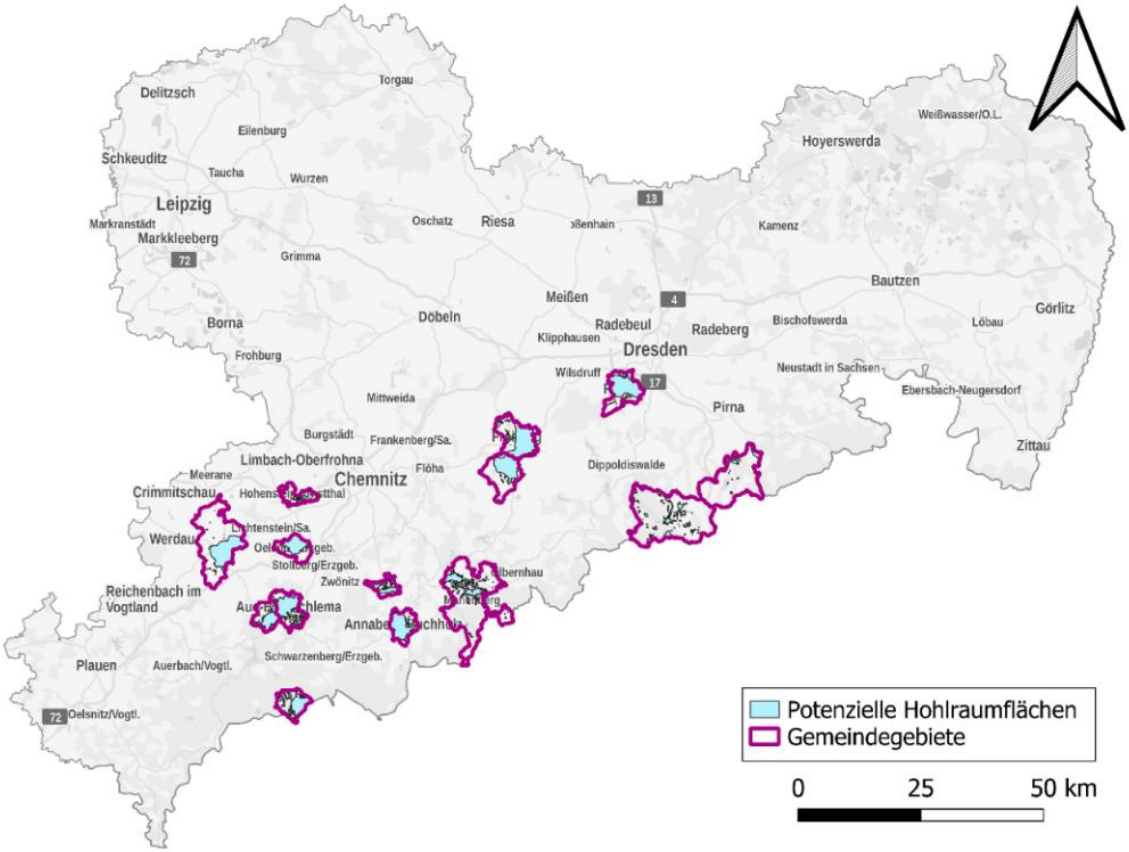
Faktor	Alter	Entwässerungssystem	geflutete Teufe	Hohlraumvolumen	Risswerkskenntnis	Temperatur	Wasserchemie	Zugänglichkeit	Gesamt	Korrektur (+1)	Wichtung
Alter	X	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3 %
Entwässerungssystem	1	X	1	1	0	1	1	0	5	6	17 %
geflutete Teufe	1	0	X	1	0	1	0	0	3	4	11 %
Hohlraumvolumen	1	0	0	X	0	0	0	0	1	2	6 %
Risswerkskenntnis	1	1	1	1	X	1	1	1	7	8	22 %
Temperatur	1	0	0	1	0	X	0	0	2	3	8 %
Wasserchemie	1	0	1	1	0	1	X	0	4	5	14 %
Zugänglichkeit	1	1	1	1	0	1	1	X	6	7	19 %
										36	100 %

Für jedes Revier kann demzufolge eine Bewertung anhand der Bewertungsfaktoren erfolgen. Die für jeden Faktor erhaltene Zahl wird mit der Gewichtung multipliziert. Anschließend werden alle korrigierten Punktwerte aufsummiert, so dass das untertägige Gesamtpotenzial für das Revier in einem Bereich von 1 bis 5 bewertet ist.

Die Bewertungen der einzelnen Faktoren sowie das untertägige Gesamtpotenzial werden anschließend in dem Unter-Tage-Layer dargestellt. Die Hohlraumkarte des Sächsischen Oberbergamtes dient dabei als Basis (SOBA, 2023a). Die Hohlraumkarte umfasst alle Flächen unter denen Hohlräume bekannt sind oder vermutet werden. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die ausgewiesenen Flächen nicht garantieren, dass sich dort tatsächlich eine Bergwerksstruktur unter Tage antreffen lässt. Um dies sicherzustellen, sind die Blätter für Bergschadenskundliche Analysen (BSA) und Risskarten des Oberbergamtes beziehungsweise des objektverantwortlichen Betriebs einzuholen. Um die in der Darstellung relevanten Hohlraumgebiete auszuwählen, wurde zunächst der Layer der Hohlraumkarte mit den Gemeindeflächen verschnitten. Die so verbliebenen Hohlraumflächen sollen vereinfacht als gemeindespezifisch verfügbare Grubenwasserflächen angesehen werden. Die verschnittenen Hohlraumflächen in den einzelnen Revieren sind in Abbildung 8 dargestellt.

Auf einem Gemeindegebiet kann eine Vielzahl separater Hohlräume auf der Hohlraumkarte ausgewiesen sein. Die Unterscheidung von einzelnen Hohlräumen innerhalb der Gemeinde und spezifische Bewertung dieser kann aufgrund der geringen Datenlage jedoch nicht konsequent verfolgt werden. Um

dennoch eine Bewertung vornehmen zu können, werden alle Hohlräume unter einem Gemeindegebiet als ein Revier zusammengefasst, welchem die genannten Bewertungsfaktoren zugewiesen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 8: Hohlraumverschnitte in den Auswahlgemeinden

3.2.2 Übertägige Standortbewertung

Um diese Bewertung vornehmen zu können, wurden die übertägigen Abnehmerstrukturen analysiert und in allgemeine Abnahmekategorien eingeteilt. Um eine zielgerichtete Bewertung zu ermöglichen, ist es wichtig, einen Analyseparameter zu wählen, welcher für die Abnehmerstrukturen in den Gemeinden die größte Aussagekraft hinsichtlich eines Grubenwasserpotenzials besitzt. Es wurde sich demnach für den Wärmebedarf entschieden. Daten diesbezüglich können in den Gemeinden auf genauerer Ebene modelliert aufgelöst werden, so dass für diesen Bewertungsbereich eine detaillierte Betrachtung gewählt wird. Dazu wird zunächst eine Abnehmerstrukturanalyse durchgeführt. Die daraus erhaltenen modellierten Wärmebedarfsdaten werden anschließend in Verbrauchsflächen (Polygonen) zusammengefasst und in Abnahmekategorien bewertet.

Abnehmerstrukturanalyse

Um das Gesamtpotenzial der Grubenwassernutzung in den Revieren zu bewerten, wurden die gewählten Analysestandorte hinsichtlich ihrer Abnehmerstrukturen untersucht. Die modellierten Werte stammen vom "DBI - Gastechnologischen Institut gGmbH Freiberg". Das Unternehmen verwendet die nachfolgend beschriebene Methodik (DBI GTI, 2023).

Die Modellierung basiert auf standortgenauen Adresskoordinaten der im Untersuchungsgebiet befindlichen Gebäude, die mit weiteren standortspezifischen Kennwerten angereichert wurden. Dazu zählen beispielsweise Gebäudeabmessungen wie 3D-Gebäudedaten, Gebäudehöhe oder Grundfläche sowie spezifische Energiebedarfe pro Quadratmeter, die anhand weiterer Merkmale wie Gebäudetyp oder Baujahr zugeordnet werden. Diese Daten wurden für die einzelnen Sektoren zusammengestellt und im Rahmen der räumlich-strukturellen Analyse als Gebäude- beziehungsweise Adressdaten in einer Geodatenbank auf Basis des DBI-Gebäudeatlas abgelegt. Dabei ist es wichtig, zwischen verschiedenen Haustypen zu unterscheiden. Ziel ist es, jedem Standort auf Grundlage des DBI-Gebäudeatlas einen spezifischen Wärmebedarf zuzuordnen, um unter Berücksichtigung der Gebäudeparameter (zum Beispiel Wohnfläche, Anzahl Haushalte) einen Wärmebedarf zu modellieren. Zur Anreicherung der Daten werden unter anderem Literaturwerte des IWU (IWU, 2015) verwendet, die in Tabelle 5 dargestellt sind.

Tabelle 5: Spezifische Wärmebedarfe je Gebäudetyp (Einfamilienhäuser – EFH sowie Mehrfamilienhäuser – MFH) in Bestandsgebäuden nach (IWU, 2015)

	Unterkategorie	spezifischer Wärmebedarf $\frac{kWh}{m^2a}$
EFH	freistehendes Gebäude mit einer oder zwei Wohneinheiten	158
	gereihtes Haus und Doppelhaushälften mit einer oder zwei Wohneinheiten	126
MFH	kleines Mehrfamilienhaus mit drei bis sechs Wohneinheiten	144
	mittleres Mehrfamilienhaus mit sieben bis zwölf Wohneinheiten	143
	großes Mehrfamilienhaus mit 13 und mehr Wohneinheiten	125

Mit diesen Informationen lässt sich ein hausgenauer Wärmebedarf modellieren, der in einem zweiten Schritt durch sektorenspezifische und regionale Kennwerte (zum Beispiel regionale Klimadaten, Sanierungsstand, Bewohnungsdaten) weiter verfeinert wird. Für Nichtwohngebäude erfolgt analog zur Berechnung des Energiebedarfs der Wohngebäude eine Zuordnung spezifischer Energiebedarfskennwerte, die mit einem oder mehreren branchenspezifischen Kennwerten aus dem DBI-Gebäudeatlas (zum Beispiel Energiebedarf pro Bett und Patient in einem Krankenhaus, Energiebedarf pro Schüler in einer Schule, Energiebedarf pro m² Verkaufsfläche in einem Elektrofachgeschäft) kombiniert werden.

Auf dieser Basis wird die erste Näherungsmodellierung für den Energiebedarf durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Validierung der Energiebedarfe anhand von Gebäudedaten (zum Beispiel Gebäudehöhe, Geschossanzahl), wobei unplausible Werte angepasst oder gegebenenfalls aus dem Datenbestand entfernt werden. Der methodische Ablauf zur hausgenauen und regionalisierten Wärmebedarfsmodellierung ist in Abbildung 9 dargestellt.

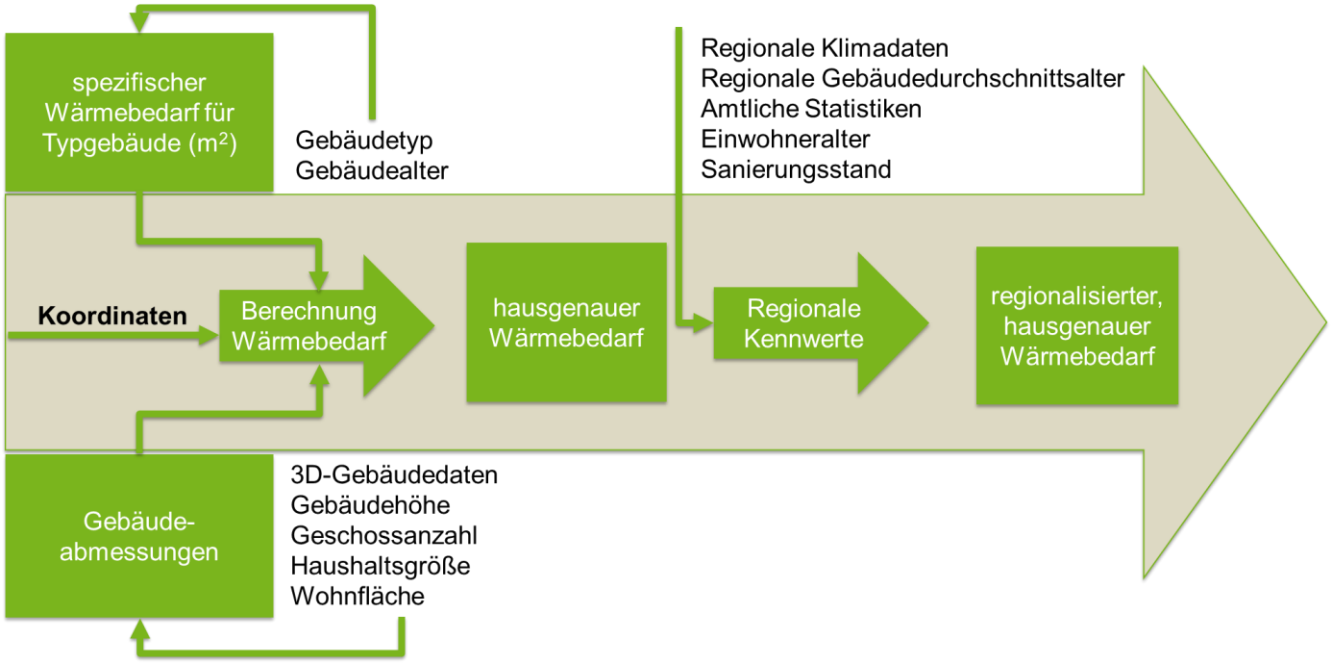


Abbildung 9: Vereinfachte Methodik zur Modellierung des Wärmebedarfs auf Basis der vorgestellten Datengrundlagen sowie des DBI-Gebäudeatlas (DBI GTI, 2023)

Im Rahmen der Modellierung werden die Unterkategorien jeweils einem bestimmten Haustyp zugeordnet. Der spezifische Wärmebedarf wird hierbei in Abhängigkeit von der Anzahl der Haushalte im Gebäude modelliert, wobei angenommen wird, dass jeder Haushalt eine Wohneinheit bewohnt. So wird für ein Mehrfamilienhaus mit 13 oder mehr Haushalten ein anderer spezifischer Wärmebedarf angesetzt als für eines mit sieben bis zwölf Haushalten. Ebenso erfolgt eine Differenzierung bei Einfamilienhäusern, indem mittels Georeferenzierung überprüft wird, ob das Gebäude freistehend ist. Freistehende Gebäude benötigen einen höheren spezifischen Wärmebedarf, da die Heizwärme über alle Außenwände – im Gegensatz zu Reihenhäusern – entweichen kann. Nachdem jedem Typgebäude standortgenau ein spezifischer Wärmebedarf zugeordnet wurde, wird mittels Gebäudeabmessungen und der daraus abgeleiteten Wohnfläche ein hausgenauer Wärmebedarf mit einem in ArcGIS programmierten Modell berechnet.

Unter Berücksichtigung regionaler Kennwerte kann der regionalisierte, hausgenaue Wärmebedarf abgeleitet werden, der das standortgenaue Ergebnis beschreibt. Insbesondere der Sanierungsstand und klimatische Faktoren spielen dabei eine wesentliche Rolle. Höhere Sanierungsquoten senken den Wärmebedarf, da sie die Wärmeverluste der Gebäude reduzieren. Zusätzlich erfolgt eine Klimabereinigung

der Standorte, bei der der Wärmebedarf je nach Lage ansteigt („kalte Umgebung“) oder sinkt („warme Umgebung“). Grund für die Klimabereinigung ist, dass selbst bei gleichen Gebäudeparametern (zum Beispiel Abmessungen, Wohnfläche, Sanierung, Alter) unterschiedliche Wärmebedarfe durch die geografische Lage entstehen. Die Klimabereinigung erfolgt mithilfe von Gradtagszahlen, die auf eine Referenzgradtagszahl für Deutschland normiert werden. Diese Referenzzahl wird durch Daten der Wetterstation Potsdam ermittelt, da dieser Standort seit 2016 als Basis für Klimabereinigungen dient (IWU, 2020). Um die Referenzgradtagszahl zu ermitteln, wurden die Temperaturdaten der Wetterstation von 1995 bis 2012 verwendet, da dieser Zeitraum als langjähriges Mittel für Klimaregionen festgelegt ist. Die Stationsdaten sind im „Climate Data Center“ des DWD kostenfrei verfügbar (DWD, 2022). Die Referenz für die Wärmebedarfsberechnung ergibt sich aus den Klimadaten von Potsdam und liegt bei 3.667 Kd (Kelvintage) (IWU, 2020). Die Klimabereinigung erfolgt durch einen Quotienten, der das langjährige Mittel eines Standorts durch die Referenzgradtagszahl teilt. So entstehen Faktoren größer als 1 für kältere und kleiner als 1 für wärmere Standorte. Dieser Faktor fungiert als Korrekturfaktor für den Wärmebedarf und bewertet die Lage des Gebäudes nach klimatischen Faktoren. Das Ergebnis beschreibt den gegenwärtigen, regionalisierten und hausgenauen Wärmebedarf für jeden Adresspunkt im Untersuchungsgebiet.

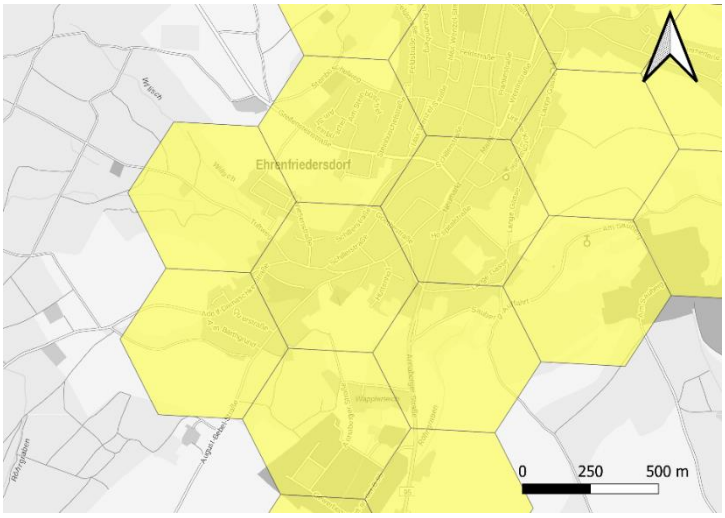
Um sicherzustellen, dass die Simulation der ermittelten Wärmebedarfe verschiedene Berechnungsaspekte sowie die sozio-demografische Entwicklung der Bevölkerung und Haushalte berücksichtigt, wurde eine Formel auf Basis der oben erläuterten Inputfaktoren erstellt:

$$WB_i = AHH_i \cdot AWohn_i \cdot \left(spez.\ Heiz_i \cdot \frac{GTZ_i}{GTZ_{Vergleich}} + spez.\ WW \cdot \left(1 + \sum_{Status\ quo}^{i} proz.\ EW \right) \right) \qquad (3)$$

Die oben beschriebene Formel berechnet den Wärmebedarf (WB) für ein beliebiges Stützjahr (i). Die Berechnungskriterien beginnen mit der Anzahl der Haushalte pro Jahr (AHH_i) und der Wohnfläche pro Haushalt und Jahr ($AWohn_i$). Zusätzlich wird der spezifische Heizwärmebedarf (spez. $Heiz_i$) für verschiedene Haustypen berücksichtigt. Anschließend wird die Gradtagszahl (GTZ_i) des Modelljahres durch den zur Normierung erforderlichen Wert ($GTZ_{Vergleich}$) geteilt und mit dem spezifischen Heizwärmebedarf multipliziert, um das Klima zu bereinigen und Standorte vergleichbar zu machen. Danach wird der spezifische Warmwasserbedarf (spez. WW) addiert. Da der Warmwasserbedarf unabhängig von Jahr, Dämmung und GTZ ist, wird er ausschließlich von der Anzahl der Wohnungseinwohner beeinflusst. Zukünftige Änderungen können bei Bedarf durch den prozentualen Einwohnerveränderungsanteil (proz. EW) in der Formel berücksichtigt werden, wobei für den Status quo der Faktor Null gesetzt wird. Das Ergebnis liefert den jährlichen Heizwärmebedarf in kWh/a für jedes Wohngebäude.

Verarbeitung der modellierten Wärmebedarfsdaten

Die so erhaltenen modellierten Wärmebedarfsdaten wurden für jeden Standort algorithmisch zu Polygonflächen in einem Layer zusammengefasst, welche Flächen von 0,25 km² beinhalten. Dies gewährleistet den Datenschutz der Anwohner und stellt gleichzeitig eine praxisnahe Größe für potenziell zu versorgende Quartiere dar. Eine Darstellung der Polygonstruktur ist beispielhaft in Abbildung 10 veranschaulicht.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 10: Genutzte Polygonstruktur, dargestellt für einen Ausschnitt der Stadt Ehrenfriedersdorf

Die modellierten Wärmebedarfe der Polygone können nun in ein Bewertungsschema eingebracht werden. Das Verfahren hierzu wird nachfolgend beschrieben. Im ersten Bearbeitungsschritt wurden die für die Reviere relevanten Polygone ausgewählt. Dazu werden alle Bedarfspolygone mit der Hohlraumkarte des sächsischen Oberbergamtes verschnitten (SOBA, 2023a). Alle Polygone, die unter einem Teil ihrer Fläche einen Hohlraum aufweisen, wurden für die weitere Bearbeitung erhalten, während alle anderen aussortiert wurden. Es ergab sich für die Auswahlgemeinden eine Restpolygonanzahl von 1625.

Um die Zusammenführung mit dem untertägigen Potenzial zu ermöglichen, wird die zuvor eingeführte Bewertungsskala von 1 bis 5 auch hier verwendet. Die modellierten Bedarfswerte für jedes Polygon sind demzufolge in dieser Skala zu bewerten. Da der Wärmebedarf in kWh pro Jahr in den Polygonen vorliegt, muss jedoch noch ein Verfahren der Skalierung im Wertebereich von 1 bis 5 erfolgen. Dieses wird nachfolgend erläutert.

Verschiedene Unterteilungsverfahren können genutzt werden. Eine Möglichkeit ist die Einteilung des maximalen Wärmebedarfs im Untersuchungsgebiet über voreingestellte Verfahren, welche in GIS-Softwares standardmäßig zur Verfügung stehen. Jedoch sind diese Aufteilungsverfahren, wie das Einteilen

in gleiche Intervalle, nicht hinreichend spezifisch für den Untersuchungszweck. Es wurde demnach eine eigene Aufteilungsmethodik eingesetzt. Dazu wurden zunächst alle vorhandenen Polygone nach ihrem Wärmebedarf geordnet. Anschließend wurden Grenzen festgesetzt, bis zu welcher Gesamtanzahl an Polygonen eine bestimmte Bewertung der Skala 1 bis 5 vergeben wird. Abbildung 11 stellt die Unterteilung der Bewertung genauer dar.

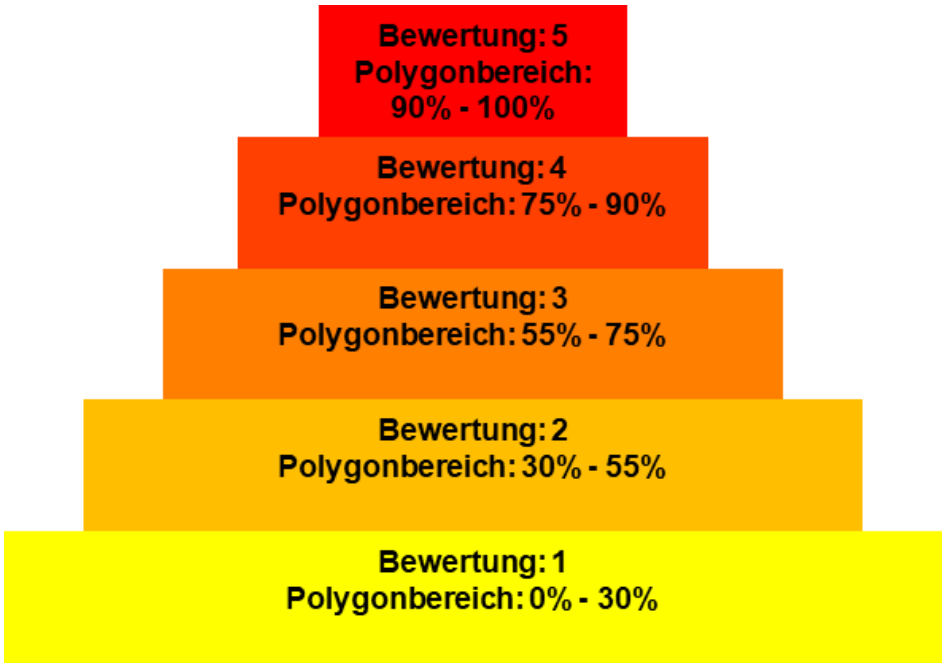


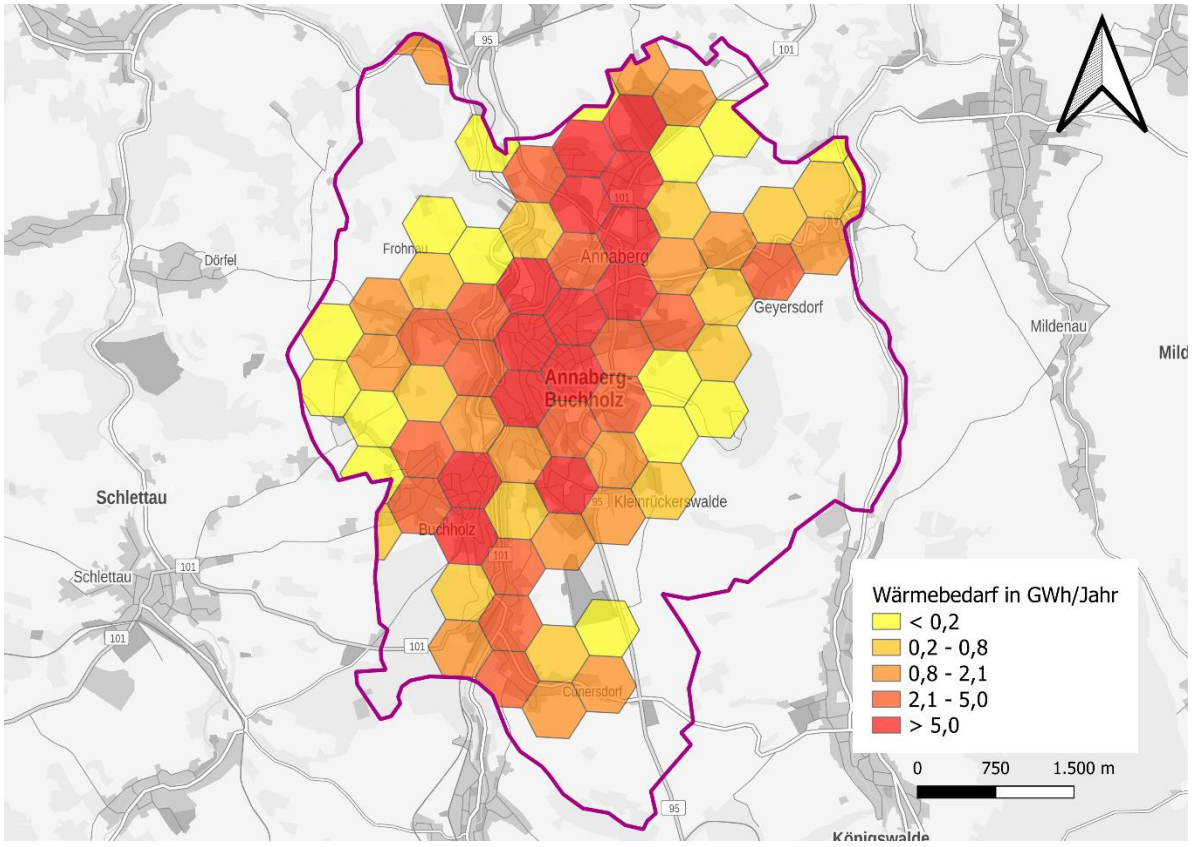
Abbildung 11: Visualisierung der Polygonaufteilung bezüglich der aufsteigend geordneten Wärmebedarfe

Anhand der Abbildung ist ebenfalls verdeutlicht, dass die Bereiche nicht gleichverteilt sind, sondern die Menge an Polygonen in höheren Bewertungszonen abnimmt. Dies spiegelt implizit die Abnehmerstruktur der Untersuchungsregion wider. So gibt es in den Gemeinden sehr viele Polygonflächen mit einem sehr geringen Wärmebedarf, in welchen eine Wirtschaftlichkeit von grubenwassergeothermischen Anlagen schwieriger zu gewährleisten ist. Dagegen gibt es eine geringere Anzahl von Ballungsgebieten mit hoher Wärmeabnahme. Dort ist die Chance einer wirtschaftlichen Umsetzung einer Anlage durch die höhere Abnahmedichte größer und das Polygon wird entsprechend besser bewertet. Die Unterschiede der Wärmeabnehmerdichten wurden somit qualitativ in der Aufteilung der Polygonbereiche durch eine entsprechende Verjüngung in höheren Bewertungskategorien berücksichtigt. Nach dieser Aufteilung können nun die für die GIS-Software notwendigen Einteilungsgrenzen für die Wärmebedarfe eingestellt werden. Diese sind in Tabelle 6 dargestellt. Anhand dieser kann eine farbabgestufte Aufteilung der Polygone in der GIS-Software vorgenommen werden.

Tabelle 6: Rechnerische Festlegung der quantitiven Wärmeabnahmegrenzen für die GIS-Software

Bewertung	Polygonbereich	Polygonanzahl	Grenze Wärmeabnahme pro Jahr
1	0 % - 30 %	487	< 0,2 GWh
2	30 % - 55 %	406	0,2 - 0,8 GWh
3	55 % - 75 %	325	0,8 - 2,1 GWh
4	75 % - 90 %	244	2,1 - 5,0 GWh
5	90 % - 100 %	163	>= 5,0 GWh
Gesamtanzahl:		1625	

Um die Bewertung in dem Über-Tage-Layer visuell in den Polygonen darzustellen, wird im zweiten Schritt die Farbabstufung in dem Layer angepasst. Die sich ergebende finale Darstellung ist in Abbildung 12 aufgezeigt. In diesem Layer sind für alle Gemeinden die entsprechenden Wärmebedarfe in den Polygonrastern als Information hinterlegt.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 12: Angepasste Darstellung des Wärmebedarfs in der Gemeinde Annaberg-Buchholz

3.2.3 Potenzial-Layer

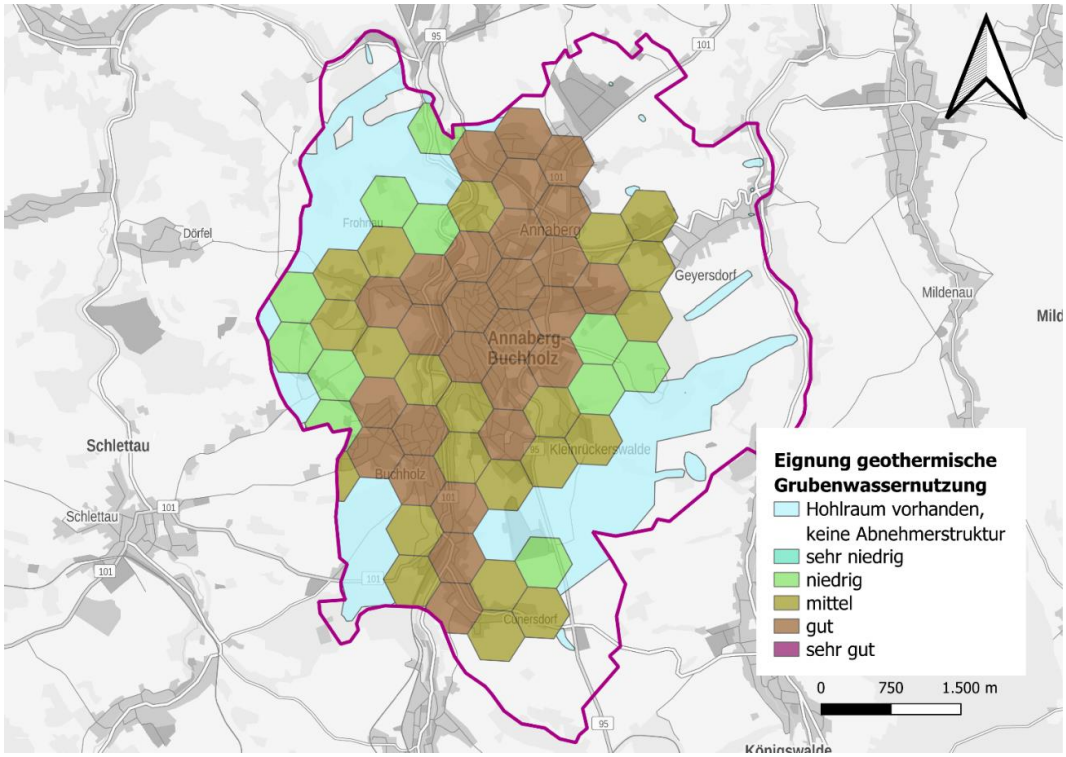
Um das Gesamtpotenzial der Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung zu bewerten, wurden in einem weiteren Schritt die Ergebnisse der untertägigen und der übertägigen Bewertung verwendet. Dazu wird die im jeweiligen Revier einheitliche untertägige Bewertung mit den je nach Wärmebedarf bewerteten Polygonflächen kombiniert. Aus der Überschneidung dieser beiden Ausgangslayer ergibt sich, dass innerhalb einer Gemeinde ein konstanter Wert für das untertägige Potenzial mit den polygonabhängigen Bewertungen der Abnehmerstruktur verrechnet wird. Für die finale Bewertung der Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung werden beide Bewertungsbestandteile gleichverteilt eingerechnet und durch die Verwendung des arithmetischen Mittels das Gesamtpotenzial ausgewiesen. Um eine höhere Auflösung des Ergebnislayers zu erhalten, wird die Geometrie des Polygon-Layers als Basis weiterverwendet. Im Ergebnislayer wurden nur Polygonzellen der jeweiligen Gemeinde zugelassen, welche folgende drei Kriterien erfüllten:

- Verbindung zum größten kontinuierlichen Rastergebiet, dass unter dem größten kontinuierlichen Hohlraum liegt ("Hauptversorgungsgebiet"),
- Rasterzelle weist einen Hohlraum unter sich auf,
- Ausnahme:
  Gemeinde Altenberg, da hier die Reviere Altenberg und Zinnwald-Georgenfeld trotz örtlicher Trennung gemeinsam bewertet wurden.

Dieses Verfahren führt dazu, dass die im Potenzial-Layer verbleibenden Polygone eine höhere Versorgungsrelevanz aufweisen und verringert die Chance, dass kleine Hohlräume außerhalb des Hauptversorgungsgebietes als gleichgestelltes Grubenwasserpotenzial in die Layerdarstellung eingehen. Die qualitative Abstufung der Bewertung ist in Tabelle 7 und anhand von Abbildung 13 am Beispiel der Gemeinde Annaberg-Buchholz aufgezeigt.

Tabelle 7: Polygoncharakterisierung für die Bewertung der Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung anhand der Grubenwasserpotenzial-Gesamtwertung

Grubenwasserpotenzial-Gesamtwertung	Legendeneintrag
0-1	sehr niedrig
1-2	niedrig
2-3	mittel
3-4	gut
4-5	sehr gut



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 13: Beispielhafte Darstellung der Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung in der Gemeinde Annaberg-Buchholz

3.2.4 Weiterführende Literatur

Durch den weitverbreiteten Bergbau sind an vielen Standorten bereits Informationen zu potenziellen Grubenwassernutzungen aufzufinden, welche im letzten Kapitel der Standortanalysen beschrieben werden. Die zusammenfassende Beschreibung dieser Quellen soll als Orientierung dienen, um Anhaltspunkte für die eigene Recherche zu vermitteln. Dadurch, dass sich viele der Untersuchungen auf spezifische Standorte innerhalb der Gemeinden und Städte beziehen, dienen sie als Komplementierung der in dieser Studie großflächig umgesetzten Bewertung. Durch die Umfänglichkeit der aufgeführten Literatur wird empfohlen, neben den Informationen der beschriebenen Zusammenfassung ebenfalls die Originaldokumente zu konsultieren. Die aufgeführte Literatur kann sich neben dem energetischen Aspekt ebenfalls auf weitere grubenwasserbezogene Themenbereiche beziehen. Die weiterführende Literatur ist für die Auswahlgemeinden und -städte in Tabelle 8 aufgeführt.

Im nachfolgenden Kapitel werden die 14 ausgewählten Standorte entsprechend der beschriebenen Methodik analysiert und bewertet.

Tabelle 8: Übersicht zur weiterführenden Literatur in den Untersuchungsstandorten

Standort	Untersuchungen zu Grubenwässern
Altenberg / Zinnwald - Georgenfeld	(OPPELT et al., 2020)
Annaberg-Buchholz	(OPPELT et al., 2020)
Aue - Bad Schlema	(RUDOLPH et al., 1991; C&E, 2001; C&E, 2003; AIA AUE GMBH, 2006; WISMUT GMBH, 2014; TUBAF, 2023b; STEYER et al., 2024)
Brand-Erbisdorf	(HUBER, 1989; VATER, 2012)
Ehrenfriedersdorf	(ROTTLUFF, 1993; PRETZSCHNER et al., 1993; INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR UMWELTSCHUTZ MBH, 1993; ROTTLUFF, 1994; HÖSEL et al., 1996)
Freiberg	(HUBER, 1990; SCHABERG, 1998; GRIMM et al., 2001; TUBAF, 2022b)
Marienberg	(OELSNER et al.,1988; HUBER, 1990; GRIMM et al., 2001; MEIER et al., 2006; MATTHES, 2007; LAGERPUSCH, 2010; MEIER, 2013)
Oelsnitz/Erzgebirge	(GRIMM et al., 2001; FELIX et al., 2007; GRAB et al., 2024)
Zwickau	(GRIMM et al., 2001; HOFFMANN, 2010a; RÖDER, 2012)

4 Standortbewertungen potenzieller geothermischer Grubenwassernutzungen

4.1 Altenberg

4.1.1 Untertägige Standortbewertung

Die untertägigen Auffahrungen des Altenberger Reviers befinden sich in Graniten und Quarzporphyren. Die Zinnkonzentration in den Erzen nimmt mit zunehmender Tiefe kontinuierlich ab, so dass der Großteil der bergmännischen Hohlräume bis in eine Tiefe von 200 m aufgefahren wurde. Der Abbau fand im 15. Jahrhundert seinen Anfang wobei insbesondere das Feuersetzen an den Abbaustellen eine priorisierte Methode der Erzgewinnung war. Die so geschaffenen Weitungen unter Tage destabilisierten das darüber befindliche Gestein. Fortschreitende Methoden der Grubenentwässerung führten zu größeren Abbautiefen, wodurch die instabile Fläche über Tage kontinuierlich zunahm. Im Zeitraum von 1545 bis 1620 ereigneten sich infolgedessen mehrere Tagesbrüche, bei denen Teile der aufgefahrenen Grubenstrukturen dem Gebirgsdruck nachgaben. Durch die kollabierenden Grubenräume entstand ein Bruchkrater („Pinge“) an der Erdoberfläche (WAGENBRETH, 1990).

Trotz des vorhandenen Pingenkraters wirken die Bruchmassen als Speichermasse für Oberflächenwasser aus Niederschlägen, so dass dem Entwässerungssystem die Wassermengen verzögert zugeführt werden. Die Grubenwassertemperatur schwankt durch den Oberflächenwassereintrag in die Pingensenke auf den Sohlen. Die Wasserwegsamkeit durch das Gestein wird als sehr gering eingeschätzt. Je nach Position im Grubenfeld wird der Wasserspiegel zwischen 698 m NHN und 746 m NHN angegeben. Die durch Niederschlag einfallende Wassermenge wird für das gesamte Altenberger Grubengebäude anhand von Niederschlagsraten und Einzugsflächen auf ca. 500.000 m^3/a abgeschätzt, wobei von der Zinnerz GmbH Altenberg 440.000 m^3/a bestätigt worden sind. Dies entspricht einem durchschnittlichen Zufluss von 50 m^3/h. Um Verformungen innerhalb der Bruchmassen am Böschungsfuß der Pingenwände bei vollständiger Flutung des Grubengebäudes bis in die Bruchmasse der Pinge und damit ein unkontrollierbares Nachbrechen der Pingenwände zu verhindern, wurde von Dezember 1991 bis August 1993 ein Entwässerungsstollen aufgefahren. Der "Neue Bielastollen" verläuft im Niveau der 7. Sohle (Strecke 725; 489,5 m ü. NHN) mit zwei Streckenabknickungen bis in das Tal der kleinen Biela. Durch eine geringe Abnehmerstruktur im Bereich des Mundlochs des Neuen Bielastollens wird eine Entnahme des Grubenwassers an dieser Stelle jedoch als nicht zielführend angesehen. Für eine Abschätzung einer möglichen Nutzung im Stadtgebiet Altenberg sind detailliertere Untersuchungen zum Wasserreservoir durchzuführen (WEINHOLD, 2001).

Da die passive Wasserhaltung auf ca. 489 m NHN stattfindet, ergibt sich mit der Höhenlage von Altenberg bis 750 m NHN eine zu überwindende Höhe von bis zu 268 m. Dies ist als ungünstig für eine Grubenwasseranlage einzustufen. Da der Pingenkörper weitläufigen Einfluss auf das Erdreich nimmt, sind

Bohransatzpunkte mit entsprechender Entfernung zu wählen, was die potenziellen Standorte limitiert. Generell ist der Boden im Revier in Oberflächennähe aufgelockert und verwittert und ist als brüchig bis sehr brüchig einzuordnen. In einer Tiefe von etwa 20 m weist das Gestein massig kompakten Charakter, mit variierenden Klüftigkeiten auf. Außerhalb der Störungszonen ist das Gestein als standfest bis leicht nachbrüchig anzusehen (WEINHOLD, 2001).

Bezüglich der Wasserchemie ist ein Anhaltspunkt durch Analysen des Wassers am Mundloch des Neuen Bielastollens geben. In einem Vergleich in dem Entwässerungsstollen von Sachsen rund um Freiberg, im Osterzgebirge, im mittleren Erzgebirge sowie im Westerzgebirge untersucht und verglichen wurden, wurde ebenfalls der neue Bielastollen untersucht. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Standorten weist das entwässerte Grubenwasser einen geringen Austrag an gelösten wie ungelösten Stoffen auf. Lediglich Kupfer und Mangan sind in erhöhten Mengen vorzufinden, wobei insbesondere Mangan Ablagerungen an einer Anlage hervorrufen könnte.

Das Revier Zinnwald-Georgenfeld, welches sich ebenfalls im Gemeindegebiet befindet, nimmt gleichfalls eine bedeutende bergbauhistorische Stellung ein. Im Rahmen des Projekts VODAMIN wurden tiefgreifende Untersuchungen zum Wasserhaushalt des Bergbaugebiets Zinnwald durchgeführt (G.E.O.S., 2013). Der aktive Bergbau wurde auf deutscher Seite 1945 und auf tschechischer Seite 1990 eingestellt. Heute ist das Grubengebäude noch über das angegliederte Besucherbergwerk „Vereinigt Zwitterfeld zu Zinnwald“ befahrbar. Ein Grubenriss ist in Abbildung 14 dargestellt.

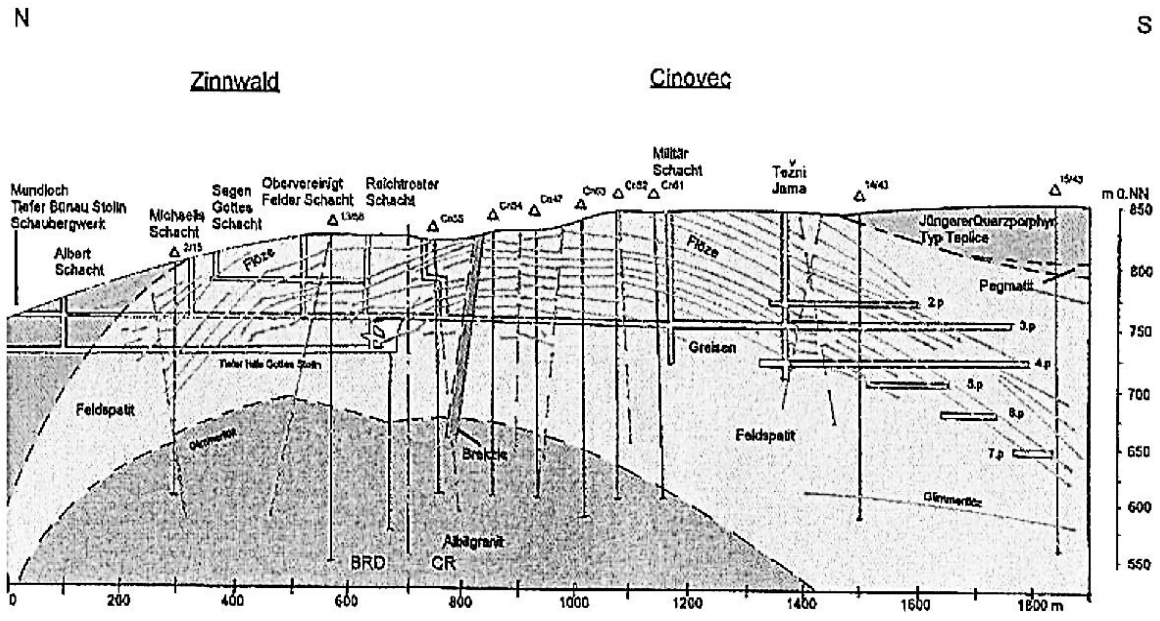
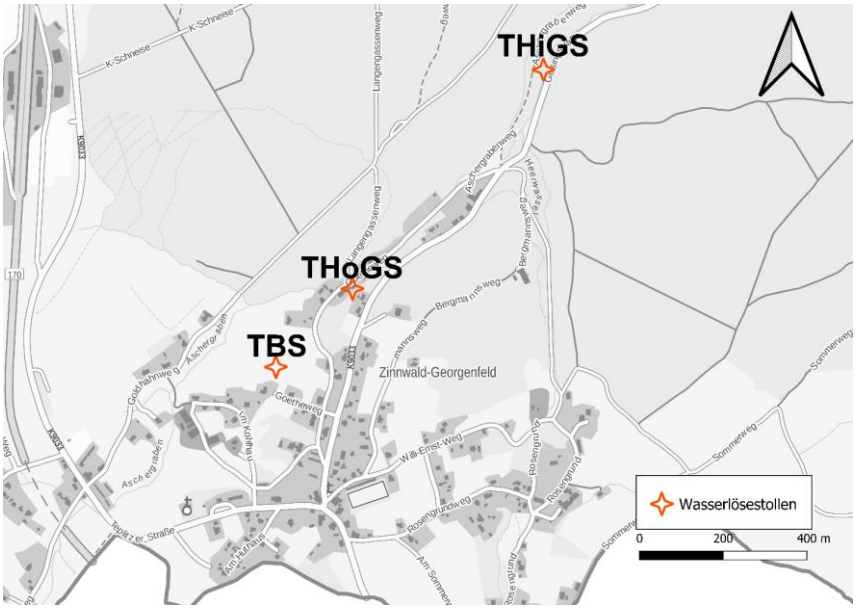


Abbildung 14: Schematischer Grubenriss des Bergwerks Zinnwald/Cinovec, entnommen aus (SMWA, 2008)

In (SENNEWALD et al., 2013) wird für trockene Zeiträume (außerhalb von Schneeschmelzen/Hochwassern) für drei Stollen folgender Durchfluss angegeben:

- Tiefer Bünau Stollen (TBS): min. 0,3 l/s (1,01 m^3/h),
- Tiefer Hoffnung Gottes Stollen (THoGS): min. 3,9 l/s (14,04 m^3/h),
- Tiefer Hilfe Gottes Stollen (THiGS):min. 12,9 l/s (46,44 m^3/h)

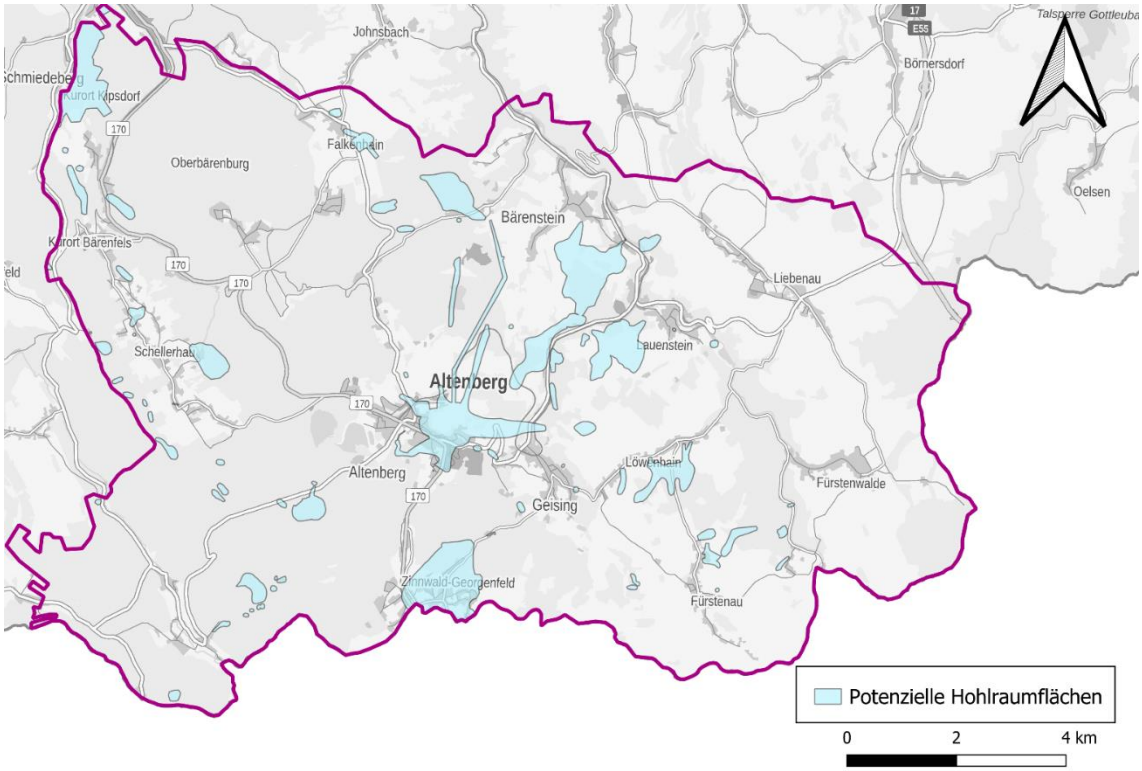
Die Positionen der jeweiligen Mundlöcher der Stollen sind in Abbildung 15 dargestellt.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 15: Positionen der Wasserlösestolln in Zinnwald-Georgenfeld

Eine weitere Quelle betitelt den Gesamtabfluss aus dem Zinnwalder Revier mit ca. 11 – 13 l/s (LFULG, 2014). Im Bergwerk existiert die „Reichtroster Weitung“, welche ein Gesamthohlraumvolumen von etwa 75.000 m^3 besitzt und zum Teil wassergefüllt ist. Die Wassertemperatur wird mit 7 - 8 °C angegeben (SCHRÖDER, 2024). Derzeit existieren Bestrebungen zur Förderung von Lithiumvorkommen im Zinnwalder Grubengebäude (ZACHARAKIS, 2017; ZINNWALD LITHIUM, 2024). In einem aktiven Bergbau würden sich durch die Wasserhaltung dann erweiterte Nutzungsmöglichkeiten ergeben. Das Revier sowie seine Bewertung sind jeweils in Abbildung 16 und Tabelle 9 dargestellt.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 16: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Altenberg

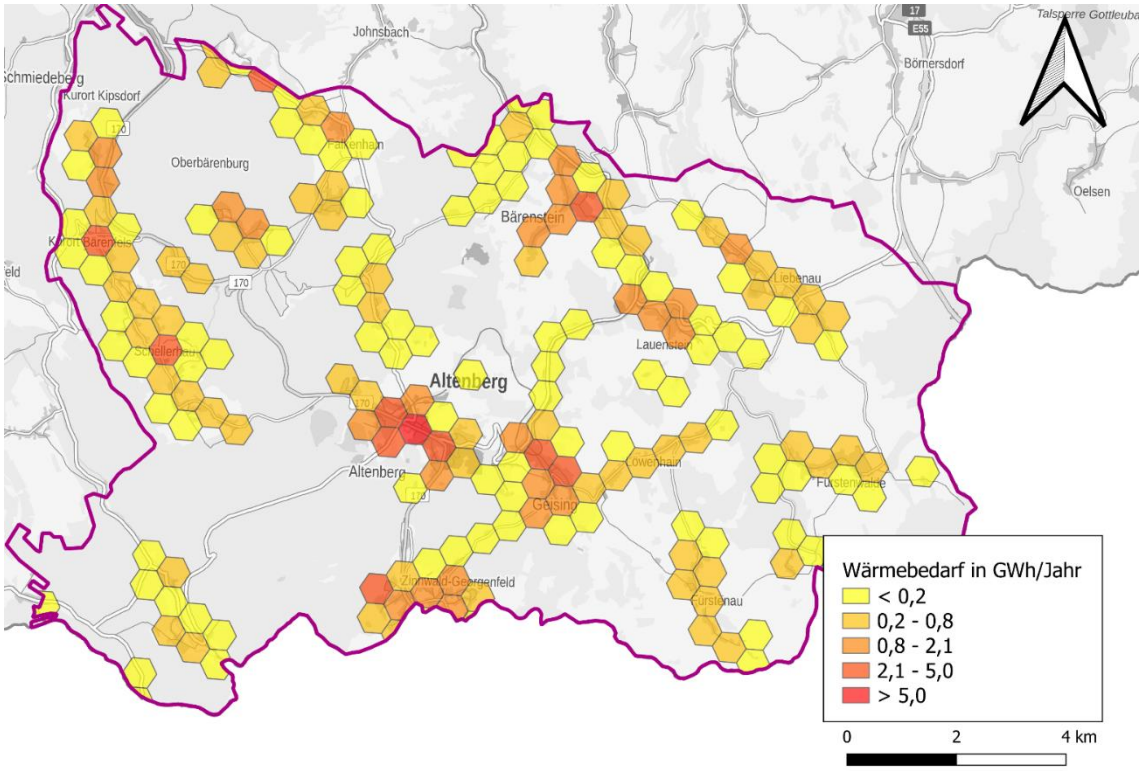
Tabelle 9: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Altenberg/Zinnwald

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	3	Bergbau seit 500 Jahren, mit neueren Auffahrungen nach großem Pingen-bruch. Hauptanteil der Strukturen bis 1800 aufgefahren.	(WEINHOLD, 2001)
Entwässerungssystem	3	Durch den neuen Bielastollen in Alten-berg und den Tiefen Hilfe Gottes Stollen in Zinnwald realisiert. Durchschnittlicher Austrag bei beiden von etwa 50 m^3/h.	(WEINHOLD, 2001; SENNE-WALD et al., 2013)
Geflutete Teufe	1	Je nach Standort im Stadtgebiet von Al-tenberg bis in eine Tiefe von 270 m unter GOK.	(WEINHOLD, 2001)
Hohlraumvolumen	4	Information nicht direkt aufzufinden. Ein Haldenunfall betitelt das Volumen dieser Halde auf 150.000 m^3. Schätzung des ge-fluteten Hohlraumvolumens der Reviere auf unter 1.000.000 m^3.	(SCHILKA et al., 2022)
Risswerkkenntnis	5	Grube war bis 1991 aktiv. Risswerk ist bei der örtlichen Sanierungsfirma vorhan-den.	(LMBV, 2023)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalie für das Re-vier bekannt.	(WEINHOLD, 2001)
Wasserchemie	4	Außer erhöhte Kupferaustragung keine bedenklichen Belastungen im entwäs-serten Grubenwasser feststellbar.	(GREIF et al., 2010)
Zugänglichkeit	2	Ist über einen 200 m langen Stolln be-dingt gegeben. Ein großer Teil der Grube ist verwahrt.	(ELBELABE, 2024)
Unter-Tage-Gesamt-wertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,1		

4.1.2 Übertägige Standortbewertung

Die Bedarfsstruktur wurde für das gesamte Gemeindegebiet über den Wärmebedarf quantifiziert. Es liegt ein modellierter Gesamtwärmebedarf von 104,1 GWh/a vor (DBI GTI, 2023). Im Zentrum des Gemeindegebietes befindet sich ein dichtes Abnehmercluster, bestehend aus der Stadt Altenberg mit dem Stadtteil Geising und dem Ortsteil Zinnwald-Georgenfeld. In der Stadt Altenberg konzentrieren sich die Wärmeabnehmer entlang der Dresdner Straße, die in die Zinnwalder Straße mündet. Hauptabnehmer sind Wohngebiete und der Europark, der eine hohe Dichte an gewerblichen Abnehmern aufweist. Es ist

zu beachten, dass der Wärmebedarf von Sonderabnehmern, wie Gewerbe- oder Industriegebiete, deutlich vom modellierten Wert abweichen kann. In Zinnwald-Georgenfeld befinden sich die meisten Abnehmer entlang der deutsch-tschechischen Grenze. Es handelt sich überwiegend um Wohngebäude. In Abbildung 17 wird die Analyse der Abnehmerbedarfe dargestellt.



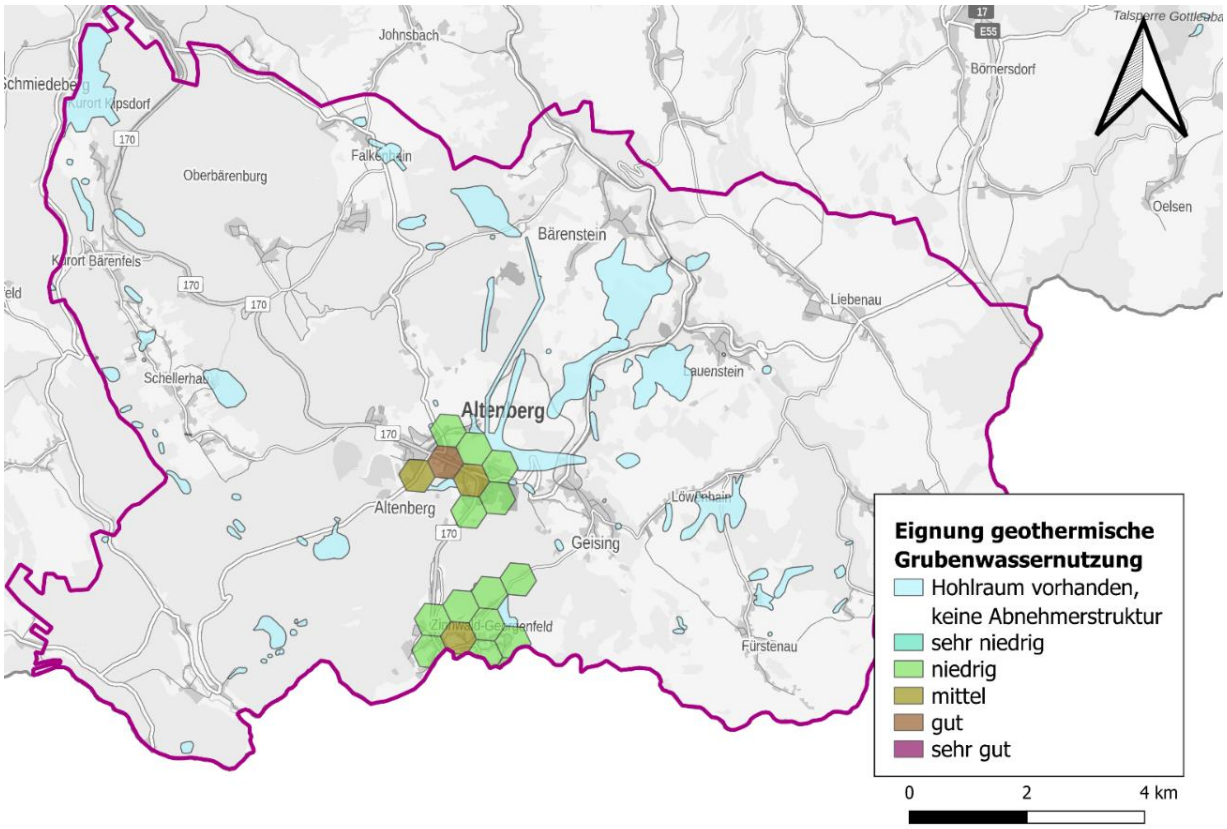
Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 17: Übertägige Bewertung der Gemeinde Altenberg mit Zinnwald-Georgenfeld

4.1.3 Potenzial-Layer

In der Potenzialkarte von Abbildung 18 ist ersichtlich, dass Altenberg grundsätzlich über substanzielle Hohlraumpotenziale verfügt, die zur geothermischen Nutzung verwendet werden könnten. Die Schnittstellenanalyse der Hohlraum- und Wärmebedarfskarte zeigt, dass insbesondere im Bereich der Dresdner/Zinnwalder Straße gute Voraussetzungen für eine solche Anlage bestehen. Die Eignung der umliegenden Ortsteile ist hingegen als "sehr niedrig" bis "niedrig" einzustufen. Im Ortsteil Zinnwald-Georgenfeld findet sich im grenznahen Bereich der Teplitzer Straße ein mittleres Bewertungspotenzial. Dies liegt primär an der geringen Besiedlungsdichte, was auch die niedrige Bewertung im Rest des Ortsteils erklärt. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass diese Bewertung keine künftigen aktiven Großabnehmer wie einen aktiven Bergbaubetrieb einbeziehen kann. Etablieren sich weitere Abnehmer in dem Ge-

biet, so ändert sich ebenfalls das Eignungspotenzial. Wird eine Grubenwassernutzung zur jetzigen Situation in dem benannten Cluster angestrebt, so würde eine Versorgung primär Wohngebäude betreffen, wobei ebenfalls ein Anteil von Gewerbeeinheiten vorzufinden ist.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 18: Potenzial-Layer der Gemeinde Altenberg mit Zinnwald-Georgenfeld

4.1.4 Weiterführende Literatur

Untersuchungen für den Raum Altenberg und Zinnwald-Georgenfeld, in denen ein hoher Detailgrad der vor Ort vorhandenen Bedingungen einbezogen wurde, ist nach Kenntnisstand der Autoren nicht bekannt. Jedoch wurde eine erste Abschätzung der Grubenwassernutzung in einem Projekt der TU Bergakademie Freiberg vorgenommen (OPPELT et al., 2020). Der Fokus lag dort auf der Bewertung des geothermischen Potenzials des Entwässerungsstollens neuen Bielastollens. Ein Bewertungsschema ist in Abbildung 19 dargestellt.

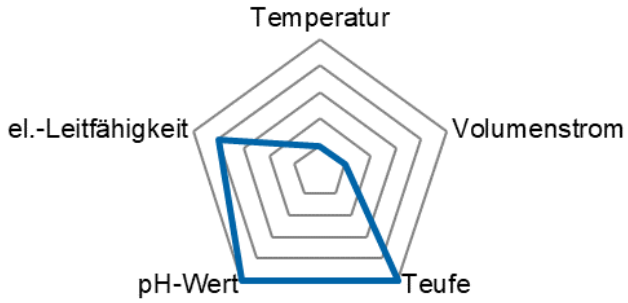


Abbildung 19: Netzdiagramm zur Einordnung des Potenzials zur Grubenwassernutzung am Mundloch des neuen Bielastollens, beste Wertung außen, nach OPPELT et al. (2020)

Da hier das Potenzial am Mundloch betrachtet wurde, ist der Faktor Teufe sehr hoch bewertet. Am Mundloch ist kein Heben des Wassers notwendig und es könnte direkt genutzt werden. Auch die Bewertung für den pH-Wert ist hoch, da das Wasser einen neutralen Wert nahe 7 besitzt. Jedoch wird auch deutlich, dass nur ein geringes Temperaturniveau und ebenso geringer Volumenstrom vorliegt, was eine energetische Nutzung zum Heizen erschwert und deshalb eine niedrige Bewertung hervorruft. Ein Nachteil der Bewertung ist, dass Abnehmerstrukturen nicht berücksichtigt sind. Da diese in unmittelbarer Nähe zum Stollen und zum Mundloch nicht vorhanden sind, wäre ein Nutzungspotenzial demnach nur vorhanden, sollten neue zukünftig Abnehmer entstehen.

4.2 Annaberg-Buchholz

4.2.1 Untertägige Standortbewertung

Der Bergbau am Standort Annaberg-Buchholz begann während der ersten Hälfte des 15. Jahrhunderts mit der Gewinnung von oberflächennahen Kupfervorkommen. Die Entwicklung hin zum Tiefbau begann mit der Schürfung der ersten gefundenen Silbererzader im Jahr 1491. Infolgedessen entstanden die Bergstädte Annaberg und Buchholz. In der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts folgte eine Zeit geringerer Aktivität, in der vornehmlich Kobalt abgebaut wurde (MÜLLER, 1894). Die letzte große Periode des Bergbaus in der Region wurde mit den Erkundungsbemühungen der SAG Wismut eingeleitet. Von 1945 an wurde das Revier nach Uranvorkommen untersucht, wobei vielmals die vorhandenen Strukturen des Altbergbaus genutzt wurden. Dadurch, dass mehrere Altbergbaufelder existierten, welche auf den Sohlen unterschiedliche Höhenniveaus aufwiesen, wurde auf eine aufwändige Verbindung der Revierteile verzichtet. Die Uranerzgewinnung hielt auf diese Weise bis 1958 an, bevor der Bergbau endgültig zum Erliegen kam (KUNZMANN et al., 2007). Die mehr als 300 abgebauten Gänge erstrecken sich auf einer Fläche von 56 km² mit einer Abbauteufe bis ca. 400 m (MEIER, 1999).

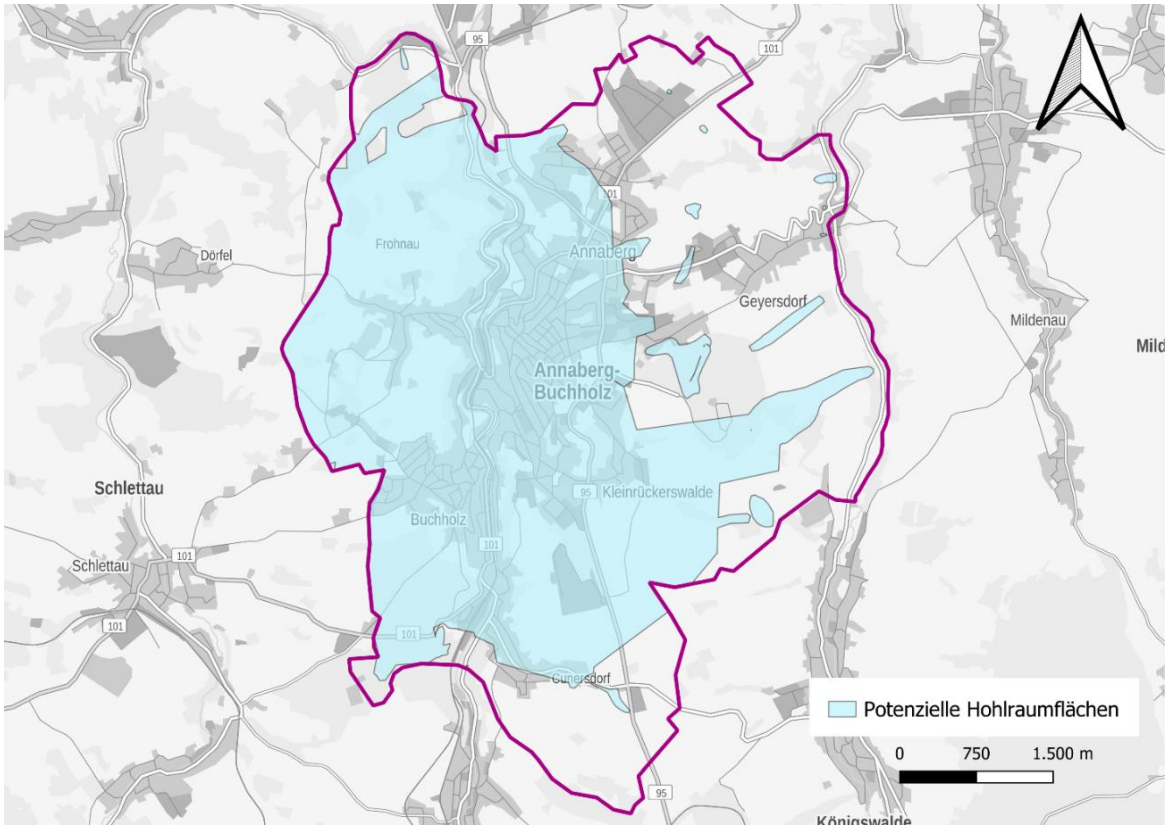
Auf dem Gebiet erfolgt bei Trockenwetter ein Grundwasserabfluss von mindestens 60-80 l/s (216–288 m³/h), welcher in niederschlagsstarken Zeiten bis auf 300 l/s ansteigen kann. Dieses Wasser

wird über mehrere Entwässerungsstollen abgeführt, wobei der Jung Andreas Stollen und der Tiefe König Dänemark Stollen die wichtigsten wasserlösenden Strukturen darstellen. Am Jung Andreas Stollen wird das gelöste Wasser bereits einer wirtschaftlichen Verwendung zugeführt, was einer thermischen Nutzung zum Großteil entgegensteht (KUNZMANN et al., 2007; WISMUT GMBH, 2024).

Es wird davon ausgegangen, dass zwischen den Grubenteilen westlich der Sehma und denen östlich der Sehma nur eine geringfügige hydraulische Verbindung existiert. Östlich der Sehma fällt der Wasserspiegel von den südlichen Grubenteilen vom Niveau des Dorotheastollens von etwa 540 m NHN auf ein Niveau von etwa 464 m NHN zum Norden hin ab. Ein Großteil des Grubenwassers wurde anschließend durch den König Dänemark Stollen ausgetragen (KUNZMANN et al., 2007). Nordwestlich der Sehma führt der Jung-Andreas-Stollen den Großteil der anfallenden Grubenwässer ab. Da sein Mundloch allerdings verbrochen ist und eine direkte Verbindung zum Tiefen St.-Christoph-Stollen (TSCST) besteht, werden die Wässer folglich über das zugemauerte und verrohrte Mundloch dieses Stollens ausgetragen (WISMUT GMBH, 2023a).

Für den in die Sehma mündenden Jung Andreas Stollen wird dabei eine Temperatur von 10,8 °C angegeben (KUNZMANN et al., 2007; TUBAF, 2023a). Den Chemismus betreffend wurden verschiedene Untersuchungen für den Jung Andreas Stollen durchgeführt (LFULG, 2016; TUBAF, 2023a). Die Wasserqualität kann trotz der mitgeführten Stoffe als gut bewertet werden und es wird unter anderem für Aquakulturen vor Ort stofflich genutzt.

In der nachfolgenden Abbildung 20 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 10 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

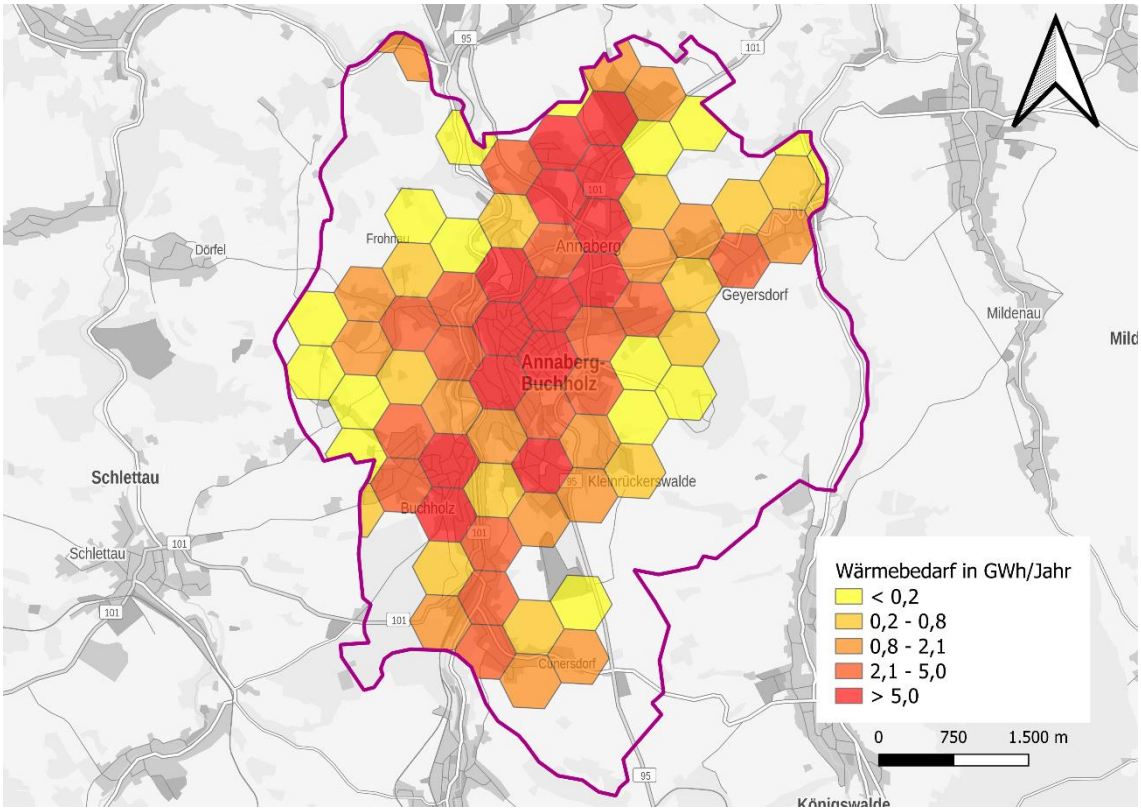
Abbildung 20: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Annaberg-Buchholz

Tabelle 10: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Annaberg-Buchholz

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	5	Viel Altbergbau mit einer Überprägung durch die Wismut SAG/SDAG von 1946 bis 1959.	(KUNZE et al., 2011)
Entwässerungssystem	4	Mehrere Entwässerungsstolln mit einem Gesamtabfluss von mindestens 200 m^3/h.	(KUNZMANN et al., 2007)
Geflutete Teufe	4	Entwässerungslevel je nach Standort im Stadtgebiet von Annaberg-Buchholz bei 30 bis 90 m unter GOK (Stadthöhe: 600 m NHN, Stollenhöhe: 510 bis 570 m NHN).	(KUNZMANN et al., 2007)
Hohlraumvolumen	5	Schätzung, da keine Daten auffindbar	/
Risswerkkenntnis	5	Die Stadtverwaltung Annaberg besitzt eigene vektorisierte Bergwerksrisse. Wismut GmbH besitzt Übersichtsrisse zum Wismutbergbau.	(STADTVERWALTUNG ANNABERG-BUCHHOLZ, 2023; SOBA, 2024)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalien für das Revier den Autoren bekannt.	(KUNZMANN et al., 2007; TUBAF, 2023a)
Wasserchemie	4	Mehrere lang operierende Entwässerungsstollen. Grubenwasser wird weiterhin stofflich von Drittem genutzt, was auf geringe Belastung hindeutet.	(WAGENBRETH, 1990; STADTVERWALTUNG ANNABERG-BUCHHOLZ, 2023)
Zugänglichkeit	4	Zwei aktive Besucherbergwerke, die außerhalb des Stadtgebietes liegen. Andere Grubenteile sind verwahrt.	(KUNZMANN et al., 2007)
Unter-Tage-Gesamt-wertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	4,1		

4.2.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Annaberg-Buchholz hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 203,6 GWh/a (DBI GTI, 2023). Erhöhte Wärmebedarfe zeigen sich in allen sechs Stadtteilen. Die meisten Abnehmer befinden sich in einem schmalen, zentralen Streifen, der sich von Kleinrückerswalde über Buchholz bis nach Annaberg im Norden des Gemeindegebietes erstreckt. Als Hauptabnehmer wurde das dichtbewohnte Stadtzentrum identifiziert. Vereinzelt befinden sich Gewerbegebiete in der Abnehmerstruktur. Die größte Ansammlung stellt das Gewerbegebiet am Gewerbering nordöstlich im Stadtgebiet dar. Eine erhöhte Anzahl an Industrieunternehmen weist das Gebiet „Oberer Bahnhof“ östlich des Stadtzentrums auf.

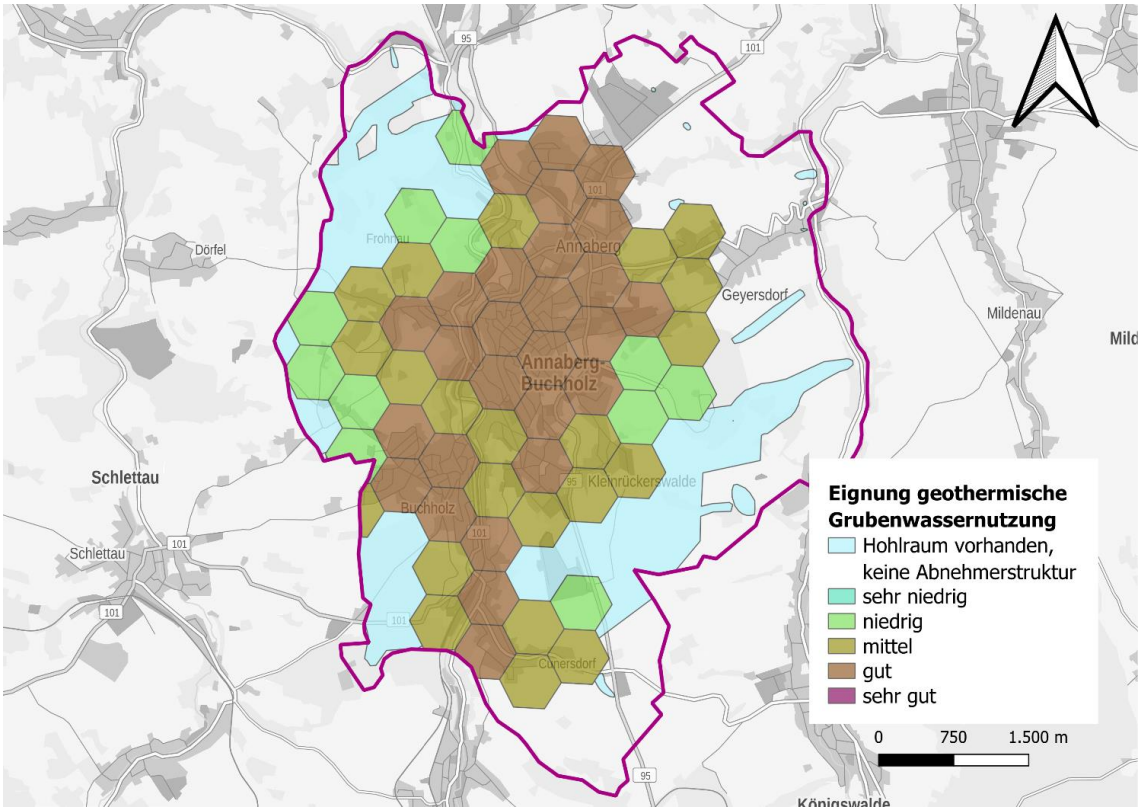


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 21: Übertägige Bewertung der Gemeinde Annaberg-Buchholz

4.2.3 Potenzial-Layer

Die Hohlraumkarte bezeugt die lange bergmännische Tradition in Annaberg-Buchholz und belegt die Existenz von Hohlräumen unterhalb des gesamten Stadtgebietes. Die Potenzialkarte in Abbildung 22 zeigt, dass im gesamten Stadtgebiet entlang der B95 und B101 insbesondere in den Stadtzentren der beiden namensgebenden Ortsteile eine große Überschneidung aus Potenzial und Bedarf besteht. Hervorzuheben ist, dass im Bereich der Zeppelinstraße über verschiedene Schächte eine Grube der Wismut SDAG betrieben wurde. Dadurch sind im Oberbergamt qualitativ hochwertige Risskarten vorhanden, welche in diesem Gebiet Auskunft über die Grubenstrukturen geben. Diese könnten bei einem Umsetzungsprojekt essenzielle Informationen liefern. Aufgrund der generalisierten Potenzialbewertung kann jedoch auch geschlussfolgert werden, dass Grubenwasser eine wirtschaftliche Alternative für eine Wärmeversorgung der Ortsteile Frohnau und Cunersdorf darstellen kann. Insgesamt stellen die Schwerpunkte für die Gemeinde die Wohngebiete entlang des Barbara-Uthmann-Rings inkl. der Schwimmhalle Atlantis, die Annaberger Altstadt sowie der Bereich zwischen Waldschlösschenpark und den Spitzkegelhalden Schacht 116 entlang der B101 dar.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 22: Potenzial-Layer der Gemeinde Annaberg-Buchholz

4.2.4 Weiterführende Literatur

Insgesamt sind nur wenige, direkt das Grubenwasserpotenzial betreffende, Informationen aufzufinden. Der Standort wurde jedoch im Projekt VODAMIN II der TU Bergakademie Freiberg betrachtet (OPPELT et al., 2020). Dort wurden die Entwässerungsstollen mit Fokus auf dem Tiefen St. Christoph Stollen betrachtet, welcher die Grubenwässer westlich der Sehma gesammelt über ein Rohr im zugemauerten Mundloch austrägt. In Trockenzeiten wird ein durchschnittlicher Volumenstrom von 80 l/s (288 m^3/h) angegeben, wobei die Temperatur des Wassers etwa 11 °C beträgt. Da bei Grubenwasseranalysen keine stark erhöhten Elementgehalte aufgefunden wurden, kann eine energetische Nutzung als gut umsetzbar eingestuft werden. Das Bewertungsergebnis ist schematisch in Abbildung 23 dargestellt.

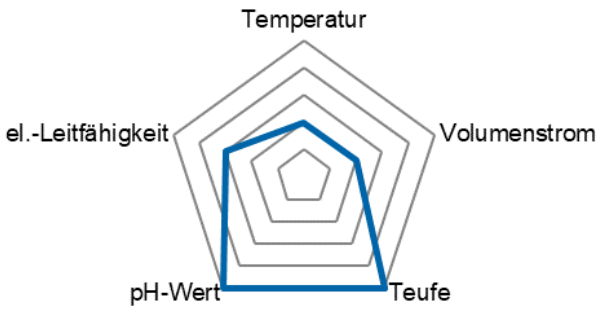


Abbildung 23: Netzdiagramm zur Einordnung des Potenzials zur Grubenwassernutzung am Mundloch des Tiefen St.-Christoph-Stollens, beste Wertung außen, nach (OPPELT et al., 2020)

Auch hier ist zu beachten, dass in dieser Untersuchung keine Analyse der Abnehmerstrukturen durchgeführt wurde. Ergebnisse der Potenzialeinordnung sollten letztlich daher je nach Verfügbarkeit im Kontext von sicher bekannten oder modellierten Wärmebedarfen stattfinden.

4.3 Aue-Bad Schlema

4.3.1 Untertägige Standortbewertung

Bergmännische Arbeiten fanden im Revier Aue-Bad Schlema ab dem 15. Jahrhundert insbesondere im Bereich des Schlematales statt. Dort wurde wie im benachbarten Schneeberger Revier Silber aber auch Kupfer und Eisen entdeckt und gewonnen (TITZMANN, 1995). Der in der Frühzeit stattgefundene Altbergbau verlor im Verlauf der Reviergeschichte jedoch die Bedeutung, was die Grubenstruktur betraf. Dies lag insbesondere an der Entdeckung des Uranvorkommens in Verbindung mit seiner Bedeutung für nukleare Rüstungsoffensiven. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden die reichen Uranvorkommen, meist aufzufinden in Form der Pechblende, auch als Uraninit bekannt, zunehmend erschlossen. Dies geschah durch die 1947 gegründete Wismut SAG unter Aufsicht der Sowjetunion, welche gleichermaßen der Profiteur des gewonnenen Urans war. Im Verlaufe des Lagerstättenbetriebs wurde das Revier, welches sich als größte Uranlagerstätte Sachsens herausstellte, kontinuierlich ausgebaut, so dass bis zur Beendigung des Bergbaus bis 1990 ca. 93.000 t reines Uran gefördert wurden (HILLER, 2012). Durch die Auffahrung der Grubenstrukturen bis in eine Teufe von 2.000 m mit einer Gesamtlänge von über 4.000 km wurde ein unterirdisches Hohlraumsystem von etwa 36 Mio. m^3 geschaffen (WISMUT GMBH, 2016; WISMUT GMBH, 2021). Ein Querschnitt der Grube ist in Abbildung 24 dargestellt.

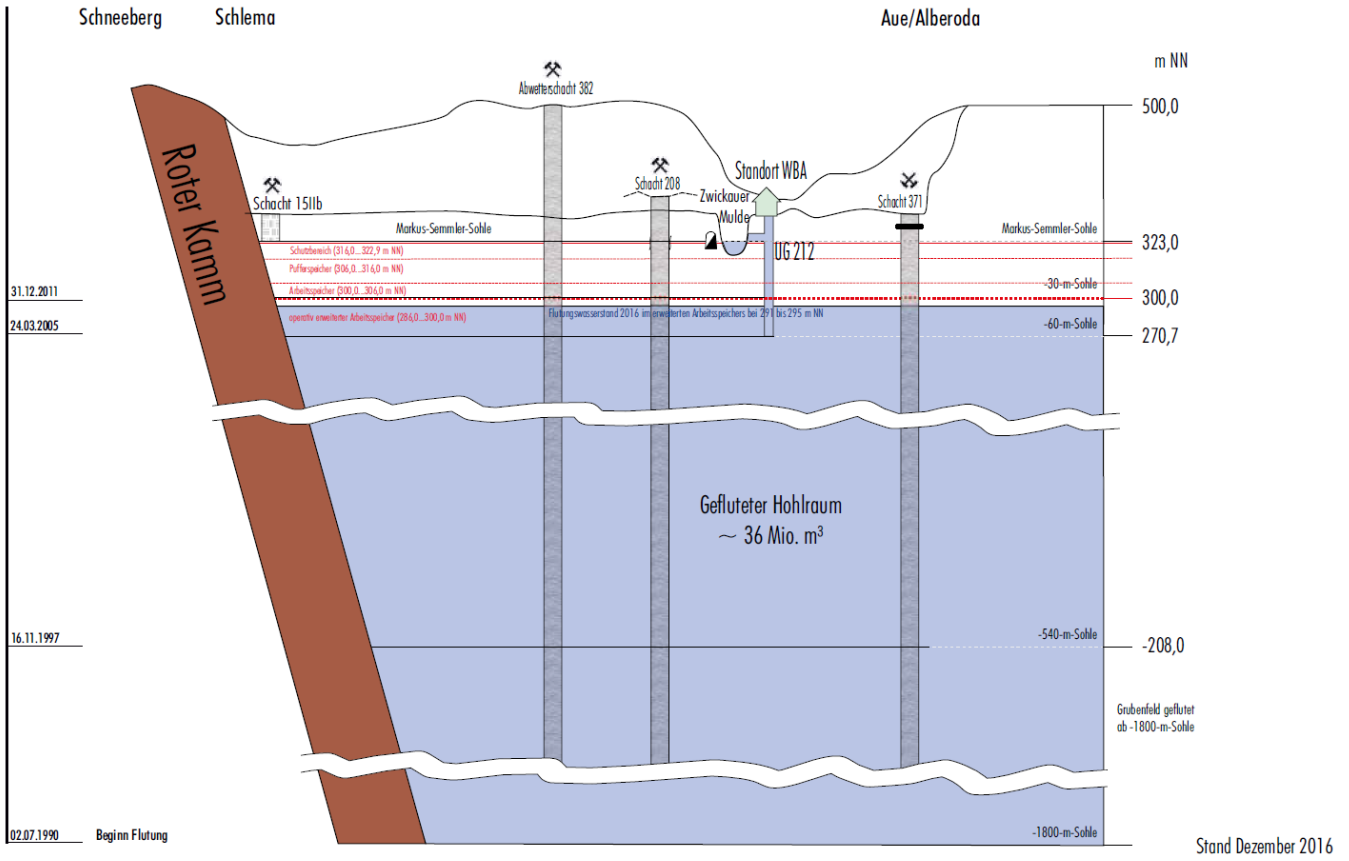
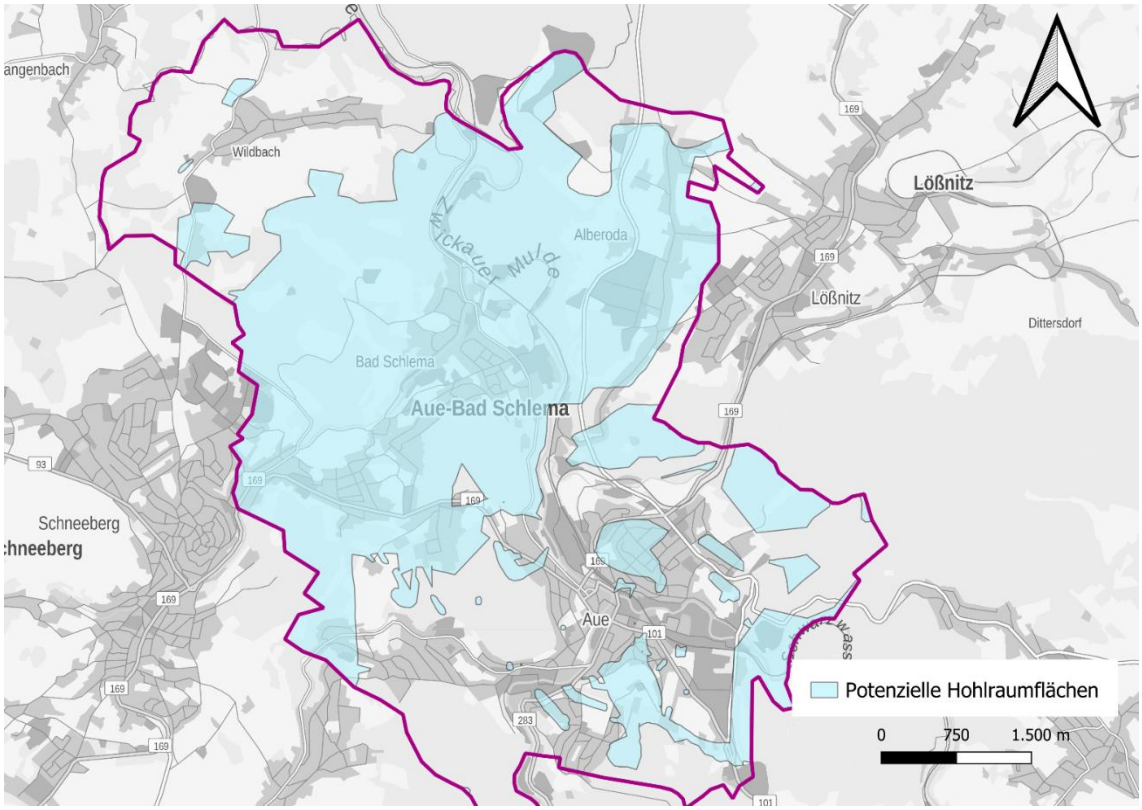


Abbildung 24: Schematischer Schnitt der Grube Schlema-Alberoda (WISMUT GMBH, 2016)

Da das Schlemaer Revier dabei hydraulisch vom Schneeberger Revier weitestgehend getrennt ist, entwässert dieses nicht mit über den Markus-Semmler-Stollen. Dies ist wichtig, da die Grubenwässer des Schlemaer Revieres radioaktiv belastet sind und vorbehandelt werden müssen, bevor sie in ein Oberflächengewässer gegeben werden können. Dies geschieht über die Wasserbehandlungsanlage in Schlema-Alberoda der Wismut GmbH. Da kontinuierlich Wasser in die Grube eindringt und radioaktives Grubenwasser die abgesenkte Oberfläche verwässern könnte, gewährleistet die WBA ein stetiges sicheres Abpumpen und Reinigen des Grubenwassers (WISMUT GMBH, 1992). Somit kann sie als zentrales Entwässerungssystem angesehen werden. Der Volumenstrom beträgt dabei durchschnittlich ca. 500 m^3/h (HILLER, 2012). Die erste geflutete Sohle befindet sich in Abhängigkeit des Betriebes der WBA meist zwischen 50 m NHN und 100 m NHN im Gemeindegebiet von der Oberfläche entfernt. Eine Herausforderung für potenzielle energetische Erschließungen kann der Kenntnisstand der Lage der Grubenstrukturen sein. Da die Auffahrungen im Revier jedoch relativ jung sind und gutes Kartenmaterial bei der Wismut GmbH vorliegt, kann die Risswerkkenntnis als sehr gut eingestuft werden (STEYER et al., 2024). Je nach Erschließungsort können in Oberflächennähe bereits Temperaturen bis 25 °C angetroffen werden. Diese liegen zum Beispiel an der WBA vor, wobei im Stadtgebiet auch kältere Wässer mit etwa 11 °C, welche überwiegend von infiltrierendem Oberflächenwasser beeinflusst sind, angetroffen werden können (TUBAF, 2023b). Die Temperatur gibt damit einen Hinweis darauf, welchen Einfluss aus tieferen Bergwerkssohlen aufsteigende Wässer besitzen. Wärmeres Grubenwasser in tieferen Sohlen ist tendenziell

höher mineralisiert und kann durch Konvektionsprozesse in Oberflächennähe gelangen. Daraus können erhöhte umweltrelevante und gesundheitliche Gefahren resultieren. Die Temperatur kann im Revier Schlema-Alberoda daher ein indirektes Indiz für die Belastung des Wassers sein, wobei eine Wasseranalyse in jedem Fall notwendig ist. Das Grubenwasser könnte durch eine Nutzung der vorhandenen Entwässerung an der WBA energetisch erschlossen werden. Da die Grube jedoch anderweitig nicht mehr zugänglich ist, ist die wahrscheinlichste Erschließung für weitere Standorte im Rahmen von neuen Bohrungen gegeben. Ein solches Projekt wurde an der Schillerschule bereits umgesetzt (WISMUT GMBH, 2012a).

In der nachfolgenden Abbildung 25 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 11 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 25: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Aue-Bad Schlema

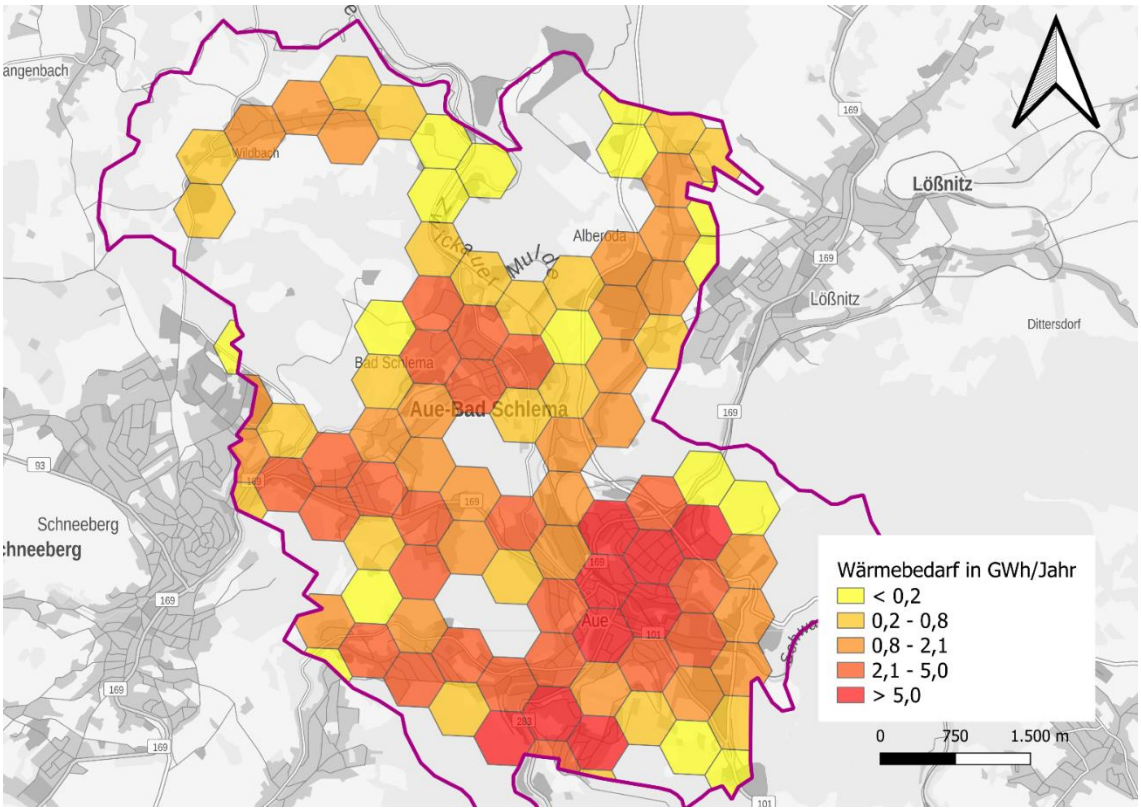
Tabelle 11: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Aue-Bad Schlema

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	5	Insbesondere Wismutbergbau im 20. Jahr-hundert.	(C&E, 2001)
Entwässerungssystem	5	Wasserbehandlungsanlage als zentrale Ent-wässerungs- und Aufbereitungsanlage. Zu-sätzliche oberflächennahe Wasserableitung durch den Markus-Semmler-Stolln vorhan-den.	(WISMUT GMBH, 1992)
Geflutete Teufe	4	Erste geflutete Sohle bei 50 bis 100 m unter GOK.	(VATER, 2012)
Hohlraumvolumen	5	Circa 36 Mio. m^3 Abraum vorhanden.	(HILLER, 2012)
Risswerkkenntnis	5	Bergwerksriss vektorisiert am TTD-Lehr-stuhl und georeferenzierte Karten bei der Wismut GmbH vorhanden.	(TUBAF, 2023c; STEYER ET AL., 2024)
Temperatur	5	Am Entnahmepunkt der Wasserbehand-lungsanlage oberflächennah bei circa 25 °C.	(G.E.O.S., 2007; C&E, 2001)
Wasserchemie	1	Aufgrund der Uranlagerstätte ist das Gru-benwasser im Revier besonders in tieferen Bereichen hochbelastet. Es ist bei jeglicher Nutzung mit hohen Auflagen zu rechnen.	(C&E, 2001)
Zugänglichkeit	2	Durch vollständige Flutung und potenzieller radioaktiver Belastung ist ein Aufschluss nur an wenigen Stellen möglich.	(C&E, 2001)
Unter-Tage-Gesamt-wertung(Wichtung siehe Tabelle 4)	3,8		

4.3.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Aue-Bad Schlema hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 208,2 GWh/a (DBI GTI, 2023). Der höchste Wärmebedarf entfällt in der Modellierung auf den Ortsteil Aue im Bereich der Stadtteile Auerhammer-Neudörfel, Neustadt und Zelle. Hier befinden sich überwiegend Wohngebiete. Größere Industrie- und Gewerbegebiete befinden sich im Osten von Aue mit einem großen metallverarbeitenden Betrieb und nordwestlich des Stadtzentrums in der Nähe des Bahnhofs. Neben Aue weisen auch die Ortsteile Bad Schlema und Alberoda einen erhöhten Wärmebedarf auf. Bad Schlema ist überwiegend durch Wohngebäude als Wärmeabnehmer geprägt. Im Osten des Ortsteils befindet sich ein großes Gewerbegebiet mit einem Ausbildungszentrum. Die im westlichen Stadtgebiet befindliche Kurgesellschaft insbesondere mit dem Großabnehmer des Kurbades ist in der Modellierung mit einem Wärmebedarfswert von 2,2 GWh unterschätzt. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zusätzlich zu be-

achten. In Alberoda konzentriert sich der Wärmebedarf entlang der Alberodaer Straße, wo sich überwiegend Wohngebäude befinden. Im südwestlichen Ortsgebiet befindet sich ein größeres Gewerbegebiet mit verschiedenen Industrie- und Gewerbebetrieben.



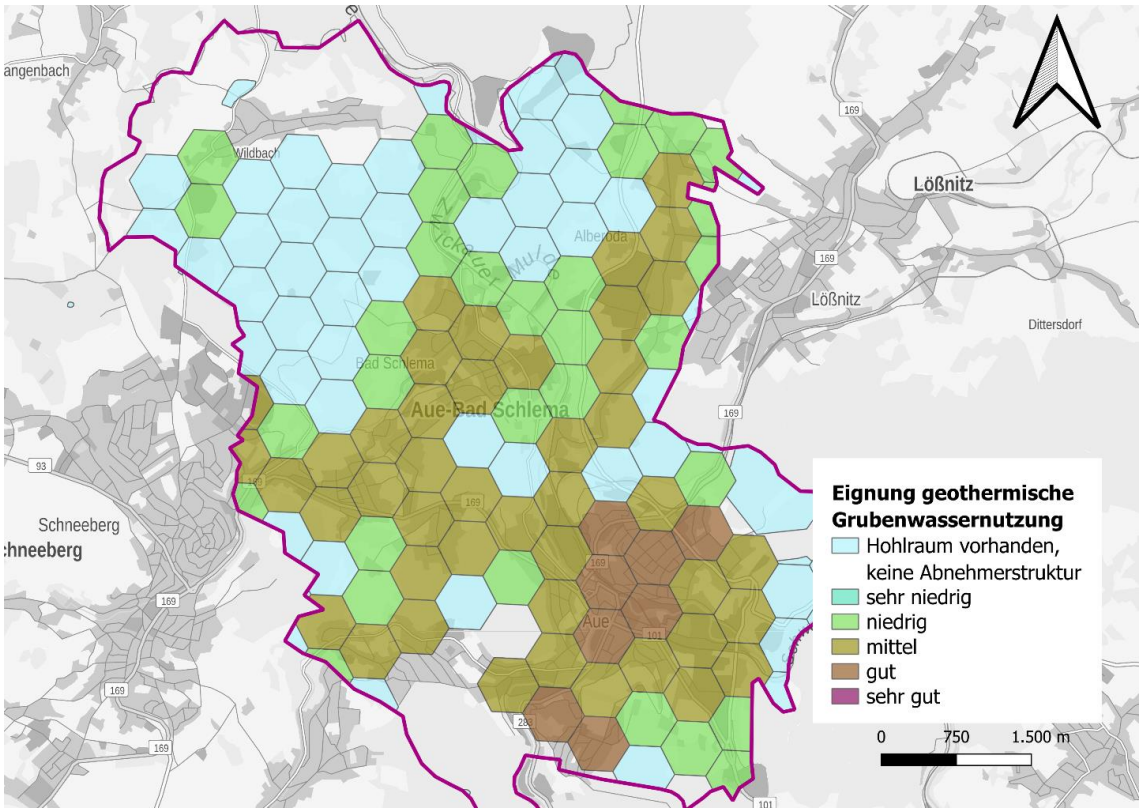
Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 26: Übertägige Bewertung der Gemeinde Aue-Bad Schlema

4.3.3 Potenzial-Layer

Auf der Potenzialkarte in Abbildung 27 sind große Hohlräume im gesamten Gebiet der Gemeinde Aue-Bad Schlema zu erkennen. Die weite Verbreitung der Hohlräume führt zu einem großflächigen geothermischen Potenzial, welches im Bereich Bad Schlema zu einer maximal mittleren Eignung und im Gemeindeteil Aue zu guten Eignungen führt. Dies ist primär mit der Modellierung der Wärmebedarfe zu erklären. Insbesondere im Gebiet der Kurgesellschaft führen die Modellierungsverfahren wie bereits angedeutet zu einer höheren Abweichung des realen Wärmebedarfs. Für die Umsetzung einer Machbarkeitsstudie ist daher besonders das Nutzen von realen Wärmebedarfsdaten zu betonen. Ebenfalls werden die Grubenteile im Gemeindegebiet anhand der aufgefundenen Literatur einheitlich bewertet, so dass nicht zwischen einzelnen Grubenteilen und Bergbauperioden unterschieden werden kann. Dies führt dazu, dass die untertägigen Gegebenheiten in Bad Schlema denen in Aue gleichgesetzt werden, obwohl im Ortsteil Aue beträchtlich weniger Hohlraumflächen ausgewiesen sind (siehe Abbildung 25).

Die Nutzung eines Wärmenetzes zur Kopplung von vorhandenen Wärmepotenzialen und Abnehmern kann unabhängig von der Potenzial-Karte zu wirtschaftlich erfolgreichen Projekten führen.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 27: Potenzial-Layer der Gemeinde Aue-Bad Schlema

4.3.4 Weiterführende Literatur

Durch die besonderen Voraussetzungen des Revieres wurden schon früh Untersuchungen zur thermischen Nutzung des Grubenwassers durchgeführt. Diese wurden maßgeblich durch die Wismut GmbH als zuständige Sanierungsfirma der Grube initiiert und vorangetrieben. Durch die große Teufe des Bergwerks rechnete man bereits in einer der ersten Studien mit greifbaren Temperaturen von bis zu 45 °C (RUDOLPH et al., 1991). Da zu dieser Zeit die Flutung des Grubengebäudes erst einsetzte, wurden daher Überlegungen getroffen, unterschiedliche Sohlen wärmetechnisch zu präparieren, um das warme Grubenwasser in größerer Tiefe fassen zu können. Durch Einleitung in anderen Sohlen hätte so ein untertägiger Kreislauf entstehen können, welcher ein hohes Wärmepotenzial im Gestein und im Grubenwasser erschließt. Im Gesamtsystem wird eine geothermische Wärmeleistung von 15 MW vorgeschlagen, welche mit einem ölgefeuerten Spitzenheizwerk zusammen über ein Heiznetz nahegelegene Abnehmer versorgt. Dabei sollte das Netz als zentrales Netz mit Vor- und Rücklauftemperaturen von 110 °C und

70 °C ausgelegt werden. Mit Einbezug von Fördermöglichkeiten hätten sich so Wärmeerzeugungskosten von umgerechnet etwa 74 €/MWh ergeben. Das vorgeschlagene Konzept wurde jedoch nicht in die Praxis umgesetzt.

Weitere Erkenntnisse wurden bis zum Jahr 2001 durch eine weitere umfassende Studie herausgearbeitet (C&E, 2001). Dort wurden drei verschiedene Versorgungskonzepte untersucht, welche das Grubenwasser des Lagerstättenteils Niederschlema-Alberoda nutzen sollten. Diese beinhalteten die Wasserbehandlungsanlage der Wismut GmbH, das Zechenhaus am Schacht 371 in Hartenstein und das Kurmittelhaus der Gemeinde Schlema. Die Herausforderungen in den drei Konzepten gestalteten sich unterschiedlich. Dazu zählen Heiznetztemperaturen, Wärmeabnehmer und Netzinvestitionskosten. Es ist zu betonen, dass die Rahmenbedingungen, welche zur Unwirtschaftlichkeit der Konzepte führten, heute nicht mehr in diesem Maße vorliegen. Je nach Leistungsanforderung könnte zur Versorgung von Gebäuden innerhalb der Gemeinde anstatt eines warmen Nahwärmenetzes ein kaltes Nahwärmenetz realisiert werden. Effiziente Wärmepumpen machen eine flexible und bedarfsgerechte Versorgung verschiedener Abnehmer damit möglich. Auch kann angestrebt werden, eine Vielzahl von Abnehmern in das Versorgungskonzept einzubeziehen, was eine hohe Auslastung des Netzes sichern würde. Konstruktive Unterschiede im Vergleich zum warmen Nahwärmenetz können die Investitionskosten in ein kaltes Wärmenetz ebenfalls positiv beeinflussen. Offene Fragestellungen der Studie beinhalteten unter anderem:

- die Nutzung der Grubenwässer aus dem Markus-Semmler-Stollen,
- den Einbezug weiterer Abnehmer im Untersuchungsgebiet,
- die Feststellung von konvektiven Einflüssen im Grubengebäude von Oberschlema,
- die Betrachtung der chemischen Folgeprozesse durch eine energetische Nutzung des Grubenwassers wie Mineralausfällungen oder Korrosion.

Die Studie schließt mit dem Fazit, dass eine wirtschaftliche Umsetzung zu den damaligen Gegebenheiten mit hoher Sicherheit nur im Falle der Versorgung der Wasserbehandlungsanlage wahrscheinlich ist.

Im Jahr 2003 wurde eine weitere Studie im Auftrag der Wismut GmbH zur thermischen Nutzung der Abflusswässer der Grube Schlema-Alberoda durchgeführt (C&E, 2003). Bestandteile waren erneut die Analyse von technischen Umsetzungskonzepten, Wirtschaftlichkeitsbewertung sowie Betrachtungen zur ökologischen Bilanz. Weiterhin wurden genehmigungsrechtliche Aspekte beleuchtet. Es wurden dabei vier Varianten in unterschiedlichen Ausführungen betrachtet, darunter:

- die übertägige Nutzung des Abstoßwassers durch eine Wärmepumpe direkt an der Wasserbehandlungsanlage,
- die übertägige Nutzung von Wasser des Schachtes 208 zur Versorgung einer nahegelegenen Siedlung,
- die untertägige Nutzung von Wasser des Schachtes 208 durch das Installieren einer Wärmesonde im Schacht,
- die untertägige Nutzung des Abstoßwassers durch eine im Bergwerk installierte Wärmepumpenanlage.

Als technisch, wirtschaftlich wie genehmigungsrechtlich sehr vorteilhaft wurde dabei die Grubenwassernutzung am Schacht 208 bewertet. Dabei stehen Zwischenwärmeübertrager sowie die Wärmepumpen unmittelbar am Schacht und die Wärme wird auf hohem Temperaturniveau an die nahegelegenen Abnehmer verteilt. Als besondere Untersuchung weist die Studie eine Analyse von chemischen und physikalischen Einflüssen auf Anlagenbauteile auf. Dafür wurde Wasser aus dem Schacht 208 für Säulenversuche verwendet. Diese fanden jeweils mit aeroben sowie anaeroben Bedingungen mit drei verschiedenen Materialproben statt. Während unter aeroben Bedingungen überwiegend die Bildung eines Biofilms zu beobachten war, lagen bei den anaeroben Korrosionserscheinungen an der Stahlprobe vor. Es werden Spezialwärmeübertrager empfohlen, wie sie zum Beispiel auch in der Meerwasserentsalzung verwendet werden.

2006 wurde die Thematik der geothermischen Grubenwassernutzung ebenfalls von der Gemeindeverwaltung Bad Schlema aufgegriffen (AIA AUE GMBH, 2006). Innerhalb einer Machbarkeitsstudie wurden die Randbedingungen einer potenziellen Nutzung untersucht. Dabei wurden ebenfalls weitere Aspekte der Restrukturierung der Bergbaufolgelandschaft in der Gemeinde diskutiert. Als wichtigste Aspekte in Bezug auf die Grubenwassernutzung wurden der Umweltschutz sowie die Verfügbarkeit des Grubenwassers benannt. Umweltschutzrechtlich muss sichergestellt werden, dass weder wassergefährdende Stoffe in die Grube noch Grubenwasser in Oberflächenwässer gelangen. Für Grubenwasseranlagen genehmigungsrechtlich relevante Punkte wurden aufgeführt. Zur potenziellen Nutzung sind Abgriffspunkte für das Grubenwasser vorgeschlagen. Darunter die Wasserbehandlungsanlage, der Verlauf des Querschlags 111 und des Querschlags 111 NO und die Schächte 383 sowie 208 W. Standortspezifische Methoden für die Wärmeerschließung und Verteilung werden erläutert und technische Realisierungskonzepte analysiert. Auf Verbraucherseite sind relevante Abnehmer im Gemeindegebiet zusammengetragen.

Ein Teil der aus der vorangegangenen Studie erarbeiteten Erkenntnisse konnte in einem Projekt genutzt werden, dessen Umsetzung 2007 durch die Stadt initiiert wurde (WISMUT GMBH, 2014; VATER, 2012). Es sah eine Versorgung der Friedrich-Schillerschule in Bad Schlema mit Grubenwasser vor, welches in der -60-m-Sohle direkt unter dem Gebäude verläuft. 2009 wurden daraufhin die Bohrungen in das Grubengebäude abgeteuft. Das Konzept beinhaltet 2 Förder- und 2 Versturzbohrungen. Zusätzlich wurde die Strecke zwischen diesen noch mit drei weiteren Bohrungen erschlossen, welche zur Herstellung eines Betonpackers dienten. Dieser verhindert ein unmittelbares Zurückfließen des kalten Wassers zu den Förderbohrungen und beugt so einen thermischen Kurzschluss vor. Da das Grubenwasser im Bergwerk in Oberflächennähe potenziell radioaktive Teilchen mit sich führt, wurde zu Beginn ein erhöhter Wert auf das Monitoring gelegt. Da sich jedoch herausstellte, dass sich überwiegend Oberflächenwasser in der Strecke unter der Schule befindet, konnten die Beprobungszyklen auf längere Zeitabstände aufgeweitet werden. Die Anlage ging 2013 in den Pilotbetrieb. In diesem Jahr konnte der effiziente Anlagenbetrieb nachgewiesen werden. Aufgrund eines Anlagenstillstandes wurde die Anlage 2022 in einer Projektarbeit der TU Bergakademie Freiberg untersucht (TUBAF, 2023b). Dort wurden neben einer Ursachenforschung für den Stillstand Optimierungsvorschläge für eine höhere Anlageneffizienz erarbeitet. Ebenfalls wurde herausgestellt, dass die Anlage von zwei Förderbohrungen nur eine aktiv nutzt, was in Anbetracht der festgestellten Ergiebigkeit der Strecke ebenfalls Erweiterungspotenzial nahelegt.

Durch das Wärmepotenzial, das sich durch die aufbereiteten Grubenwässer an der Wasserbehandlungsanlage ergibt, wurde die thermische Nutzung im Jahr 2023 im Rahmen eines Quartierskonzeptes für Bad Schlema erneut untersucht (STEYER et al., 2024). Für den Fall der Realisierung könnten so Wärmeleistungen von über 5 MW bereitgestellt werden, welche über ein neu zu errichtendes Wärmenetz im Stadtgebiet verteilt werden. Dazugehörige Wärmeübertragerkonzepte werden vorgestellt. Auch werden der Markus-Semmler-Stollen sowie die Bohrungen der vorhandenen Anlage an der Friedrich-Schiller-Schule in die Potenzialbetrachtung einbezogen. Während gemäß den Durchflussraten des Markus-Semmler Stollens je nach Fasspunkt eine Wärmeleistung von ca. 2 MW erschlossen werden kann, kann für die Schillerschule die gewinnbare Wärmeleistung auf etwa 460 kW beziffert werden. Zum Standort der Schule gibt es jedoch zu erwähnen, dass diese Leistung mit einem Volumenstrom erschlossen werden kann, welcher dem maximalen Volumenstrom während der Dauerpumpversuche entspricht. Es ist wahrscheinlich, dass auch höhere Volumenströme grubenseitig genutzt werden könnten. Als eine weitere Schlüsselerkenntnis muss die Grubenwasserströmung näher untersucht und verstanden werden. Dies kann mit Tracertests geschehen, die Aufschluss darüber geben, welche Verweilzeit das Wasser beim Durchströmen der Grubenbaue aufweist. Insgesamt weist das Quartierskonzept auf die höffigsten Potenziale der geothermischen Grubenwassernutzung hin und legt erste technische Umsetzungsstrategien dar. Damit legt es einen Grundstein für eine erweiterte Grubenwassernutzung in der Gemeinde.

4.4 Bad Gottleuba-Berggießhübel

4.4.1 Untertägige Standortbewertung

Seit dem frühen 13. Jahrhundert wurde in der Region Bad Gottleuba - Berggießhübel Bergbau verzeichnet (MÜLLER, 1890). Die an der Oberfläche ausstreichenden Erzlagerstätten führten während der frühen Bergbauperioden insbesondere zum offenen Abbau über Tage. Den Erzgängen folgend wurde der Tiefbau ein wichtiger Bestandteil der Eisengewinnung. Bis zum dreißigjährigen Krieg 1618 erlebte der Bergbau eine Hochzeit und das Eisen aus Berggießhübel wird von zeitgenössischen Chronisten als äußerst qualitativ beschrieben (BBW MARIE LOUISE STOLLN, 2023). Im Zuge der Kriegsverheerungen brach der Bergbau jedoch vollständig zusammen. Erst im frühen 19. Jahrhundert wurde erneut mit gesteigerter Intensität versucht, neue Erzlager aufzuschließen, was schließlich auch zur Anlegung des Hauptentwässerungsstollens "Zwiesler Tiefer Erbstollen" führte. In der intensivsten Periode des Abbaus zwischen 1870 und 1892 wurden so Eisenmengen gefördert, welche weit über die Fördermengen des 16. Jahrhunderts hinausgingen (FISCHER et al., 2020). Es ist demnach davon auszugehen, dass durch den jungen Abbau insbesondere im Grubenteil "Mutter Gottes Vereinigt Feld", in dem zu dieser Zeit 90 % des Erzes im Revier gefördert wurden, risskundlich gesicherte Daten vorliegen.

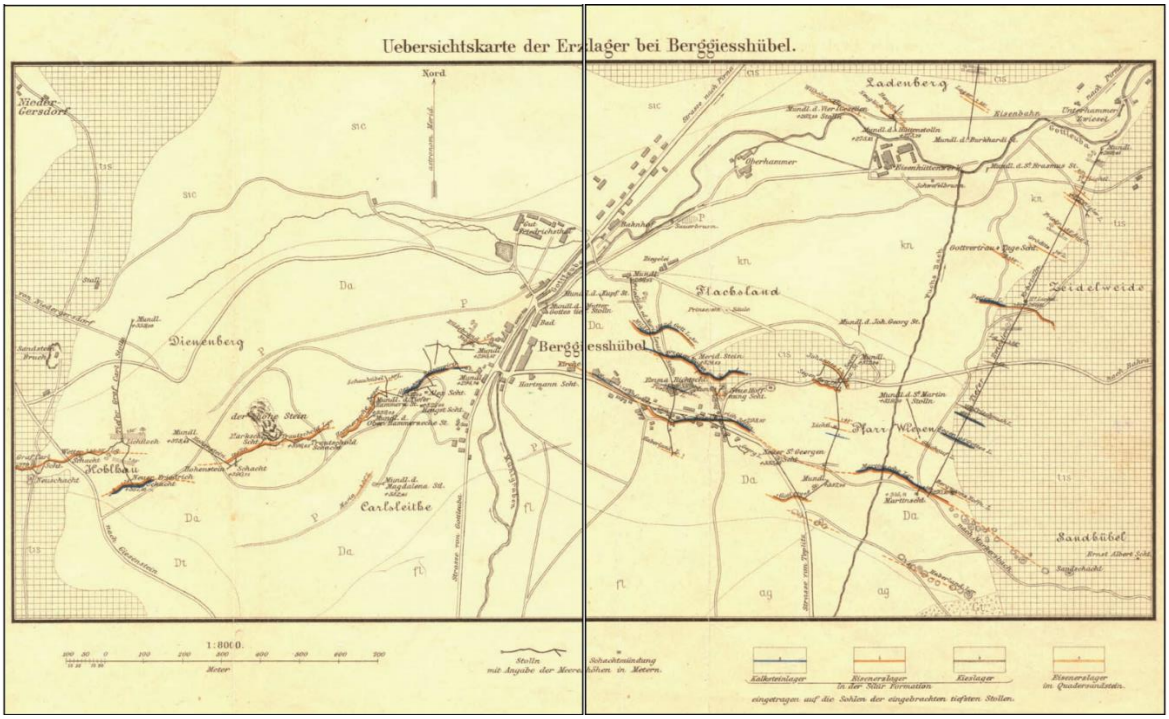
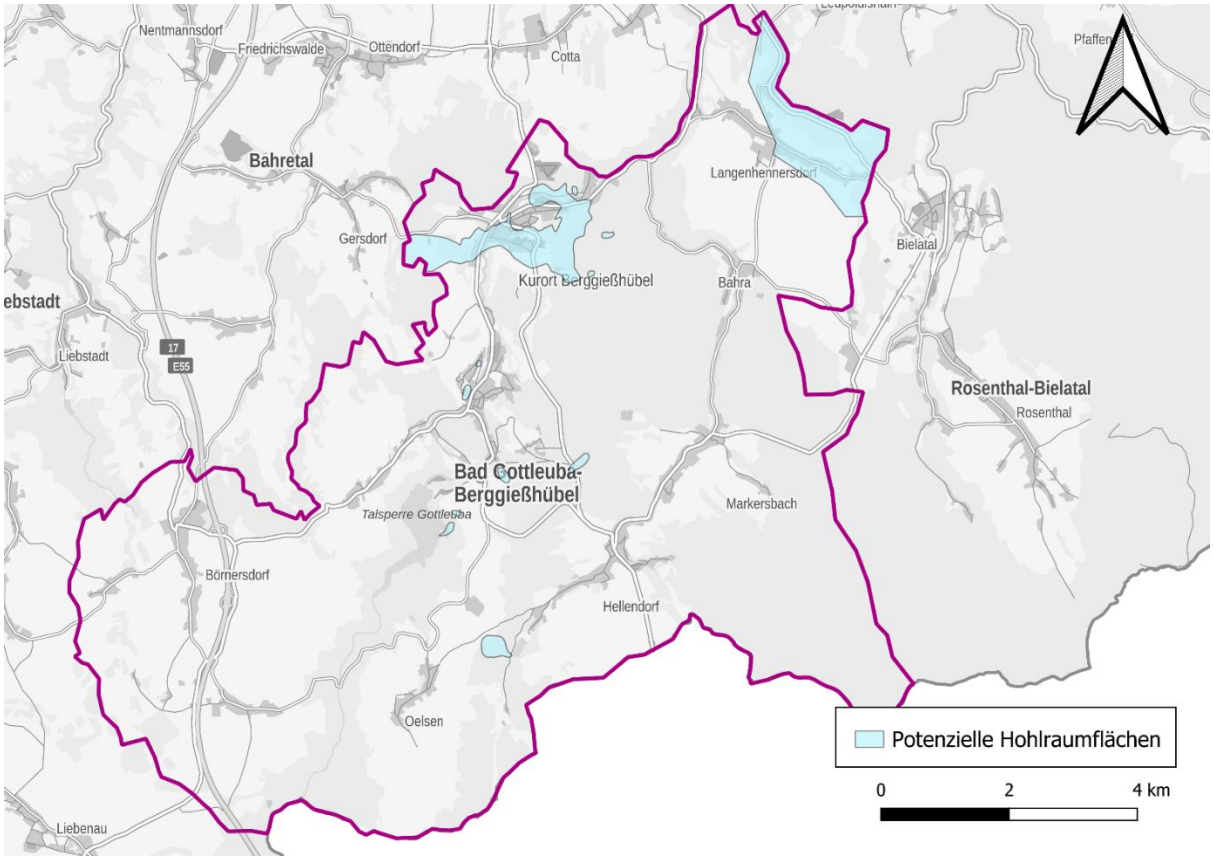


Abbildung 28: Zweigeteilte Karte des geologischen Aufbaus des Reviers mit wichtigen Erzlagern und Stollen, angefertigt um 1890 (FISCHER et al., 2020)

Auch in den Zeiten der Autarkiebestrebungen in den 1930er Jahren wurde das Revier erneut erkundet, was jedoch nur mäßigen Erfolg brachte und infolgedessen der Bergbau in Berggießhübel endgültig eingestellt wurde.

In der nachfolgenden Abbildung 29 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 12 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

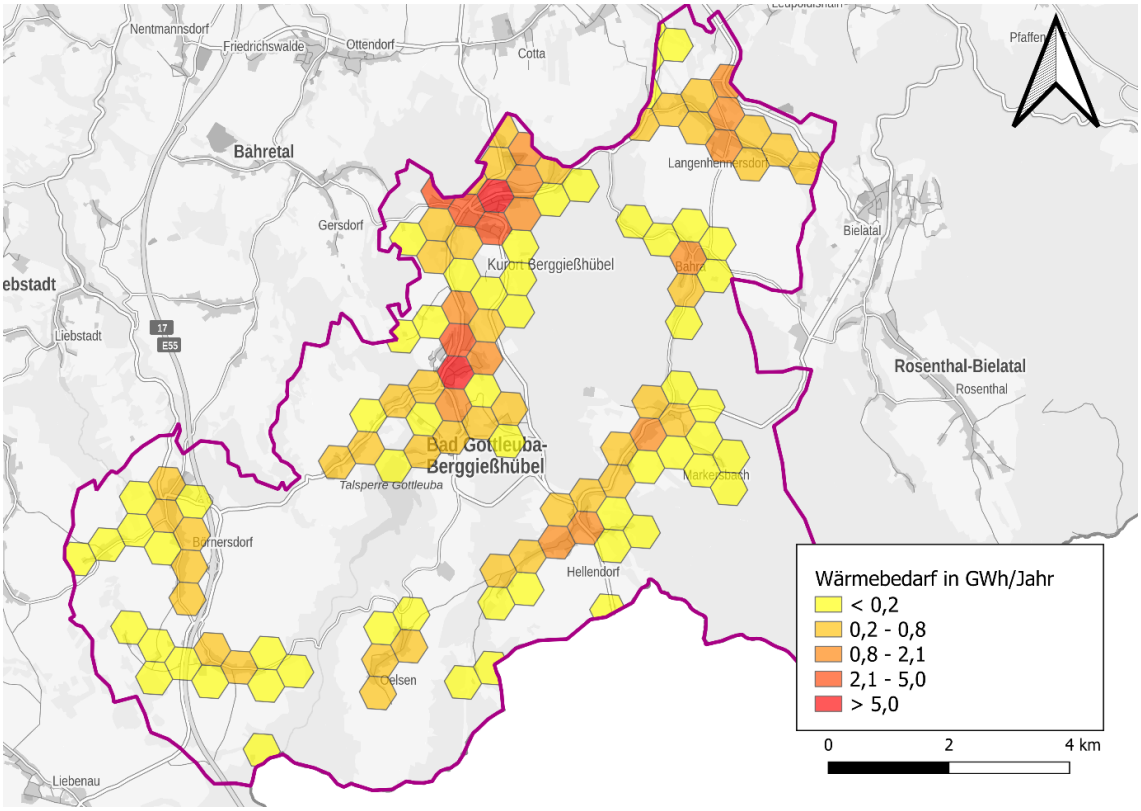
Abbildung 29: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Bad Gottleuba-Berggießhübel

Tabelle 12: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Berggießhübel

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	4	Die größte Bergbauperiode fand durch moderne Bergbautechnik im 19. Jahrhundert statt. Älterer Bergbau in geringerem Ausmaß vorhanden.	(BBW MARIE LOUISE STOLLN, 2023)
Entwässerungssystem	2	Tiefer Zwiesler Stolln (TZES) mit geringen Durchflüssen. Marie-Louise-Stolln unter dem Stadtgebiet, aber wenig Durchfluss zu erwarten, durch die tiefere Entwässerung im TZES.	(FISCHER ET AL., 2020; TUBAF, 2024C)
Geflutete Teufe	5	Marie-Louise-Stollen 5 m unter GOK, TZES bis zu 20 m unter GOK (Stadthöhe: 360 m NHN, Marie-Louise-Stollen: 355 m NN, TZS: 340 m NHN)	(BBW MARIE LOUISE STOLLN, 2023; GOOGLE, 2023)
Hohlraumvolumen	3	Nur Schätzung, da den Autoren keine Angaben bekannt sind.	/
Risswerkkenntnis	3	Bergwerksriss vorhanden, jedoch wahrscheinlich geringfügig bis nicht georeferenziert.	(FISCHER et al., 2020)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalie für das Revier den Autoren bekannt.	(FISCHER et al., 2020; TUBAF, 2024C)
Wasserchemie	4	TZES schon seit 1825 in Betrieb. Heute geringe Schadstoffaustragung. 1975 daher auch für potenzielle Trinkwassernutzung am 1. Lichtloch saniert.	(FISCHER et al., 2020; TUBAF, 2024C)
Zugänglichkeit	4	Aktives Besucherbergwerk vorhanden. Rest der Grube ist verwahrt.	(BBW MARIE LOUISE STOLLN, 2023)
Unter-Tage-Gesamt-wertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,3		

4.4.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Bad Gottleuba-Berggießhübel hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 70,7 GWh/a (DBI GTI, 2023). Die Wärmeabnahme konzentriert sich auf die namensgebenden Ortsteile Bad Gottleuba und Berggießhübel. Beide Orte sind überwiegend durch Wohnbebauung geprägt. Bad Gottleuba weist in Zentrumsnähe im Bereich der Feuerwache einige gewerbliche und industrielle Wärmeabnehmer auf. In Berggießhübel befinden sich im Bereich Ladenberg im nördlichen Stadtgebiet zahlreiche Industrie- und Gewerbebetriebe. Die restlichen Wärmeabnehmer im Gemeindegebiet verteilen sich auf die übrigen 10 Ortsteile, in denen fast ausschließlich Wohngebäude zu versorgen sind.

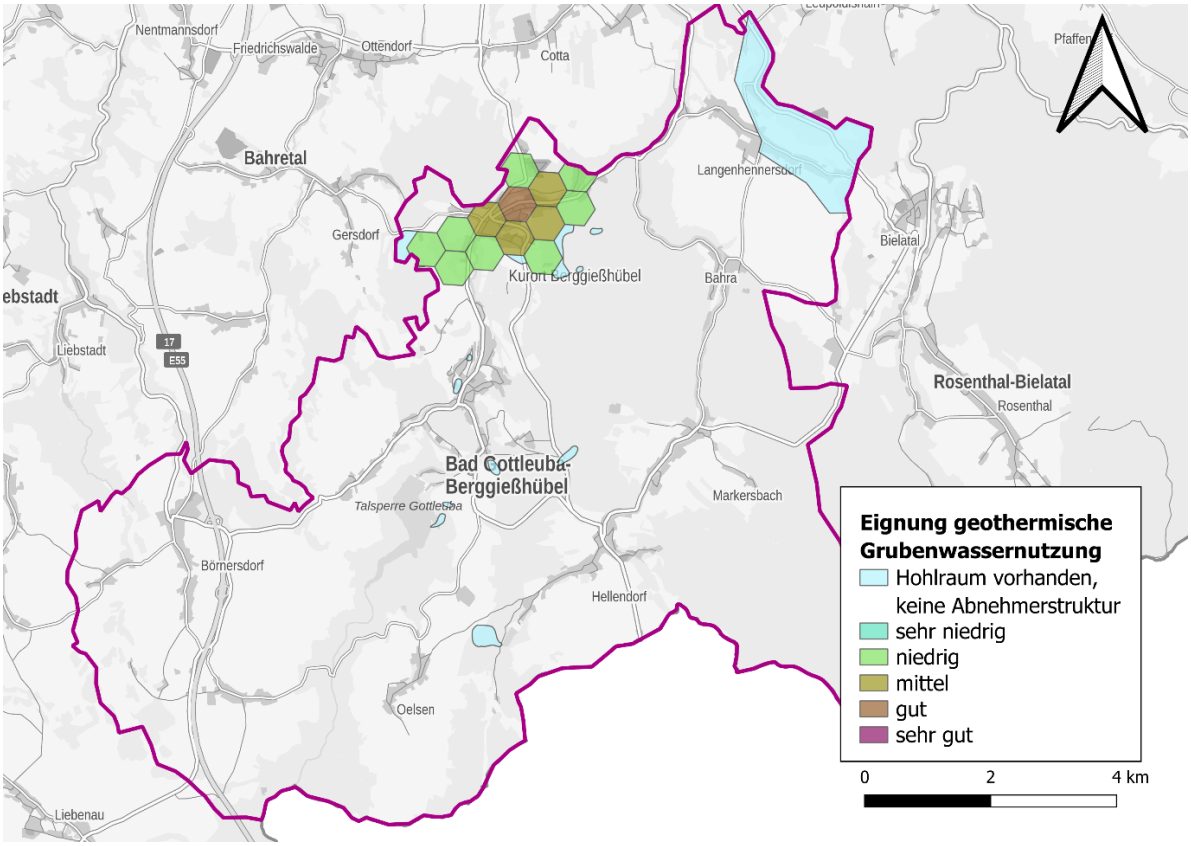


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 30: Übertägige Bewertung der Gemeinde Bad Gottleuba-Berggießhübel

4.4.3 Potenzial-Layer

Die Potenzial-Karte von Bad Gottleuba-Berggießhübel in Abbildung 31 zeigt nur einen verhältnismäßig kleinen Raum im Kurort Berggießhübel, der sich für die geothermische Verwendung von Grubenwasser eignet. Grund für die eingeschränkte Verwendungseignung ist insbesondere die mangelnde Verfügbarkeit entsprechender Hohlräume. Lediglich im Osten ist ein Teil der Wismut-Grube Königstein auf dem Gemeindegebiet vorzufinden, welche allerdings größtenteils zu der Verwaltungsgemeinschaft Königstein/Sächsische Schweiz gehört und daher nicht weiter betrachtet wurde. Im Ortsteil Berggießhübel ist im nördlichen Teil der Giesenteiner Straße sowie mit dem Verlauf der Talstraße eine mittlere Eignung für die geothermische Grubenwassernutzung ausgewiesen. In diesem Bereich sind überwiegend Wohngebäude anzutreffen. Die als niedrig bewerteten Potenzialraster zeichnen sich durch eine geringe Abnehmerdichte aus.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 31: Potenzial-Layer der Gemeinde Berggießhübel

4.4.4 Weiterführende Literatur

Neben den verwendeten Quellen ist keine weiterführende Literatur zum Thema Grubenwassergeothermie für den Raum Bad Gottleuba-Berggießhübel bekannt.

4.5 Brand-Erbisdorf

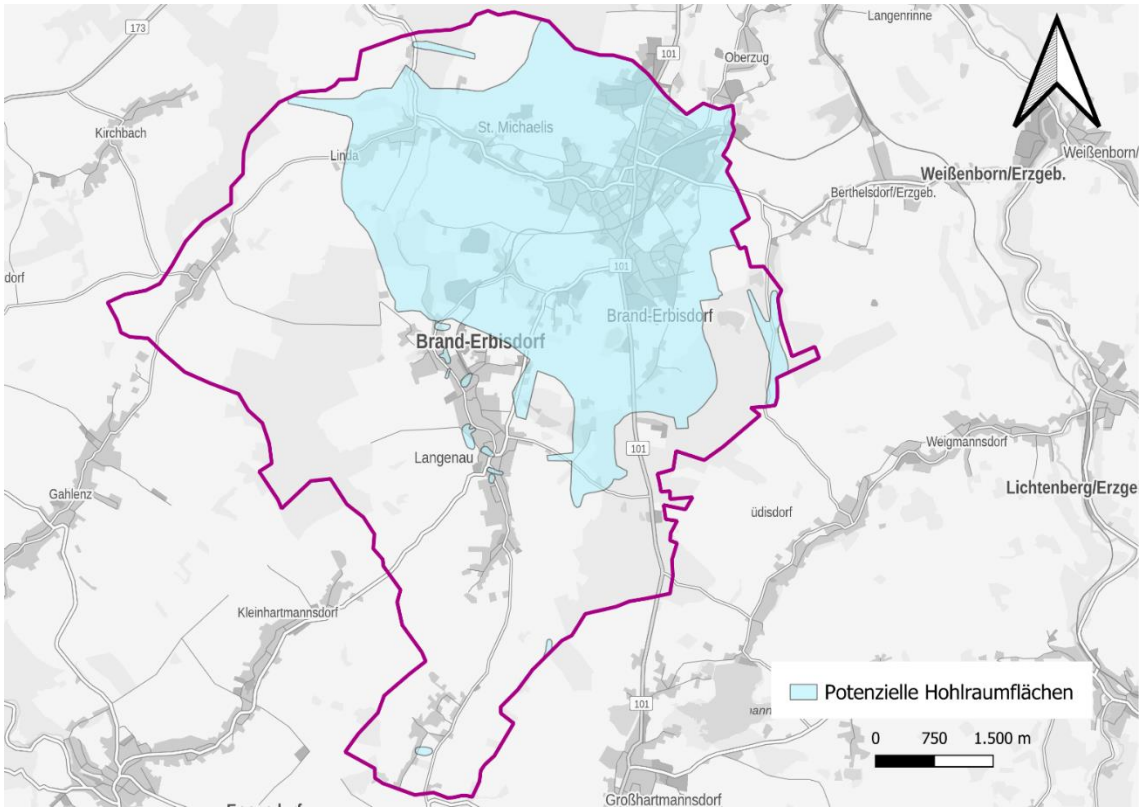
4.5.1 Untertägige Standortbewertung

Das Brander Revier wurde nach den ersten Silberfunden in Freiberg bergbautechnisch nachweislich erkundet. Die erste offizielle Erwähnung fand im Jahre 1387 statt, wonach sich der Erzbergbau mit Fokus auf Silber zunehmend ausweitete. Die Blütezeit des Bergbaus im 16. Jahrhundert ging mit der Konstruktion des Hauptentwässerungsstollens des Reviers einher. Seitdem führt der Thelersberger Stollen kontinuierlich einen Teil der Grubenwässer aus dem Revier zwischen einer Tiefe von 70 bis 100 m ab (KAISER, o. D.; KUGLER et al., 2011). Durch die reichen Erträge erlebte der Silberbergbau auch in diesem Revier eine Blüte, die bis zur Einführung der an Gold gekoppelten Währung anhielt. Der kontinuierliche Preisverfall des Silbers führte dazu, dass die Gruben zum Anfang des 20. Jahrhundert hin geschlossen wurden. Spätere Erkundungsmissionen der SAG Wismut auf der Suche nach Uranerz verliefen erfolglos. Bis

1969 wurde der Bleierzbergbau durch das Bergbau- und Hüttenkombinat „Albert Funk“ Freiberg durchgeführt, bis der Bergbau im Revier zum Erliegen kam.

Die Gruben von Brand-Erbisdorf bringen aufgrund ihrer topographischen Lage ca. 50 bis 100 m mehr an Teufe als die Freiberger Gruben ein. Es ist demnach auf Niveau der Entwässerung mit einem ähnlichen Temperaturniveau in dem Grubenwasser zu rechnen. Die Grube erstreckt sich in manchen Revierteilen bis in eine Tiefe von etwa 660 m. Im Revierteil OWO-Spat wurden Temperaturanomalien bis 30 °C in den Schächten nachgewiesen, wobei aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Grubenteil von einem Standwasserreservoir auszugehen ist. Sollte das Standwasser der Grubenbaue unterhalb des Entwässerungsniveaus energetisch genutzt werden, so steht ein Gesamtwasservolumen von 1,4 Mio. m^3 zur Verfügung. Auf dem gesamten Revier ist mit einem Wasserzulauf von etwa 900 m^3/h zu rechnen (HUBER, 1989), welches teilweise über den Thelersberger und größtenteils über den Rothschönberger Stollen abgeführt wird. Temperaturanomalien auf Höhe der Entwässerungsstollen sind aufgrund der Mischungsprozesse nicht mehr in messbarem Bereich zu erwarten (HUBER, 1990).

In der nachfolgenden Abbildung 32 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 13 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

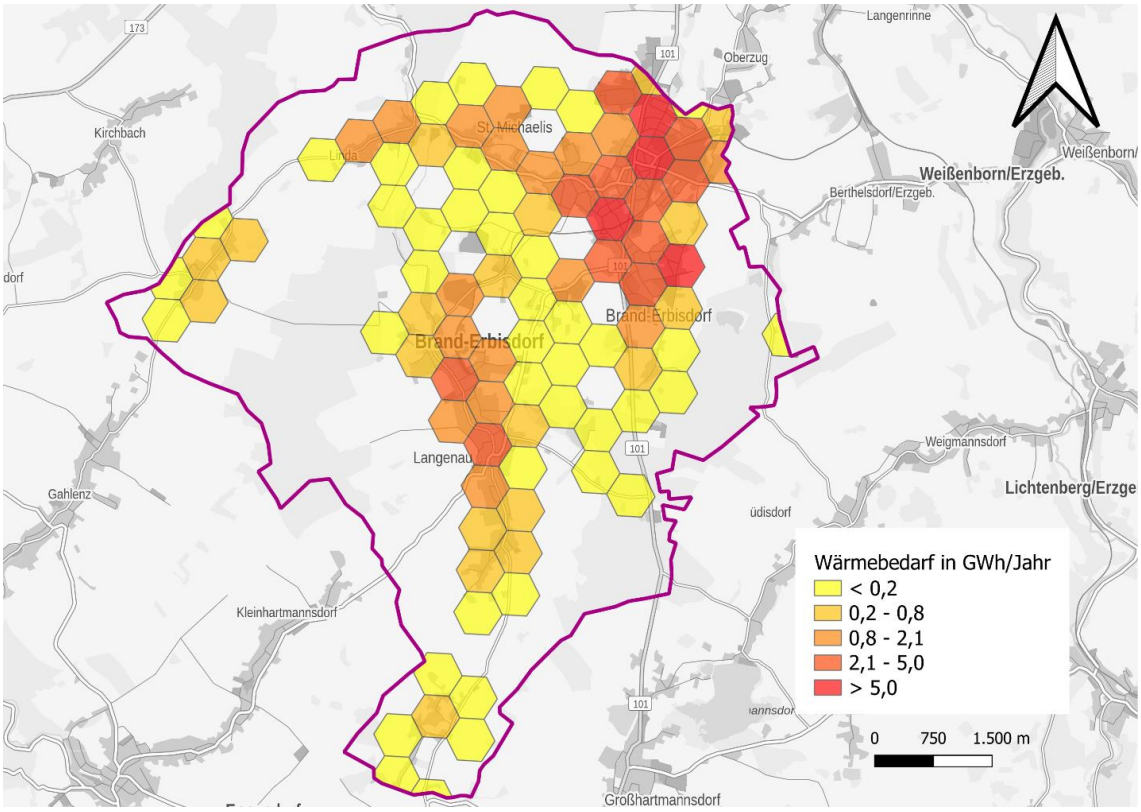
Abbildung 32: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Brand-Erbisdorf

Tabelle 13: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Brand-Erbisdorf

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	4	Größter Teil der Grubenbaue im 18. und 19. Jahrhundert aufgefahren.	(KAISER, O. D.; KUGLER et al., 2011; HUBER; 1990)
Entwässerungssystem	5	Grube besitzt im Mittel etwa 360 m^3/h Zulauf. Der Hauptteil wird über den Rothschönberger Stollen abgeführt, ein kleinerer Anteil über den Thelersberger Stollen (nach eigener Messung ca. 4 L/s).	(DEGNER, 2003; TUBAF, 2024C)
Geflutete Teufe	1	Rothschönberger Stollen 259 m unter GOK (Stadthöhe: 460 m NHN, Stollnhöhe: 201 m NHN)	(DEGNER, 2003; GOOGLE, 2023)
Hohlraumvolumen	5	Gefluteter Grubenraum betitelt mit etwa 1,4 Mio. m^3.	(DEGNER, 2003)
Risswerkkenntnis	3	Kartenmaterial nach Aussage des Museums Huthaus Einigkeit vor Ort vorhanden.	(MUSEUM HUTHAUS EINIGKEIT, 2024)
Temperatur	5	Im Revierteil OWO-Spat wurden durch Konvektion hervorgerufene Temperaturanomalien bis 30 °C in den Schächten nachgewiesen.	(HUBER, 1989)
Wasserchemie	3	Rothschönberger Stollen stellt zentralen Entwässerungsstollen dar. Älterer Bergbau wurde zuvor hauptsächlich durch Thelersberger Stollen entwässert. Eine Gewässerbelastung ist vorzufinden, kann jedoch als moderat eingestuft werden	(KUGLER ET AL., 2011; MARTIN et al., 2015)
Zugänglichkeit	1	Zugänglichkeit nicht mehr gegeben.	(KAISER, O. D.; KUGLER et al., 2011; HUBER, 1990)
Unter-Tage-Gesamtwertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,0		

4.5.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Brand-Erbisdorf hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 97,5 GWh/a (DBI GTI, 2023). Den höchsten Wärmebedarf hat der Ortsteil Brand-Erbisdorf. Neben ausgedehnten Wohngebieten befindet sich im Osten der Stadt ein Industriegebiet mit einer Aluminiumschmiede. Weitere gewerbliche Abnehmer befinden sich im Norden an der Grenze zu Freiberg und im Süden des Stadtgebietes. Der zentral im Gemeindegebiet gelegene Ortsteil Langenau weist ebenfalls eine hohe Dichte an Wärmeabnehmern auf. Entlang der neuen Hauptstraße befinden sich viele Wohngebäude. Im Norden des Ortsteils befindet sich in einem Gewerbegebiet ein Wertstoffhof als Sonderabnehmer. Fünf weitere Ortsteile sorgen für zusätzlichen Wärmebedarf, der überwiegend von Wohngebäuden benötigt wird.

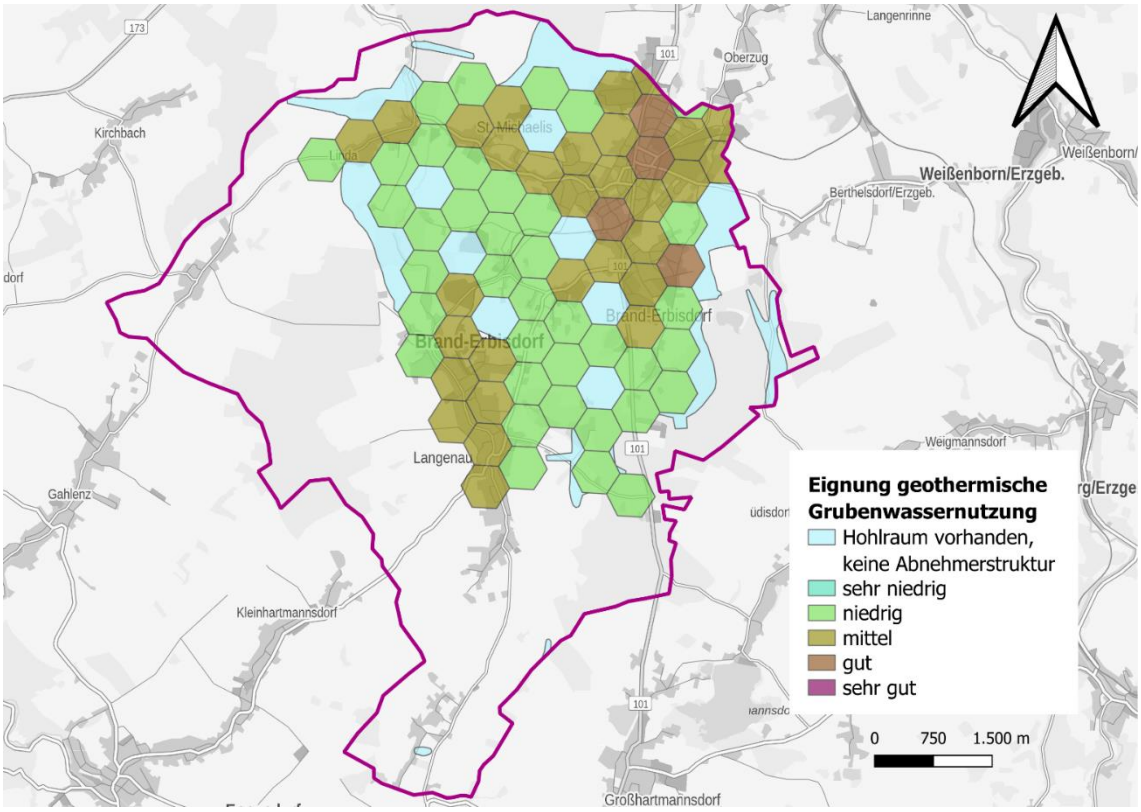


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 33: Übertägige Bewertung der Gemeinde Brand-Erbisdorf

4.5.3 Potenzial-Layer

Der Potenzial-Layer der Stadt Brand-Erbisdorf ist in Abbildung 34 dargestellt. Aufgrund der räumlichen Überschneidung des untertägigen Potenzials und des Bedarfes, eignet sich Grubenwassergeothermie im Ortsteil Brand gut zur Bereitstellung thermischer Energie. Dies ist insbesondere durch die dichte Bebauung von Wohngebieten im Norden der Stadt begründet. Auch im Zentrum liegt ein hoher Bedarf vor, welcher sich dementsprechend ebenfalls positiv auf die Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung auswirkt. Dort ist die Bedarfsverteilung heterogener und umfasst neben Wohngebäuden ebenfalls Gewerbe- und kommunale Abnehmer. Diese verteilte Abnehmerstruktur lässt sich ebenfalls im Bereich des Gewerbegebietes Süd feststellen, wobei dort eine geringere Abnehmerdichte zu verzeichnen ist und somit maximal ein mittleres Potenzial durch die Methodik ausgewiesen werden kann. Große Teile der Gemeinde zeichnen sich durch eine geringe Abnehmerdichte aus (vgl. Abbildung 36), so dass die Eignung für viele Rasterzellen der Gemeinde als "sehr niedrig" bis "niedrig" eingestuft ist.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 34: Potenzial-Layer der Gemeinde Brand-Erbisdorf

4.5.4 Weiterführende Literatur

Grubenwassergeothermie wurde in Brand-Erbisdorf bisher nicht tiefgreifend untersucht. In einer Begleituntersuchung einer frühen Dissertation wurde die Möglichkeit der energetischen Grubenwassernutzung jedoch konzeptionell beschrieben (HUBER, 1989). Da die Schächte im Revier komplett verschlossen sind, sind die Wässer nur über Bohrungen zu erreichen. Eine Nutzung des Fließwassers des Rothschönberger Stollens ist aufgrund der dort vorliegenden geringeren Volumenströme nicht umsetzbar. Um Grubenwasser zugänglich zu machen müssten demnach Grubenbaue angebohrt oder verwahrte Schächte aufgewältigt werden. Da die Aufwältigung von erfolgreich gesicherten Schächten unwahrscheinlich ist (LFULG, 2022), wird die größte Umsetzungschance der Einbringung von Bohrungen zugeschrieben. Eine mögliche Region für den Bohransatzpunkt könnte dabei der Grubenteil OWO-Spat sein. Für das Stadtzentrum und das Wohngebiet "Straße des Friedens" könnte der Blindschacht II - OWO West als Bohrzielpunkt dienen. Für das Wohngebiet Kuhberg wird das Streckenkreuz OWO/NO-Querschläge als vielversprechend angegeben. In beiden Fällen ist die Förderhöhe durch den Grubenwasserpegel des Reviers als vorteilhaft einzustufen. Um die Wasserrückspeisung in die Grube zu gewährleisten bieten sich entweder der Kohlhäusler-Schacht (Sonnenwirbel) beziehungsweise der

Caspar-Schacht (Kohlenstraße) an. Die Nutzung dieser Schächte gewährleistet weiterhin die Nutzbarmachung eines möglichst großen Fließweges unter Tage. Insbesondere der Caspar-Schacht eignet sich in besonderem Maße, da er bis 1969 bauhaft gehalten wurde, was nicht auf den Kohlhäusler-Schacht zutrifft.

4.6 Ehrenfriedersdorf

4.6.1 Untertägige Standortbewertung

Ehrenfriedersdorf war eine der bedeutendsten Zinnerzlagerstätten des Erzgebirges. Die Erzgänge erstreckten sich in die obersten Schichten des tief liegenden Granits. In dem darüberliegenden Glimmerschiefer finden sich bis dicht unter die Tagesoberfläche geringmächtige Ausläufer von weiteren Erzen, neben Zinnstein u. a. Wolframit, Arsenkies oder Flußspat (WAGENBRETH, 1990). Auch Silber und Erze wie Magnetit oder Kupferkies sind in kleineren Lagern vorhanden.

Im 13. Jahrhundert wurden insbesondere die Zinnseifen aus den Fließgewässern rund um das Siedlungsgebiet ausgewaschen. Durch das reichliche übertägige Vorkommen des Zinnerzes werden auch erste untertägige Bergbaubestrebungen kurz darauf vermutet. Spätestens mit dem Auffahren des Tiefen Sauberger Stollens von 1536 bis 1570 erreichte der Bergbau ebenfalls die tieferen untertägigen Bereiche. Das Oberflächenwasser sowie tieferes, mit Kunstgezeugen gehobenes Wasser konnten über diesen in den Fluss Wilzsch entwässern. Im 19. Jahrhundert konnten durch moderne Wasserhebungstechniken Fortschritte in der Erschließung neuer Erzvorkommen gemacht werden, so dass die Förderung aufgrund der Autarkiebestrebungen der DDR noch bis 1990 fortgeführt wurden (HÖSEL et al., 1994; WAGENBRETH, 1990).

Auch wenn die Bergbautätigkeit über 600 Jahre zurückreicht, so sind doch viele der Altbergbaustrukturen heute nicht mehr ersichtlich. Insbesondere im Sauberger Revierteil wurden ältere Strukturen durch jüngere Bergbautätigkeiten "überprägt", wobei dies den Vorteil bringt, nun auf eine signifikant hochwertigere Kartographierung zurückgreifen zu können. Eine Übersichtsrisskarte des Ehrenfriedersdorfer Reviers ist in Abbildung 35 zu sehen.

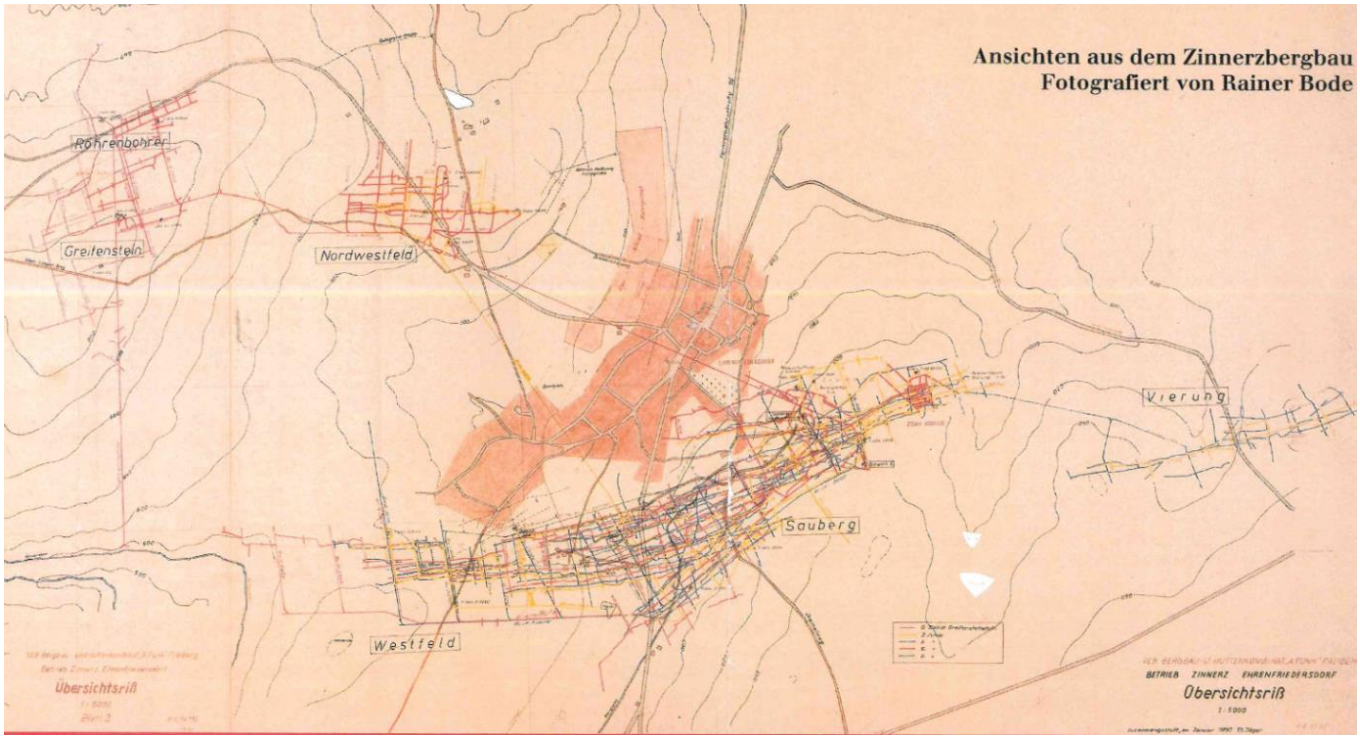


Abbildung 35: Übersichtsrisskarte des Ehrenfriedersdorfer Revieres (SOBA, 2022)

Der Sauberger Grubenteil erstreckt sich über sechs Sohlen und stellt damit den weitläufigsten Teil des Reviers dar. Er ist dicht mit dem daneben angrenzenden Westfeld verbunden und schließt über Querschläge an das Feld Vierung und das Nordwestfeld an. Ein Seigerriss des Sauberger Grubenteils ist in Abbildung 36 dargestellt.

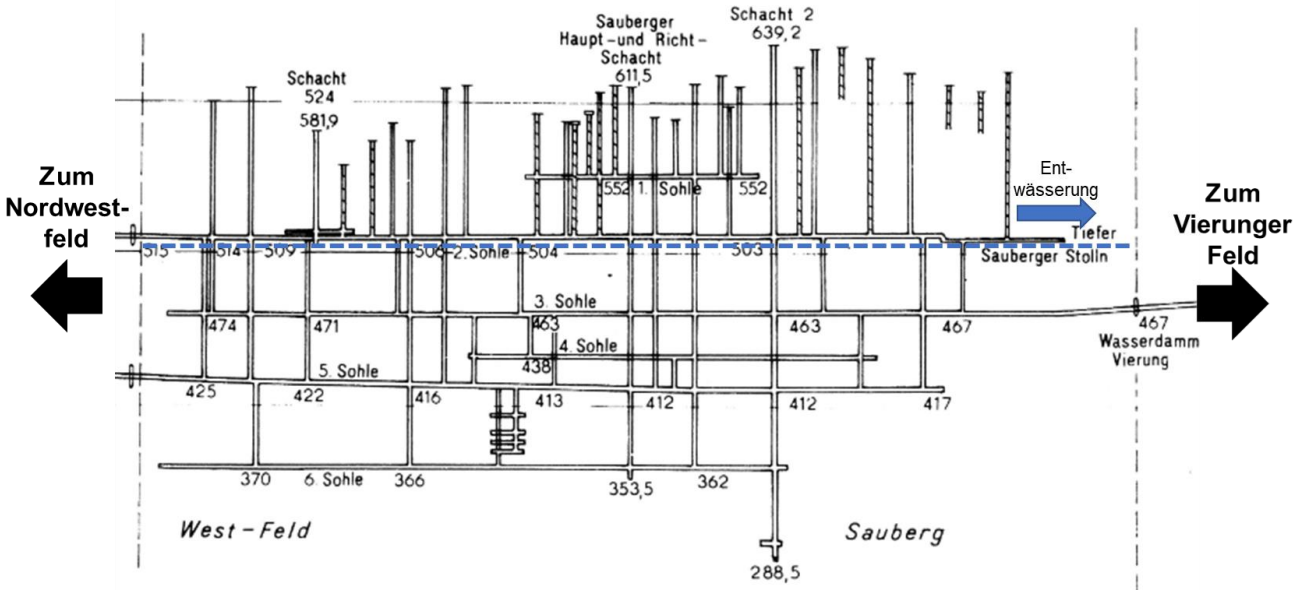


Abbildung 36: Seigerriss der Sohlen und Schächte im Sauberger Feld sowie dem Westfeld (HÖSEL et al., 1994)

Das Niveau des Grubenwassers im Sauberg wird durch den Tiefen Sauberger Stollen konstant gehalten. Dabei sind von der Entwässerung über diesen Stollen nur das Sauberger und das Westfeldrevier betroffen, was zu einer durchschnittlichen Entwässerung von etwa 300 m^3/h führt (MERKEL et al., 2010). Der Grubenwasserspiegel befindet sich dadurch etwa 4 m unter der 2. Sohle (siehe Abbildung 36). Alle unterhalb dieses Stollens liegenden Grubenhohlräume füllten sich mit Wasser, so dass ein unterirdisches Wasserreservoir von etwa 1,5 Mio. m^3 entstand (KLEMM et al., 2015). Das Nordwest- sowie das Vierunger Feld sind über vier wasserdichte Dämme hydraulisch abgetrennt (HÖSEL et al., 1994). Dies hat zur Folge, dass in diesen Grubenteilen das Wasser nach Schließung der Grube nicht auf dem Level des Tiefen Sauberger Stollens entwässern konnte. Der Wasserspiegel befindet sich dort so auf höherem Niveau als im Sauberger und im Westfeld. Durch Wasserdämme entstanden somit hydraulisch getrennte Grubenfelder als natürliche Wasserspeicher mit unterschiedlichen Wasserleveln und mit Temperaturen von 10 - 12 °C (KLEMM et al., 2015). Proben zeigen, dass es sich bei den Grubenwässern fast ausschließlich um oberflächennahe Grundwässer handelt. Dies trifft ebenfalls auf Wasserproben in unterschiedlichen Sohlen zu. Aus den Untersuchungen zeigt sich, dass die Wässer nur eine kurze Verweilzeit im Gebirge besitzen und lediglich eine erhöhte Arsen- und Eisenbelastung aufweisen. Die Speziesgehalte dieser sind in Abbildung 37 aufgezeigt.

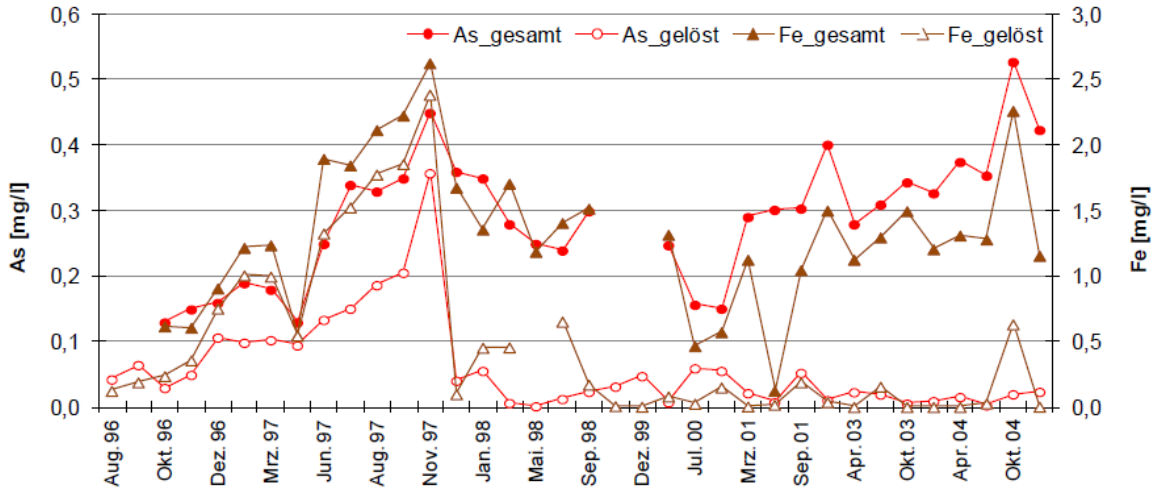
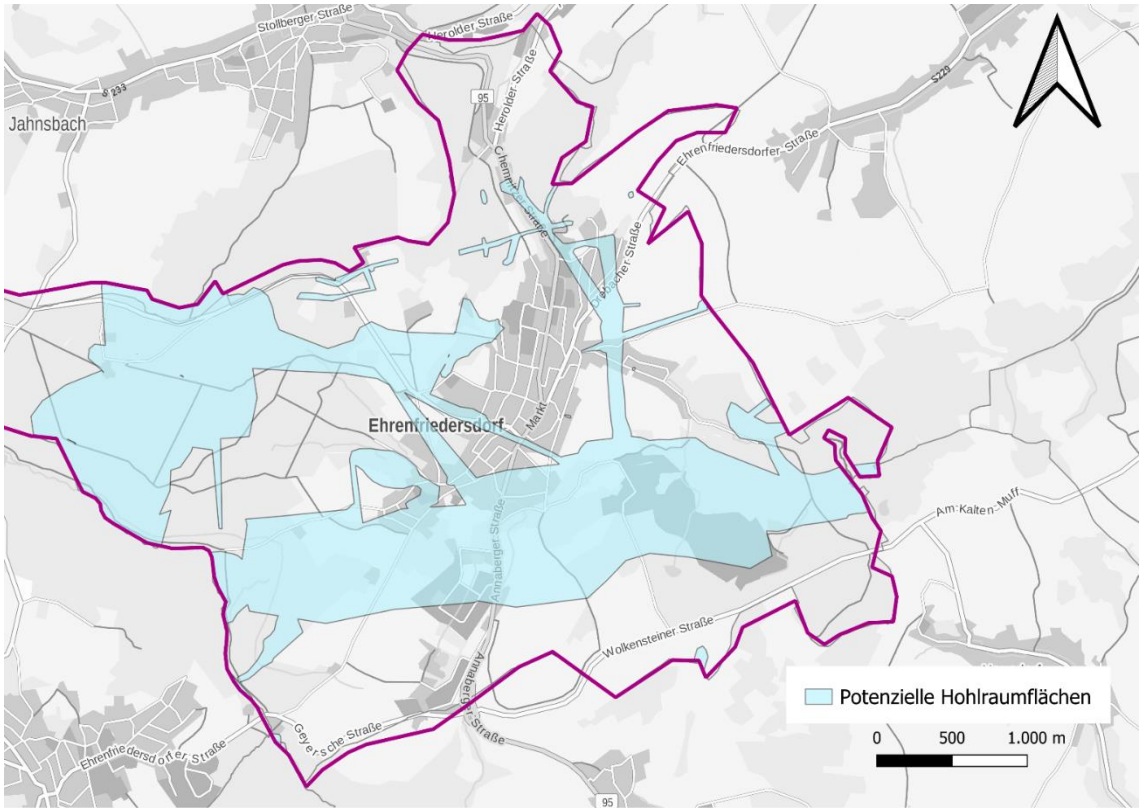


Abbildung 37: Zeitliche Veränderung der Fe- und As-Speziesgehalte im Flutungswasser am Überlauf Gesenk 2. Sohle (KLEMM et al., 2015)

In der nachfolgenden Abbildung 41 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 14 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

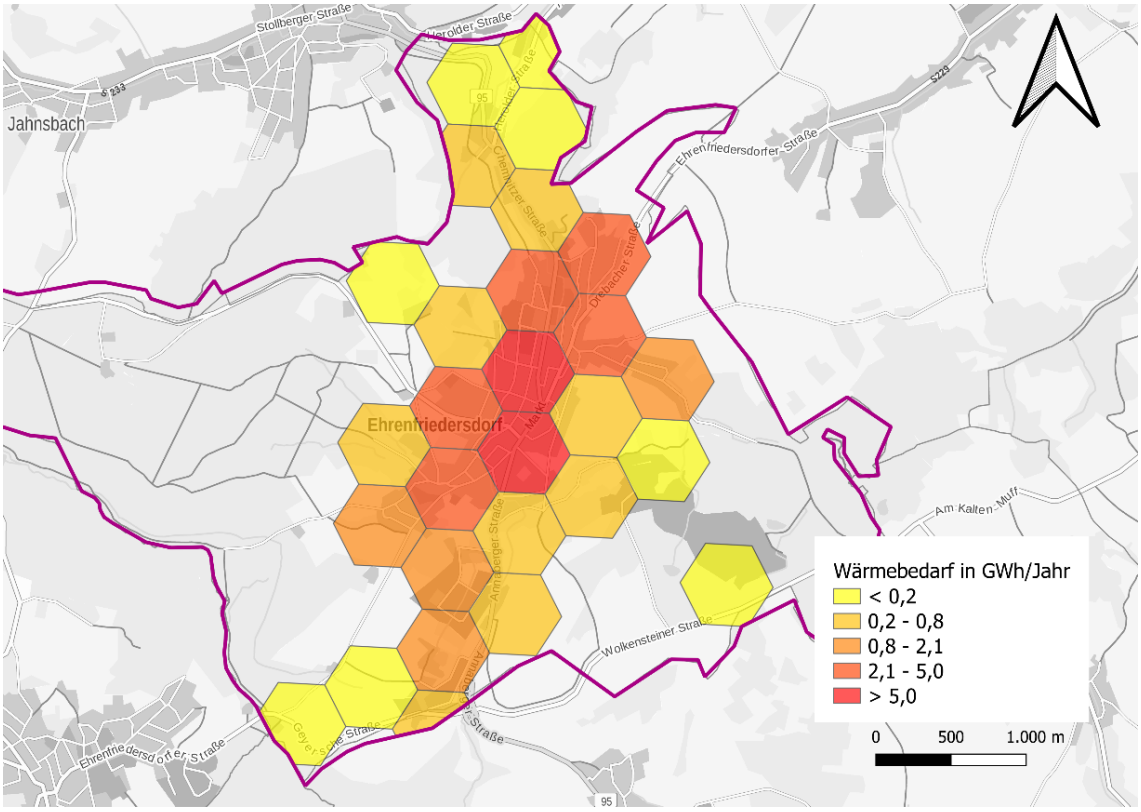
Abbildung 38: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Ehrenfriedersdorf

Tabelle 14: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Ehrenfriedersdorf

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	5	Altbergbau mit Überprägung in der Hauptperiode im 20. Jahrhundert.	(HÖSEL et al., 1994)
Entwässerungssystem	4	Sauberger Stollen mit Abfluss von 300 m^3/h unter dem Stadtgebiet.	(MERKEL, 2010)
Geflutete Teufe	4	Tiefer Sauberger Stollen 96 m unter GOK (Stadthöhe: 530 m NHN, Stollenhöhe: 515 m NHN, Sauberger Schacht: 611 m NHN). Grubenteile des Nordwest-felds darüber angestaut.	(GOOGLE, 2023; HÖSEL et al., 1994)
Hohlraumvolumen	5	Angegeben mit circa 1,5 Mio. m^3.	(KLEMM et al., 2015)
Risswerkkenntnis	5	Übersichtsriss im Oberbergamt vorhan-den und durch den Lehrstuhl der Techni-schen Thermodynamik der TUBAF vek-torisiert.	(SOBA, 2022)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalien für das Re-vier bekannt.	(HÖSEL et al., 1994)
Wasserchemie	3	Standwässer weisen moderate Mineral-isierung auf. Entwässerungsstollen ist ge-ringer belastet.	(JANNECK et al., 2016)
Zugänglichkeit	4	Besucherbergwerk ermöglicht Zugang zu Teilen der Grube.	(Zinngrube Ehrenfrie-dersdorf, 2024)
Unter-Tage-Gesamt-wertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,9		

4.6.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Ehrenfriedersdorf hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 43,3 GWh/a (DBI GTI, 2023). Die höchste Dichte an Wärmeabnehmern ist entlang der B95 zu finden. Im Süden der Stadt befindet sich ein Gewerbegebiet mit Handel und produzierendem Gewerbe. Die Innenstadt ist überwiegend durch Wohnbebauung geprägt und weist den höchsten Wärmebedarf auf. In der Nähe des Saubergs im Osten des Stadtgebietes befinden sich weitere Gewerbebetriebe, die jedoch touristisch geprägt sind.

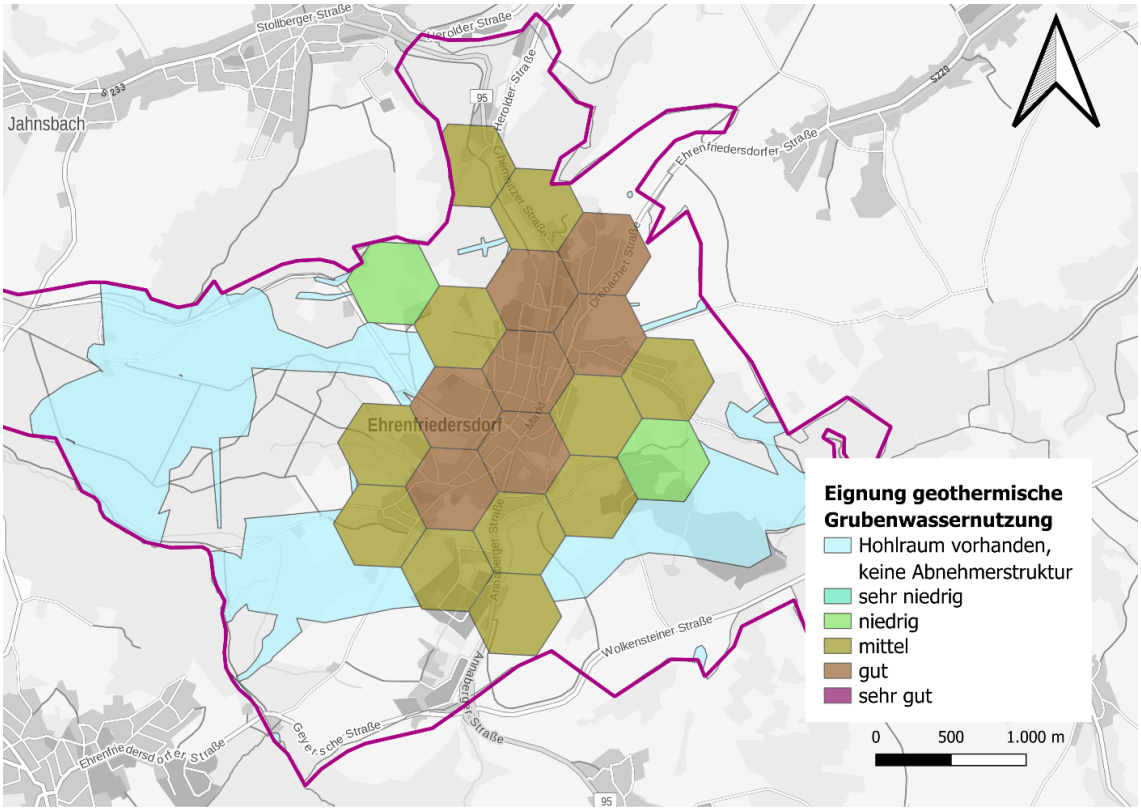


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 39: Übertägige Bewertung der Gemeinde Ehrenfriedersdorf

4.6.3 Potenzial-Layer

Durch die intensive Bergbaugeschichte befinden sich unter großen Teilen des Gemeindegebietes Hohlräume. Die Potenzialdarstellung in Abbildung 40 zeigt, dass sich die Eignung für Grubenwassergeothermie insbesondere im Stadtzentrum als gut herausstellt. Eine hohe Abnehmerdichte trifft dort auf vorhandene Grubenstrukturen, welche mit Grubenwasser geflutet sind. Eine Besonderheit ergibt sich, da bereits eine Grubenwassernutzung besteht. Da die Bewertungsmethodik jedoch keine bereits umgesetzten Projekte beinhaltet, müssen die Ergebnisse der Potenzialkarte nachgelagert mit vorhandener Infrastruktur kombiniert bewertet werden. Aufgrund der geringeren Wärmebedarfsdichte wird die Eignung der umliegenden Stadtteile als "mittel" eingestuft. Auch hier gilt es zu prüfen, inwiefern sich vorhandene Infrastruktur positiv auf eine reale Umsetzung auswirkt. Ein Ausbau einer Anlage in der Nähe des Bergwerks könnte beispielsweise durch die gut bekannten untertägigen Gegebenheiten eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit mitbringen. Ebenfalls könnte die Nutzung des zentralen Entwässerungsstollens einen Vorteil für eine erfolgreiche Anlagenumsetzung bedeuten.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 40: Potenzial-Layer der Gemeinde Ehrenfriedersdorf

4.6.4 Weiterführende Literatur

In Ehrenfriedersdorf wurden bereits kurz nach der Schließung der Zinngrube Pläne für eine energetische Nutzung der Grube und des Grubenwassers erstellt. Durch die vorhandene Zugänglichkeit der Grube und die Fachexpertise der Bergarbeiter setzte sich der vor Ort ansässige Verein "Energiemodell Sachsen e. V." dafür ein, Teile der Grube für eine energetische Nutzung zu ertüchtigen. Die daraus entstandenen Ergebnisse können zusätzliche Detailinformationen zu der in dieser Studie vorgestellten Bewertung liefern.

Im Bereich des Sauberger Haupt- und Richtschachtes wurde eine erste Anlage bereits 1992 in Betrieb genommen. Es wurde auf der 2. Sohle dementsprechend ein Plattenwärmeübertrager installiert, welcher die Wärme auskoppelt. Die Energie wird aus dem in einer Strecke anstehenden Grubenwasser gewonnen, wonach das abgekühlte Wasser in einen entfernteren Teil des Bergwerks erneut abgeschlagen wird. Das Grubenwasser fließt dann zum Teil erneut zur Entnahmestelle, wobei es seine Temperatur regeneriert. Es war bereits zu dieser Zeit angedacht, die Wärme in Form eines kleinen kalten Nahwär-

menetzes vom untertägigen Wärmeübertrager zu den zu versorgenden Objekten über Tage zu transportieren. Das Temperaturniveau des Netzes entspricht im Vorlauf etwa 8-10 °C, nach der Wärmeentnahme durch die Nutzobjekte etwa 4 °C (ROTTLUFF, 1993).

Bereits während der Inbetriebnahme der ersten Anlage wurden Pläne für ein weiteres Pilotprojekt ausgearbeitet. Dieses beinhaltete die Beheizung eines öffentlichen Gebäudes in der Stadt über ein grubenwasserführendes Netz. Das Grubenwasser sollte dafür über Bohrungen direkt unter der Stadt erreicht werden, wobei eine Förderbohrung und eine Schluckbohrung geplant und umgesetzt wurden. Essenziell für den Erfolg des Projektes waren die untertägigen Vorarbeiten im Bereich der anzubohrenden Strecken. Durch wasserdichte Druckdämme konnte das Nordwestfeld hydraulisch vom Sauberger Feld abgeschnitten werden, um ein Wasserreservoir über der trockenen 2. Sohle des Sauberger Revieres zu erzeugen. Vor der endgültigen Flutung wurden die Bohrungen noch messtechnisch mit verschiedenen Sensoren bestückt, die aber aufgrund eines Unwetterereignisses bald keine Daten mehr lieferten. Das Grubenwasser wird von der Förderbohrung aus durch erdverlegte Leitungen in die Stadt und zum zu beheizenden Objekt geleitet, wo die Wärme in Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau gehoben wird. Das abgekühlte Grubenwasser wird über Leitungen zum Schluckbrunnen gefördert und wieder in das Bergwerk abgeschlagen. Der kürzeste Fließweg zwischen Rückgabe und Förderung beträgt etwa 3000 m über welchen sich die Wassertemperatur regenerieren kann (INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR UMWELTSCHUTZ MBH, 1993). Im Zuge der Anlagenplanung wurde ebenfalls eine numerische FEM-Simulation des Wärmepotenzials angedacht, welche am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau 1993 durchgeführt wurde (PRETZSCHNER et al., 1993). Die Fließstrecke wurde wie in Abbildung 41 modelliert und verschiedene Wärmebedarfs-"Regime" wurden abgebildet.

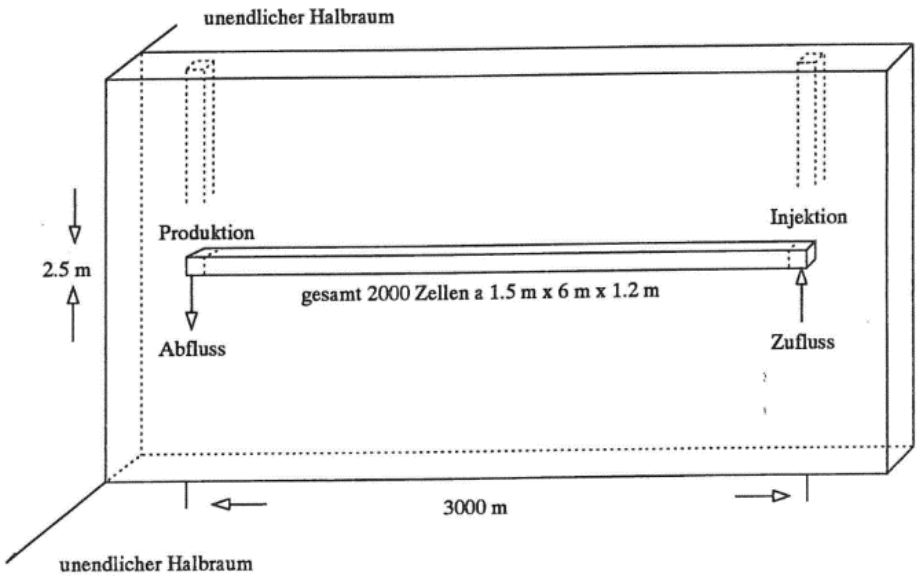


Abbildung 41: Modell der Fließstrecke des Grubenwassers im Nordwestfeld (PRETZSCHNER et al., 1993)

Ein entscheidendes Kriterium für die Simulation war die kritische Reinjektionstemperatur, welche mit 3 °C numerisch bedingt festgesetzt wurde. Kühlt die Anlage den Grubenwasserkreislauf zu stark aus, so wird diese Temperatur unterschritten und die Simulation abgebrochen.

Es konnte rechnerisch aufgezeigt werden, dass eine nachhaltige Wärmeentnahme insbesondere von der Entnahmeleistung und dem natürlichen untertägigen Zufluss abhängig ist. Es wurden drei Leistungsstufen berechnet, welche bei einer konstanten Entnahmetemperaturdifferenz von 6 K nur von dem geförderten Grubenwasservolumenstrom abhängig waren. Die Leistungsstufen wiesen sich durch Grubenwasserförderraten von 11 m^3/h, 40 m^3/h und 72 m^3/h aus, was einer maximalen Leistung von jeweils 76 kW, 176 kW und 504 kW entspricht. In dem Rechenszenario ohne untertägigen Zufluss konnte maximal die zweite Leistungsstufe über 15 Jahre unterstützt werden. Die dritte Leistungsstufe kühlt den Untergrund zu stark aus, so dass nach etwa 8 Jahren Wärmeentnahme die kritische Reinjektionstemperatur von 3 °C unterschritten wurde. Dieses Verhalten ändert sich jedoch, wenn eine natürliche Strömung im Untergrund berücksichtigt wird. Bereits ab einer zusätzlichen Strömung von 18 m^3/h kann auch die Leistungsstufe 3 genutzt werden. Dies verdeutlicht die Bedeutung der untertägigen Strömungen und weist darauf hin, dass die Quantifizierung dieser wichtigen Daten für den Anlagenbetrieb liefern kann (PRETZSCHNER et al., 1993; ROTTLUFF, 1994; HÖSEL et al., 1996).

Die Untersuchungen im Revier Ehrenfriedersdorf beschränkten sich nicht nur auf den direkten Nutzen des Grubenwassers als Heizenergiequelle. Es wurden ebenfalls Untersuchungen zur aktiven Einspeicherung von Wärme in Grubenbaue vorgenommen. Es wurde erkannt, dass für eine nachhaltige und umweltfreundliche Wärmeversorgung Wärmenetze eine essenzielle Komponente darstellen. Die Versorgung dieser kann zum Beispiel über Solarthermie erfolgen, welche allerdings eine saisonale Abhängigkeit aufweist. Um Überschüsse im Sommer zu speichern und im Winter zu nutzen, können Grubenbaue verwendet werden. Die vorliegende Untersuchung wurde vom damaligen Institut für Wärmetechnik durchgeführt und befasste sich mit dem Abdichten einer Strecke, dem anschließenden Befüllen mit Wasser und dem Anbinden eines Solarthermiefeldes. Als Versuchsstrecke wurde die Richtstrecke 2000 W im Westfeld gewählt. Auch nach Grubenflutung sollte die Strecke über dem Wasserspiegel liegen, und so lediglich das vorgefüllte Wasser im abgedichteten Bereich beinhalten. Es wurden numerische Modellierungen des wahrscheinlichen Speicherverhaltens vorgenommen. Diese kamen zu dem Ergebnis, dass der Speicher mit dem Volumen von ca. 5000 m^3 unter den getroffenen Annahmen keine kosteneffizientere Speicherung als herkömmliche Speicher darstellt. Der maximale Betrachtungszeitraum betrug maximal ein Jahr und eine praktische Überprüfung der Ergebnisse anhand des realen Speichers wurde im Projekt aus Kostengründen nicht umgesetzt. Als Investitionskosten für das beschriebene Speicherkonzept wurden auf heutige Kaufkraft gerechnet etwa 1 Mio. € veranschlagt (INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR UMWELTSCHUTZ MBH, 1993; PRETZSCHNER et al.,1993).

4.7 Freiberg

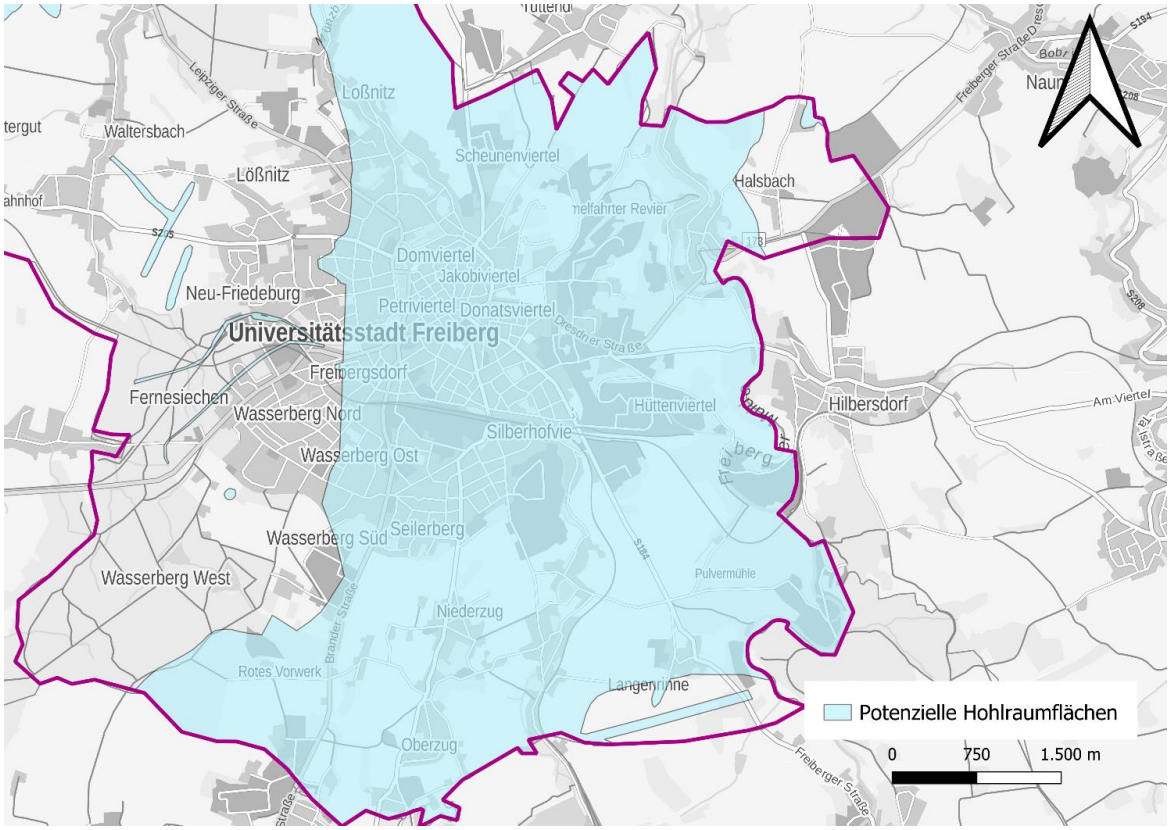
4.7.1 Untertägige Standortbewertung

Der Freiberger Erzbergbau fand seinen Anfang etwa in der zweiten Hälfte des 12. Jahrhunderts, als auf dem Gebiet des damaligen Christiansdorfs Silber an der Tagesoberfläche gefunden wurde. Daraufhin entwickelte sich die Umgebung schnell zu einer Stadt und das Stadtrecht wurde im Jahre 1186 von Markgraf Otto verliehen. Um den voranschreitenden Tiefbau zu ermöglichen, wurde bald der erste bedeutende Entwässerungsstollen des Reviers angelegt. Der "Alte Tiefe Fürstenstollen" entwässerte daraufhin bis in eine Teufe von etwa 60 m (ca. 315 m ü. NHN) das Bergwerk und sollte etwa 500 Jahre der tiefste Entwässerungsstollen bleiben.

Von 1844 bis 1877 wurde der Rothschönberger Stollen auf einer Höhe von ca. 198 m NHN konstruiert und entwässerte seither den Hauptteil des Freiberger Reviers. Nach der Schließung des Bergwerks im Jahre 1969 wurden alle Grubenbaue unterhalb dieser Stollensohle geflutet. Da die Freiberger Lagerstätte keine wasserführenden Horizonte besitzt, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den abgeführten Grubenwässern hauptsächlich um junge Oberflächenwässer handelt (MEYER, 1960; GOTTE et al., 1960). Auch die in der Schachtröhre "Reiche Zeche" aufsteigenden wärmeren Wässer deuten auf juveniles Oberflächenwasser hin, was eine ständige Grundwasserströmung aus tiefen Horizonten auszuschließen scheint (OELSNER, 1983).

Grubenwasser überall aber praktisch nur unter 200 m NHN nutzbar. Nutzung über Entwässerungsstollen vorzuziehen. RSS und HauptStollenumbruch verlaufen direkt unter dem Nikolaiviertel und stehen zur Verfügung. Warme Tiefenwässer aus dem Schacht Reiche Zeche könnten genutzt werden → Prüfung Entfernung, genaue Standortbeschreibung. Befahrbarkeit beschreiben (siehe HUBER, 1990).

In der nachfolgenden Abbildung 42 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 15 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 42: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Freiberg

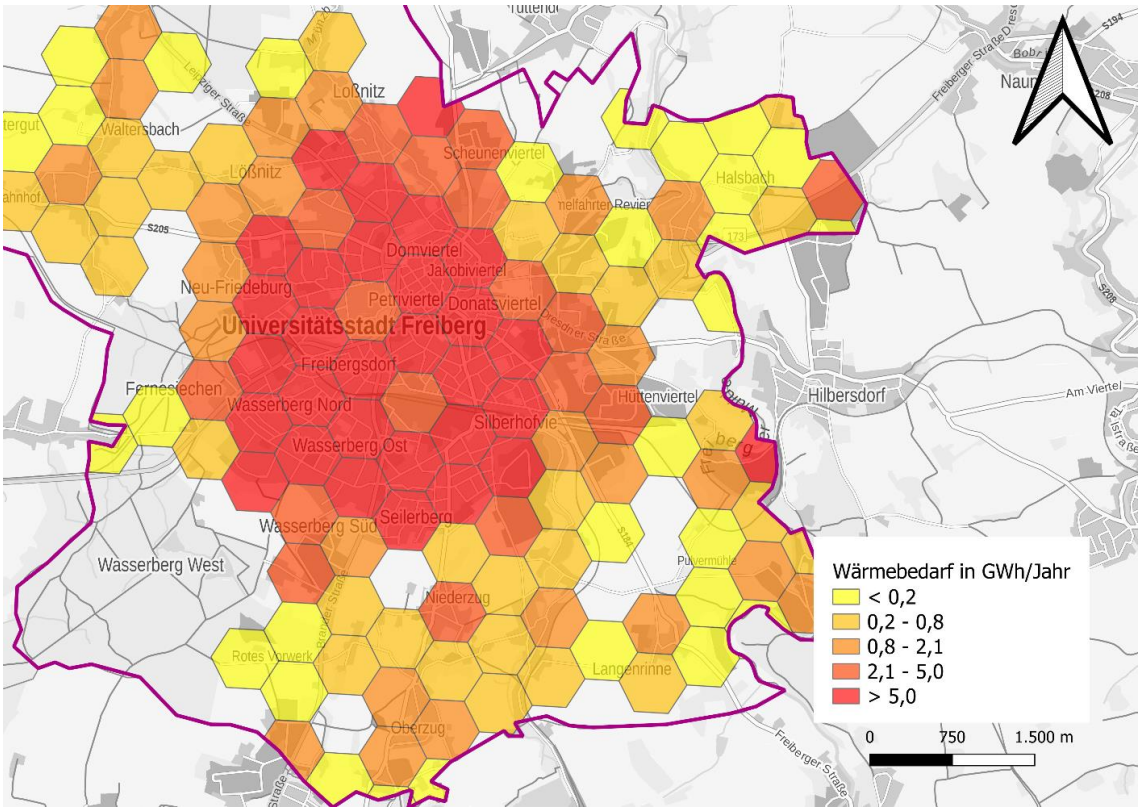
Tabelle 15: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Freiberg

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	3	Hauptperiode der Auffahrungen im 19. Jahrhundert. Unbekannter Altbergbau jedoch großflächig möglich.	(HUBER, 1990; WAGEN-BRETH, 1984)
Entwässerungssystem	5	Rothschönberger Stollen als großer Entwässerungsstollen unter dem Stadtgebiet mit min. 540 m^3/h Durchfluss am Schacht Reiche Zeche.	(JANNECK et al., 2016; GUB, 2014a)
Geflutete Teufe	1	Rothschönberger Stollen 202 m unter GOK (Stadthöhe: 400 m NHN, Stollenhöhe: 198 m NHN).	(DEGNER, 2003)
Hohlraumvolumen	5	Geflutetes Volumen beträgt circa 2,5 Mio. m^3.	(DEGNER, 2003; GRIMM et al., 2001)
Risswerkkenntnis	5	Fast vollständig vektorisiert verfügbar und in Karten digitalisiert vorhanden.	(TUBAF, 2024d)
Temperatur	3	Wassertemperaturen größtenteils bei 10 bis 12 °C, insbesondere im Entwässerungsstolln. Am Schacht Reiche Zeche liegt eine Anomalie durch Konvektion vor (ca. 19 °C).	(ZSCHERNIG, 1991)
Wasserchemie	3	Rothschönberger Stollen führt moderate Frachten mit. Behandlungsmaßnahmen werden empfohlen.	(MARTIN et al., 2015)
Zugänglichkeit	4	Grube Teil der TUBAF mit aktiven bergmännischen Arbeiten. Teile der Grube verwahrt.	(TUBAF, 2023d)
Unter-Tage-Gesamt-wertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,9		

4.7.2 Übertägige Standortbewertung

Die Stadt Freiberg hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 483,2 GWh/a (DBI GTI, 2023). Der Wärmebedarf konzentriert sich auf die dichtbewohnten Stadtteile Altstadt, Freiberg Süd und Freiberg West. Um diese Zone herum befinden sich im Osten und Süden der Stadt zahlreiche Industrie- und Gewerbebetriebe. So ist im Osten unter anderem ein Berufsschulzentrum und das Gewerbegebiet Saxonia und im Süden das Gewerbe- und Industriegebiet Süd zu nennen. Im Norden der Stadt sind weitere Sonderabnehmer vorzufinden, wie eine Gießerei und der Gewerbepark „Deutsches Brennstoffinsti-

tut“. Die Stadtteile Zug im Süden, Kleinwaltersdorf im Westen und Halsbach im Osten des Gemeindegebietes sorgen für einen weiteren Wärmebedarf, welcher hauptsächlich durch Wohnbebauung entsteht.



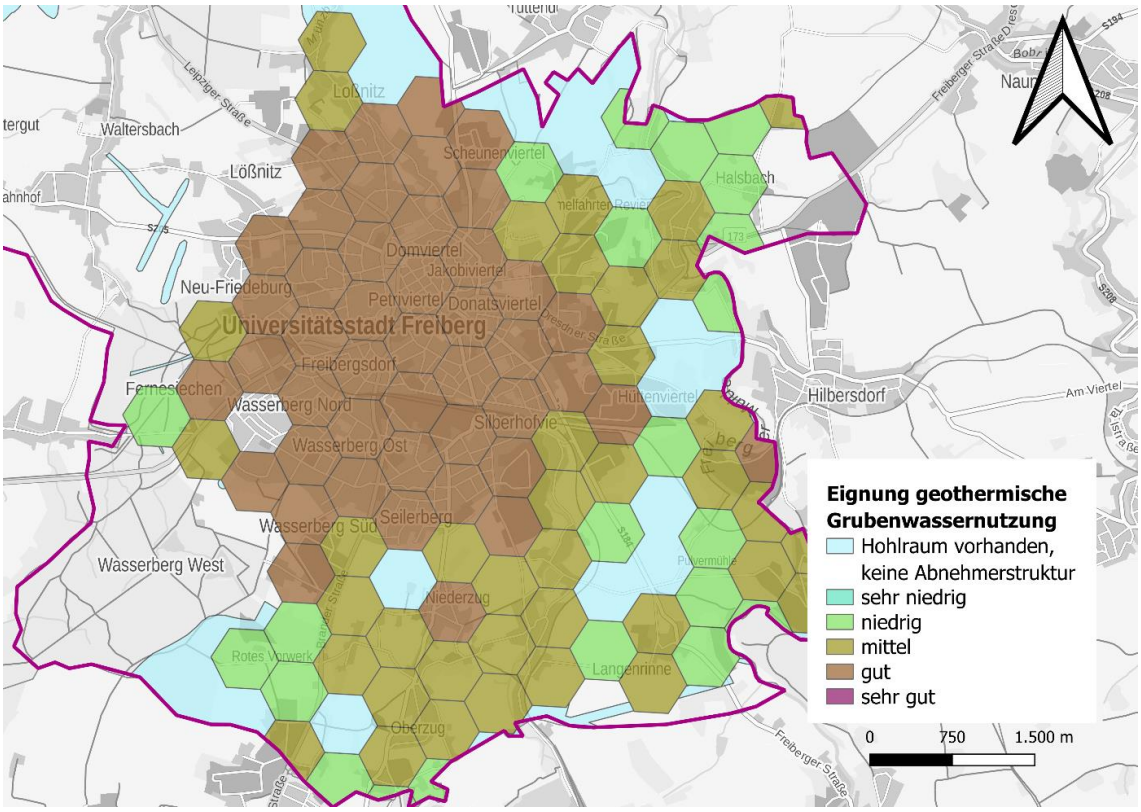
Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 43: Übertägige Bewertung der Gemeinde Freiberg

4.7.3 Potenzial-Layer

Abbildung 44 stellt den Potenzial-Layer von Freiberg dar. Die Stadt zeichnet sich primär durch ihre relativ hohe Wärmeabnehmerdichte aus. Die Konzentration von Abnehmern im Sektor Wohnen führt insbesondere in den Vierteln der Altstadt, Friedeburg und Wasserberg zu einer guten übertägigen Bewertung. Kombiniert mit einer guten untertägigen Bewertung des Bergwerks führt dies folglich großflächig zu einer generell guten Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung. Gegebenenfalls kann bereits vorliegende Infrastruktur zur Wärmeverteilung genutzt werden, um Synergieeffekte zu erzeugen. Es ist zu beachten, dass es durch die generalisierte Bewertung der untertägigen Gegebenheiten insbesondere im Bereich von Friedeburg und dem Wasserberg zu Abweichungen in der tatsächlichen Eignung der Grubenstrukturen kommen kann. Trotz einer Verzeichnung von Hohlräumen in diesen Gebie-

ten können diese unterschiedliche reale Gegebenheiten, verglichen mit dem Hauptteil der Grube, aufweisen. Dies ist der Fall, da sich die Informationsbasis der Bewertung primär auf Teile der Grube bezieht, welche unter der Altstadt und im Norden Freibergs verlaufen.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 44: Potenzial-Layer der Gemeinde Freiberg

4.7.4 Weiterführende Literatur

Die Ausdehnung des Freiberger Reviers bedingt, dass bereits eine große Anzahl an Literaturdaten zur Verfügung steht. Auch Potenzialanalysen wurden demnach in dem Gebiet durchgeführt, von denen die frühesten bis in die Anfänge der 90er Jahre zurückreichen.

Durch die Arbeit der TU Bergakademie sind sehr gute Daten über das Freiberger Silberbergwerk vorhanden. Die durch Wasserreservoire und Entwässerungsstollen zur Verfügung stehenden Wassermengen, sind daher gut spezifizierbar. Eine frühe Untersuchung findet sich in HUBER (1990), in der geeignete energetische Nutzungsvarianten für das Nikolaiviertel eingegrenzt wurden. Neben dem Niederbringen von Bohrungen in die wasserführenden Horizonte wurde ebenfalls die Wasserförderung über den Schacht "Reiche Zeche" angedacht. Da in diesem Schacht bereits eine Grubenwasserversorgung für das Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen implementiert wurde, wird im Weiteren näher auf die Möglichkeit der bohrtechnischen Erschließung des Grubengebäudes eingegangen.

Um den Bereich des Nikolaiviertels zu versorgen, bietet sich ein Bohrpunkt in der Nähe der Kreuzung der Wasserturmstraße und der Nikolaigasse an. Dort kann der Rothschönberger Stollen direkt erreicht werden und es besteht ein vernachlässigbares Risiko auf unbekannten Altbergbau. Dies ist wichtig sicherzustellen, da nach dem unbeabsichtigten Anbohren einer Zwischensohle die Bohrung meist aufgegeben werden muss. Weiterhin wurden der Bohrzielpunkt unter Tage untersucht, sowie eine technische Umsetzung diskutiert. Insgesamt kann zwischen der Nutzung des warmen Horizontes am Überlauf des Schachtes der "Reichen Zeche" und dem kalten Horizont im Rothschönberger Stollens unterschieden werden. Da am warmen Horizont das Wasser ständig artesisch mit ca. 20°C und 300 m^3/h übertritt, kann unter der Annahme des maximal möglichen Wärmeentzugs bis auf 5°C ein Wärmepotenzial von über 5 MW ergeben. Weiterhin sind die darunterliegenden Grubenstrukturen mit wärmerem Wasser gefüllt, was das energetische Potenzial ebenfalls erhöhen kann. Um weitere Standorte im Freiberger Revier zu erschließen, empfehlen sich Bohrungen.

Ein wichtiger Aspekt der energetischen Grubenwassernutzung ist das Speicherpotenzial, welches solche Reservoire bieten. In SCHABERG (1998) wurde explizit diese Eigenschaft anhand eines Versuchsstandes in der Reichen Zeche demonstriert und untersucht. Dazu wurde ein Streckenstumpf mit einer Mauer versiegelt, so dass ein geschlossener Speicherraum mit einem Volumen von 22,63 m^3 entstand. Be- und Entladevorgang wurden über Rohrleitungen realisiert, welche sich am Boden und an der Decke des Speichers befanden. Der Speicher wurde anschließend mit Grubenwasser befüllt. Da sich das Niveau über dem Flutungsspiegel der Grube befand, wurde ein stetiger Abstrom von Grubenwasser über die Betriebszeit beobachtet, welcher mit 4 l/h allerdings als vernachlässigbar angesehen werden konnte. Das Grubenwasser wurde für die Beladung des Speichers an Heizstäben vorbeigeführt, welche das Fluid erhitzten. Wärmespeicherversuche wurden so auf verschiedenen Temperaturniveaus und über verschiedene Zeiträume durchgeführt. Dabei wurden Temperaturen sowohl im Speicherraum als auch in den den Speicher umgebenden Wänden gemessen. Technische Herausforderungen entstanden primär durch Ablagerungen, welche durch den Chemismus des Grubenwassers bedingt waren. Insbesondere der hohe Temperaturgradient an den Heizstäben führte zu einer Anfälligkeit gegenüber Fouling. Im Zeitraum von maximal 21 Tagen wurde so der Be- und Entladevorgang experimentell aufgenommen. In Zusammenhang mit einer numerischen Untersuchung konnte ein Speicherwirkungsgrad von maximal 50 % ermittelt werden.

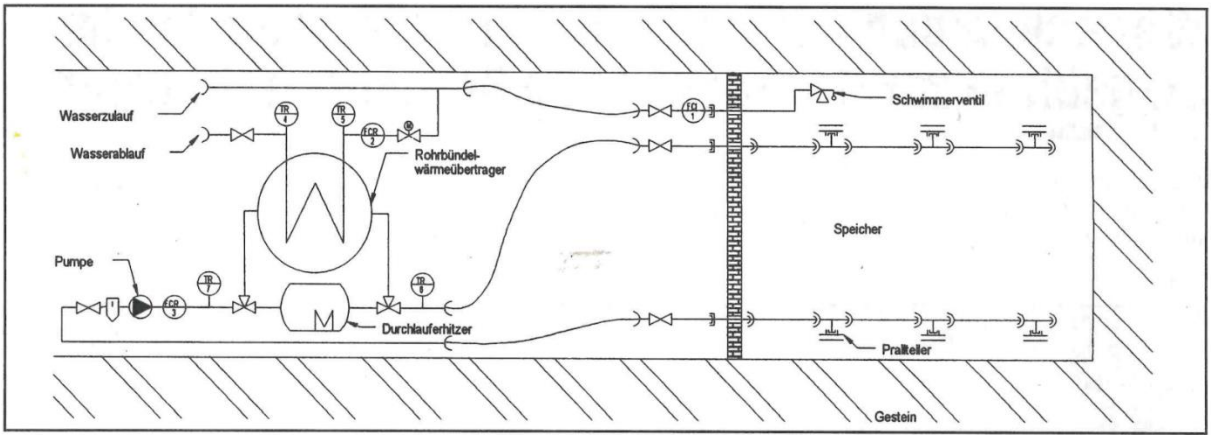


Abbildung 45: Technisches Schema des untersuchten Grubenwasserwärmespeichers Himmelfahrt Fundgrube (Schaltung Beladung) (SCHABERG, 1998)

2001 wurde eine vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie in Auftrag gegebene Studie zu Grubenwasserpotenzialen veröffentlicht, in der ebenfalls das Freiberger Revier untersucht wurde (GRIMM et al., 2001). Daneben wurde auch der revierübergreifende Rothschönberger Stollen untersucht. Verschiedene in Betrieb befindliche Anlagen und potenzielle Standorte wurden aufgezählt. Darunter die Grubenwassergeothermieanlage der Reichen Zeche, das Nikolaiviertel als möglicher Abnehmercluster sowie eine mittlerweile errichtete Grubenwasseranlage für das Kreiskrankenhaus. Durch die Vorstudien, die guten bergbautechnischen Voraussetzungen und die Nähe zur technischen Universität wird der Standort Freiberg als sehr vorteilhaft eingestuft, welches sich in den Bewertungskriterien aus Tabelle 16 widerspiegelt.

Tabelle 16: Bewertung des Freiberger Reviers für die geothermische Grubenwassernutzung aus (GRIMM et al., 2001)

Kriterien		Bewertung (3 höchste)
Natürlich	Reservoir	3
	Fläche	3
	Tiefe	3
	Temperatur	2
	Summe	**11**
Technisch	Nutzung	3
	Chemie	2
	Radiologie	2,5
	Summe	**7,5**
Wirtschaftlich	Infrastruktur	2,5
	Bedarf	2,5
	Entfernung	2,5
	Summe	**7,5**
	Gesamtsumme	**26 (max. 36)**

Damit erhielt das Freiberger Revier von allen 48 untersuchten Standorten die beste Bewertung. Da die Bewertung der einzelnen Kriterien jedoch nicht näher beschrieben wurde, kann das Vorgehen nicht genau nachvollzogen werden.

Die neueste Untersuchung im Freiberger Revier wurde in einem Forschungsprojekt 2022 begonnen (TUBAF, 2022b). Das Projekt MineATES beschäftigt sich mit der Nutzung grundwassererfüllter bergbaulicher Hohlräume als thermische Speicher. Damit wird das Thema der Speicherung von Wärme im Grubenwasser aus dem Jahre 1998 wieder aufgegriffen und erweitert. Bestandteile der Studie sind die Optimierung von Messkonzepten, Experimente in Pilotskala, numerische Untersuchungen des Stoff- und Wärmetransportes, über-Tage Energiedargebotsanalysen sowie die Erstellung eines Kriterienkatalogs.

Abbildung 46: Logo für das Grubenwärmespeicherprojekt MineATES (TUBAF, 2022b)

Durch die Verfügbarkeit eines Lehrbergwerkes konnten gute Rahmenbedingungen geschaffen werden, um Wärmespeicherexperimente in kleinem Maßstab durchzuführen. Dazu wurde ein Wasserreservoir

in der Grube für das Projekt ertüchtigt und mit einem umfassenden Messkonzept ausgestattet. Dies erlaubt in den Versuchen die Temperaturverteilung und damit Wärmespeicherung im Gestein zu untersuchen. Da künftig eine höhere Notwendigkeit bestehen wird, Gebäude ebenfalls zu kühlen, beinhalten die Versuche auch den Fall der Kälteeinspeicherung. Die in den Experimenten gemessenen Temperaturverläufe werden anschließend genutzt, um numerische Modelle zu validieren. Aus diesen können anschließend vereinfachte Werkzeuge entwickelt werden, die einen anwenderfreundlichen Zugang zur Abschätzung von untertägigen Speicherpotenzialen ermöglichen. Als Schnittstelle der Energiequelle Grubenwasser und den übertägigen Verteilnetzen, werden ebenfalls Wärmeübertrager als Schlüsseltechnologie betrachtet. Optimierte Materialien und Beschichtungen maximieren die Übertragungseffizienz und bilden die Grundlage für ein wartungsarmes System (OPPELT et al., 2021; GRAB et al., 2024). Über Tage sind die Energiebedarfe ein wichtiger Aspekt im wirtschaftlichen Betrieb eines Grubenwasserwärmespeichers. Um dies adäquat in die Ergebnisse einzubeziehen, werden Wärme- und Kältebedarfe gebäudescharf und zeitaufgelöst in konkreten Reallaborstandorten modelliert (DBI GTI, 2023). Für die Verteilung werden anschließend optimierte Verteilnetzstrukturen berechnet und in die Projektergebnisse einbezogen. Alle Bestandteile der Untersuchungen werden abschließend in einem nutzerorientierten Kriterienkatalog zusammengefasst, um die Praxistauglichkeit der Projektergebnisse zu fördern.

4.8 Freital

4.8.1 Untertägige Standortbewertung

Am Standort Freital wurde seit 1542 Steinkohle abgebaut. Nach der Entdeckung der Strahlungsaktivität der Steinkohle aus dem Freitaler Revierteil Döhlen, wurde die Kohle im Interesse der Sowjetunion durch die Wismut SAG vermehrt gefördert. Insgesamt wurde so eine Erzmenge von etwa 3,6 Mio. Tonnen gefördert, was den allein durch den Uranbergbau entstandenen Grubenhohlraum auf ein Volumen von 2,4 Mio. m^3 beziffern lässt (WISMUT GMBH, 2006). Der geflutete Teil der Grube im Wismutbergbau wird auf 1,7 Mio. m^3 geschätzt (WISMUT GMBH, 2016). Die vorhandenen Altstrukturen der Grubenbaue wurden dabei teilweise erweitert und überprägt, so dass in Bereichen des Wismutbergbaus die Grube als relativ jung erachtet werden kann (REICHEL, 2007).

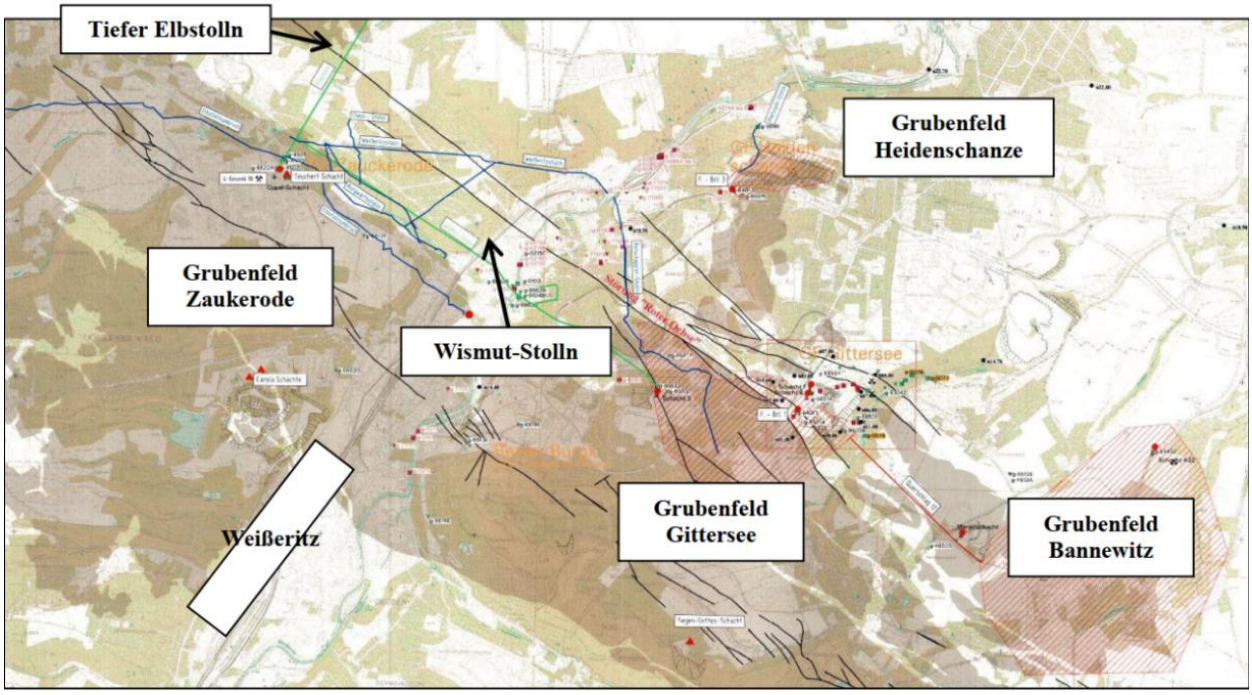


Abbildung 47: Übersichtschema über die Reviere in Freital (GOERKE-MALLET et al., 2016)

Von 1817 bis 1837 wurde der zentrale Entwässerungsstollen für das Steinkohlerevier konstruiert. Der "Elbstollen" ist mit einer Haupttraktlänge von über 6 km der längste Entwässerungsstollen des Reviers und führt auf einem Niveau von 110 m Grubenwasser aus dem Revier in die Elbe ab (REICHEL, 2007). In den Elbstollen wird Wasser aus dem bis 2016 konstruierten WISMUT-Stollen eingeleitet. Dieser sorgt für die sichere Entwässerung der Grube Gittersee und verläuft auf einer Länge von ca. 2,9 km zum Großteil unter den Stadtteilen Burgk und Potschappel (WISMUT GMBH, 2017a; WINZER, 2024). Durch die Höhe der Entwässerungsstollen ergibt sich ein Abstand zum Grubenwasser von etwa 50-100 m (STADT FREITAL, 2024). Nachdem der WISMUT-Stollen in den Tiefen Elbstollen übergegangen ist, durchquert dieser noch den Stadtteil Pesterwitz, wobei der Abstand zur Geländeoberkante aufgrund der Höhenlage auf über 160 m ansteigt, was Nachteile bei dem Aufwand einer möglichen Erschließung bedingt.

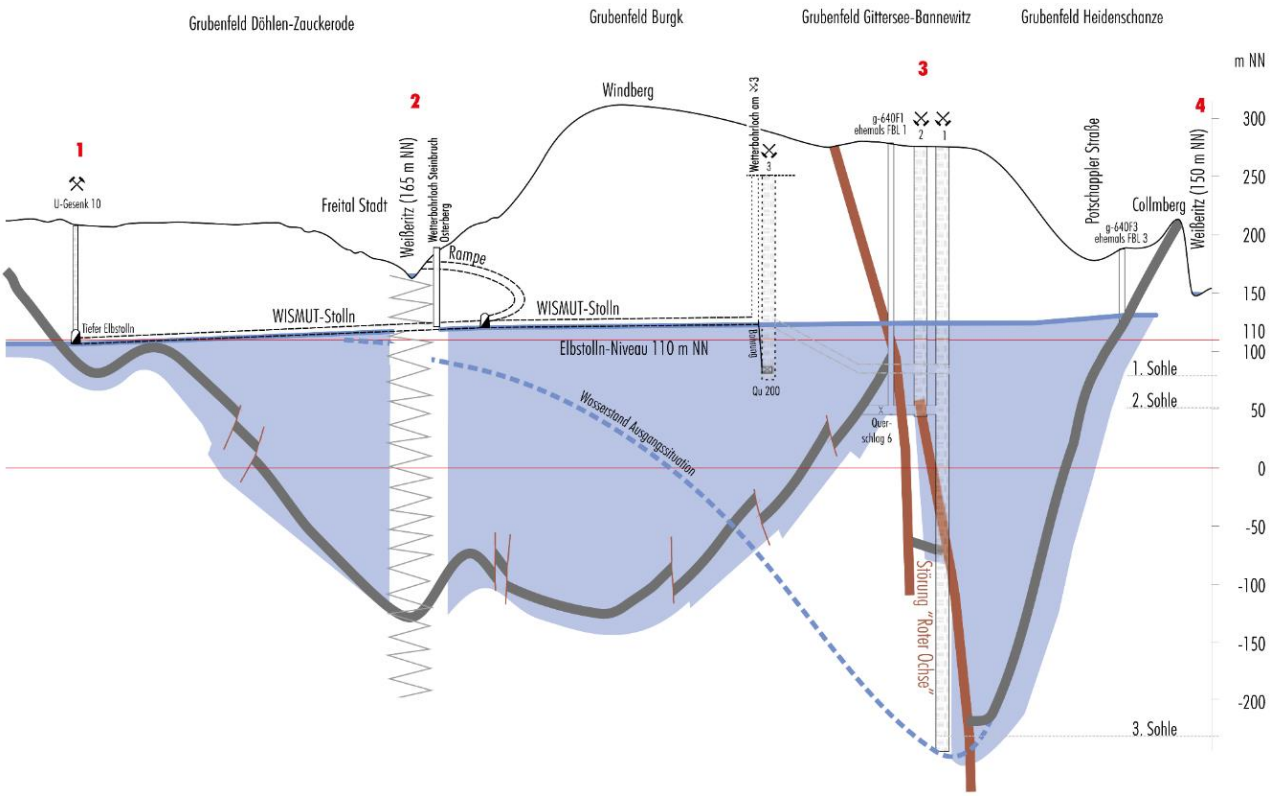
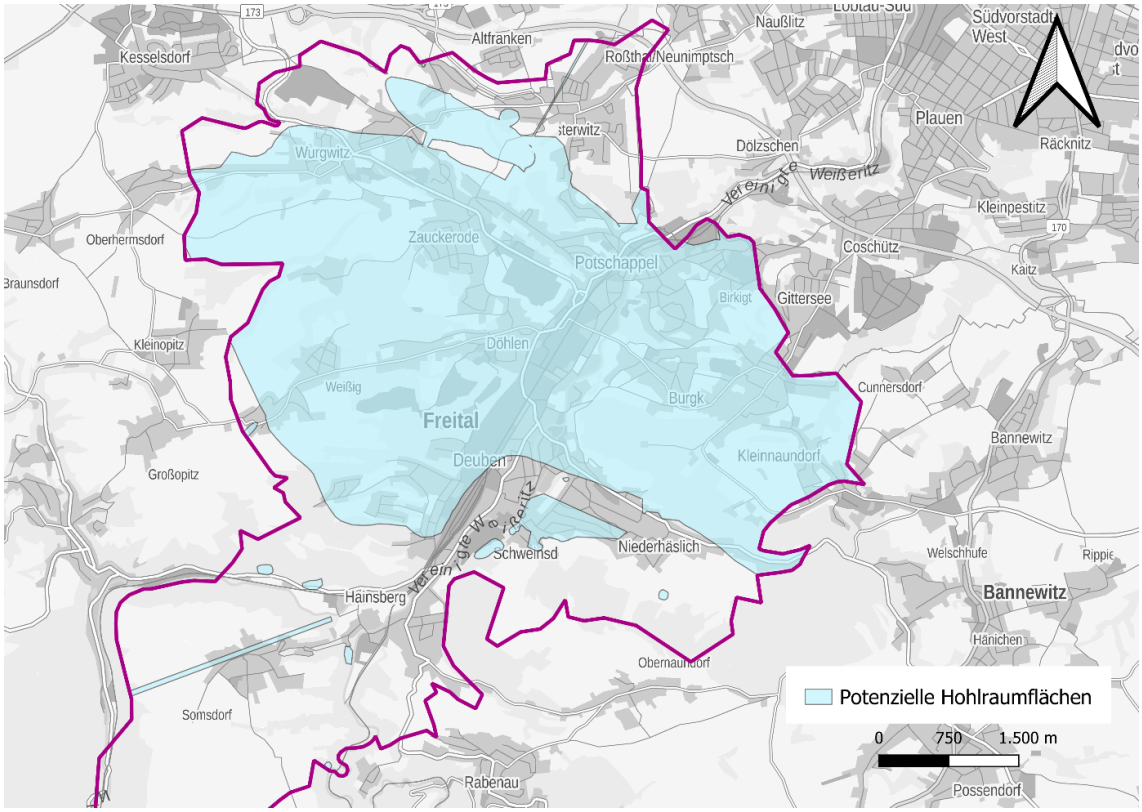


Abbildung 48: Schematischer Schnitt durch die Grube Dresden-Gittersee (WISMUT GMBH, 2017a)

In der nachfolgenden Abbildung 49 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 17 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

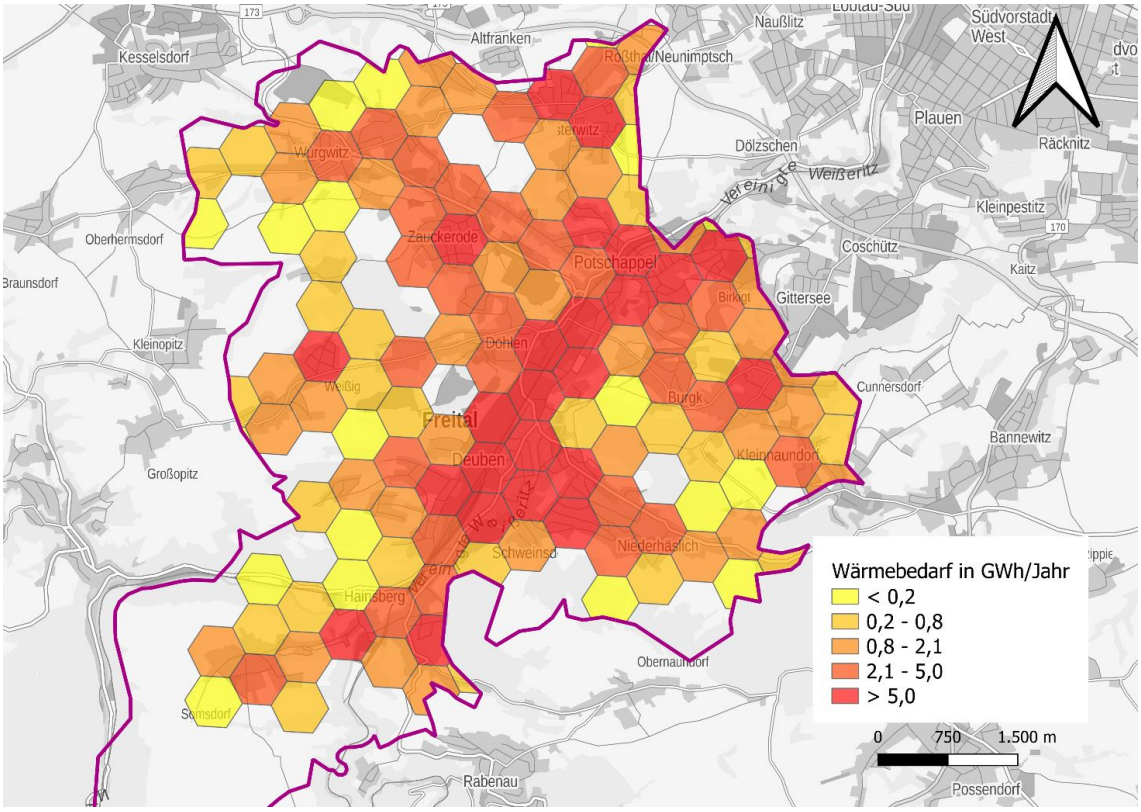
Abbildung 49: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Freital

Tabelle 17: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Freital

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	5	Umfassender Wismutbergbau im Freitaler Raum. Altbergbau noch teilweise vorhanden.	(REICHEL, 2007)
Entwässerungssystem	4	Tiefer Elbstollen und Wismutstollen dienen als zentrale Entwässerung. Aus der Grube Gittersee allein treten ca. 75 m^3/h aus. Gesamter Durchfluss mit weiteren Zutritten aus anderen Gruben auf 100 bis 500 m^3/h geschätzt.	(GOERKE-MALLET et al., 2016)
Geflutete Teufe	4	Tiefer Elbstollen 61 m bis 190 m unter GOK (Stadthöhe: 171 m NHN, Höhe Döhlener Becken: 300 m NHN, Stollenhöhe: 110 m NHN).	(GOERKE-MALLET et al., 2016; GOOGLE, 2023)
Hohlraumvolumen	5	Im Wismutrevier mit einem Volumen von ca. 2,4 Mio. m^3 beschrieben.	(WISMUT GMBH, 2006)
Risswerkkenntnis	4	Insbesondere durch Wismut-Tätigkeit im Grubenteil Gittersee vorhanden.	(WISMUT GMBH, 2006)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalien im Revier erkennbar. 9 bis 11 °C in oberen Sohlen und in Entwässerungsstollen.	(REICHEL, 2007)
Wasserchemie	3	Entwässerungskonzept sieht Abschlagung in die Elbe ohne Vorbehandlung vor. Analysen zeigen eine erhöhte Eisenbelastung.	(TUBAF, 2023e)
Zugänglichkeit	1	Durch Verwahrung außerhalb der Entwässerungsstollen nicht mehr gegeben.	(GOERKE-MALLET et al., 2016)
Unter-Tage-Gesamtwertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,1		

4.8.2 Übertägige Standortbewertung

Die Stadt Freital hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 550,5 GWh/a (DBI GTI, 2023). Die höchste Wärmeabnehmerdichte befindet sich in den zentral gelegenen Stadtteilen Deuben, Döhlen und Potschappel entlang der Dresdner Straße. Neben Wohngebäuden existieren zahlreiche Sonderabnehmer in diesen Gebieten, wie zum Beispiel ein Edelstahlwerk, Ziegelwerk und eine Papierfabrik. Die umliegenden Stadtteile, wie Niederhäslich, Zaukerode, Pesterwitz und weitere sind überwiegend von Wohnbebauung geprägt und sorgen für einen, über das gesamte Stadtgebiet verteilten Wärmebedarf.

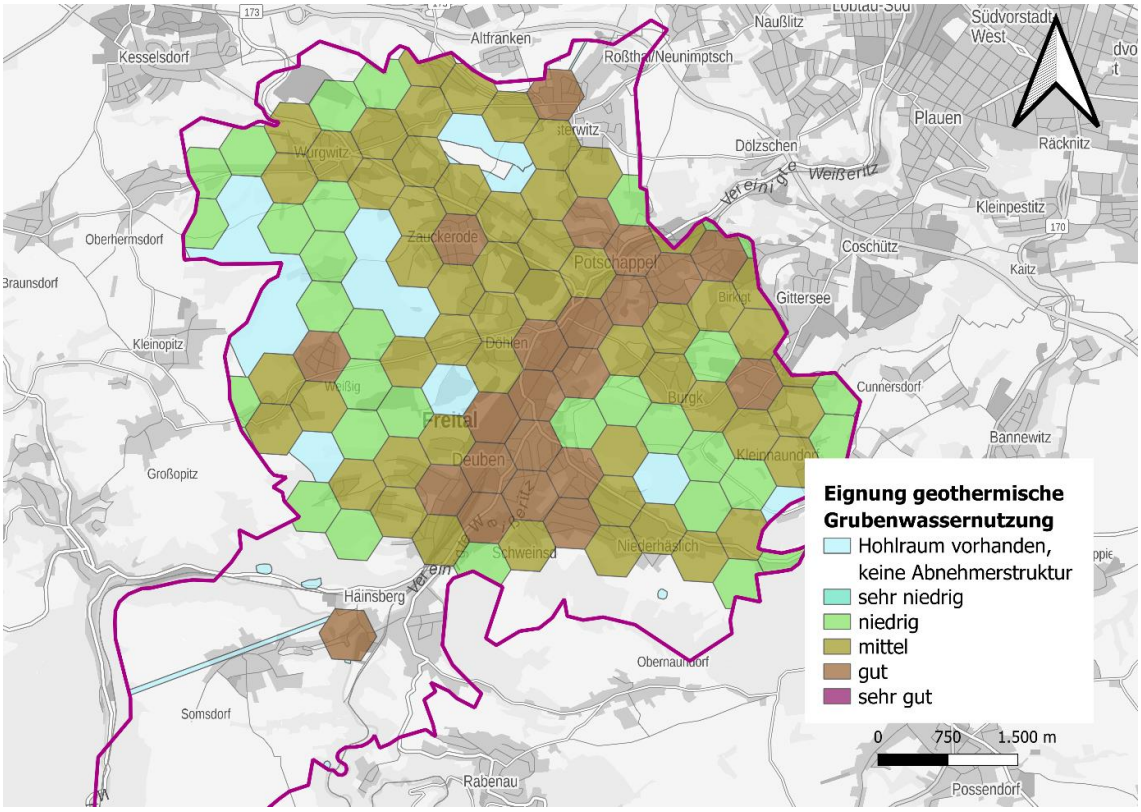


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 50: Übertägige Bewertung der Gemeinde Freital

4.8.3 Potenzial-Layer

Die Bewertung der Stadt Freital ist in Abbildung 51 dargestellt. Mit rund 39.000 Einwohnern und als die drittgrößte betrachtete Gemeinde der Potenzialstudie finden sich durch die Abnehmerstrukturen entsprechend gut geeignete Standorte. Die Bebauung der Stadt konzentriert sich entlang der Weißeritz, Wiederitz und des Poisenbaches. Diese Bereiche weisen demnach einen erhöhten Wärmebedarf auf und bekommen eine dementsprechend gute Eignung für die geothermische Grubenwassernutzung zugeschrieben. Insbesondere in den Stadtteilen Burgk und Döhlen konzentrieren sich vorteilhafte Standorte wobei der Hauptteil der nördlichen Abnehmer überwiegend dem Sektor "Wohnen" zugeschrieben werden kann. Südlicher in diesem gut bewerteten Cluster dominieren hingegen als industriell eingestufte Abnehmer. Ein weiteres gut bewertetes Abnehmercluster ist im Stadtteil Deuben an der Grenze zu Schweinsdorf und Niederhäslich zu finden. Dort liegt eine heterogene Zusammensetzung an Wohn-, Kommunal- und Industriegebäuden vor. Die Erschließung untertägiger Grubenwasserkörper in diesem Gebiet, kombiniert mit einer Wärmeverteilung könnte auch dort einen Anteil an regenerativer Energieversorgung der Stadt liefern.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 51: Potenzial-Layer der Gemeinde Freital

4.8.4 Weiterführende Literatur

Neben den verwendeten Quellen ist keine weiterführende Literatur zum Thema Grubenwassergeothermie für den Raum Freital bekannt.

4.9 Hohenstein-Ernstthal

4.9.1 Untertägige Standortbewertung

Die Anfänge des Bergbaus im Hohenstein-Ernstthaler Revier können auf die Zeit des frühen 15. Jahrhunderts datiert werden. Zu dieser Zeit wurden direkt im Bereich des Altmarktes Stollen angelegt, welche zunächst der Wasserversorgung dienten (WAGENBRETH, 1990). Der Bergbau für Erze wie Kupfer, Silber oder Gold blühte im 16. Jahrhundert zum ersten Mal auf. Dabei wurde der vor Ort verfügbare Arsenkies in der "Große Brettschneider Fundgrube" der "Lampertusfundgrube" und der "Römerfundgrube" abgebaut (SCHRAPS, 2008). Im Fortschreiten der Bergbauaktivität wurde der Goldbergau relevanter, so dass über alle Bergbauperioden bis 1910 etwa 10 kg des Edelmetalls gefördert wurden. Die Auffahrungen sind risskundlich gut bekannt und ein Großteil des Bergwerks kann bis heute befahren werden.

Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen einen Grundriss der Lampertus-Fundgrube (ST. LAMPERTUS FUNDGRUBE, 2023).

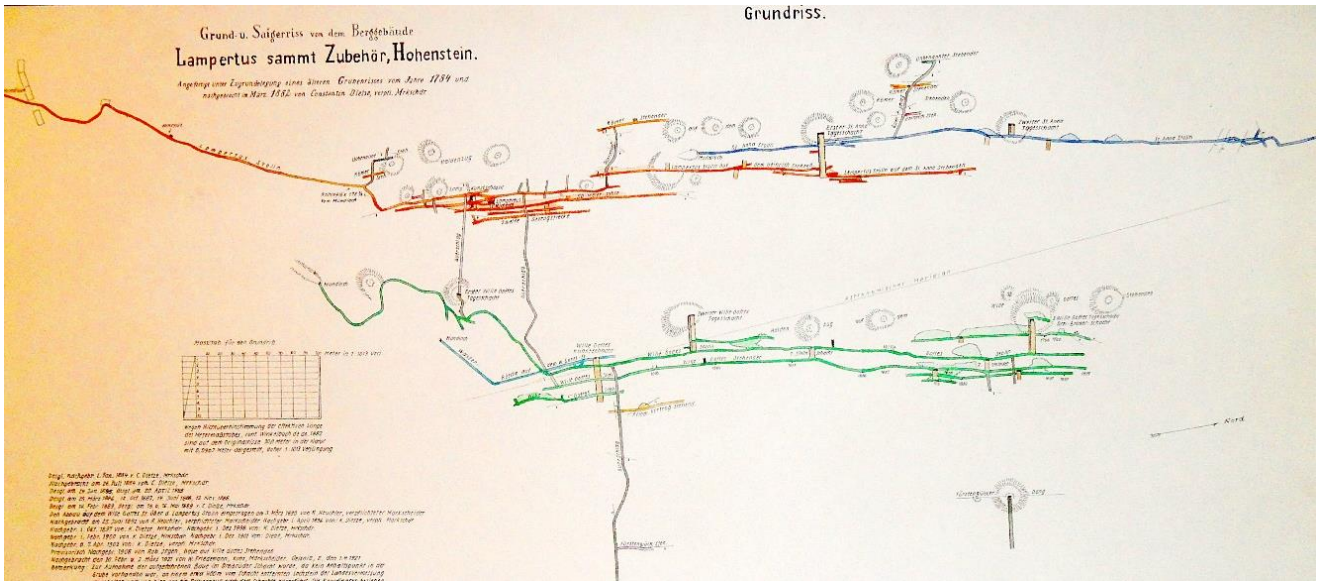


Abbildung 52: Grundriss der Lampertus Fundgrube in Hohenstein-Ernstthal (ST. LAMPERTUS FUNDGRUBE, 2023)

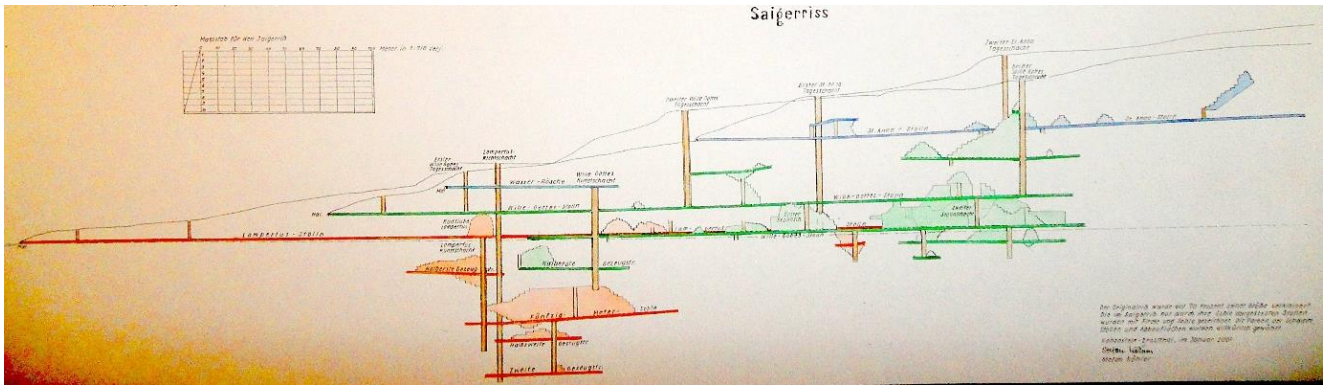
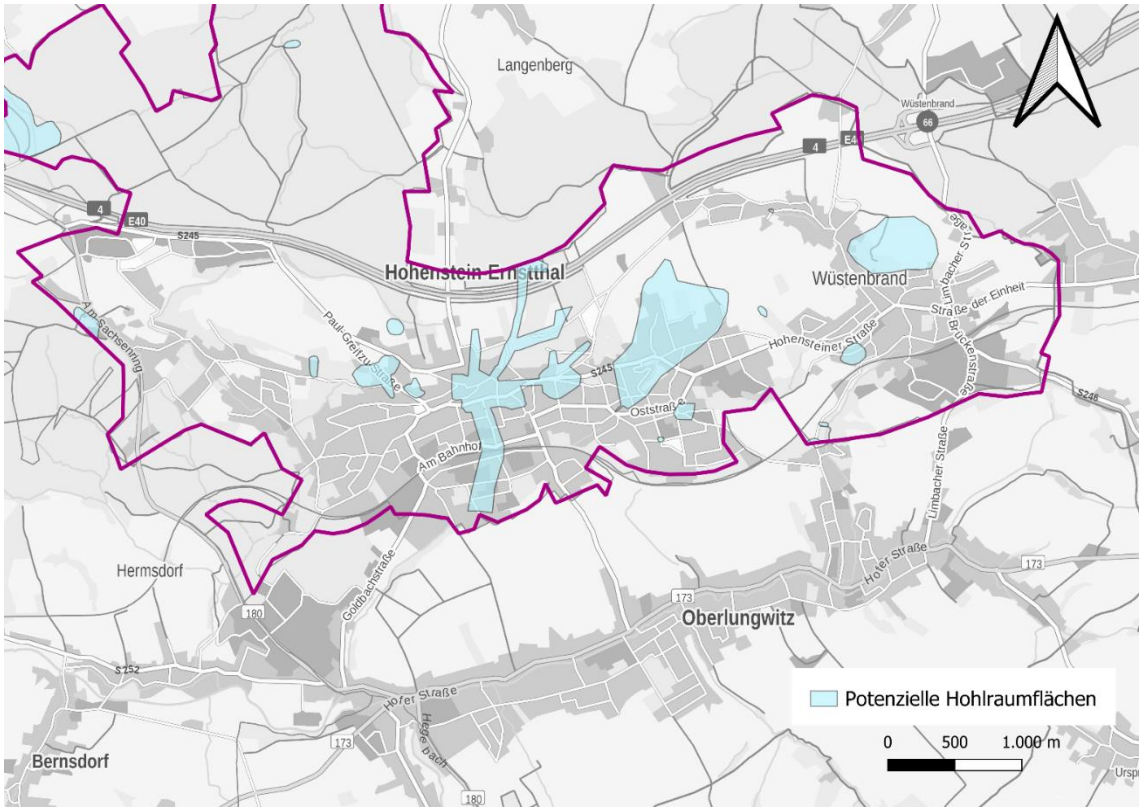


Abbildung 53: Saigerriss der Lampertus Fundgrube in Hohenstein-Ernstthal (ST. LAMPERTUS FUNDGRUBE, 2023)

Da die Grube über den Lampertus-Stollen in Richtung Stadtgebiet entwässert, befindet sich das Niveau der gefluteten Grubenbaue im Gebiet des Lampertus-Schachts etwa 40 m bis 50 m unter der Geländeoberkante. Das Mundloch des Lampertus-Stollens befindet sich im Stadtgebiet und somit direkt an der Oberfläche. Eine energetische Nutzung des Wassers ist aufgrund der geringen Ausmaße des Wassereinzugsgebiets der Grube jedoch infrage zu stellen. Saisonale Messungen des vorhandenen Volumenstroms können darüber näheren Aufschluss geben. Ein weiterer Entwässerungsstollen, der Augusta-Stollen, der Grubenwasser aus einem zentraleren Grubenabschnitt in der Nähe des Stadtzentrums löst, führt das Wasser nördlich aus dem Stadtgebiet. Für eine energetische Betrachtung bietet dieser sich aufgrund der Entfernung und der potenziell niedrigen Volumenströme ebenfalls nicht an. Durch die

kurzen Sickerwege und die somit herrschende unmittelbare Verbindung zum saisonalen Niederschlagswasser, sind in den Entwässerungsstollen keine höheren Wassertemperaturen als die im Jahresmittel vorliegenden 10-12 °C zu erwarten.

In der nachfolgenden Abbildung 54 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 18 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

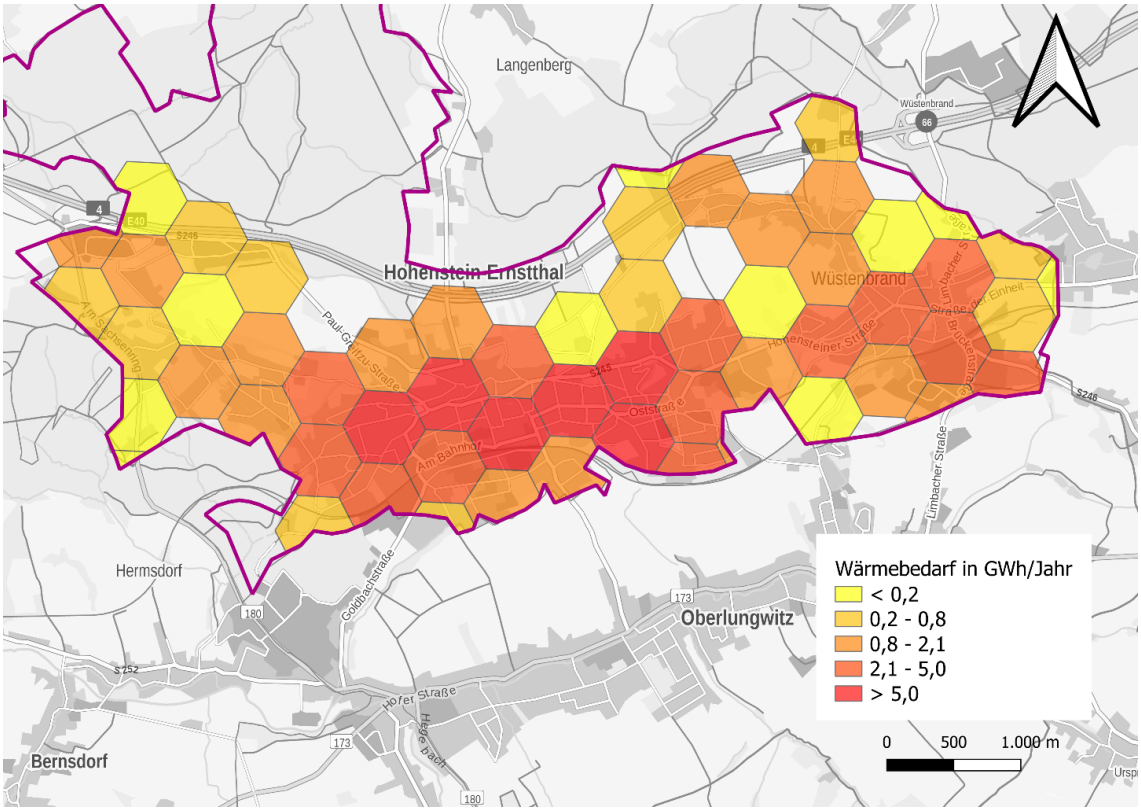
Abbildung 54: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Hohenstein-Ernstthal

Tabelle 18: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Hohenstein-Ernstthal

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	4	Auffahrungen vom 16. bis ins frühe 20. Jahrhundert. Größte Erzausfördermenge von 1831 bis 1910.	(WAGENBRETH, 1990)
Entwässerungssystem	3	Durchschnittlicher Zufluss im Jahr 1995 über eine Messung von 7 Monaten circa 23 m^3/h beziehungsweise 550 m^3/d.	(SCHRAPS, 2008)
Geflutete Teufe	5	Austritt von Grubenwasser im Stadtgebiet teilweise auf GOK aus Mundlöchern. Im Lampertusschacht bei ca. 42 m unter GOK.	(ST. LAMPERTUS FUNDGRUBE, 2008)
Hohlraumvolumen	2	Keine Angaben für das Revier den Autoren bekannt. Geflutetes Volumen aufgrund von Literatur und Risskarten geschätzt.	/
Risswerkkenntnis	3	Es sind Ausdrucke und Zeichnungen vorhanden. Nach Autorenkenntnis wurde bisher keine Georeferenzierung vorgenommen.	Archivmaterial des Besucherbergwerkes St. Lampertus Fundgrube
Temperatur	1	Fast ausschließlich Oberflächenwasser ohne Temperaturanomalien.	(FISCHER & PARTNER,1998)
Wasserchemie	5	Wasser wurde als Trinkwasservorrat angedacht und früher dazu verwendet.	(FISCHER & PARTNER, 1998)
Zugänglichkeit	4	Aktives begehbares Bergwerk und großflächig befahrbar.	(KÖHLER, 2020)
Unter-Tage-Gesamtwertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,5		

4.9.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Hohenstein-Ernstthal hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 117,5 GWh/a (DBI GTI, 2023). Die höchste Wärmeabnehmerdichte befindet sich in den namensgebenden Stadtteilen Hohenstein und Ernstthal. Dort sind vorwiegend Wohngebäude vorzufinden. Im südlichen Stadtgebiet befinden sich in Bahnhofsnähe vereinzelt Gewerbebetriebe. Ein zweites, großes Verbrauchscluster ist der Ortsteil Wüstenbrand im Osten des Stadtgebietes. Südlich des Bahnhofs befindet sich ein großes Gewerbegebiet. Die restlichen Bereiche des Ortsteils sind überwiegend von Wohnbebauung gekennzeichnet.

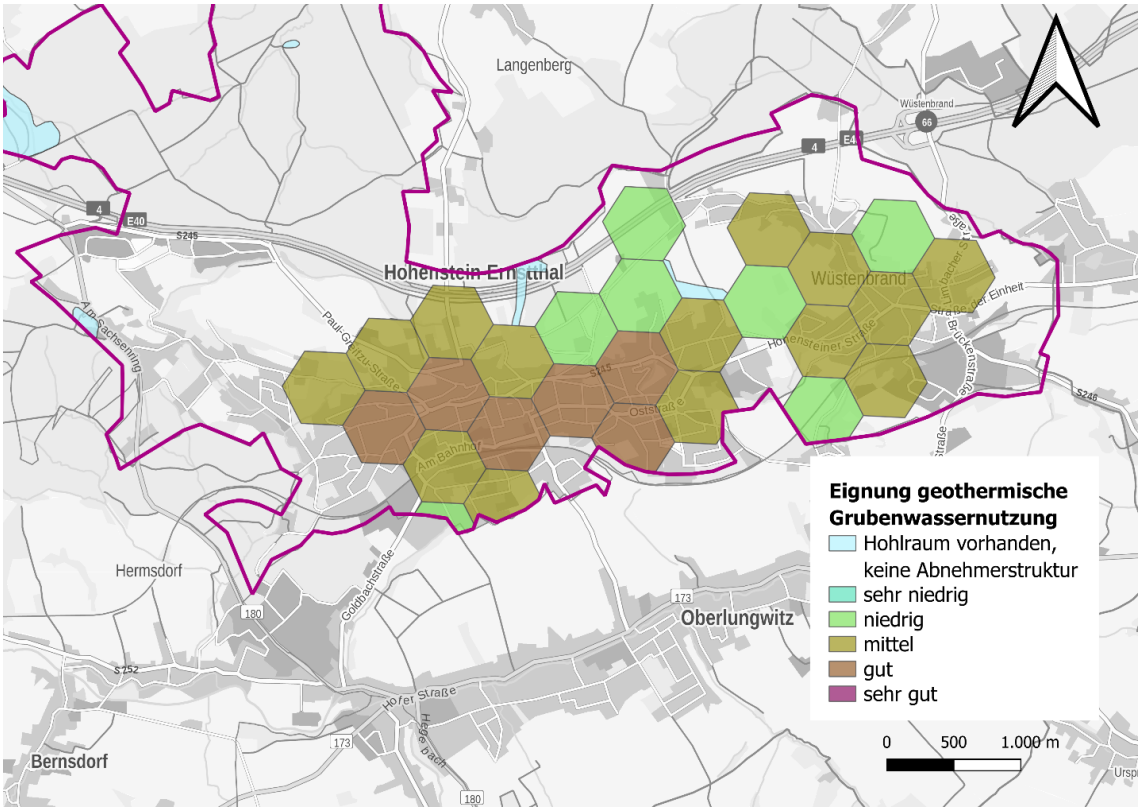


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 55: Übertägige Bewertung der Gemeinde Hohenstein-Ernstthal

4.9.3 Potenzial-Layer

Wie der Karte in Abbildung 56 entnommen werden kann, weist das entlang der A4 verlaufende Stadtgebiet von Hohenstein-Ernstthal im innerstädtischen Bereich eine gute Eignung der Grubenwassernutzung auf. Dies ist überwiegend durch die dichte Bebauungsstruktur im Wohnsektor, kombiniert mit einer guten Bewertung der Grubenwassernutzbarkeit zu erklären. Die gute Eignung ist dabei durch die geringen verfügbaren Grubenwassermengen nicht einer hohen nutzbaren Wärmeleistung gleichzusetzen. Auf der Seite des Grubenwassers muss festgestellt werden, welche Mengen tatsächlich durch das Nutzen von Entwässerungsstollen oder das Erschließen von gefluteten Hohlräumen zur Verfügung stehen. Diese Schlussfolgerungen gelten auch für den Rest des Stadtgebiets, welches aufgrund von geringeren modellierten Abnehmerleistungen mit einer mittleren bis niedrigen Eignung versehen wird.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 56: Potenzial-Layer der Gemeinde Hohenstein-Ernstthal

4.9.4 Weiterführende Literatur

Neben den verwendeten Quellen ist keine weiterführende Literatur zum Thema Grubenwassergeothermie für den Raum Hohenstein-Ernstthal bekannt.

4.10 Johanngeorgenstadt

4.10.1 Untertägige Standortbewertung

Auch wenn der erste Bergbau im frühen 16. Jahrhundert vermutet wird, so erlebte Johanngeorgenstadt seine erste Blüte nach Silberfunden. Wenige Jahre nach der Stadtgründung in 1654 erhielt diese daher ein kurfürstliches Bergamt, unter dessen der Aufsicht die Bergbauaktivitäten gestellt wurden. Neben Silber wurden weiterhin Wismut, Zinn, Eisen und Kobalt gewonnen (TELLER et al., 2023; KRAUß, 2024). Nach dem Ende des zweiten Weltkrieges wurde das Revier bald von der SAG Wismut zur Gewinnung von Uran übernommen. Der Abbau gestaltete sich zum Leidwesen der ansässigen Bevölkerung und der Stadt und führte zu Abraummaterial, welches in Summe etwa auf 7,7 Mio. m^3 Haldenvolumen beziffert werden kann (RUNGE, 1999; TELLER, 2009). Zu Hochzeiten um 1952 wird die Anzahl der aktiven Arbeiter

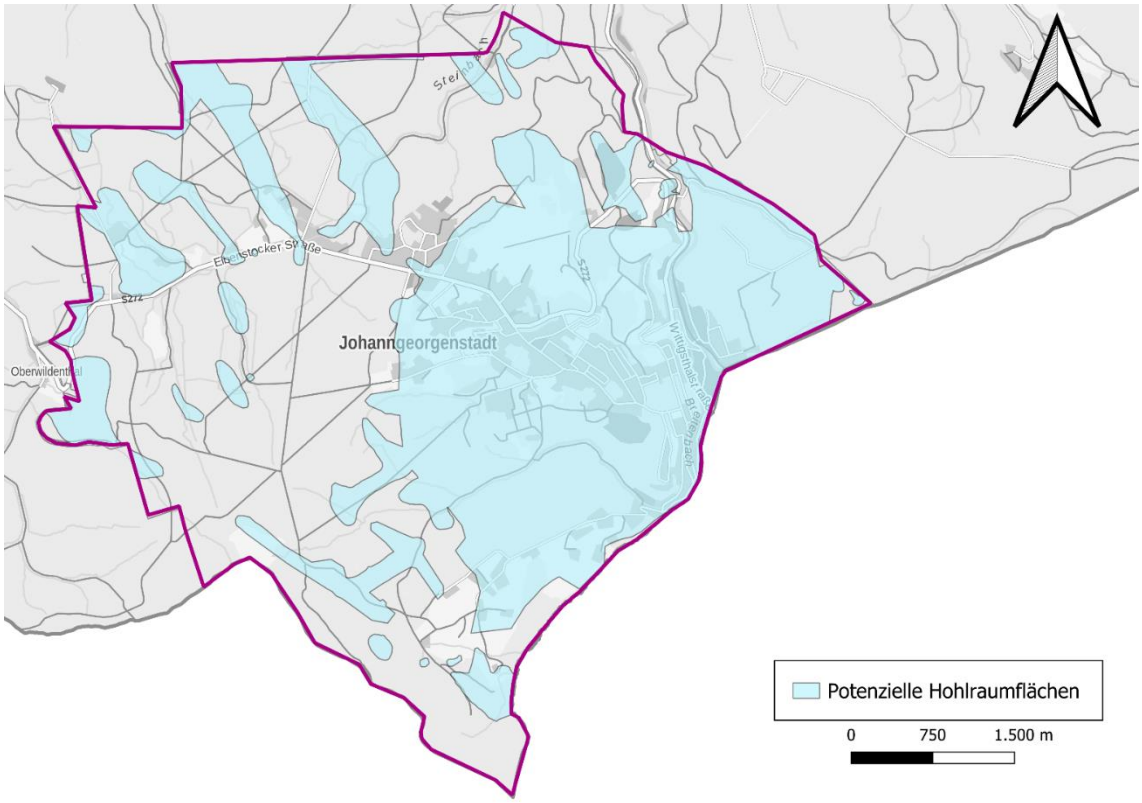
im Revier auf etwa 60.000 Personen geschätzt, wodurch die ausgiebigsten Bergwerksstrukturen im Untergrund von Johanngeorgenstadt entstanden (TELLER et al., 2023).

Die Entwässerung verlief bis 2008 auf nicht geklärter Weise, da sie nach Einstellung des Bergbaus sich selbst überlassen wurde. Durch einen Verbruch im reviertiefsten Stollen wurde der überwiegende Teil des Grubenwassers über den nicht befahrbaren Glück-Auf-Stollen entwässert. 2008 wurde eine dauerhafte Entwässerungslösung mit einer Entwässerungsbohrung im Bereich des Stollenmundlochs gelöst. Die Wasserhaltung befindet sich demnach auf dem Niveau des Stollenmundlochs, welches am Schwarzwasser in einer Höhe von etwa 671 m liegt (WISMUT GMBH, k.A.; ENGELSCHALL, 1723). Das austretende Wasser wird in den Fluss Schwarzwasser geleitet. Da keine Wasseraufbereitungsanlage an die Entwässerung angegliedert ist, kann von einer radiologisch unbedenklichen Fracht ausgegangen werden. Sollten tiefere Grubenbaue erschlossen werden, können jedoch strahlenschutzrechtliche Belange berührt sein (LFULG, 2023).

Durch den Wismutbergbau der Nachkriegszeit sind die Strukturen der Grube abseits der Bereiche mit ausschließlich Altbergbau hinreichend bekannt. Informationsmaterial findet sich in Form von Karten beim Sächsischen Oberbergamt sowie im Archiv der Wismut GmbH.

Durch die variierende Höhe des Stadtgebietes ergeben sich unterschiedliche Höhendifferenzen, welche für die Nutzung des Grubenwassers überwunden werden müssten. So reichen diese von wenigen Metern im Schwarzwassertal bis zu über 200 m in der Neustadt. Somit ergeben sich unterschiedliche Bewertungen hinsichtlich der notwendigen Anlagentechnik, welche stark vom fokussierten Standort abhängig sind (GOOGLE, 2023; WISMUT GMBH, 2023b; WAGENBRETH, 1990).

In der nachfolgenden Abbildung 57 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 19 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

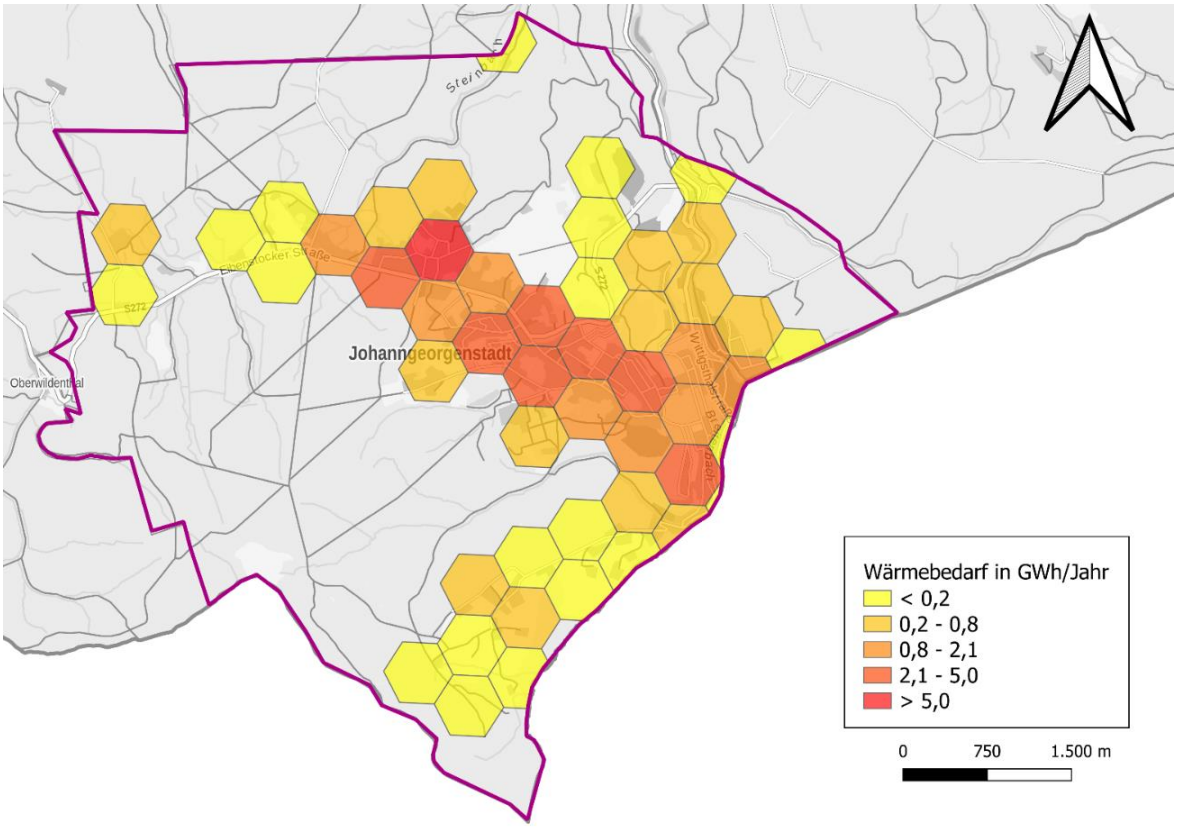
Abbildung 57: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Johanngeorgenstadt

Tabelle 19: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Johanngeorgenstadt

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	5	Uranbergbau wurde nach 1946 intensiv durch die Wismut SAG/SDAG durchgeführt. Überschneidungen mit Altbergbau sind aufzufinden.	(KRAUß, 2024; WISMUT GMBH, 2023b)
Entwässerungssystem	4	Zentrale Entwässerungsbohrung mit stark variierendem Durchfluss je nach Jahreszeit vorhanden. Mittelwert bei 342 m^3/h.	(LFULG, 2016; TUBAF, 2024e)
Geflutete Teufe	2	Entwässerungsbohrung 95 bis 206 m unter GOK, Mittelwert: 151 m unter GOK (Stadthöhe: 766 bis 877 m NHN, Stollnhöhe: 671 m NHN)	(Bergarchiv Freiberg, 1692; ENGELSCHALL, 1723)
Hohlraumvolumen	5	Haldengröße mit 7,7 Mio. m^3 angegeben. Auch nach Senkung kann auf einen großen, verbleibenden Hohlraum geschlossen werden.	(WISMUT GMBH, 2010; TELLER 2001; LAQUAI, 2015)
Risswerkkenntnis	4	Risswerk im Oberbergamt in Karten vorhanden.	(SOBA, 2024)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalie für das Revier den Autoren bekannt.	(LAQUAI, 2015; HOFFMANN, 2010b)
Wasserchemie	2	Nutzung des Grubenwassers kann strahlenschutzrechtliche Belange tangieren - Prüfung erforderlich.	(LFULG, 2023)
Zugänglichkeit	4	Zugang zum Grubengebäude und Grubenwasser ist durch Schaubergwerke gegeben. Der Großteil der Grube ist verwahrt.	(KRAUß, 2024; LFULG, 2023; TUBAF, 2024e)
Unter-Tage-Gesamtwertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,3		

4.10.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Johanngeorgenstadt hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 43,4 GWh/a (DBI GTI, 2023). Der Wärmebedarf konzentriert sich auf die Ortsteile Neustadt, Mittelstadt und Altstadt. Den Großteil an Abnehmern bilden Wohngebäude. Im östlichen Stadtgebiet, im Ortsteil Pachthaus, befinden sich in Bahnhofsnähe zahlreiche Industrie- und Gewerbebetriebe, unter anderem ein Eisenwerk. Westlich der Altstadt gelegen existiert ein weiteres Gewerbegebiet, mit entsprechend höherem Wärmeverbrauch. Insgesamt kann in der Gemeinde durch die geringere Dichte an Gebäuden ebenfalls eine geringe Wärmeabnehmerdichte festgestellt werden.

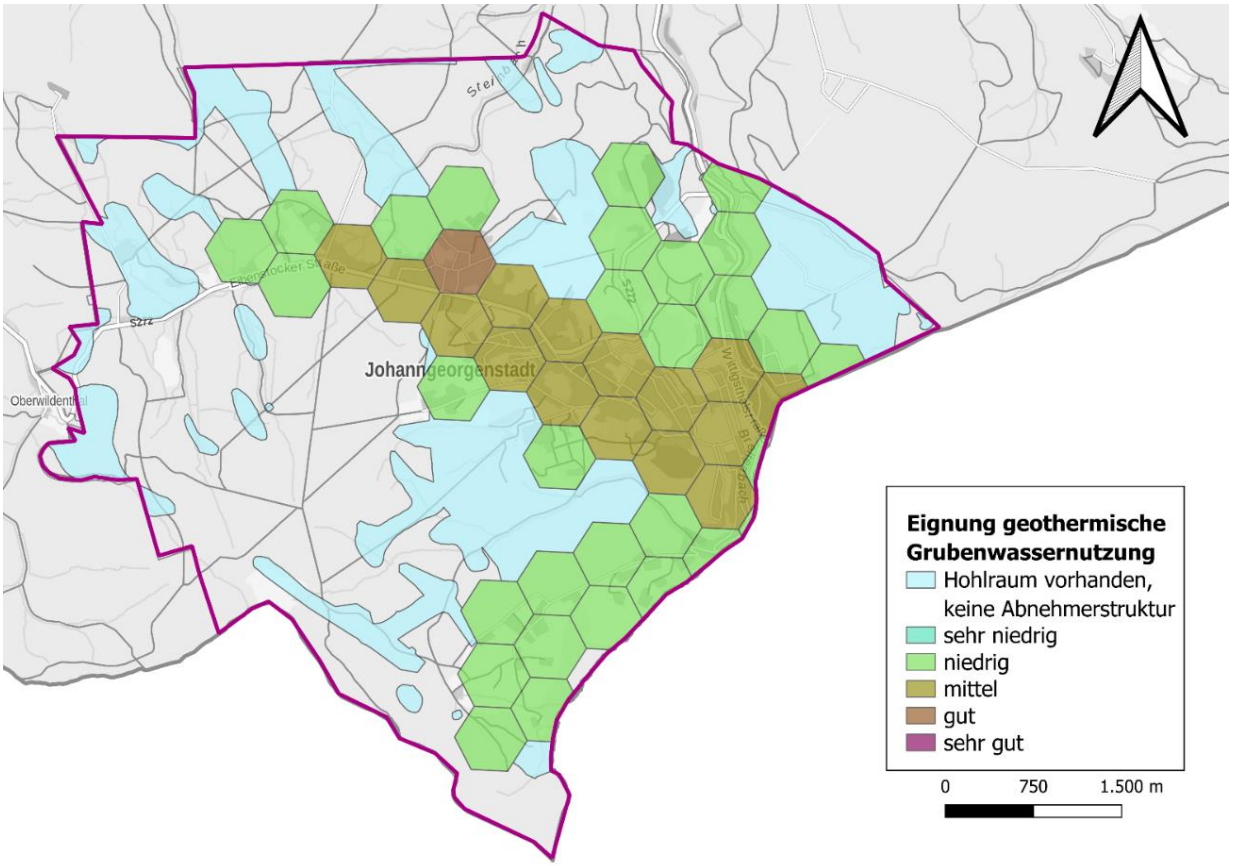


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 58: Übertägige Bewertung der Gemeinde Johanngeorgenstadt

4.10.3 Potenzial-Layer

Nach der Schlussfolgerung der übertägigen Bewertung der Abnehmerstrukturen aus Abbildung 58 ist ein Großteil der in Abbildung 59 anzutreffenden Ergebnisse des Potenzial-Layers abzuleiten. Durch die dünne Besiedlungsdichte der Gemeinde liegt an vielen Standorten ein niedriges Eignungspotenzial vor. Dort wo größere Wohngebiete bestehen, findet sich jedoch durch eine höhere Abnehmerdichte ebenfalls ein höheres Potenzial. Insbesondere entlang der Eibenstocker Straße zwischen Steinbach und der tschechischen Grenze finden sich so mittlere bis gute Eignungen für die Nutzung von Grubenwassergeothermie. Durch die großflächige Verfügbarkeit von untertägigen Hohlräumen besteht jedoch im Großteil des Gemeindegebiets generell eine Verfügbarkeit an Grubenwasser.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 59: Potenzial-Layer der Gemeinde Johanngeorgenstadt

4.10.4 Weiterführende Literatur

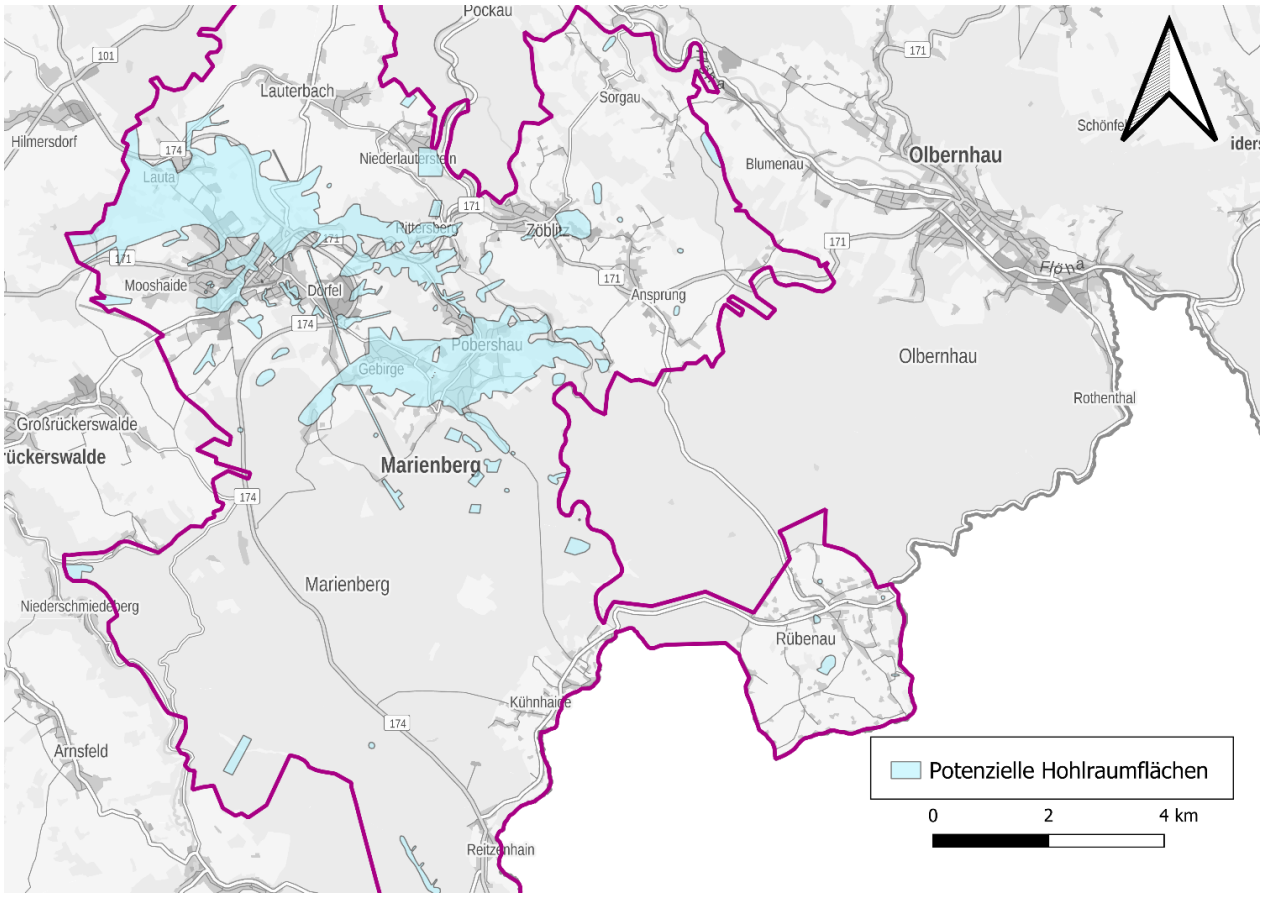
Neben den verwendeten Quellen ist keine weiterführende Literatur zum Thema Grubenwassergeothermie für den Raum Johanngeorgenstadt bekannt.

4.11 Marienberg

4.11.1 Untertägige Standortbewertung

Erste Bergbauversuche im Marienberger Revier können auf das späte 13. Jahrhundert datiert werden, was mitunter durch die Prägung von Silbermünzen aus lokal gewonnenem Silber begründet wurde (BOGSCH, 1933). Während sich erste Gruben im Gebiet Pobershau gegen 1484 urkundlich belegen lassen, blüht der Bergbau erst nach reichen Silberfunden im Jahr 1519 auf (MEYER, 2007). Die größte flächendeckende Ausdehnung der Gruben wird bereits Mitte des 15. Jahrhunderts vermutet, wobei sich das Revier von Wolkenstein im Westen bis zu Pobershau im Osten erstreckte. Der heute bedeutsamste Wasserlösungsstollen des Revieres, der "Weißtaubner Stollen", wurde um 1525 unter dem damaligen Namen "Fürstenstollen" in Auftrag gegeben. Er sollte nach Fertigstellung ca. 60 m tiefer liegen als der zuvor tiefste "Gläserstollen" und auf Niveau des später angelegten Schachts 302 eine Tiefe von etwa 107 m erreichen (ca. 513 mNHN) (MATTHES, 2007). Diese Teufe stellt seither ebenfalls das Entwässerungsniveau dar. Der gesamte Zulauf im Revier beträgt niederschlagsabhängig etwa 250 bis 2000 m^3/h (MATTHES, 2007; MEIER, 2013). Neben dem vorliegenden Altbergbau wurden im Marienberger Revier nach 1947 von der SAG Wismut neue Gänge zur Uranerschließung aufgefahren. Dabei wurden, wie in anderen Wismut-Revieren, die altbergbaulichen Strukturen genutzt, um die Erkundungen vorzunehmen. Das Streckensystem ist heute daher teilweise überprägt. Durch die Auffahrung tieferer Grubenteile gab es schon früh Grubenstrukturen, welche aufgrund ihrer Teufe nur über Kunstgezeuge entwässert werden konnten. Es gibt somit heute noch tiefe anstehende Wasserreservoire. Diese werden nach verfügbaren Risskarteninformationen überwiegend im Bereich der Weißtaubner Stollensohle zwischen dem Rudolphschacht und dem Wismutschacht 139 im Revierteil Lauta vermutet und umfassen etwa 35.000 m^3 (VEB BERGERKUNDUNG, 1989; LANDRATSAMT MARIENBERG, 1991). Bis in eine Teufe von 400 m ist mit einem geflutetem Gesamthohlraumvolumen von ca. 100.000 m^3 zu rechnen (OELSNER et al., 1988; LANDRATSAMT MARIENBERG 1991; VEB BERGERKUNDUNG, 1989). Dabei wird die Temperatur auf 10-12 °C geschätzt. Unter dem Stadtgebiet hin gegen sind die Wasserreservoire unter der Weißtaubner Stollensohle aufgrund der geringen Tiefe an darunter aufgefahrenen Strecken als limitierter beschrieben (VEB BERGERKUNDUNG, 1989). Eine potenzielle Nutzung des Grubenwassers ist insofern weiterhin günstig einzuordnen, da es als sehr gering belastet eingestuft wird. In der Entwässerungssohle besitzt das Wasser meist Trinkwasserqualität (OELSNER et al., 1988, LANDRATSAMT MARIENBERG, 1991; VEB BERGERKUNDUNG, 1989). Im Revierteil Lauta sind über die Bergbautätigkeiten zudem Thermalwassereinbrüche registriert worden, welche von Bergleuten teilweise zum Baden genutzt wurden. Hingegen sind diese Zutritte aufgrund der Flutung der Grube heute geothermisch nicht mehr direkt nutzbar, können jedoch potenziell auftretende Temperaturanomalien in Strecken im Bereich Lauta erklären (GRIMM et al., 2001).

In der nachfolgenden Abbildung 60 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 20 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 60: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Marienberg

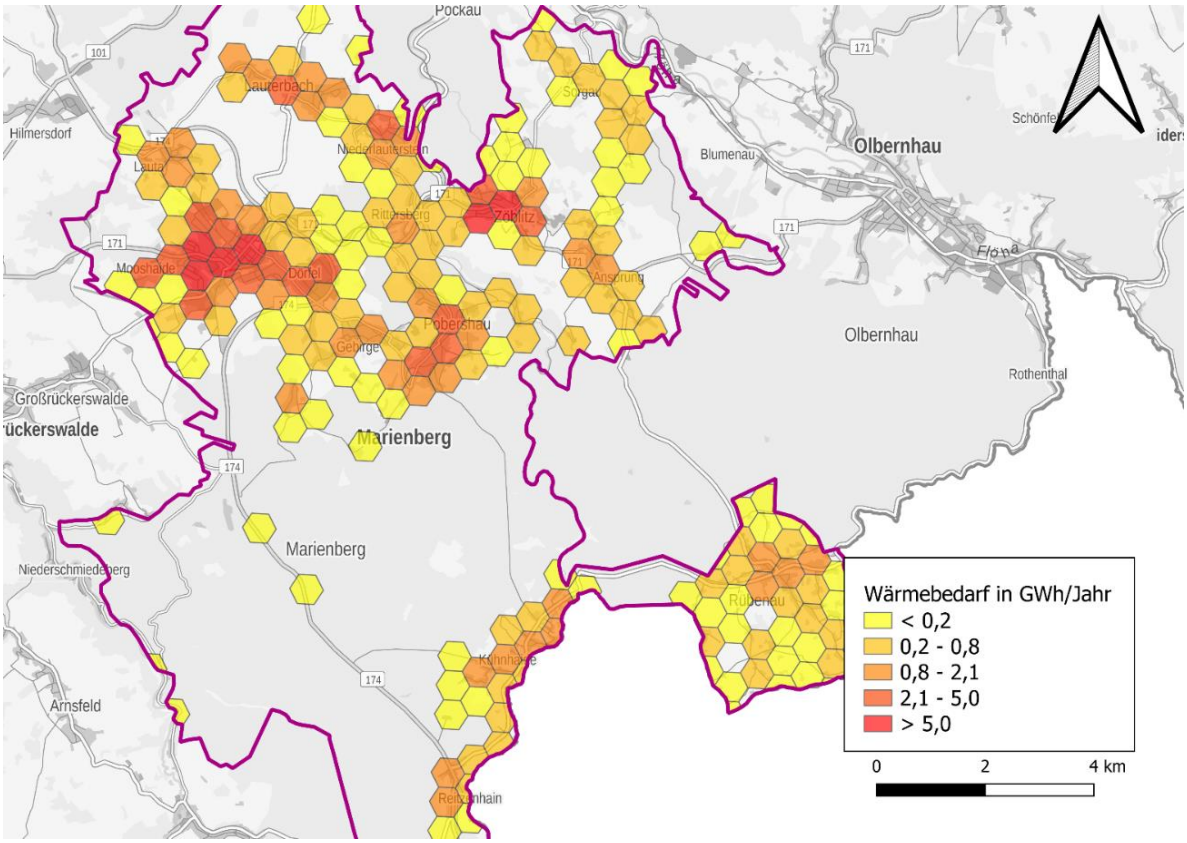
Tabelle 20: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Marienberg

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	5	Altbergbau überprägt vom Wismut-Berg-bau im 20. Jahrhundert.	(MEIER, 2013)
Entwässerungssystem	4	Königlich Weißtaubner Tiefer Erbstollen als Hauptwasserlösung mit Zulauf von 250 m^3/h bis 2.000 m^3/h.	(MEIER et al., 2006)
Geflutete Teufe	3	Im Schacht 302 befindet sich das Gruben-wasser 107 m unter GOK. Da am Schacht 302 die GOK eine Höhe von 617 m NHN aufweist und ein Flutungspegel in Höhe von 510 m NHN ansteht, kann die Höhen-differenz auf 100-150 m im Revier ge-schätzt werden.	(MEIER et al., 2006; GOOGLE 2023)
Hohlraumvolumen	4	Unter dem Weißtaubner Stollen besteht bis in eine Tiefe von 400 m NHN ein Flu-tungsvolumen von etwa 100.000 m^3. Tie-fere geflutete Grubenbaue existieren ebenfalls.	(OELSNER et al., 1988)
Risswerkkenntnis	4	Risswerke von Entwässerungsstollen sind digital und in gezeichneten Karten vorhanden.	(SOBA, 2024)
Temperatur	2	Keine Temperaturanomalien für das Re-vier bekannt. 12,4 °C sind im Weißtaub-ner Stolln nachgewiesen.	(MEIER et al., 2006)
Wasserchemie	5	Überwiegend Oberflächenwasser in der Weißtaubner Sohle mit Trinkwasserqua-lität.	(OELSNER et al., 1988)
Zugänglichkeit	4	Zugang unter anderem über den Weiß-taubner Stolln und Schacht 302 gegeben. Andere Grubenteile verwahrt.	(MATTHES, 2007)
Unter-Tage-Gesamt-wertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,9		

4.11.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Marienberg hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 183,5 GWh/a (DBI GTI, 2023). Der Wärmebedarf konzentriert sich auf das nördliche Gemeindegebiet, insbesondere auf die Kernstadt Marienberg und den Ortsteil Zöblitz. Die Kernstadt Marienberg ist überwiegend durch Wohnbebauung geprägt. Eine höhere Dichte an Industriebetrieben befindet sich im Osten der Stadt im Stadtteil Dörfel. Ein ähnliches Bild zeigt sich in Zöblitz. Der überwiegende Teil der Wärmeabnahme im Ort erfolgt durch

Wohngebäude. Vereinzelt gibt es Industriebetriebe, wie eine Metallwarenfabrik, die einen erhöhten Wärmebedarf haben. Die weiteren 14 Ortsteile von Marienberg sorgen für einen diffus über das Gemeindegebiet verteilten Wärmebedarf.



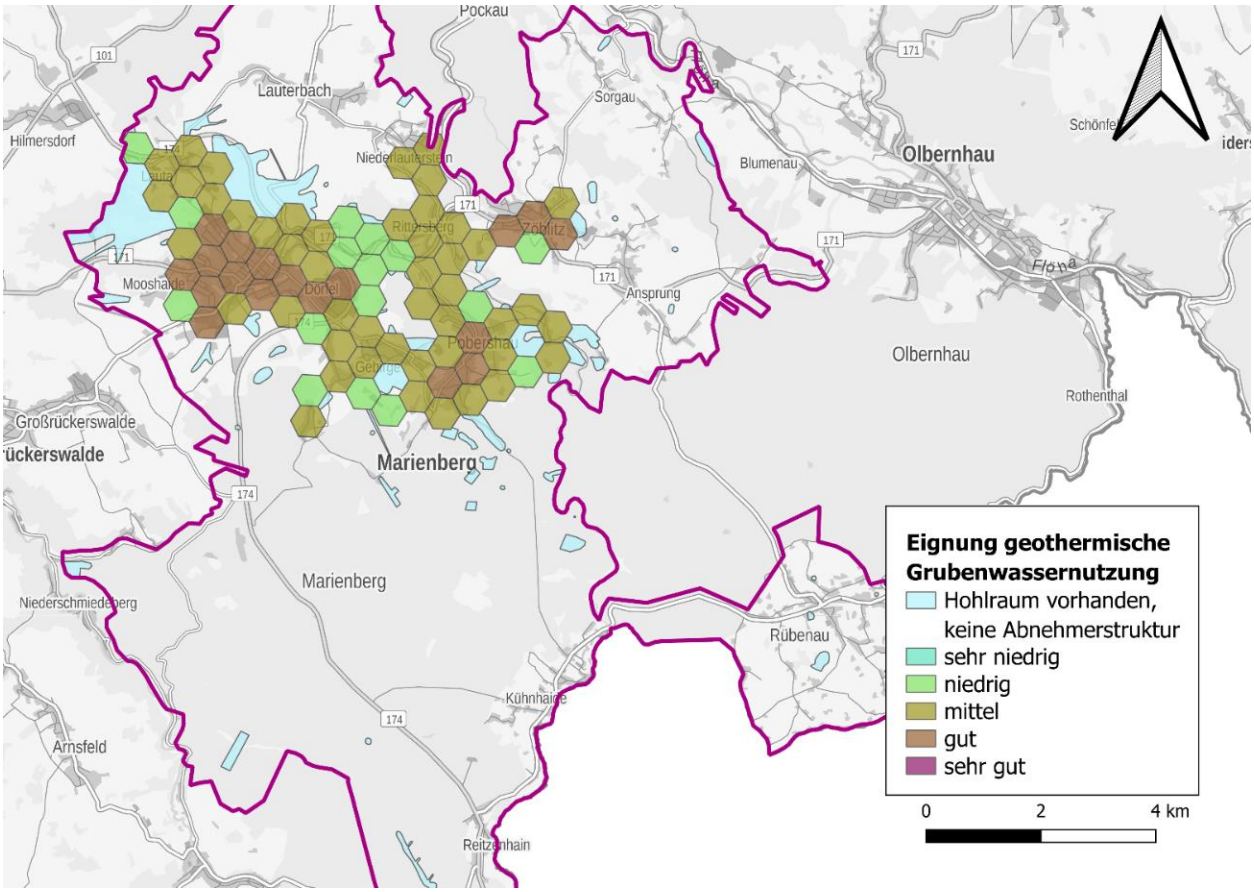
Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 61: Übertägige Bewertung der Gemeinde Marienberg

4.11.3 Potenzial-Layer

Abbildung 62 stellt nach der Bewertungsmethodik die Eignung der Grubenwassernutzung in der großen Kreisstadt Marienberg dar. Durch die relativ hohe Abnehmerdichte um den Rathausplatz und den Stadtteilen Dörfel und Zöblitz weisen diese demnach gute Eignungen für die Nutzung von Grubenwassergeothermie auf. Durch die großflächige Unterbauung ist ein weiterer Teil des Stadtgebiets generell geeignet und wird durch die Abnehmerstrukturen größtenteils als "mittel" bewertet. Dünner besiedelte Gemeindegebiete führen zu einem ungünstigeren Eignungspotenzial, wobei auch dort Einzelabnehmer im Spezialfall einen wirtschaftlichen Betrieb einer solchen Wärmeversorgungsanlage umsetzen könnten. Weiterhin gibt es Flächen, welche ohne Abnehmerstrukturen, jedoch mit einem Zugang zur Grube vorliegen. Dort könnte eine zukünftige Nutzung mit entsprechender Bebauung realisiert werden. Es ist essenziell zu beachten, dass durch den Datenbestand insbesondere die untertägigen Gegebenheiten

generalisiert wurden. Die untertägige Bewertung konnte daher nicht auf bereits bestehende Infrastruktur und potenzielle Zugänge gesondert und standortspezifisch eingehen.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 62: Potenzial-Layer der Gemeinde Marienberg

4.11.4 Weiterführende Literatur

Im Bereich des Marienberger Reviers wurden mehrere Untersuchungen zum geothermischen Nutzungspotenzial durchgeführt, wobei diese sich hauptsächlich auf den Revierteil Lauta beziehen. Die erste größere Studie wurde im Jahr 1988 angefertigt und befasst sich mit den Wassermengen im und um die Bereiche des Rudolphschachts und Schacht 139 (OELSNER et al., 1988). Von Risskarteninformationen der damaligen VEB Bergsicherung Schneeberg konnte eine Gesamtstreckenlänge bis zu einem Teufenbereich von 400 m NHN von etwa 50 km ermittelt werden. Zusammen mit einem angenommenen Querschnitt der Grubenbaue von 2 m² ergibt sich demnach ein geflutetes Hohlraumvolumen von 100.000 m³ unter der Entwässerungssohle. Im flacheren Bereich von 450 m NHN bis 490 m NHN ist nach derselben Methodik mit einem Volumen von ca. 33.000 m³ zu rechnen. Weiterhin wurden die Mengen des natürlichen Wasserzulaufs bestimmt, um eine permanente Entnahme zur Trinkwasserversorgung neben dem geothermischen Nutzen anzuregen. Der natürliche Zulauf beträgt etwa 60 m³/h was die maximal entnehmbare und nicht wieder rückführbare Wassermenge beschreibt. Geht man von einer Abkühlung auf

5 °C aus, so muss ein Teil des Wassers wieder rückgeführt werden, um einen Volumenstrom von größer als 60 m^3/h zu erschließen. In der Studie wird eine Wasserförderung von 600 m^3/h vorgeschlagen, was bei einer Einspeisung von 200 m unter der Rasensohle (ca. 400 m NHN) zu einer vernachlässigbaren Temperaturänderung in diesem Teufenbereich (Temperaturniveau 14 °C) führt. Wichtig ist hierbei, dass diese Schlussfolgerung durch eine sehr einfache analytische Abschätzung anhand eines Rechenbeispiels für den Temperaturausgleich an einer unendlich ausgedehnten Platte vorgenommen wurde. Eine genauere Berechnung dieses Falls, um die getroffene Vermutung zu bestätigen ist daher zu empfehlen. Die Förderung und Rückführung wurde am Rudolphschacht (Schacht 45) empfohlen, wobei das Grubenwasser mit den Verdampfern der Wärmepumpen durch die hohe Grubenwassergüte in direkten Kontakt kommen könnte. Diese Aussage ist ebenfalls nach heutigem Kenntnisstand als kritisch zu bewerten, da Ablagerungen doch immer anzutreffen sind und können diese in teuren Bauteilen wie einer Wärmepumpe zu einem Kostenrisiko führen. Ein Zwischenkreislauf mit Wasser oder Sole sollte daher auch dort implementiert werden. Zusammenfassend wurde ebenfalls auf zwei Versorgungsvarianten für potenzielle Abnehmer hingewiesen (Wohngebiet "Mühlberg" sowie das ehemalige Objekt der NVA). Beide Varianten beinhalten eine vollständige Deckung des Heizenergiebedarfs bis zu Außentemperaturen von 0 °C was mit einer maximalen Leistung von ca. 4-5 MW einhergeht. Bei Temperaturen unterhalb 0 °C wird empfohlen, die Energie zur Vorwärmung vorhandener Fernwärmenetze zu verwenden und so weitere Einsparpotenziale an Gas zu erschließen. Die von der vorangegangenen Studie beschriebenen Umstände wurden von einem der Autoren in einer nachfolgenden Dissertation aufgegriffen, aus der sich zusätzliche Details ergeben (HUBER, 1990). So wird beschrieben, dass zur Vermeidung eines thermischen Kurzschlusses das Grubenwasser nach der Entnahme aus dem Rudolphschacht in den Schacht 139 alternierend auf dem Niveau der Sohlen 3 und 5 eingespeist werden sollte. Dies erschließt eine größere thermische Masse an Wasser und Gestein und führt zu einem sicheren, langfristigen Betrieb. Dazu wurde eine Sümpfung und eine Installation der Rohrleitungen direkt im Schacht vorgeschlagen. Eine Turbine kann die Fallhöhe des Wassers zur teilweisen Rückgewinnung der Umlaufenergie in der übertägigen Grubenwasserleitung nutzen.

Die nächste Untersuchung analysierte die Grubenbaue im Revierteil Lauta im Jahr 2001 (GRIMM et al., 2001). Dieser Grubenteil wurde nach dem Ende des Wismutbergbaus 1955 bis 1958 zur Flussspatgewinnung genutzt. Der anschließende Flutungsprozess vollzog sich bis 1963, wobei sich der Flutungsspiegel auf dem Niveau des Weißtaubner Stollens einstellte. Eine Übersicht der Grubenbaue wird in Abbildung 63 gegeben. Zum verfügbaren Hohlraumvolumen wurde auf die in Quelle (HUBER, 1990) vorhandenen Angaben verwiesen. Die Temperaturen im Reservoir wurden als für die Tiefenstufe üblich eingeschätzt, wobei der Einfluss potenziell zusitzender Thermalwässer schwer zu quantifizieren ist. In der Studie wurde der Standort mit verschiedenen Kriterien bewertet, welche in

Tabelle 21 dargestellt sind.

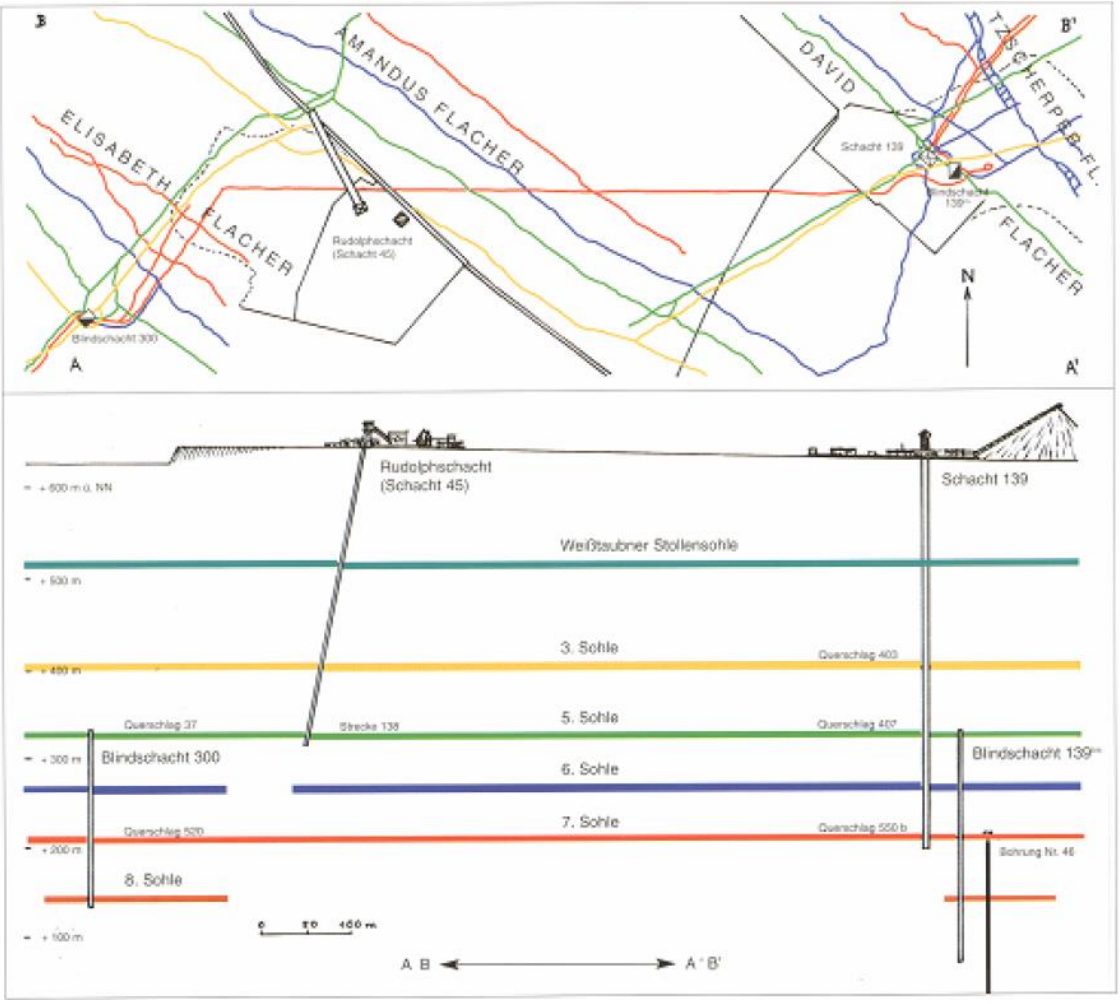


Abbildung 63: wichtigste Strecken zwischen Rudolphschacht (Schacht 45) und Schacht 139, Seigerriss zeigt die Schnittfläche von A-B zu A´-B´ zum Jahre 1955 aus (GRIMM et al., 2001)

Tabelle 21: Bewertung des Revierteils Lauta in Marienberg für die geothermische Grubenwassernutzung (GRIMM et al., 2001)

Kriterien		**Bewertung (3 höchste)**
Natürlich	Reservoir	1,5
	Fläche	1,5
	Tiefe	1,5
	Temperatur	3
	Summe	**7,5**
Technisch	Nutzung	3
	Chemie	2
	Radiologie	2
	Summe	**7,0**
Wirtschaftlich	Infrastruktur	2,5
	Bedarf	1,5
	Entfernung	1,5
	Summe	**5,5**
	Gesamtsumme	**20 (max. 36)**

Eine nähere Erklärung zu dem genauen Bewertungsvorgang ist in der Studie nicht vorhanden. In der Bewertung erreichte der Revierteil Marienberg somit den 11. Platz der in der Studie untersuchten 48 Standorte.

Durch die Vorstudien wurde in den folgenden Jahren ein Grubenwasserprojekt am Schacht 139 angestoßen, um ein lokales Hallenbad und einen Supermarktkomplex zu versorgen. Dazu wurden in den Jahren 2006, 2007 und 2013 Untersuchungen zur Erschließung dieses Standortes durchgeführt (MEIER et al., 2006; MATTHES, 2007; MEIER, 2013). Diese bezogen sich hauptsächlich auf die generelle Bewertung des Standorts und den Erschließungsprozess, da der Schacht neu aufgewältigt und Anlagentechnik installiert werden musste. Diese wurde mit Beginn im Oktober 2009 auf Niveau des Weißtaubner Stollens errichtet, wobei eine Wärmeübertragerstation direkt über dem Flutungsniveau eingerichtet wurde, um den Pumpaufwand minimal zu halten. Der für die Anlage benötigte Volumenstrom belief sich auf 120 m^3/h, wobei dieser aus dem kontinuierlichen Entwässerungsstrom des Stollens entnommen wurde und welcher auch in niederschlagsarmen Zeiten nachgewiesen wurde. Die Platzierung der Anlagentechnik wurde so gewählt, dass schwankende Flutungsstände keine Gefahr für den Betrieb darstellten. Ein Querschnitt der Anlage sowie ein Bild der installierten Technik unter Tage sind jeweils in Abbildung 64 und Abbildung 65 dargestellt. Bei einer Abkühlung von 10 °C auf 5 °C kann somit eine Wärmeleistung von ca. 700 kW erschlossen werden. Die Wärme wurde über einen Sekundärkreislauf über Tage geleitet und dem Wärmeabnehmer zugeführt. Diverse Gründe führten dazu, dass die Anlage wieder demontiert wurde. Konkrete Stellungnahmen konnten dazu nicht gefunden werden und Kommunikationsversuche mit den Verantwortlichen waren nicht erfolgreich. Eine genauere Übersicht der möglichen Ursachen für einen unwirtschaftlichen Betrieb sind in Kapitel 6 aufgeführt. Es verbleibt zum heutigen Kenntnisstand ein gesicherter Schacht, welcher zur Befahrung des Weißtaubner Stollens genutzt werden kann und der weiterhin die Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung erfüllt.

Eine weitere Nutzung des Grubenwassers stellt die Geothermieanlage am Standort „Weiße Villa“ in Pobershau dar. Hierbei wird Wasser aus dem Walfisch-Stollen genutzt, welcher sich an dieser Stelle in 12 m Teufe befindet. Mithilfe von PE-Sonden (Gesamtlänge 200 m) wird eine Leistung von 15 kW zur Beheizung eines Zweifamilienhauses bereitgestellt (LAGERPUSCH, 2010).

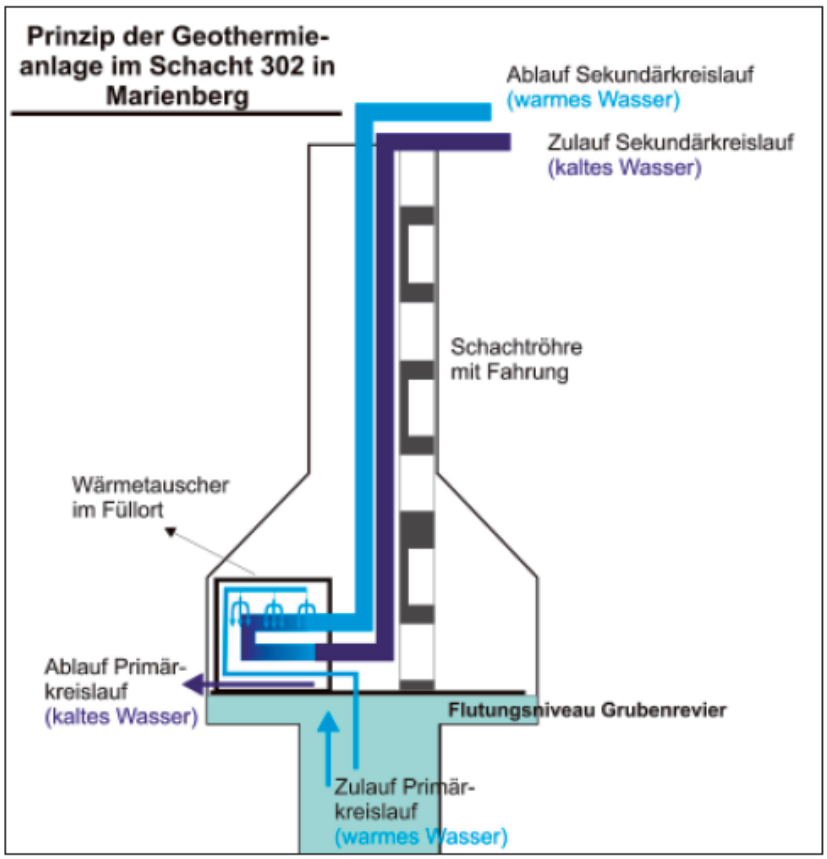


Abbildung 64: Prinzipskizze der Grubenwasseranlage am Schacht 139 (MATTHES, 2007)

Abbildung 65: Wärmeübertrager und Anlagentechnik unter Tage der Grubenwasseranlage am Schacht 139 im installierten Zustand (MATTHES, 2007).

4.12 Oelsnitz im Erzgebirge

4.12.1 Untertägige Standortbewertung

Die Steinkohleförderung im Revier Lugau/Oelsnitz begann Mitte des 19. Jahrhunderts, nachdem ein ausstreichendes Kohleflöz bei übertägigen Bauarbeiten im Bereich Neu-Oelsnitz freigelegt wurde (LFULG, 2010). Durch das geringe Alter des Großteils des Reviers ist die Informationslage um die aufgefahrenen Grubenstrukturen als positiv zu bewerten. Durch das Einfallen des Vorkommens in westlicher Richtung wurde der Bergbau im Laufe der Gewinnungsarbeiten in größere Teufenbereiche verlagert. Bis 1879 wurden somit teilweise Schachtteufen von 840 m realisiert (VOGEL, 1993). Insbesondere unter dem Stadtgebiet von Oelsnitz erstrecken sich die aufgefahrenen Grubenstrukturen von einer Teufe von ca. 400 m bis zu den vorgenannten 840 m, was einer Höhe von -60 m bis -444 m NHN entspricht (JAHNS, 2018). Ein Schema der Grubenstrukturen ist in Abbildung 66 dargestellt.

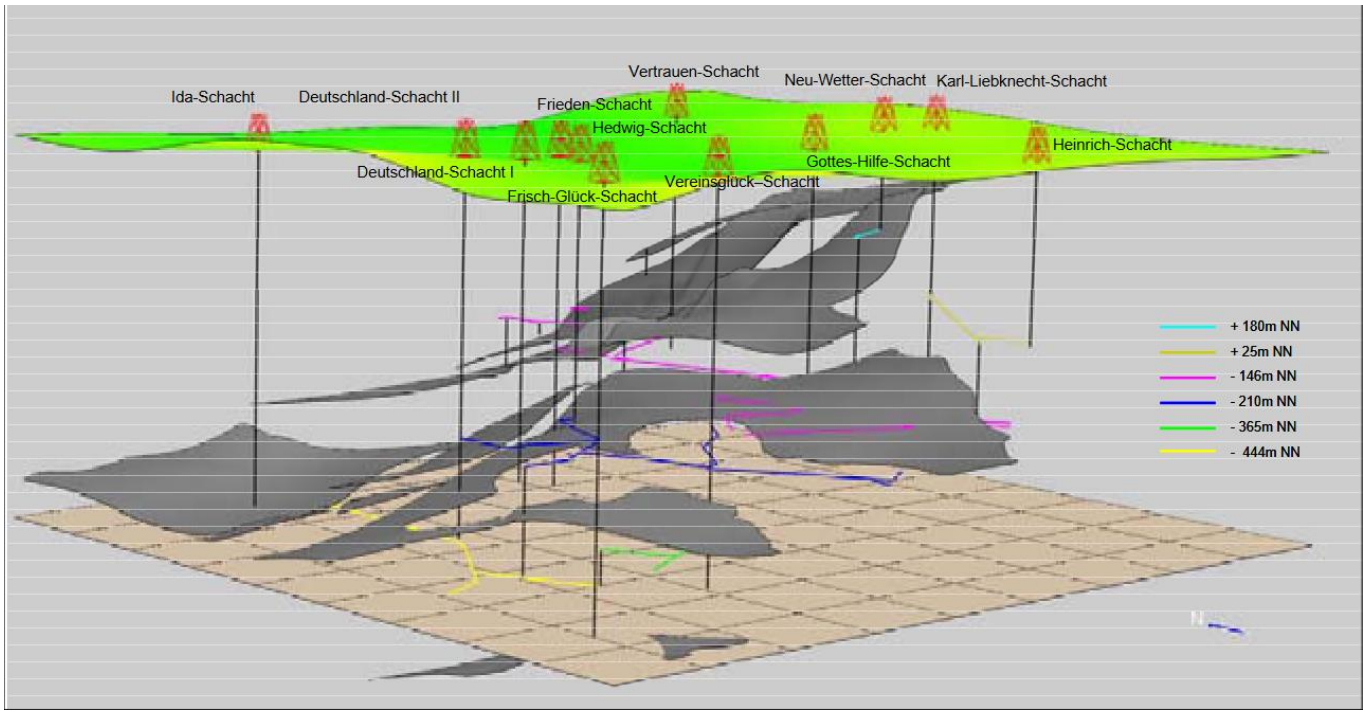
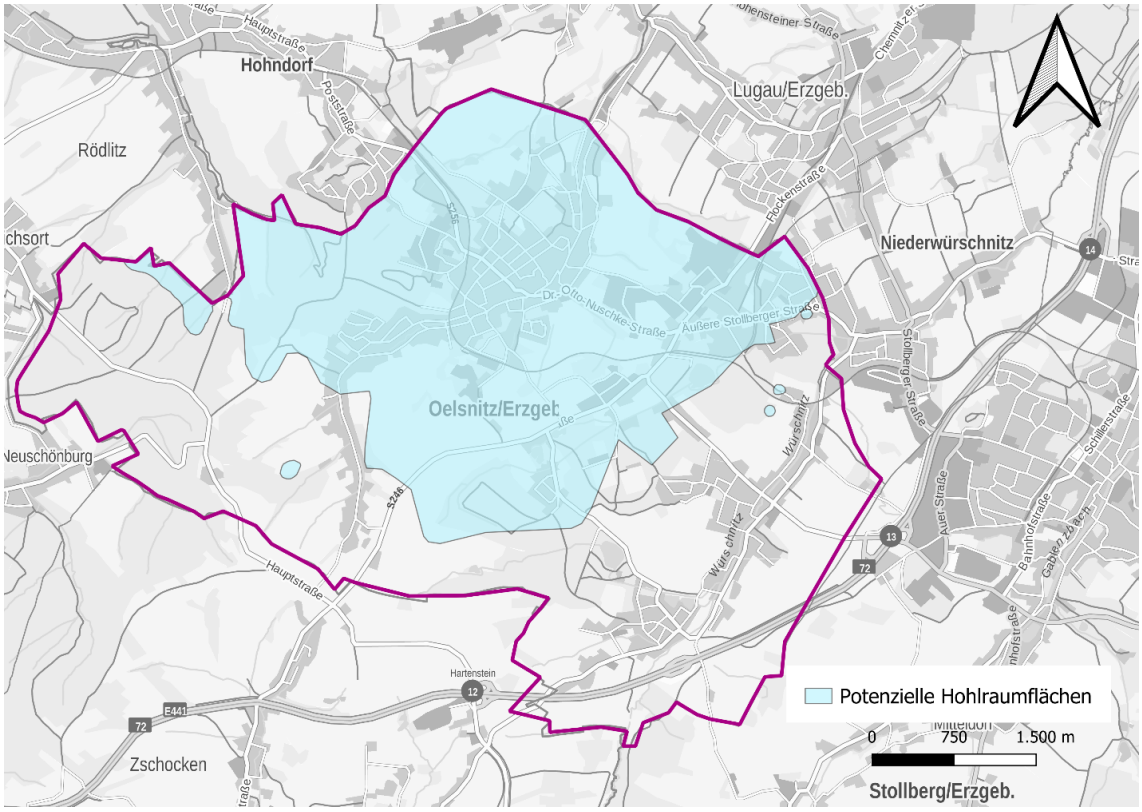


Abbildung 66: Schematische Darstellung des Grubengebäudes im Bereich Oelsnitz (LFULG, 2010)

Die Flutung der Grube ist noch nicht abgeschlossen und wird voraussichtlich 2032 ihren Endstand erreichen. Durch die Gefahr des Zutagetretens des Grubenwassers muss bis zu diesem Zeitpunkt ein Entwässerungskonzept erstellt werden. Da das Revier keine natürlichen Entwässerungsstollen besitzt, muss das Grubenwasser aktiv gepumpt und gegebenenfalls aufbereitet werden, bevor es abgeschlagen werden kann. Dies bietet eine Chance zur Mehrwertgenerierung durch eine wärmetechnische Nutzung, wodurch die Pumpkosten teilweise kompensiert werden können. Um den Anstieg des Grubenwassers zu überwachen, wurden in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen zum Grubengebäude durchgeführt. Dementsprechend besteht eine gute Kenntnis über die Schächte und aufgefahrenen

Strecken. Diese sind sowohl in Karten als auch vektorisiert vorhanden und bieten eine gute Basis für eine potenzielle Erschließung. Durch die Informationslage ist ebenfalls bekannt, dass durch den Bergbau ein Hohlraum von 150 Mio. m^3 geschaffen wurde. Nach der Einbringung von Versatzmassen und Verbrüchen sowie Senkungen verbleiben heute davon etwa 47 Mio. m^3 Resthohlraum (LFULG, 2010). Wird eine Grubenwassernutzung durch Erschließung des Grubengebäudes forciert, so können neben den Strecken auch die Schächte über Bohrungen erschlossen werden. Als Vorteil bieten die Schächte eine geringere Bohrtiefe, nachteilig ist der oft schwer ermittelbare Zustand der Schachtröhre zusammen mit deren Verfüllung (GRAB et al., 2024). Informationen diesbezüglich sollten in jedem Fall von Fachkundigen vor Ort eingeholt werden. Weiterhin sollte beachtet werden, dass das Revier hydraulisch nicht als vollständig verbunden gewertet werden kann. Es wird eingeteilt in einen westlichen und in einen östlichen Teil, die unterschiedliche Grubenwasserflutungsstände besitzen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass beide Teile nur schwach miteinander hydraulisch kommunizieren. Daher könnten sich auch im Chemismus und der natürlichen Bewegung der Grubenwässer Unterschiede zwischen den Revierteilen ergeben. Die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus einem Revierteil auf den anderen sollte somit kritisch betrachtet werden.

In der nachfolgenden Abbildung 67 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 22 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

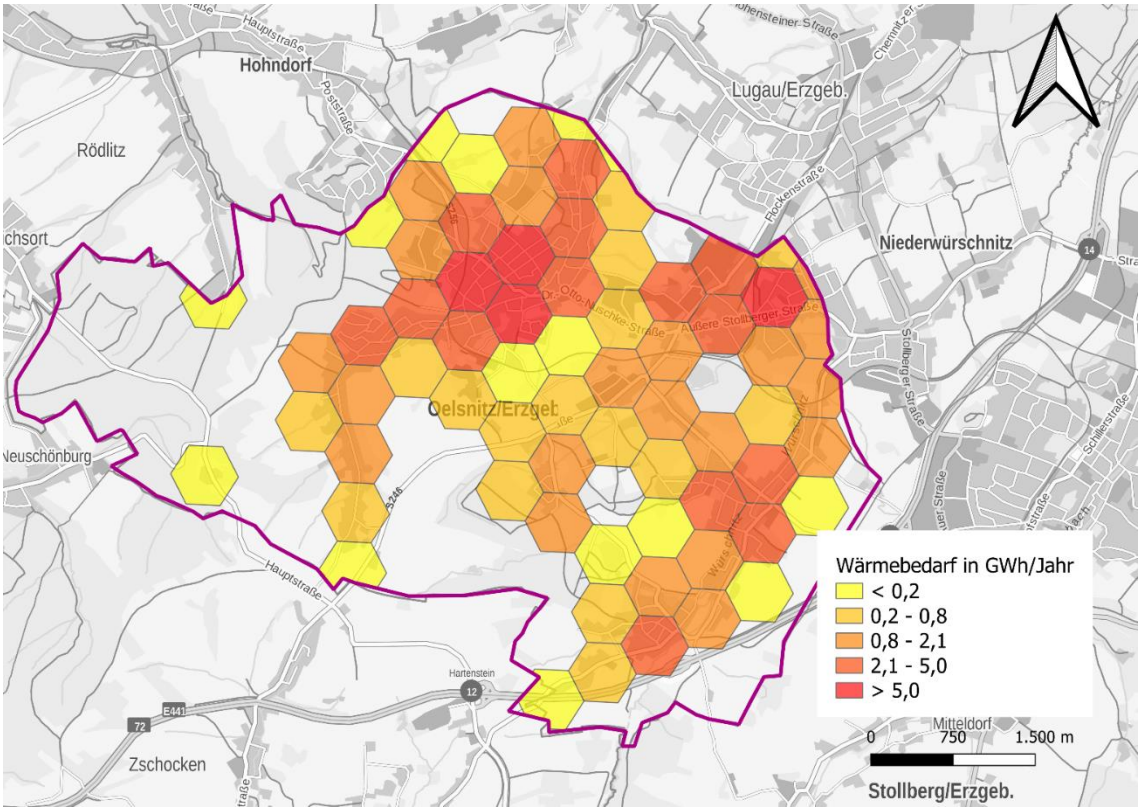
Abbildung 67: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Oelsnitz im Erzgebirge

Tabelle 22: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Oelsnitz im Erzgebirge

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	4	1844 Beginn der Abbautätigkeit (zunächst oberflächennah). Betrieb der letzten Schächte bis 1971.	(LFULG, 2010)
Entwässerungssystem	1	Bisher nicht vorhanden. Flutungswasser muss nach Erreichung des finalen Standes zur Gefahrenabwehr abgepumpt werden.	(LFULG, 2010)
Geflutete Teufe	5	Durch Flutung bis Tagesoberfläche in Schächten ist das Grubenwasser gut erschließbar. Strecken jedoch in -146 m NHN bis -444 m NHN)	(LFULG, 2010)
Hohlraumvolumen	5	Trotz massiver Senkungen verbleibt ein Resthohlraum von etwa 47 Mio m^3.	(SOBA, 2018)
Risswerkkenntnis	5	Risswerk als Scan und Vektorlayer verfügbar.	(TUBAF, 2022a)
Temperatur	1	Konvektion im Grubengebäude ist nicht zu erwarten und es lässt sich somit nicht auf Temperaturanomalien schließen.	(LFULG, 2010)
Wasserchemie	4	Durch fehlende Konvektion im Grubengebäude kann von schwacher Mineralisation im oberflächennahen Abgreifbereich ausgegangen werden.	(LFULG, 2010)
Zugänglichkeit	2	Schächte gesichert und verwahrt. Messbohrungen bestehen.	(LFULG, 2010)
Unter-Tage-Gesamtwertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,3		

4.12.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Oelsnitz/Erzgebirge hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 104,6 GWh/a (DBI GTI, 2023). In der Stadt Oelsnitz ist der Wärmeverbrauch am höchsten. Im Stadtgebiet befinden sich überwiegend Wohngebäude mit vereinzelten Industrie- und Gewerbebetrieben. Im östlich gelegenen Stadtteil Neuoelsnitz befindet sich ein großes Gewerbegebiet am Turley-Ring. Hier befinden sich eine Schwimmhalle, Schulgebäude und verschiedene Produktionsbetriebe. Der restliche Wärmebedarf im Gemeindegebiet entfällt ausschließlich auf Wohngebäude, wobei sich eine größere Konzentration im östlich gelegenen Ortsteil Neuwürschnitz befindet.

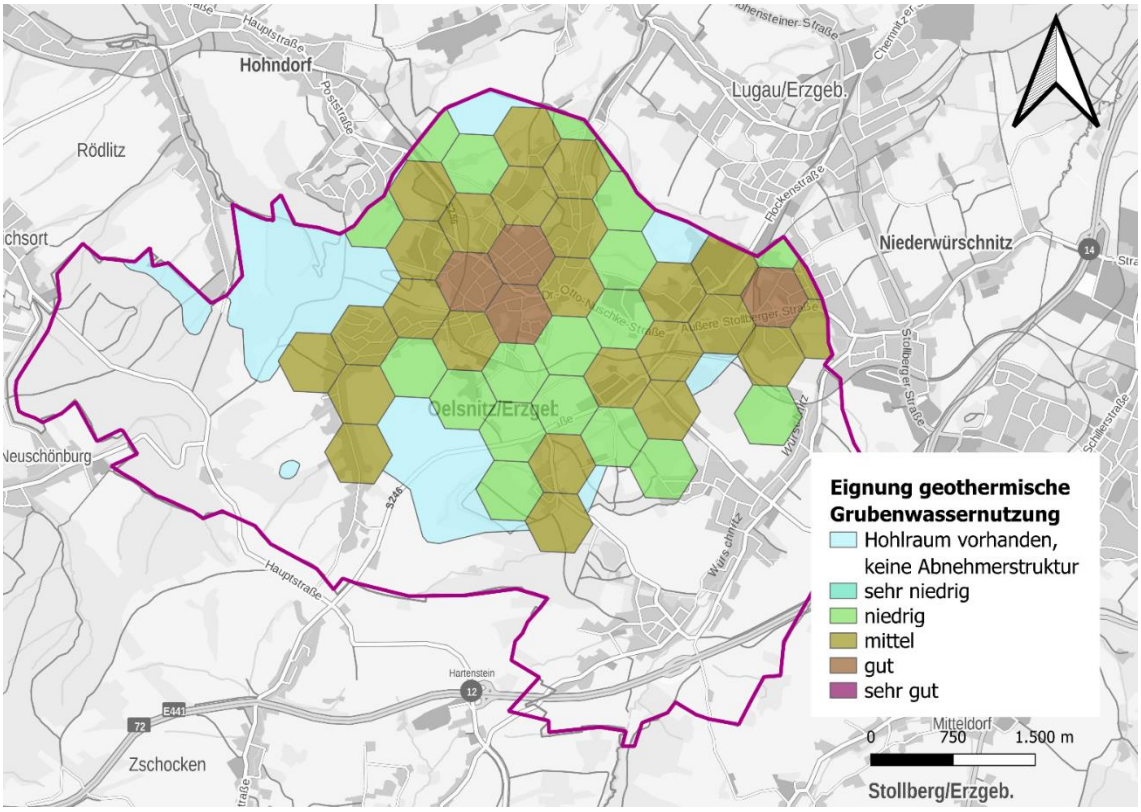


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 68: Übertägige Bewertung der Gemeinde Oelsnitz im Erzgebirge

4.12.3 Potenzial-Layer

Die Bewertung nach der Methodik für das Eignungspotenzial in den Rasterzellen ist in Abbildung 69 erkennbar. Auch in der Gemeinde Oelsnitz/Erzgebirge ist ein treibender Faktor hinter dieser Bewertung die Abnehmerdichte der Stadtteile. Durch die Ansammlung an Abnehmern aus dem Wohnsektor, eignet sich der Bereich des Stadtzentrums entlang der Bahnhofsstraße gut für eine Wärmeversorgung mit Grubenwasser. Die Eignung der umliegenden Gebiete ist stark vom Grad der Bebauung abhängig und sinkt mit abnehmender Bebauungsdichte. Hervorzuheben ist, dass die Bewertungsmethodik keine standortabhängigen Streckentiefen erfasst. Dies führt dazu, dass im Stadtteil Neuoelsnitz die flacheren Grubenbaue, verglichen mit dem Rest des Revieres, nicht gesondert als Vorteil in der Bewertung einbezogen werden. Auch sind potenzielle Wasserabgriffstellen durch Messbohrungen oder künftige Wasserhaltungsanlagen nicht mit einbezogen. Diese können je nach Lage in der Stadt das hier ausgeschriebene Eignungspotenzial positiv beeinflussen.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 69: Potenzial-Layer der Gemeinde Oelsnitz im Erzgebirge

4.12.4 Weiterführende Literatur

Das Oelsnitzer Revier wurde als ein Untersuchungsstandort in einer frühen Grubenwasserstudie für Sachsen gewählt (GRIMM et al., 2001). Oelsnitz wurde jedoch mit Zwickau zusammen betrachtet, was zu einer geringeren Detailtiefe der Auswertung des Standorts führt. Insgesamt wurde die Datenlage um das Oelsnitzer Revier als schwierig eingeschätzt und es konnten nur wenige Quellen ausfindig gemacht werden, welche für die Einschätzung einer geothermischen Nutzung der Grubenwässer verwendet werden konnten. Es wird darauf hingewiesen, dass die voranschreitende Flutung des Grubengebäudes die Chance bietet, Anlagentechnik in den später gefluteten Bereichen zu installieren. Dies ist aus heutiger Sicht bezüglich des Verwahrungszustandes des Grubengebäudes jedoch kritisch zu bewerten. Aufgrund des Fokuses auf dem Standort Zwickau in der kombinierten Betrachtung, werden im Folgenden keine Ergebnisse der Bewertung für den Standort Oelsnitz aus der Studie dargestellt.

2007 wurde vom Landesamt für Umwelt und Geologie, der Geothermie Neubrandenburg GmbH sowie von der TU Bergakademie Freiberg eine detaillierte Studie zum geothermischen Potenzial des Grubengebäudes Lugau/Oelsnitz angefertigt (FELIX et al., 2007). In Teufen von etwa 600 m wird von einer Tem-

peratur zwischen 25 und 27 °C ausgegangen. Dabei wird von einer Grubenwasserneubildung von lediglich etwa 30 m^3/h durch oberflächlich eingetragenes Wasser in das gesamte Grubengebäude ausgegangen.

In der Studie wurden folgende Versorgungsgebiete in der Stadt Oelsnitz hinsichtlich ihres maximalen Wärmebedarfs aufgeschlüsselt:

Tabelle 23: Benötigte Wärmeleistung verschiedener Versorgungsgebiete im Stadtgebiet Oelsnitz/ Erzgebirge, entnommen aus FELIX et al. (2007)

Nr.	Versorgungsgebiet	max. erforderliche Heizleistung in kW
1.	Am Rathaus	433
2.	Gabelsberger Straße	448
3.	Schumann-Straße	933
4.	Badstraße	1.609
5.	Lugauer Straße	111
6.	Am Bergbaumuseum	700
7.	Pflockenstraße	104
8.	Emmrich-Straße	180
9.	Kaisergrubenstraße	150

Für die Erschließung des geothermischen Reservoirs des Bergwerks werden verschiedene Szenarien behandelt, mit Hilfe derer die oben genannten Stadtgebiete beheizt werden könnten. Die erste Variante bildet die Wasserentnahme mittels einer Bohrung mit Zielpunkt im Füllort des Karl-Liebknecht-Schachtes auf der -146 m-Sohle, was einer Teufe von 561 m entspricht. Die Wässer sollen in einem offenen System über Tage gehoben werden und nach energetischer Nutzung in den Hegebach entlassen werden. Nachteilig wirkt hierbei, dass das Wasser, je nach Flutungsspiegel, über eine große vertikale Entfernung gehoben werden müsste. Weiterhin kann mit dieser Verfahrensweise nur so viel Wasser aus der Grube genutzt werden, wie durch Neubildung zur Verfügung steht (ca. 30 m^3/h). Außerdem bedarf die Einleitung des Wassers in Oberflächengewässer einer zusätzlichen Reinigung. Eine weitere Nutzungsmöglichkeit besteht darin, das Wasser nach der thermischen Nutzung nicht oberflächlich abzuleiten, sondern der Grube mithilfe einer Reinjektionsbohrung wieder zuzuführen. Hierfür ist eine ausreichend hohe hydraulische Kommunikation mit der Entnahmestelle sowie eine entsprechende Regenerationszeit zur Erwärmung des abgekühlten Wassers erforderlich. Die Förderbohrung wird hierbei ebenfalls am Karl-Liebknecht-Schacht an der -146 m-Sohle eingerichtet. Die Einleitung in einer Schluckbohrung besitzt den Vorteil, dass größere Wassermengen genutzt werden können. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass eine weitere Bohrung abgeteuft und zusätzliche Rohrleitungen für den Wassertransport installiert werden müssten. Hierbei wird in der Konzeptstudie von einer horizontalen Entfernung von

140 m und 830 m in einer weiteren Variante ausgegangen. Mit den beiden oben genannten Szenarien könnten laut der Studie die Gebiete 6 und 7 versorgt werden.

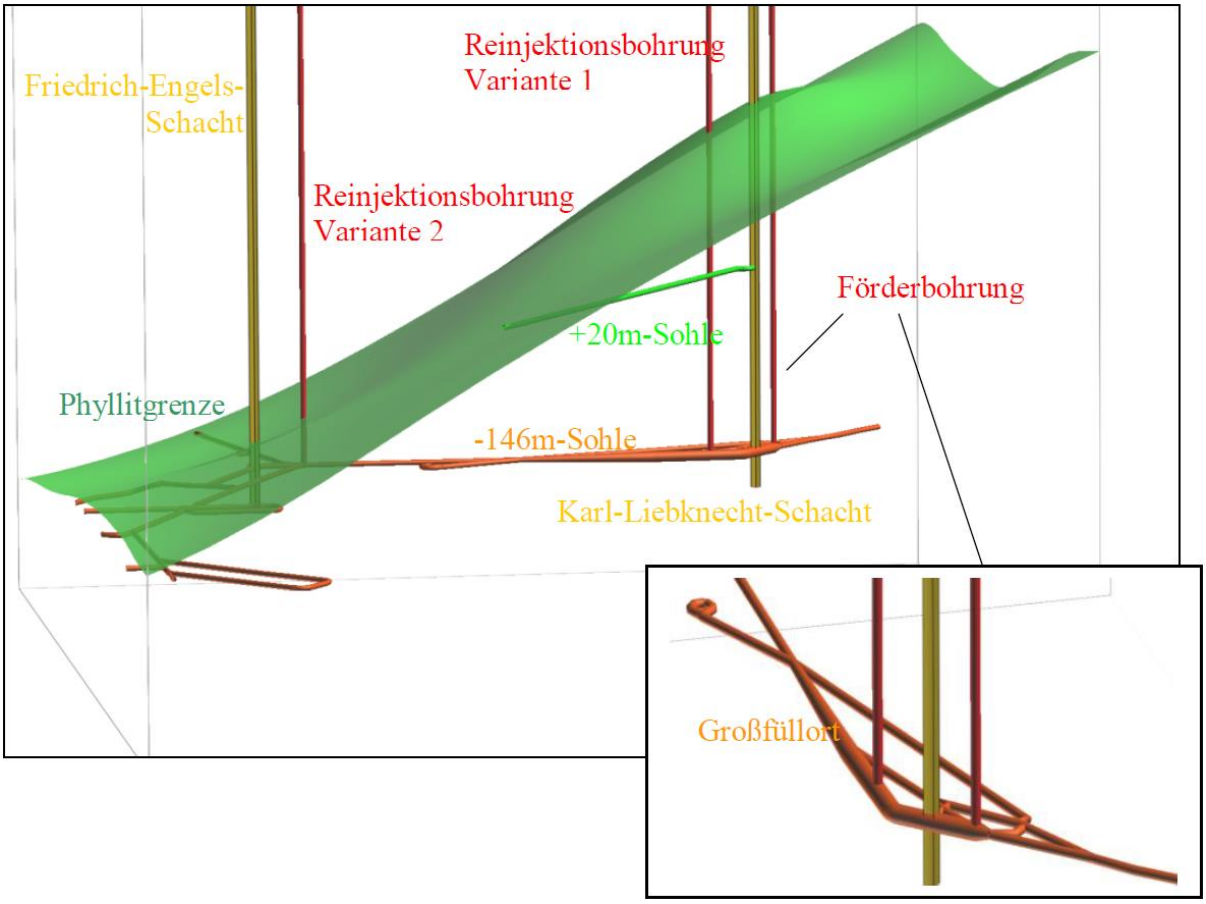


Abbildung 70: Darstellung der mit dem Grossfüllort kommunizierenden Auffahrungen im Phyllitbereich im östlichen Grubenfeld nach FELIX et al. (2007)

Für das Siedlungsgebiet 1 wird die Einbringung einer Förder- und einer Schluckbohrung auf der -146 m-Sohle im Streckenbereich Mitteloelsnitz und im Bereich Vereinsglück-Schacht in Erwägung gezogen. Eine Versorgung von Gebiet 9 ist nach vollständiger Grubenflutung mithilfe einer natürlichen Entwässerung der Grube und einer Einleitung des gereinigten Wassers in den Hegebach denkbar. Nach einer Prognose erreicht der Wasserspiegel im Jahr 2032 seine Endhöhe, wodurch das Wasser ohne großen Pumpaufwand zur Verfügung steht. In diesem Szenario wird das Reservoir über eine 629 m tiefe Bohrung erschlossen, welche ihren Zielpunkt im Bereich des 1,7 m mächtigen Glück-Auf-Flöz besitzt. Zusätzlich zu den technischen Realisierungsmöglichkeiten wird eine wirtschaftliche Abschätzung der oben vorgestellten Szenarien gegeben. Die detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen können der Originalstudie entnommen werden. Das Fazit ist, dass beim damaligen Flutungsstand kein wirtschaftlicher Betrieb einer Grubenwassergeothermieanlage möglich ist, da für die Wasserhebung zu hohe Energiekosten entstehen. Eine Grubenwassergeothermieanlage sollte somit in zeitlicher Nähe zum Flutungsendstand installiert werden (FELIX et al., 2007).

Aufgrund des fortgesetzten Interesses der lokalen Gemeinden und der Notwendigkeit einer Wasserhaltungslösung wurde der Standort in einem Forschungsprojekt mit Beginn im Jahr 2022 erneut untersucht (GRAB et al., 2024). Das Projekt "MareEn" hatte den Schwerpunkt, für die Gemeinden Oelsnitz, Lugau, Gersdorf und Hohndorf die Abnehmerstrukturen zu untersuchen und unter Tage potenzielle Grubenwasserreservoire ausfindig zu machen. Mit diesen sollten Versorgungskonzepte für den übertägigen Bedarf abgeleitet werden. Diese wurden in Form von 10 Standortsteckbriefen angefertigt. Diese beinhalten die Streckengeometrien sowie die daraus gewinnbare theoretische Heizleistung. Zusammen mit dem Bedarf konnten Wärmenetze ausgelegt, Deckungsgrade berechnet und wirtschaftliche Kennwerte abgeschätzt werden. Was besonders hervorsticht ist der prägnante Einfluss von Sekundärströmungen unter Tage, hervorgerufen durch eine Ausgleichsbewegung im Grubengebäude sowie der Förderenergie der Anlage selbst. Schon geringe Anteile an zusätzlich strömendem Wasser führen zu einer signifikanten Erhöhung der gewinnbaren Energie. Die Untersuchung verdeutlichte, dass es wichtig ist, zunächst konservativ ohne zusätzliche Strömungen zu rechnen. Ist ein Anlagenkonzept mit konservativen Annahmen umsetzbar, so kann nach Erschließung des Grubengebäudes durch Bohrungen der Einfluss zusätzlicher Strömungen beispielsweise durch Tracer-Tests quantifiziert werden. Zusätzliche Strömungen bedeuten ein höheres verfügbares Energiepotenzial, das danach in der weiteren Projektplanung vorteilhaft berücksichtigt werden kann. Einer der betrachteten Standorte ist ausschnitthaft in Abbildung 71 dargestellt. (GRAB et al., 2024).

Grubenwassergeothermie	
Bohrmeter	2 x 580 m
Streckenlänge	857 m
Th. Heizleistung	360 – 3.400 kW
Th. Wärmemenge	0,9 – 8,1 GWh/a
Pot. Einsparung CO_2-Emissionen	100 – 800 t/a

Nahwärmenetz	
Anzahl Abnehmer	71
Netzlänge	1.572 m
Wärmebedarf	1,6 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (>100, keine weitere Wärmequelle notwendig)	56 % – 506 %

Versorgungsgebiet Kaisergrubenschacht Gersdorf, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Abbildung 71: Ausschnitt eines Ergebnissteckbriefes des Projektes MareEn am Standort "Kaisergrubenschacht" in Gersdorf (GRAB et al., 2024)

4.13 Schneeberg

4.13.1 Untertägige Standortbewertung

Der Bergbau in Schneeberg lässt sich bis ins Mittelalter zurückverfolgen. Er begann mit der Gewinnung von Zinnseifen im 13. Jahrhundert und setzte sich Mitte des 15. Jahrhunderts mit dem Tiefbau auf Zinn und Silber fort. Insbesondere die Silberfunde führten zu einem ersten Aufblühen des Bergbaus und der Stadt, welche um 1481 das Stadtrecht und 1483 eine eigene Münzstätte erhielt (WAGENBRETH, 1990). Aufgrund größerer Silberfunde wurde der Bergbau in tiefere Untertageregionen fortgesetzt und Entwässerungsstollen angelegt. Der spätere Hauptentwässerungsstollen "Markus-Semmler-Stollen" wurde beginnend im Jahr 1503 zunächst für das Oberschlemaer Revier angelegt. Der Stollen wurde jedoch nach Schneeberg weitergetrieben, so dass er in seiner maximalen Ausdehnung alle Grubenteile des Reviers erreicht. Vom Mundloch an der Zwickauer Mulde bis zur weitesten entfernten Grube verläuft der Stollen auf einer Höhe von ca. 323 m NHN bis 367 m NHN, wobei alle darunterliegenden Grubenteile wassererfüllt sind (WAGENBRETH, 1990). Dadurch ergibt sich eine zu überwindende Höhe von etwa 100 m bis 150 m. Ein Schema des Grubenfeldes ist in Abbildung 72 dargestellt. Der Abfluss vom Schneeberger Grubenfeld wird mit durchschnittlich 173,6 l/s angegeben. Für trockene Jahreszeiträume wird ein Volumenstrom von mindestens 7.500 m^3/Tag angenommen. Für die Bewässerung von Grünanlagen und Kunstbrunnen werden im Bedarfsfall hiervon maximal 1.000 m^3/Tag in heißen Sommerperioden von der Kurgesellschaft Schlema mbH genutzt (KRAUSE, 2011).

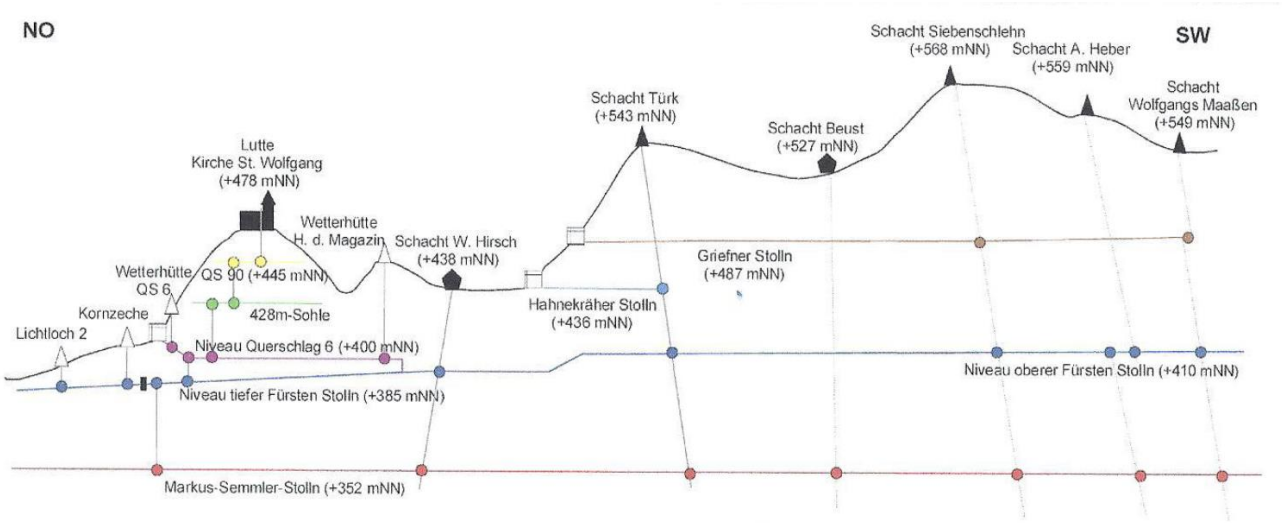
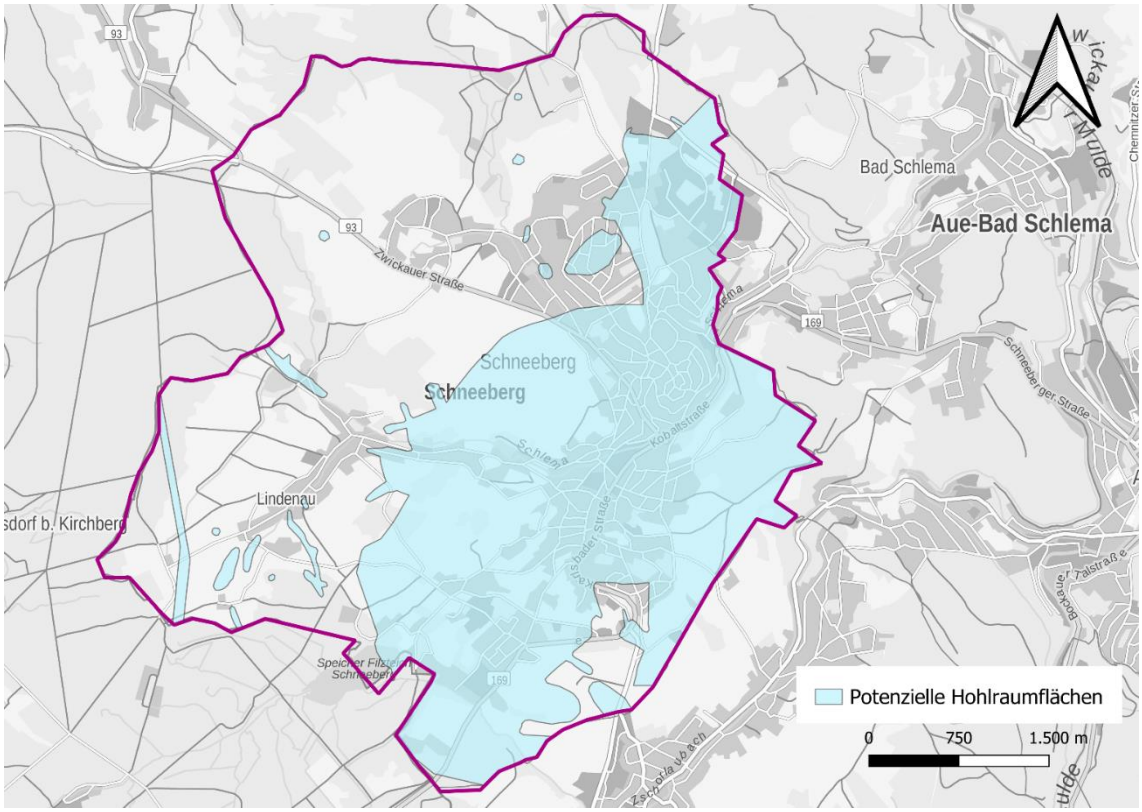


Abbildung 72: Schematische Darstellung des Schneeberger Grubengebäudes oberhalb des Markus-Semler-Stollns (WISMUT GMBH, 2012b)

In der nachfolgenden Abbildung 73 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 24 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 73: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Schneeberg

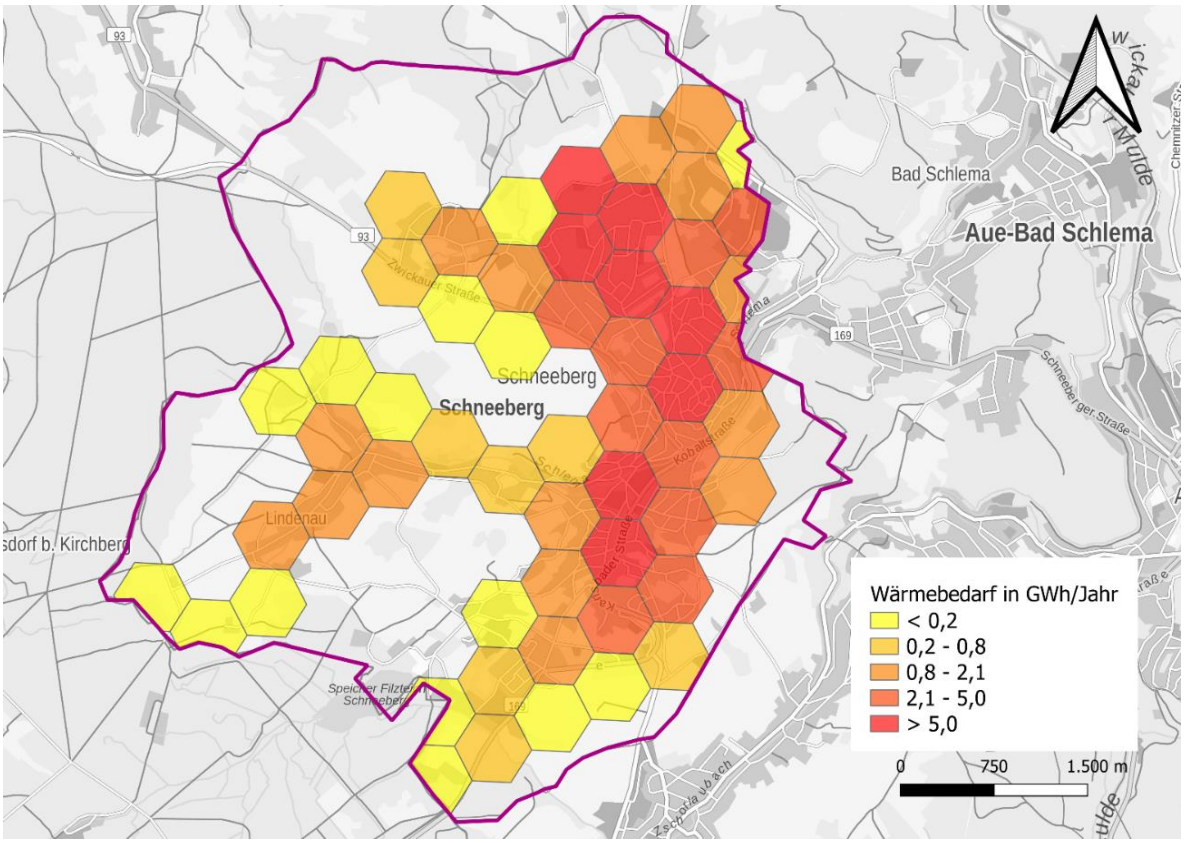
Tabelle 24: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Schneeberg

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	4	Heterogenes Vorliegen von älteren Strukturen des Kobaltbergbaus und großflächigen Auffahrungen der Wismut SAG/SDAG im 20. Jahrhundert.	(WISMUT GMBH, 2022; LFUG 2003)
Entwässerungssystem	4	Markus-Semmler-Stollen als zentraler Ablauf des Schneeberger Grubenfeldes mit witterungsabhängigen Abflüssen von 310 bis 620 m^3/h.	(KRANZ, 2011)
Geflutete Teufe	2	Markus-Semmler-Stollen stellt das tiefste Entwässerungsniveau dar. Gemäß seines Mundlochs und Verlauf ergibt sich eine Tiefe von 100 bis 200 m unter GOK.	(WISMUT GMBH, 2012b)
Hohlraumvolumen	5	Circa 2,1 Mio. m^3 ungeflutet. Durch Wismut-Bergbau ist ein mindestens gleichgroßes, geflutetes Volumen wahrscheinlich.	(WISMUT GMBH, 2017b)
Risswerkkenntnis	5	Große Teile des Risswerk bei der Wismut GmbH vorhanden.	(WISMUT GMBH, 2012b)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalien für das Gebiet den Autoren bekannt.	(TUBAF, 2023f; TUBAF, 2024)
Wasserchemie	3	Nach eigenen Probennahmen aus dem Entwässerungsstollen sowie aus luftabgeschlossenem Grubenüberlauf moderat.	(TUBAF, 2023f; TUBAF, 2024)
Zugänglichkeit	4	Verschiedene Teile im Revier über Besucherbergwerke "Fundgrube Weißer Hirsch", "Besucherbergwerk Markus-Semmler" oder "Besucherbergwerk Sankt Anna" zugänglich. Andere Teile sind verwahrt.	(Weißer Hirsch Schneeberg e.V., 2024; Besucherbergwerk Zschorlau, 2024; Besucherbergwerk Markus-Semmler, 2024)
Unter-Tage-Gesamtwertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,7		

4.13.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Schneeberg hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 121,0 GWh/a (DBI GTI, 2023). Die Wärmehauptabnehmer konzentrieren sich im Osten des Gemeindegebietes in den Stadtteilen Schneeberg und Neustädel. In diesem Bereich befinden sich überwiegend Wohngebäude. Im Süden und Norden dieser Zone befinden sich diverse Sonderabnehmer. Im Süden ist eine Polizeischule

zu nennen und im Norden ein Krankenhaus der Stadt Schneeberg. Alle weiteren Verbraucher im Gemeindegebiet können der Wohnbebauung zugeordnet werden.

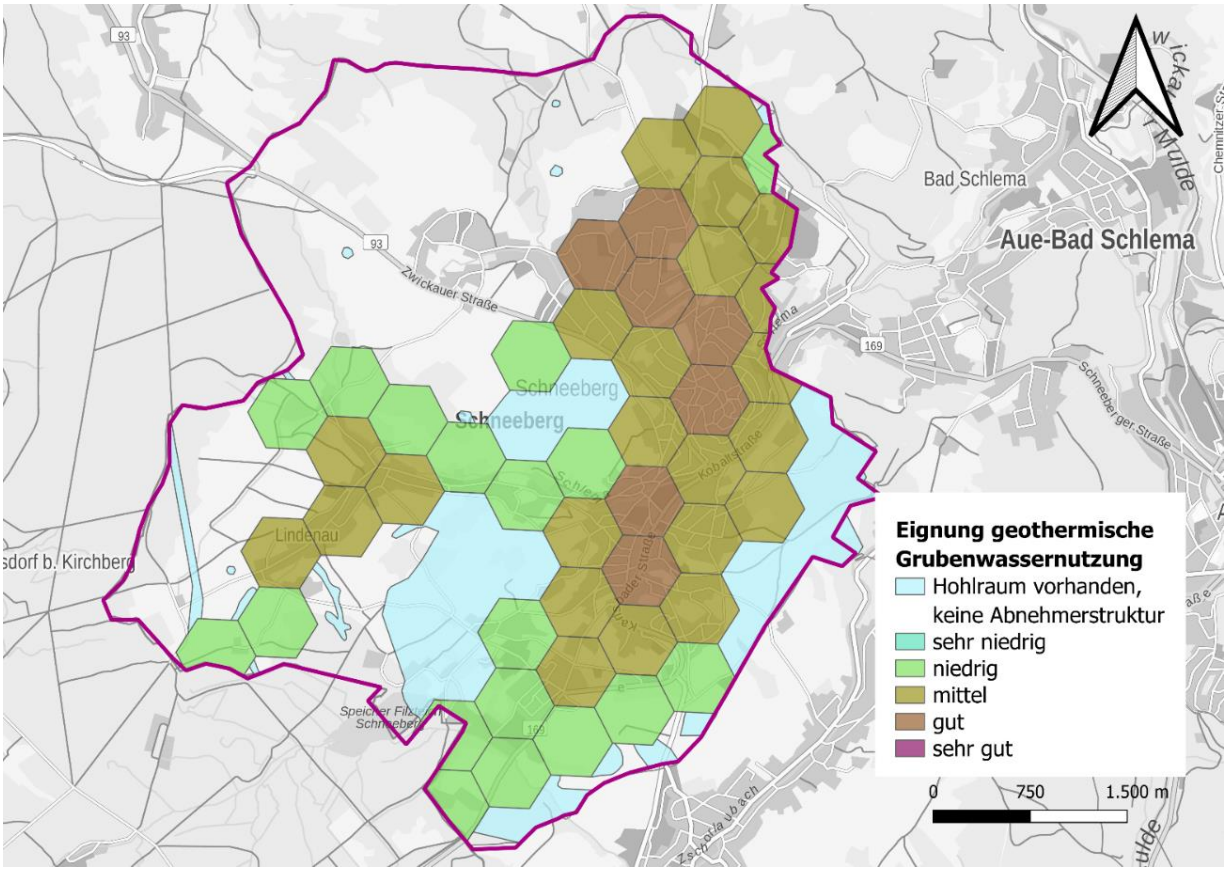


Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 74: Übertägige Bewertung der Gemeinde Schneeberg

4.13.3 Potenzial-Layer

Die Bewertung der Eignung für die geothermische Grubenwassernutzung ist für die Stadt Schneeberg in Abbildung 75 dargestellt. Große Teile der Stadt sind mit bergbaulichen Hohlräumen unterzogen. Dies führt durch die untertägigen Gegebenheiten, in Zusammenhang mit der Wärmeabnahmedichte insbesondere im Stadtzentrum zu guten Bewertungen für die geothermische Nutzung von Grubenwasser. Auch im nordwestlichen Stadtteil in der Nähe des Keilbergs ist aufgrund vorteilhafter Abnehmerstrukturen eine gute Eignung ausgeschrieben. Je nach Besiedlungsstruktur weisen die verbleibenden Rasterzellen der Gemeinde mittlere und niedrige Eignungen auf. Da unterschiedliche Teile des Reviers in historischen Zeiten ebenfalls unterschiedlich aufgefahren und erweitert wurden, kann sich der Kenntnisstand der Grube je nach Standort innerhalb der Gemeinde unterscheiden. Für praktische Umsetzungen ist es daher essenziell festzustellen, in welchem Maße aussagekräftiges Kartenmaterial verfügbar ist.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 75: Potenzial-Layer der Gemeinde Schneeberg

4.13.4 Weiterführende Literatur

Neben den verwendeten Quellen ist keine weiterführende Literatur zum Thema Grubenwassergeothermie für den Raum Schneeberg bekannt.

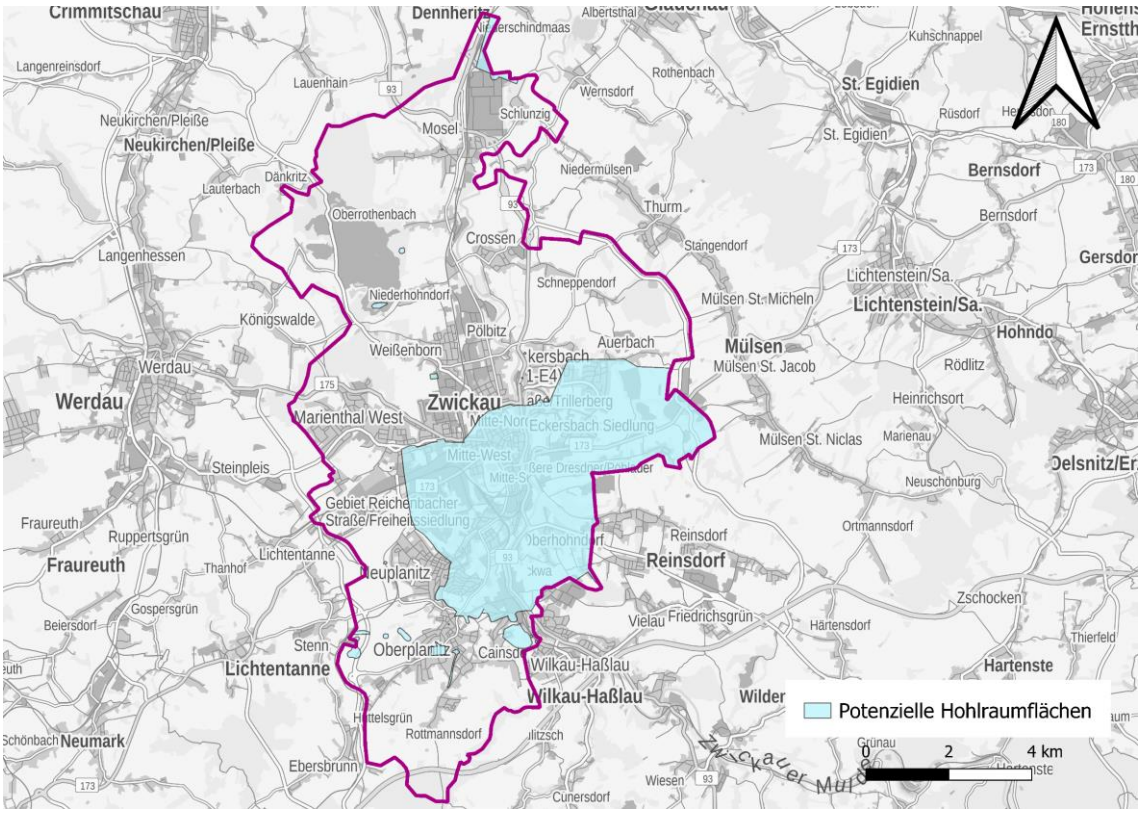
4.14 Zwickau

4.14.1 Untertägige Standortbewertung

Die Anfänge der Bergbautätigkeit im Zwickauer Revier lassen sich auf die Mitte des 14. Jahrhunderts datieren (HOTH, 2008). Durch das Zutage treten der Kohleflöze ist zu vermuten, dass die ersten Abbauversuche in dieser Zeit oberflächennah erfolgten und die Spuren dieses Bergbaus weitestgehend verblasst sind. Da die Steinkohle über die Historie nur untergeordneten wirtschaftlichen Stellenwert besaß, ist die Blüte im Zwickauer Revier erst mit Beginn der Industrialisierung zu verzeichnen. Steinkohlebetriebene Dampfmaschinen machten es zum einen notwendig, diese Ressource zu erschließen, führten auf der anderen Seite zur effektiveren Förderung aus tiefen Kohleflözen. Die zur Verfügung stehende Entwässerungsleistung ermöglichte es, Grubenteile im Revier bis auf eine maximale Teufe von etwa 1080 m trockenzulegen (STEINKOHLENBERGBAUVEREIN ZWICKAU, 2000). Insgesamt sind im Untergrund des Reviers Wasserwegsamkeiten vorhanden, welche die verschiedenen Gesteinshorizonte mit den Grubenstrukturen verbanden. Teilweise führte die Grubenwasserhaltung zum Trockenfallen oberflächennaher Flachbrunnen (HOTH, 2008). Insgesamt betrug der Grubenzulauf durch Niederschlagswasser sowie Wasser der Zwickauer Mulde etwa 680 m^3/h, wobei heute noch etwa 220 m^3/h stetig aus dem Senkungsbereich Bockwa abgepumpt werden. Dieses Wasser würde anderweitig am tiefsten Punkt des Revieres die Tagesoberfläche verwässern. Das Grund- und teilweise auch Grubenwasser steht somit relativ oberflächennah auf einer Höhe von etwa 250 m NHN an. Da im Stadtgebiet Bockwa die steinkohleführenden Horizonte in etwa 50 m bis 210 m Tiefe liegen, ergibt sich eine vorteilhafte Erschließungshöhe. Aufgrund des Einfallens der Köhleflöze in Richtung des Stadtgebietszentrums verlagern sich die Grubenbaue dort in eine Tiefe von etwa 525 m bis 625 m (RÖDER, 2012). Dies führt dazu, dass ein höherer Bohraufwand notwendig ist, eine Förderung des Grubenwassers aufgrund des hohen Wasserspiegels dann jedoch energieeffizient durchgeführt werden kann. Im gesamten Revier steht nach den Verbrüchen und Senkungen ein Resthohlraum von etwa 5 Mio. m^3 zur Verfügung, wovon sich etwa 250.000 m^3 im Gebiet der Innenstadt befinden (RÖDER, 2012). Im Revier sind Risskenntnisse in Karten sowie teilweise auch digitalisiert vorhanden, deren Qualität durch eine erfolgreiche Bohrung auf Grubenwasser nachgewiesen werden konnte (SIB ZWICKAU, 2020). Durch dieses Projekt wurde Grubenwasser erschlossen, dessen Temperatur mit ca. 24°C dem geothermischen Gradienten in der entsprechenden Tiefe entspricht. An der Oberfläche konnten ebenfalls keine erhöhten Temperaturen des abgepumpten Wassers beobachtet werden, was gegen einen konvektiven Einfluss der Grubenwässer spricht. Dies ist andererseits förderlich für den Chemismus des Wassers in Oberflächennähe. Dieser ist stabil genug um die durchschnittliche Einleitmenge von 220 m^3/h in die Zwickauer Mulde zu leiten und somit in dieser Nutzungsmenge als nicht schädlich zu bewerten (HOFFMANN, 2010a). Die Tiefenbohrung erschließt höher mineralisiertes Grubenwasser (GUB, 2014b). Da dies jedoch den Erwartungen entspricht, wird dies nicht

in die Bewertung des Chemismus des unmittelbar erschließbaren Grubenwassers aufgenommen. Da das Grubengebäude vollständig verwahrt ist, ist das Grubenwasser nur über die Pumpstation oder über die bereits bestehende Bohrung erreichbar. Neue Erschließungsprojekte können nur durch Bohrungen durchgeführt werden, da es keine zugänglichen Strukturen der Grube gibt.

In der nachfolgenden Abbildung 79 sind die potenziellen Hohlräume des Reviers abgebildet. Die Bewertung kann in Tabelle 24 nachvollzogen werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 76: Untertägige Revierdarstellung der Gemeinde Zwickau

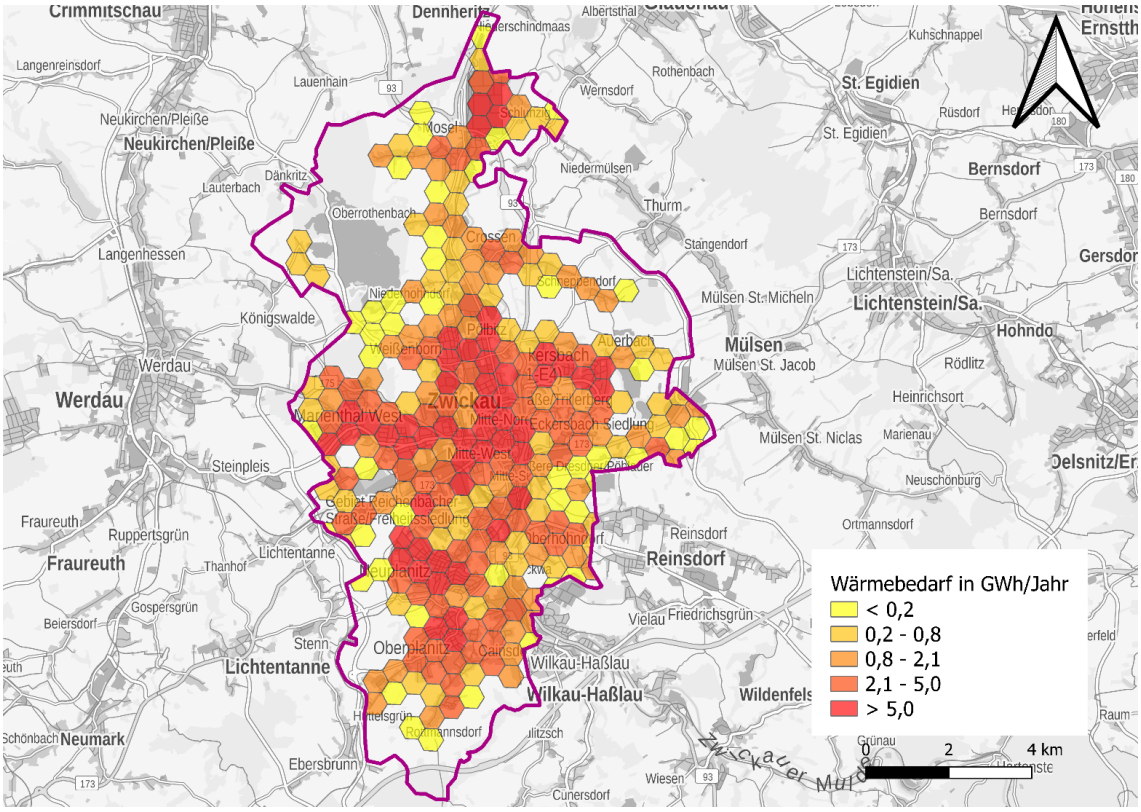
Tabelle 25: Untertägige Bewertung des Bergbaureviers Zwickau

Bewertungs-parameter	Wer-tung	Erklärung	Literaturverweis
Alter	5	Hauptförderzeitraum von 1875 bis 1977, überwiegend junge Grubenstrukturen.	(HOTH, 2008)
Entwässerungssystem	4	Indirekt über die aktive Entwässerung der Bockwaer Senke. Verschiedene Quellen geben im Mittel einen Überlauf von 210 m^3/h an.	(GRIMM et al., 2001)
Geflutete Teufe	2	Teilweise stehen oberflächennahe Grubenbaue an (Bockwaer Senke). Im Stadtgebiet jedoch mit bis zu 625 m unter GOK sehr tief.	(HOTH, 2008)
Hohlraumvolumen	5	Resthohlraumvolumen von etwa 5 Mio. m^3, davon 250.000 m^3 im Stadtbereich.	(RÖDER, 2012)
Risswerkkenntnis	5	Rissmaterial durch Anbohrung eines Blindschachts im Rahmen eines Forschungsprojektes vektorisiert vorhanden.	(SIB ZWICKAU, 2020)
Temperatur	1	Keine Temperaturanomalien für das Revier bekannt.	(Sib Zwickau, 2020)
Wasserchemie	3	Je nach Förderhorizont variierend. In 652 m unter GOK liegt Wasser in einem Mineralisierungsbereich von 10 - 100 g/l vor. Oberflächennah abgepumpte, diffus austretende Mischwässer werden direkt in Zwickauer Mulde geleitet.	(HOFFMANN, 2010a; GUB, 2014b)
Zugänglichkeit	1	Abseits von bestehender Bohrung nicht gegeben.	(HOFFMANN, 2010a)
Unter-Tage-Gesamt-wertung (Wichtung siehe Tabelle 4)	3,1		

4.14.2 Übertägige Standortbewertung

Die Gemeinde Zwickau hat einen modellierten Gesamtwärmebedarf von 924,4 GWh/a (DBI GTI, 2023). Der Hauptwärmebedarf von Zwickau fällt in einem Streifen von Nord nach Süd an. Im Stadtbezirk Nord ist ein großes Automobilwerk angesiedelt, welches einen erhöhten Bedarf aufweist. Abseits davon ist das nördliche Gemeindegebiet von Wohngebäuden geprägt. Das Kernstadtgebiet Zwickau weist eine heterogene Aufteilung zwischen Industrie-, Gewerbebetrieben und Wohnbebauung auf. Entlang der Bahnstrecke, die von Norden in das Stadtgebiet führt, sind verschiedene gewerbliche Abnehmer zu finden. Im Stadtbezirk Ost befinden sich überwiegend Wohngebäude und eine Hochschule. Südlich des

Hauptbahnhofs im Stadtbezirk Mitte sind zahlreiche Gewerbe- und Industriebetriebe zu finden. Der Stadtbezirk Süd ist wiederum von Wohngebäuden geprägt mit der Ausnahme des Gebiets um den Bahnhof Cainsdorf herum. Dort sind vorwiegend Industrie- und Gewerbegebiete anzutreffen.



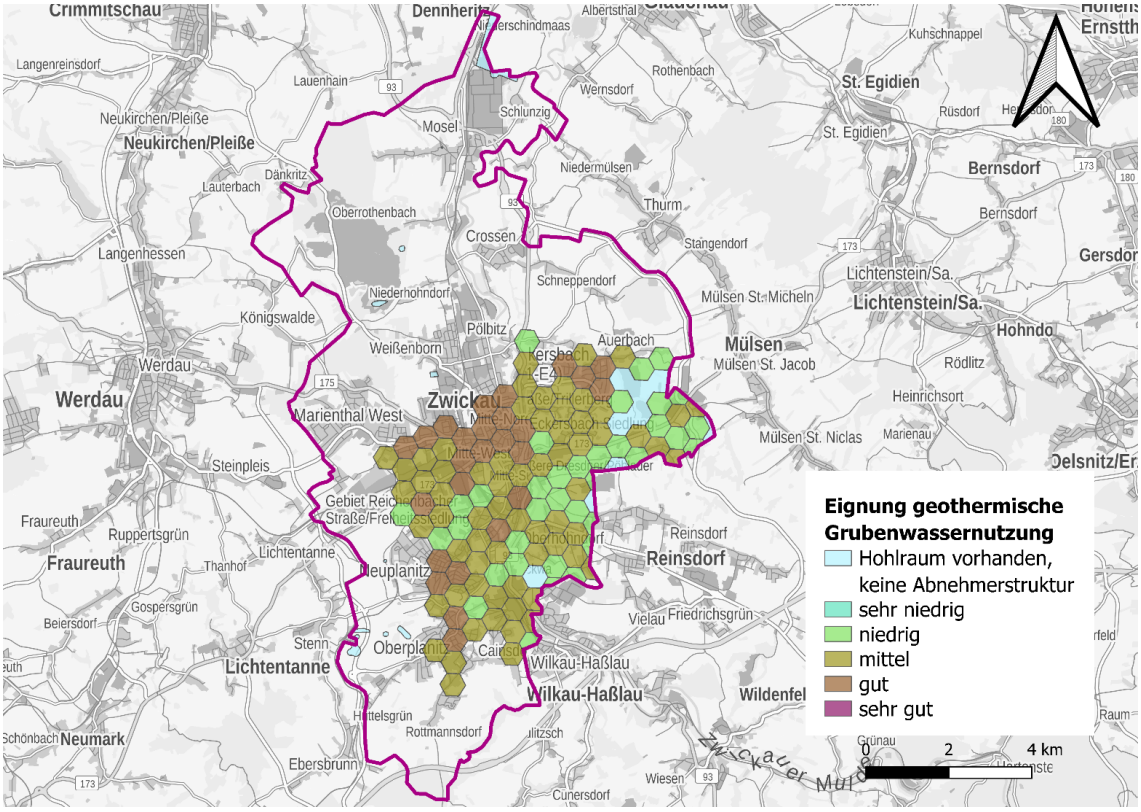
Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 77: Übertägige Bewertung der Gemeinde Zwickau

4.14.3 Potenzial-Layer

Die Stadt Zwickau ist mit rund 90.000 Einwohnern die größte betrachtete Stadt der Studie. In Abbildung 76 ist ersichtlich, dass ein Großteil der Stadt von relevanten Hohlräumen unterzogen ist. Je nach Abnehmerstrukturen und den untertägigen Voraussetzungen des Reviers werden die relevanten Rasterzellen mit einer entsprechenden Bewertung für die Eignung der geothermischen Grubenwassernutzung versehen. Da sich eine große Anzahl an Abnehmern im Zentrum befindet, werden hier dementsprechend gute Eignungen für die geothermische Grubenwassernutzung abgeleitet. Auch im Bereich von Auerbach und Niederplanitz lassen sich gute Potenziale vermuten. Der Großteil der in allen gut bewerteten Rasterzellen vorhandenen Abnehmerstrukturen befindet sich im Wohnsektor. Lediglich das Verwaltungszentrum und die umliegenden Gebäude im Stadtgebiet Marienthal-Ost bringen einen großen Anteil an Kommunalabnehmern ein. Ein essenzieller Punkt für die praktische Nutzung der Potenziale

ist das Erschließen des Grubenwassers. Da innerhalb des Stadtgebiets die bergmännischen Auffahrungen stark unterschiedliche Höhen aufweisen, die Methodik jedoch eine generalisierte Bewertung für die Bedingungen unter Tage gibt, muss für potenzielle Standorte in jedem Fall eine individuelle Prüfung durchgeführt werden.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 78: Potenzial-Layer der Gemeinde Zwickau

4.14.4 Weiterführende Literatur

Der Standort Zwickau wurde in der Grubenwasserpotenzialstudie aus dem Jahr 2001 mit dem Revier Oelsnitz/Erz. kombiniert betrachtet (GRIMM et al., 2001). Da der Fokus in der Betrachtung auf dem Standort Zwickau lag, werden die Ergebnisse hier verwertet. Nach einer Beschreibung des Steinkohlereviers und einem Abriss des Informationsstandes zur Geologie, Hydrogeographie und der bergbaulichen Situation wurde das Entwässerungssystem des Zwickauer Reviers genauer betrachtet. Die Notwendigkeit, aus dem Senkungstrog der Bockwaer Senke stetig das Mischwasser aus Grubenwasser und Grundwasser abzupumpen, wird dabei als Potenzial fokussiert. Verschiedenen Angaben zufolge kann so eine Wassermenge von 4.000 bis 6.000 m^3/d als Wärmelieferant verwendet werden. In einem Sammelbereich der Wässer, dem Becherteich, wurden ebenfalls Temperaturmessungen und Messungen der elektrischen Leitfähigkeit durchgeführt. Als Temperaturspanne ergab sich eine Spanne von 11,8°C bis 22,6°C. Das

Temperaturmaximum in Oberflächennähe scheint auf einen Einfluss tieferer Wässer hinzuweisen. Dies wird jedoch durch die Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit im Bereich von 2,21 bis 4,29 mS/cm infrage gestellt, da Tiefenwässer im Bereich Zwickau eine elektrische Leitfähigkeit im Bereich von etwa 50 mS/cm aufweisen und eine solch hohe Temperatur auf unverdünnte Tiefenwässer hinweisen müsste (GUB, 2014b). Die Bewertung der Studie scheint zudem laut abschließender Bewertung ebenfalls moderate Temperaturen als realistisch anzunehmen, welche sich im Bereich von 11,8°C bis 12,8°C befinden. Es wird nahegelegt, dass mit der Wärmenutzung des Wassers die Ewigkeitskosten des Pumpbetriebes, welche sich im Jahr 2001 auf heute umgerechnet ca. 280.000 € beliefen, teilweise wieder eingespielt werden könnten. Die finale Bewertung des Standortes Zwickau ist in Tabelle 26 dargestellt. Mit einer Bewertungspunktzahl von 24 wird das Zwickauer Revier nach Freiberg als das für Grubenwassergeothermie ergiebigste Revier dargestellt.

Tabelle 26: Bewertung des Zwickauer Reviers für die geothermische Grubenwassernutzung aus (GRIMM et al., 2001)

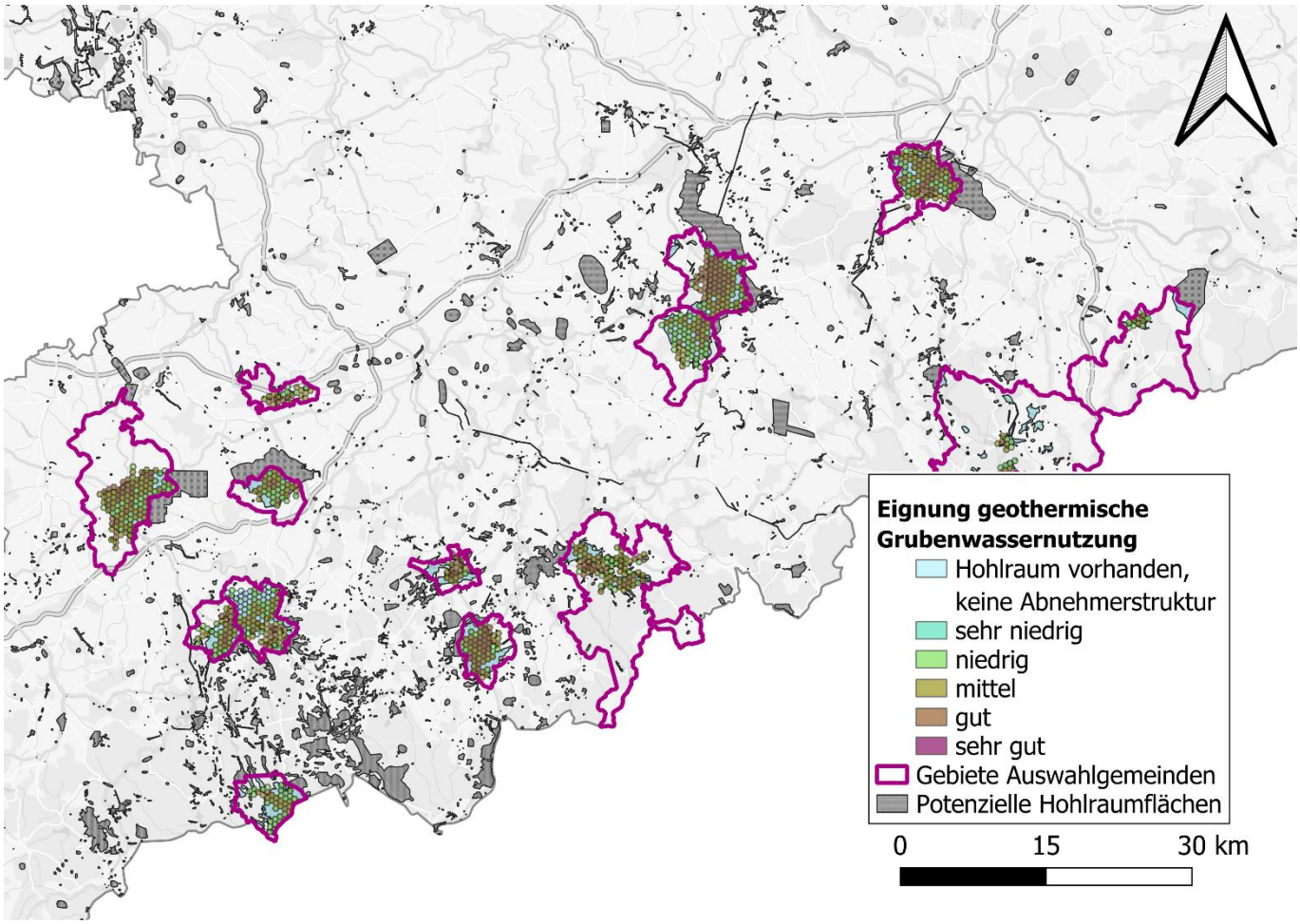
Kriterien		Bewertung (3 höchste)
Natürliche	Reservoir	3,0
	Fläche	3,0
	Tiefe	3,0
	Temperatur	2,0
	Summe	**11,0**
Technische	Nutzung	2,0
	Chemie	1,0
	Radiologie	3,0
	Summe	**6,0**
Wirtschaftliche	Infrastruktur	1,0
	Bedarf	3,0
	Entfernung	3,0
	Summe	**7,0**
	Gesamtsumme	**24,0 (max. 36)**

Wie in der untertägigen Standortbewertung ausgeführt, wurde in Zwickau ein Projekt zur Erschließung eines gefluteten Blindschachtes in der Umgebung der Westsächsischen Hochschule Zwickau durchgeführt. Dies sollte direkt für eine Grubenwasseranlage geschehen, die nachfolgend das ca. 23 °C warme Tiefenwasser zur Versorgung naher Gebäude verwendet. Als Vorarbeit dienten die Ergebnisse des EU-finanzierten Projektes "READY", bei dem die geothermische Nutzung des Zwickauer Flutungswassers zum ersten Mal betrachtet wurde (RÖDER, 2012). Der Antrag für dieses Projekt wurde 2007 vom SIB Zwickau gestellt und sollte als Demoprojekt gelten (HOFFMANN, 2010a). Das Projekt "Geothermische Nutzung von Flutungswasser aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers am Pilotprojekt Ersatzneubau für Produktionstechnik der Westsächsischen Hochschule Zwickau" wurde in vier Phasen

aufgeteilt. Diese befassten sich mit dem Bau der Wärmeversorgungstrasse, dem Abteufen der Bohrung, der Grubenwassernutzung und der Integration der Anlage in das vorhandene Energieversorgungsnetz. Die Bohrung erfolgte 2012 und zielte auf einen Blindschacht in ca. 630 m Tiefe. Durch die Richtbohrtechnik konnte der Schacht erschlossen und hydrogeologische Tests zur Bewertung der Wassermenge und -güte durchgeführt werden. Eine Besonderheit ist in der Wärmetrasse zu beobachten, die als kaltes Nahwärmenetz ausgeführt ist und über einen vom Grubenwasser getrennten Zwischenkreis die Wärme auf niedrigem Temperaturniveau in das zu beheizende Gebäude der Westsächsischen Hochschule Zwickau befördert. Dort wird die Wärme durch eine Wärmepumpe anschließend auf das notwendig hohe Temperaturniveau gebracht. Das genutzte Grubenwasser wird anschließend in die Zwickauer Mulde abgeschlagen. Dies setzt einen entsprechenden Wasserstand und Durchfluss voraus, der sicherstellt, dass das Fließgewässer nicht zu stark von dem mineralisierten Grubenwasser beeinträchtigt wird. Durch die Bohrung könnte eine theoretische Wärmeleistung von etwa 1 MW erschlossen werden. Im Betrieb wird jedoch eine Wärmemenge von etwa 120 bis 160 kW durch das Grubenwasser gewonnen (RÖDER, 2023). Die Wärme wird über wartungsarme gewickelte Kapillarrohrwärmeübertrager aus Kunststoff erschlossen. Diese zeichnen sich durch ihre geringe Ablagerungsanfälligkeit aus. Es wird vermutet, dass dies durch eine geringere Wärmeleitfähigkeit gegenüber Materialien wie Edelstahl begründet werden kann. Dadurch herrscht ein geringerer Temperaturgradient und weniger Ausfällungen sind an den Kapillarrohren zu verzeichnen. Dies bedingt jedoch eine insgesamt höhere Wärmeübertragerfläche, was höhere Kosten gegenüber Edelstahl verursachen kann. Weiterhin können Oberflächeneigenschaften und Strömungsregime die geringen Verschmutzungseigenschaften erklären.

4.15 Zusammenfassung

Insgesamt wurden 14 Gemeinden in Sachsen auf ihre Standortgegebenheiten untertägig und übertägig untersucht und bewertet. Die sich daraus ergebenden Potenzial-Layer wurden einzeln aufgezeigt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist nachfolgend in Abbildung 79 dargestellt.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 79: Ergebniskarte der Potenzialuntersuchungen aller Auswahlgemeinden mit dargestellten potenziellen Hohlraumflächen (SOBA, 2023a)

Dieser Potenzial-Layer stellt alle Untersuchungsresultate in der Gemeinde dar und bietet somit einen Einblick in potenziell vielversprechende Nutzungsstandorte. Insgesamt gibt es in allen untersuchten Gemeinden und Städten mindestens ein Polygon in dem ein gutes Grubenwasserpotenzial ausgewiesen ist.

Dies bedeutet, dass jede Gemeinde mindestens einen Standort aufweist, wo ein wirtschaftlicher Betrieb einer solchen Anlage im Hinblick auf die untertägigen sowie übertägigen Gegebenheiten zu einer hohen Wahrscheinlichkeit umgesetzt werden kann. Insbesondere in Gemeinden und Städten mit einer hohen Abnehmerdichte sind viele der Polygonflächen als gutes Potenzial ausgewiesen, was die Wichtigkeit

von vorhandenen Abnehmern hervorhebt. In weniger dicht besiedelten Gebieten können vorteilhafte untertägige Gegebenheiten trotz geringerer Abnahme ebenfalls eine höhere Potenzialbewertung bedingen (wie zum Beispiel Ehrenfriedersdorf).

Insgesamt ist das Grubenwasser somit in allen Gemeinden eine Energiequelle, die Umsetzungspotenzial aufweist, wobei die Ergebnisse als Hilfsmittel zur Standorteingrenzung zu verstehen sind. Für die genaue Wahl eines Anlagenstandorts müssen standortspezifische Gegebenheiten im Rahmen einer Machbarkeitsstudie beachtet werden. Auch ist die Konsultation von entsprechendem Fachpersonal vor Ort, von Behörden sowie Forschungseinrichtungen zu empfehlen.

In der Abbildung ist ebenfalls ersichtlich, dass der Untersuchungsumfang innerhalb dieser Studie nicht alle Gemeinden Sachsens mit den zugehörigen Hohlräumen abdecken konnte. Es ist daher wichtig herauszustellen, dass ebenfalls abseits der in dieser Studie analysierten Gemeinden gute Voraussetzungen für Grubenwassergeothermieanlagen angetroffen werden können. Für die Bewertung solcher Standorte kann die hier aufgezeigte Analysemethode verwendet werden oder direkt eine zugeschnittene Machbarkeitsstudie angestoßen werden.

5 Grubenwasserprobenahmen und Einsatz mobiler Wärmepumpenversuchsstand

5.1 Grubenwasserprobenahmen und -analysen

Ein wichtiger Bestandteil für den Anlagenbetrieb sowie für umweltrelevante Gefährdungsbeurteilungen ist die chemische Zusammensetzung der Grubenwässer. Durch die künstlich geschaffenen Hohlräume unter Tage bietet sich dem eindringenden Grund- und Oberflächenwasser eine hohe Kontaktfläche zum Gestein. An dieser können dann verstärkt Verwitterungsprozesse stattfinden, was zu einer Anreicherung von gelösten und ungelösten Mineralien im Grubenwasser führt (EVANS et al., 1992). Auch können während des Bergbaus verlorene Hydrauliköle einen Einfluss auf die Belastung des Wassers besitzen.

Innerhalb dieser Studie sollte der Kenntnisstand über den Chemismus der Grubenwässer in Sachsen durch Probenahmen- und Analysen erweitert werden. In Tabelle 27 sind die verwendeten Verfahren sowie Probenparameter aufgelistet.

Tabelle 27: Auflistung der vorgenommenen Analyseverfahren und Parameter für jeden Probestandort

Analysemethode	Parameter
Organoleptische Parameter (vor Ort)	Geruch, Trübung, Farbe
Multiparametersonde (vor Ort) WTW Multi 3430 mit pH-Sone SentiX 980, Redoxpotentialsonde SenTix ORP und elektrische Leitfähigkeit TetraCon 925	Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential
Sauerstoffsensor: Typ GWO 5610-L02 (vor Ort)	O_2-Gehalt, O_2-Sättigung
Titration (vor Ort)	m-Wert, p-Wert
VIS-Spektralphotometer Hach Modell DR 3900	Fe-II, Fe-III, Sulfat, Chlorid
TOC-Analyser Modell multi N/C 2100 S	TIC, TOC,TN
Mikrowellenplasma-Atomemissionsspektrometer (MP-AES) Agilent Modell 4200 MP-AES	Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, Sr, Zn
Berechnung in PhreeqC	HCO_3^-

Es wurden dabei zugängliche Grubenwasserkörper beprobt, wobei die Beprobung durch die technischen Gegebenheiten maximal 30 m unter der Wasseroberfläche erfolgen konnte. Die Analysen, welche nicht vor Ort stattfanden, wurde vom Labor des Institutes für Bergbau und Spezialtiefbau, Arbeitsgruppe für Bergbauliche Wasserwirtschaft, durchgeführt.

Die Probenvorbehandlung und Konservierung vor Ort beinhalteten unter anderem das Filtrieren und Ansäuern. Die Vorbereitung und das Konservierungsmittel sind nachfolgend in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Vorbereitungsmatrix für die Messung von Grubenwasserparametern

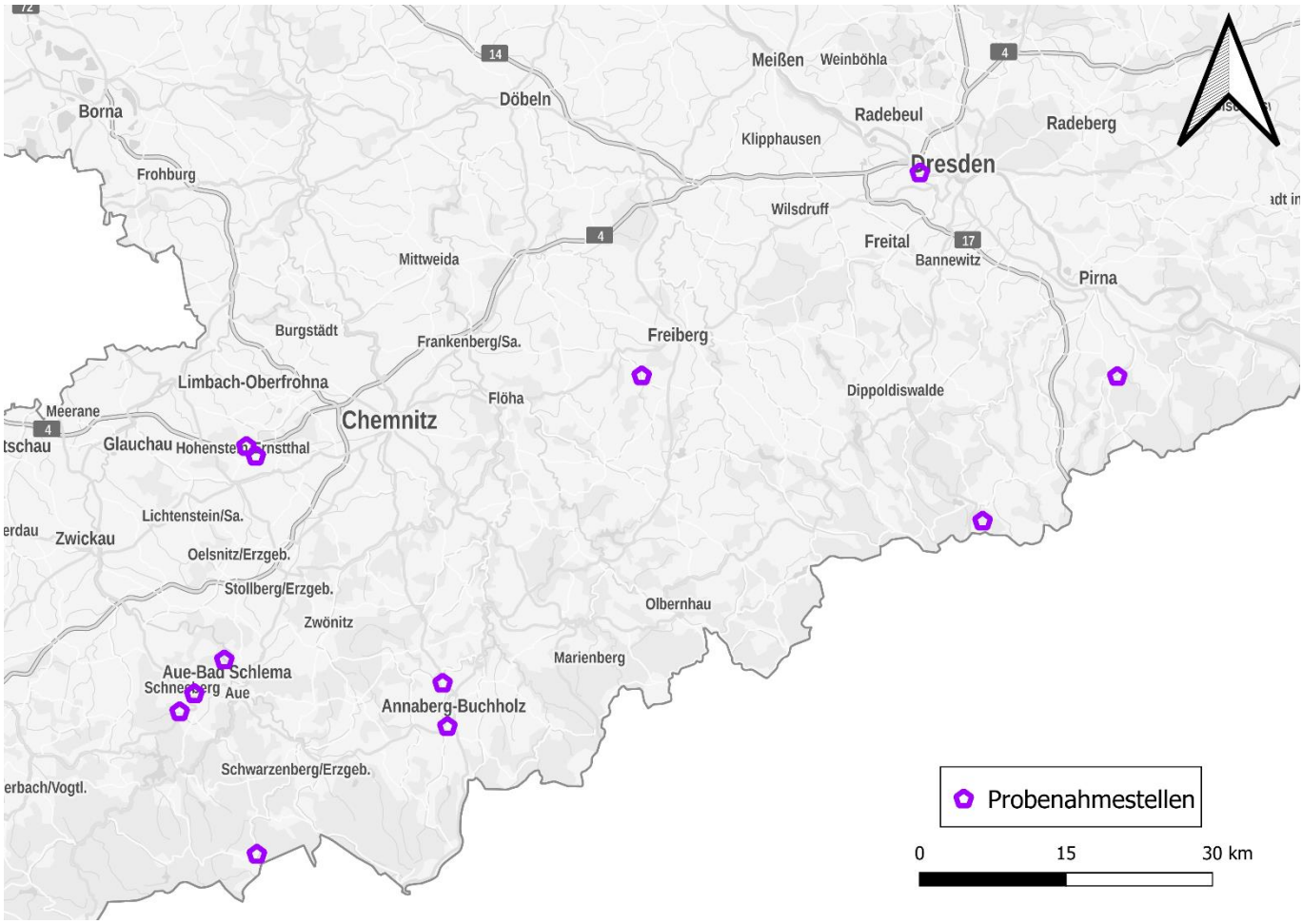
Parameter	Filtration	Konservierungsmittel	
		Art	**Menge**
Fe-II	0,45 µm	Ferrous Iron	1 Tüte
TC/TN	Nein	-	-
Chlorid/Sulfat	Nein	-	-
MPAES unf.	Nein	$HNO_{3,c}$	1 vol%
MPAES	0,45 µm	$HNO_{3,c}$	1 vol%

Insgesamt konnten im Umfang der Studie 16 Probenahmen und Analysen in 9 Auswahlstandorten durchgeführt werden. Die Analysen der Grubenwässer können als Basis für eine Bewertung innerhalb einer Machbarkeitsstudie dienen. In Tabelle 29 werden nachfolgend die Auswahlstandorte aufgezeigt und die Probenahmestellen benannt.

Tabelle 29: Übersicht der Probenahmestandorte in den Auswahlgemeinden

Standort	Probenahme erfolgt?
Altenberg/Zinnwald	Tiefe-Hilfe-Gottes-Stollen (Revier Zinnwald)
Annaberg-Buchholz	Markus-Röhling-Stollen und Dorothea-Stollen
Aue-Bad Schlema	Markus-Semler-Stollen
Bad Gottleuba-Berggießhübel	Tiefer Zwiesler Erbstollen
Brand-Erbisdorf	Thelersberger Stollen
Ehrenfriedersdorf	Nein
Freiberg	Nein
Freital	Elbstollen
Hohenstein-Ernstthal	Lampertus-Stollen und Augusta-Stollen
Johanngeorgenstadt	Wismut-Entlastungsbohrung am Glück-Auf-Stollen
Marienberg	Nein
Oelsnitz/Erz.	Nein
Schneeberg	Mehrere Proben in der Fundgrube Weißer Hirsch. Standwässer sowie ein Zulauf zum Markus-Semmler-Stollen
Zwickau	Nein

Die aufgeführten Probenstandorte wurden ebenfalls in einer GIS-Datei implementiert. Dort sind sie mittels eines Punktlayers über ihre entsprechenden Koordinaten in der GIS-Karte eingefügt. Nach der Analyse des Grubenwassers auf seine Bestandteile, wurden die Ergebnisse der Analytik des entsprechenden Probenahmestandorts als Attributfelder integriert. Für jeden Messpunkt sind somit die Analysewerte des beprobten Grubenwassers einsehbar. Die Visualisierung der Probenahmestandorte in der GIS-Karte ist in Abbildung 80 dargestellt.



Topographische Kartengrundlage: Geodaten Sachsen; Administrative Gemeindegrenzen: © GeoBasis-DE / BKG (01.01.2021); Koordinatensystem EPSG:25833 - ETRS89 / UTM zone 33N

Abbildung 80: Darstellung der Lage der Probenahmestandorte

5.2 Messversuche des mobilen Versuchsstands

Ein wichtiger Bestandteil der Forschung zu Grubenwassergeothermieanlagen ist die Analyse des Ablagerungsverhaltens von den im Grubenwasser mitgeführten Stoffen in Wärmeübertragern. Das Verschmutzen von Oberflächen in Fluiden wird auch Fouling genannt. Dieses kann durch fünf mögliche Mechanismen hervorgerufen werden: Kristallisationsfouling, Partikelfouling, Reaktionsfouling, Korrosionsfouling sowie biologisches Fouling. Jeglicher Foulingprozess beinhaltet in der praktischen Anwendung jedoch mehrere Mechanismen. Für den Bereich der Grubenwassergeothermie ist insbesondere die Kombination aus Kristallisations-, Partikel- und biologischem Fouling von großer Bedeutung. Während Kristallisationsfouling durch in der Flüssigkeit vorliegenden gelösten Mineralien beim Unterschreiten der Löslichkeitsgrenze entsteht, tritt Partikelfouling durch Ablagerungen von in der Flüssigkeit suspendierten Teilchen auf (MÜLLER-STEINHAGEN, 2001). Beide Prozesse werden durch biologische Ablagerungen begünstigt, welche an sauberen Oberflächen oftmals erste Akkumulationskeime bilden (IBRAR, 2019).

Um Ablagerungen an den Oberflächen zu minimieren, gilt es, dem mechanischen Anhaften der Ablagerungen entgegenzuwirken. Dies geschieht über die Wahl von angepassten Materialien oder durch Beschichtungen. Oberflächenparameter wie Kontaktwinkel, Rauheit und Zeta-Potenzial bestimmen im Zusammenhang mit dem Grubenwasserchemismus, der Temperatur und dem Strömungsregime die Entwicklung von Ablagerungen. Um die Grubenwässer an vielversprechenden Standorten auf ihr Ablagerungsverhalten zu untersuchen, wurden von dem Institut für Technische Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg mobile Grubenwasserversuchsstände entworfen. Ein solcher Versuchsstand bildet eine herabskalierte Realanlage ab und kann aufgrund der Geometrie und des Gewichtes standortübergreifend eingesetzt werden. Kernstück ist eine 4kW-Wärmepumpe, welche über zwei Plattenwärmeübertrager mit dem Grubenwasser gekoppelt ist. Der erste realisierte Versuchsstand ist in Abbildung 81 dargestellt.

Im Versuchsstand können verschiedene Wärmeübertragerplatten simultan auf ihr Ablagerungsverhalten untersucht werden. Somit kann nach einem Versuch direkt festgestellt werden, welche Beschichtungen Ablagerungen effizienter verhindern und welche Materialien gemieden werden sollten. Um ein möglichst breites Spektrum von potenziellen Betriebszuständen abzudecken, wird der Grubenwasserstrom in der Anlage zweigeteilt. In dem ersten Plattenwärmeübertrager wird Wärmeenergie dem ersten Grubenwasserstrom entzogen und das Grubenwasser kühlt ab. Über die Wärmepumpe wird diese Energie auf ein höheres Temperaturniveau gehoben. Anschließend wird sie auf den zweiten Grubenwasserstrom im zweiten Plattenwärmeübertrager übertragen, wodurch dieser erwärmt wird. Durch beide Wärmeübertrager kann somit die Abkühlung (Abnehmer heizt) und die Erwärmung des Grubenwassers (Abnehmer kühlt) gleichzeitig simuliert werden. Anschließend werden beide Grubenwasserströme wieder zusammengeführt und mit nahezu Anfangstemperatur wieder in das Bergwerk zurückgeführt.

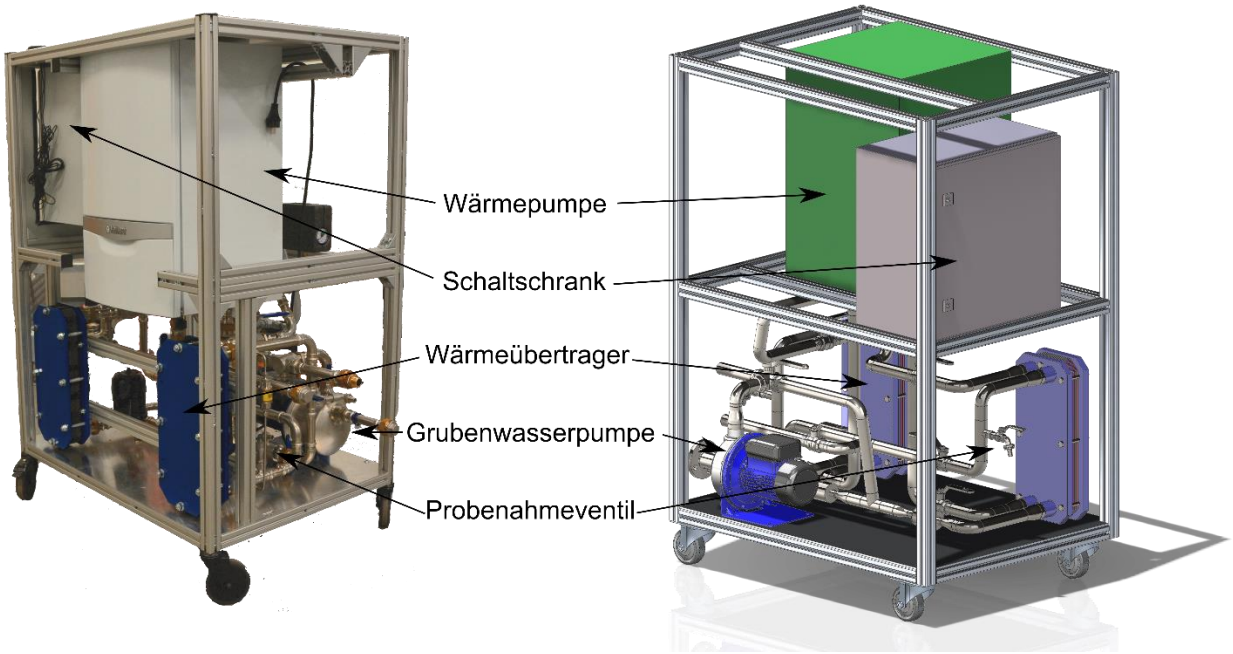


Abbildung 81:Mobiler Wärmepumpenversuchsstand des Instituts für technische Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg

Für die vorliegende Studie wurden zwei Standorte für einen Einsatz des mobilen Wärmepumpenversuchsstands gewählt. Beide Versuchsstandorte unterscheiden sich primär hinsichtlich ihrer Grubenwassertemperatur, wobei zum einen Grubenwasser mit ca. 26°C und zum anderen Grubenwasser mit ca. 12°C getestet wurde. Beide Versuchsstandorte stellen Erzbergwerke dar, können jedoch abhängig von den untertägigen Gegebenheiten in ihrem Chemismus abweichen. Um den Schutz der Rechte der betroffenen Objektverantwortlichen zu gewährleisten, werden beide Standorte jeweils anonymisiert ausgewertet.

5.2.1 Versuchsstandort 1

Der erste Standort für den Einsatz des mobilen Wärmepumpenversuchsstands (mWPVS) besitzt ein Grubenwasser, welches sich durch seine hohe oberflächennahe Temperatur auszeichnet. Dadurch kann ein hohes Wärmepotenzial entstehen, wenn das Vorkommen in ausreichender Fördermenge genutzt wird. In Abbildung 82 ist das Fließschema des Versuchs am ersten Versuchsstandort aufgezeigt.

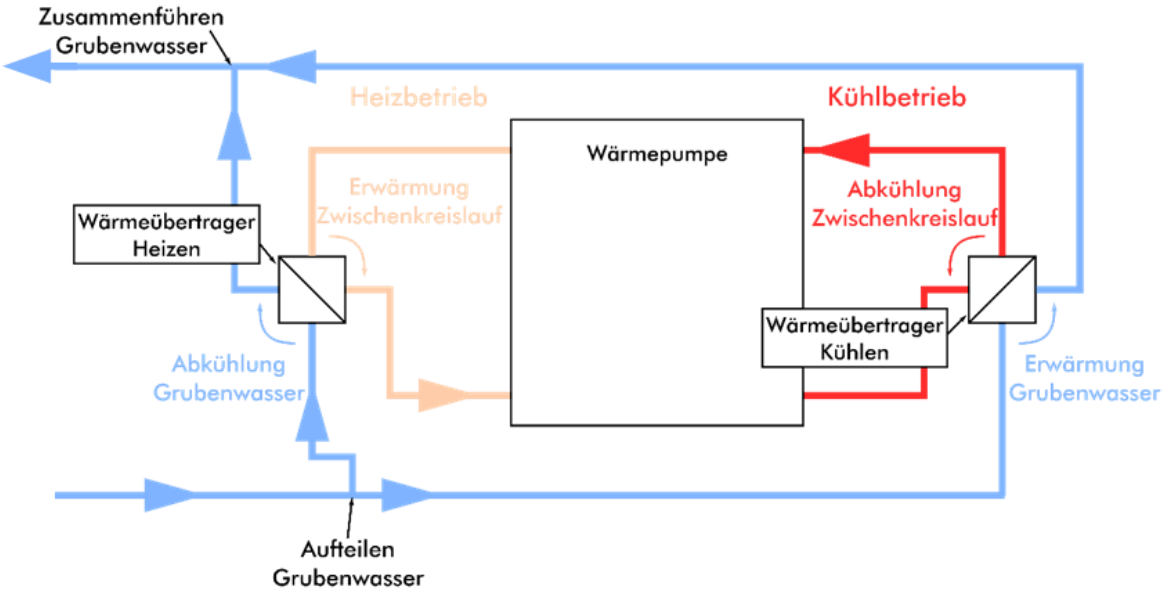


Abbildung 82: Fließschema des mobilen Wärmeübertragerversuchsstandes am Versuchsstandort 1

Der Versuchsstand war über 5 Monate an dem entsprechenden Standort aktiv. Dabei wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt und insgesamt 16 verschiedene Materialien getestet. Etwa 30 l/min wurden dafür durch den Versuchsstand geführt. Nach der Abkühlung beziehungsweise Erwärmung wird es anschließend wieder zusammengeführt in das Bergwerk eingeleitet.

Ergebnisse des Versuchsstandortes 1

In Tabelle 30 sind die im Versuchsstand gemessenen Volumenströme und Druckdifferenzen über den Wärmeübertrager über die beiden Messperioden dargestellt. Es wird dabei deutlich, dass eine erhebliche Reduktion des Volumenstroms, vermutlich durch Fouling, vorlag.

Während der ersten Versuchsreihe wurde der Volumenstrom um 73 % (Heizen) beziehungsweise 55 % (Kühlen) reduziert (Zweite Versuchsreihe: 86 % (Heizen), 79 % (Kühlen)). Dies deutet auf eine starke Verschmutzung der Wärmeübertrager hin. Durch die Ablagerungen wird der frei durchströmbare Bereich im Wärmeübertrager und ggf. auch in der Zuführung reduziert, d.h. der mögliche Volumenstrom sinkt. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der Messung zur Druckdifferenz über den Wärmeübertrager. Eine hohe Druckdifferenz deutet ebenfalls auf Verschmutzungen hin, da dadurch, wie beschrieben, der durchströmbare Querschnitt reduziert wird und damit der Druckverlust über den Wärmeübertrager steigt. Im ersten Versuch steigt dieser um 945 % (Heizen), beziehungsweise 1040 % (Kühlen), im zweiten Versuch um 620 % (Heizen), beziehungsweise 1420 % (Kühlen).

Tabelle 30: Messwerte des mWPVS am Anfang und am Ende der Messperioden

		V̇ Heizen	V̇ Kühlen	Δp Heizen	Δp Kühlen
1. Versuchsreihe	Start	20,51 l/min ↓	19,38 l/min	2,47 kPa ↓	2,26 kPa
	nach 3 Monaten	5,52 l/min	8,57 l/min	25,83 kPa	25,80 kPa
2. Versuchsreihe	Start	10,90 l/min ↓	10,91 l/min	3,59 kPa ↓	1,70 kPa
	nach 2 Monaten	1,55 l/min	2,24 l/min	25,83 kPa	25,81 kPa

Beim Öffnen der Wärmeübertrager bestätigten sich die anhand der Messwerte vermuteten Verschmutzungen. Auch im Zulauf zum Versuchsstand und zu den Wärmeübertragern hatten sich Ablagerungen gebildet. Zusätzlich lag bei beiden Versuchsreihen eine starke Verschmutzung der Wärmeübertrageroberflächen vor.

Um die Ablagerungen zu analysieren wurde diese von allen Wärmeübertragerplatten durch einen Plastespatel abgestreift und für den Transport in verschließbare Plastetüten gefüllt. Die Analyse fand durch einen handgehaltenen Röntgenfluoreszenz-Analysator (hRFA) statt, durch den die Ablagerungen auf ihre elementaren Bestandteile untersucht wurden. Bei der Analyse werden alle Elemente erfasst, deren Atommasse schwerer als die von Magnesium ist. Proben werden vorbereitend im Labor getrocknet und homogenisiert. Die Messung findet durch Anregung der Proben mittels Röntgenstrahlung statt, wobei die enthaltenen Elemente eine jeweils für sie charakteristische Fluoreszenzröntgenstrahlung abgeben. Die Messung der Intensität dieser lässt direkt Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der entsprechenden Ablagerungen zu. In Abbildung 83 sind die Ergebnisse der hRFA-Analyse der Ablagerungen dargestellt.

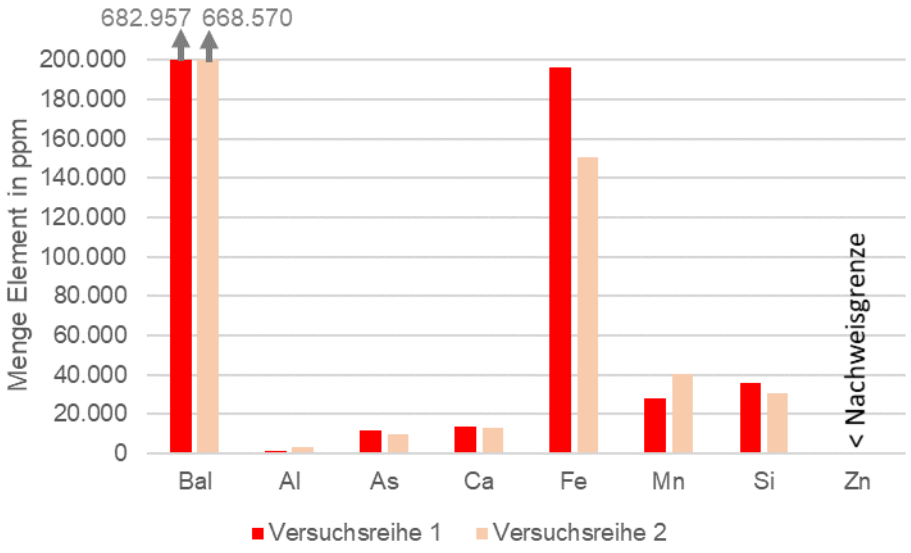


Abbildung 83: Ergebnisse der Feststoffanalyse der Ablagerungen auf den Wärmeübertrageroberflächen des Versuchsstandes (Versuchsreihe 1: 08.03.2023, Versuchsreihe 2: 24.05.2023)

Bei beiden Versuchsreihen finden sich hohe Mengen an gebundenem Eisen in den Ablagerungen und ein hoher Bal-Wert ist zu erkennen. Bal steht für Balance und bildet den Summenparameter für alle nicht messbaren Elemente. Ein hoher Bal-Wert deutet u.a. auf eine hohe Menge an Organik in den Ablagerungen hin.

In Abbildung 84 sind die Ergebnisse der verschiedenen untersuchten modifizierten Wärmeübertrageroberflächen dargestellt. Es ist der prozentuale Verlust (bezogen auf die nutzbare Wärmeleistung) im Vergleich zum Standardmaterial (X5CrNiMo17-12-2) gezeigt. Alle Messpunkte oberhalb der 0-%-Linie (grauer Bereich) sind schlechter als das Standardmaterial, alle unterhalb (grüner Bereich) sind besser.

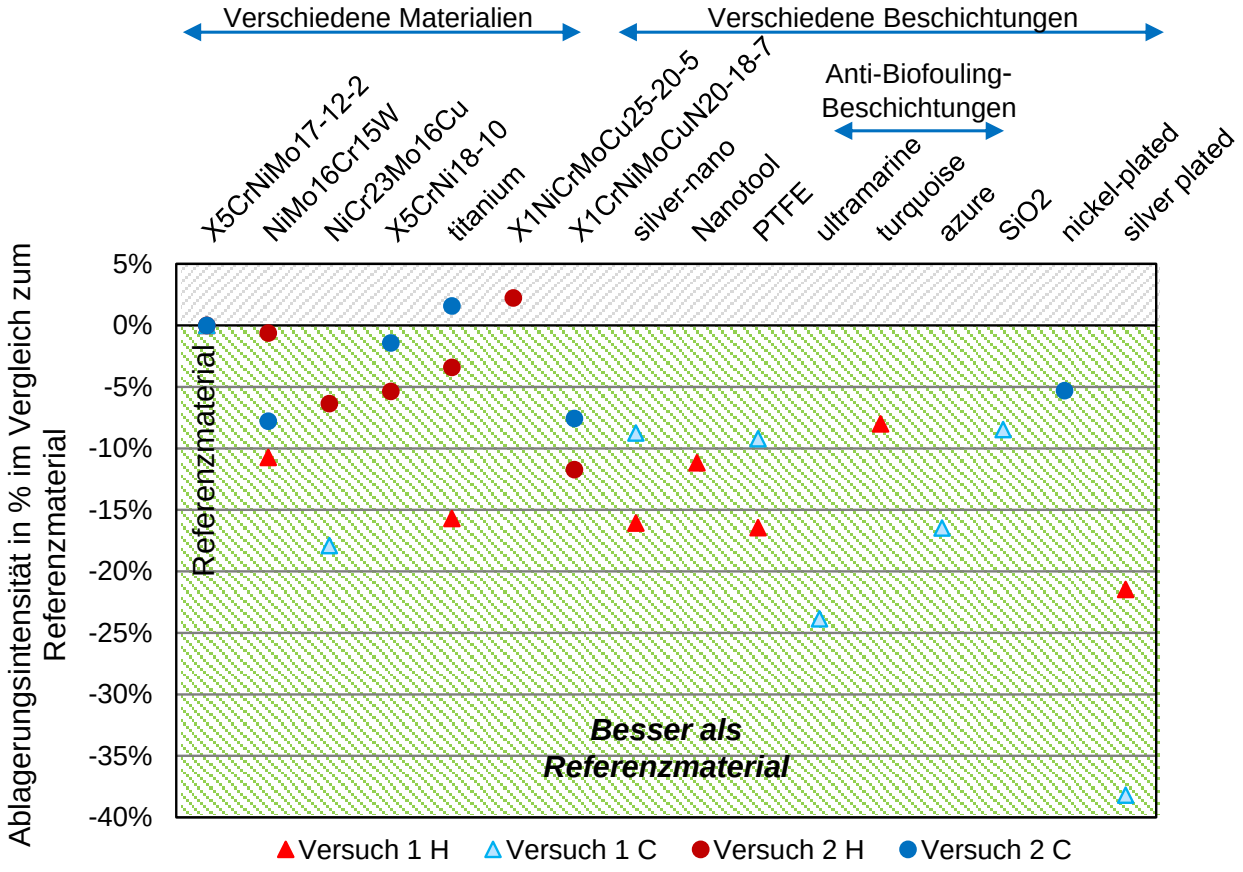


Abbildung 84: Vergleich des Verlusts durch Fouling für die verschiedenen untersuchten Wärmeübertrageroberflächen (H=Heiz-Wärmeübertrager, C=Kühl-Wärmeübertrager)

Es wird deutlich, dass durch die Nutzung von modifizierten Wärmeübertrageroberflächen die Verluste durch Fouling erheblich reduziert werden können. Durch die Nutzung von versilberten Oberflächen ist eine Reduktion des Foulings um bis zu 40 %-Punkte möglich. Auch die Anti-Biofouling-Beschichtungen (ultramarine, turquoise, azure) ermöglichen Reduktionen von über 10 %-Punkten. Zu berücksichtigen ist dabei, dass aktuell anhand der durchgeführten Versuchsreihen noch keine Aussage über Lebensdauer der Beschichtungen getroffen werden kann.

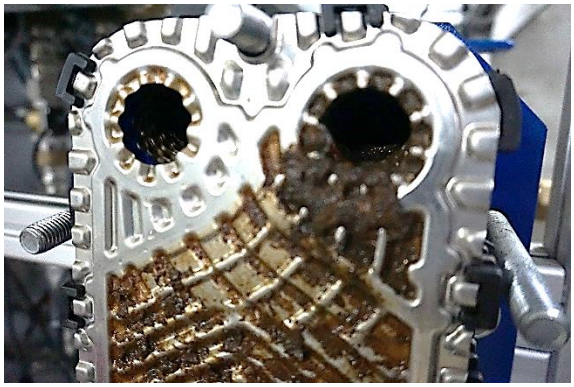


Abbildung 85: Verschmutzungen im Zulauf des Wärmeübertragers nach Versuch 1

Abbildung 86: Ablagerungen auf der Wärmeübertragerplatte des Standardmaterials nach Versuch

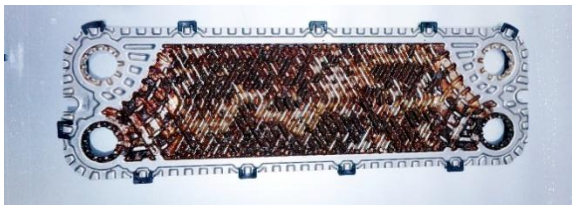


Abbildung 87: Verschmutzungen auf der NiCr23Mo16Cu -Platte nach Versuch 1 im Kühl-Wärmeübertrager

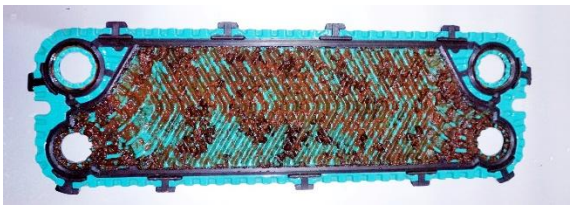


Abbildung 88: Verschmutzungen auf der Platte mit türkiser Beschichtung nach Versuch 1 im Heiz-Wärmeübertrager

Abbildung 89: Verschmutzungen auf der NiMo16Cr15W -Platte nach Versuch 2 im Heiz-Wärmeübertrager

Abbildung 90: Verschmutzungen auf der Titan-Platte nach Versuch 2 im Kühlwärmeübertrager

Zusammenfassung des Versuchsstandorts 1

Die Kernergebnisse der Untersuchungen mit dem Wärmeübertragerversuchsstand am ersten Versuchsstandort sind nachfolgend stichpunkthaft aufgeführt:

- bei einer energetischen Nutzung des Grubenwassers ist, ohne Gegenmaßnahmen, mit einer wesentlichen Reduktion der Effizienz durch Fouling zu rechnen,
- neben dem Wärmeübertrager sind dabei auch die Zuleitungen durch Ablagerungen betroffen,
- eine Analyse der Ablagerungen zeigt, dass die Anlagerungen im Wesentlichen aus Eisen und organischen Materialen bestehen, aus diesem Grund sind insbesondere Oberflächen, die ein gutes Verhalten gegen Biofouling aufweisen, zu empfehlen,
- der Vergleich der untersuchten Oberflächen zeigt, dass eine Silberbeschichtung oder Anti-Biofouling-Beschichtungen für den Standort zu empfehlen sind, auch der Edelstahl NiMo16Cr15W ist zu empfehlen,
- es ergab sich keine generelle Tendenz ob Fouling vermehrt ausprägt, wenn das Grubenwasser abgekühlt oder aufgeheizt wurde und bewies somit eine Oberflächenabhängigkeit,
- auf Basis der beiden Versuchsreihen kann noch keine Aussage zur Lebensdauer der Beschichtungen getroffen werden.

Empfehlungen für die Betriebsweise

Bei einer geplanten energetischen Nutzung können für die Betriebsweise erste Aussagen getroffen werden. Zunächst ist festzustellen, dass die Verschmutzung in relativ kurzer Zeit auftrat und den Analysen nach überwiegend aus Biofouling besteht. Insbesondere langsame Strömungsgeschwindigkeiten fördern das Wachsen einer dickeren Foulingschicht. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit könnte dagegen zu einer langsamer anwachsenden Foulingschicht führen (KUKULKA et al., 2007). Abbildung 91 verdeutlicht die Möglichkeit der Foulingverminderung durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit gegenüber von Biofouling.

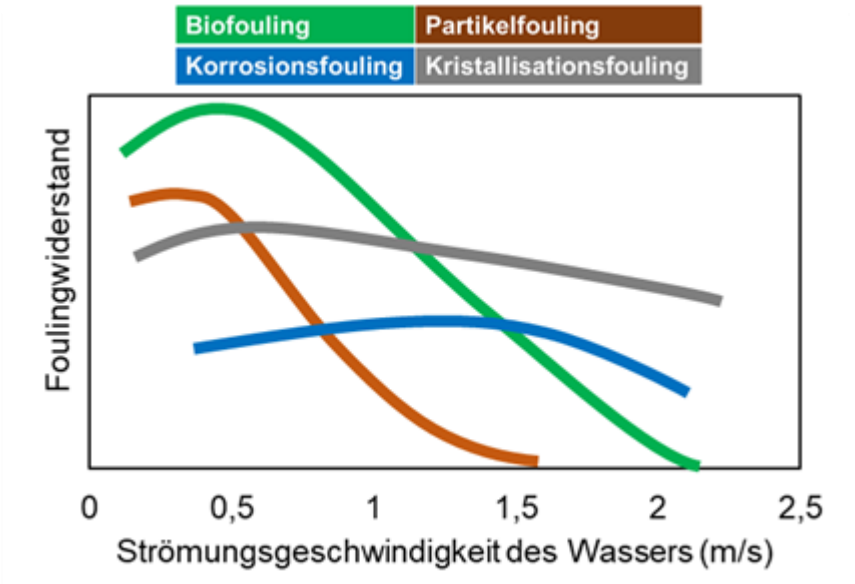


Abbildung 91: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf den Foulingwiderstand und bei verschiedenen Foulingmechanismen (modifiziert nach VDI-GESELLSCHAFT, 2013)

Im Versuchsstand herrschen an den wärmeübertragenden Flächen Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,1 m/s was zu einem schnelleren Anwachsen der Foulingschichten führt. In einer realen Grubenwasseranlage kann demnach eine höhere Strömungsgeschwindigkeit einen längeren Betrieb gewährleisten, bevor eine Reinigung notwendig wird. Des Weiteren werden Anti-Biofouling- oder Silberbeschichtungen empfohlen, die während des Versuchs gute Resultate erzielten. Aus der Anpassung des Wärmeübertragers und des Strömungsregimes ergeben sich verlängerte Wartungsintervalle für die Reinigung, die am Versuchsstandort erzielt wurden.

Reinigungsmöglichkeiten

Eine Reinigung wurde am Versuchsstandort manuell mit einer Bürste durchgeführt. Die Ablagerungen ließen sich dadurch sehr gut entfernen. Eine automatisierte Reinigung kann über eine Cleaning-In-Place (CIP) Anlage geschehen, die unter anderem in der Chemie- und Lebensmittelindustrie aber auch in Grubenwassergeothermieanlagen eingesetzt werden (MOERMAN et al., 2013; TSAI, 2005; LI et al., 2019). Solch eine Anlage zirkuliert ein Reinigungsmittel im Kreislauf über die zu reinigenden Flächen. Dabei kann das Reinigungsfluid ebenfalls beheizt werden, um die Effektivität zu erhöhen. Im Kontext der Grubenwassergeothermie und den sich bildenden Ablagerungen wurde bisher festgestellt, dass Säuren für die metallischen Ablagerungen an den Wärmeübertrageroberflächen die besten Resultate für die Lösung der Schicht erzielten. Nach einer solchen Behandlung sind auch zunächst harte Foulingschichten durch eine Spülung entfernbar.

Im Zusammenhang mit dem Versuch am Standort 1 kann diese Empfehlung jedoch nur vorläufig ausgesprochen werden, da ein sehr hoher Organikanteil das Reinigungsverhalten beeinflussen kann. Dies muss in weiteren Schritten untersucht werden.

5.2.2 Versuchsstandort 2

Im Rahmen der Versuche für die Potenzialstudie Sachsen war der mobile Wärmepumpenversuchsstand weiterhin in einem ehemaligen Silbererzbergwerk installiert. In diesem Versuch sollte neben dem Ablagerungsverhalten an verschiedenen Materialien und Beschichtungen ein weiterer relevanter Zusammenhang untersucht werden. Dies betrifft die Möglichkeit, dass sich Platten je nach Position im Wärmeübertrager unterschiedlich schnell zusetzen. Das zeitlich versetzte Anwachsen der Ablagerungen könnte eine Veränderung des Durchströmungsverhaltens bedingen, was den übertragbaren Wärmestrom mindert. Dies hätte praktische Auswirkung auf die Häufigkeit der Reinigungszyklen. Auch müssten die Ergebnisse der Beschichtungen um einen Korrekturfaktor angepasst werden, da ein unterschiedlich stark ausgeprägtes Ablagerungswachstum die Ergebnisse verzerren würde. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Plattenpositionen zu gewährleisten, wurde ein Wärmeübertrager mit Edelstahlplatten des gleichen Typs ausgestattet (X5CrNiMo17-12-2). Weiterhin standen an dem Versuchsstandort zwei Grubenwässer zur Verfügung. Beide wurden durch eine getrennte Wasserführung in jeweils einem der Wärmeübertrager bezüglich ihrer Ablagerungszusammensetzung untersucht.

Die Wässer besitzen eine Temperatur im Bereich von 11-12 °C und sind dementsprechend niedrig-temperierte Grubenwässer. Der Versuch wurde über zwei Monate an dem betreffenden Standort durchgeführt. Der Standort wird im Weiteren auch als Versuchsstandort 2 bezeichnet. Das Anlagenschema ist in Abbildung 92 dargestellt.

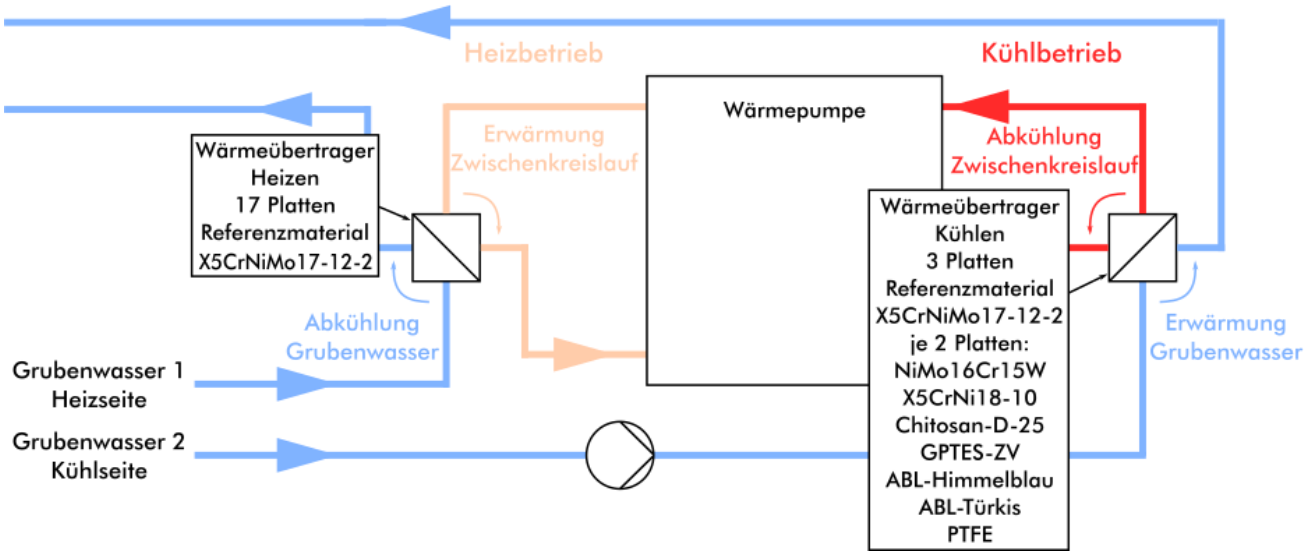


Abbildung 92: Fließschema des mWPVS der TU Bergakademie Freiberg am Versuchsstandort 2

Ergebnisse des Versuchsstandortes 2

Die Ergebnisse in Abbildung 93 zeigen, dass allein aus der Positionierung der Platten im Wärmeübertrager keine Tendenz zur Ablagerungsbildung zu erkennen ist. Der Vergleich der Ergebnisse für die Ablagerungsbildung auf den unterschiedlichen Oberflächen ist damit ohne einen Korrekturfaktor möglich. Am Untersuchungsstandort ergibt sich durch die Ablagerungen im Wärmeübertrager bei Grubenwasser 1 (Heizseite) eine durchschnittliche Reduktion des übertragbaren Wärmestroms von 24 %.

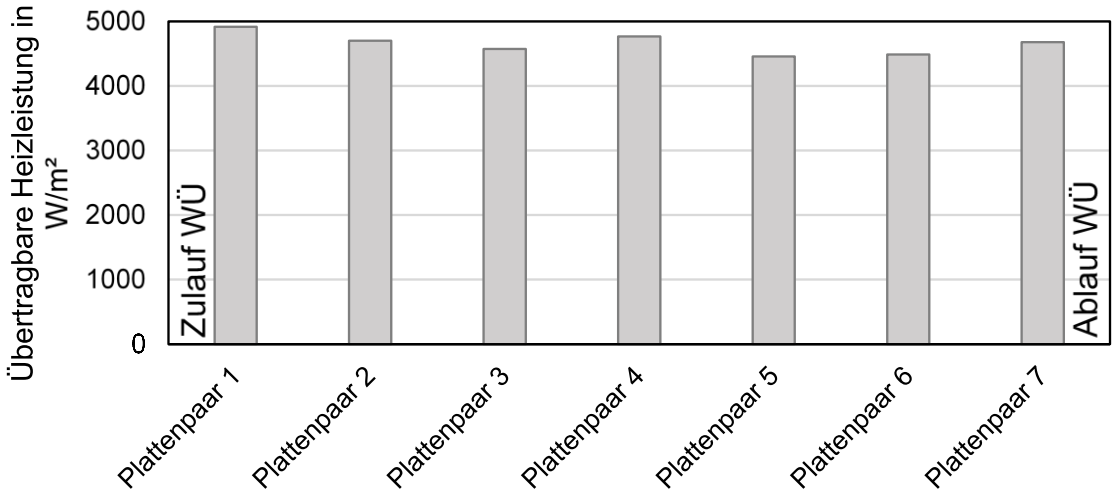


Abbildung 93: Übertragbare Heizleistung pro verschmutzten Plattenpaares über den Wärmeübertrager (Heizseite, Grubenwasser 1)

Für die verschiedenen Materialien auf der Kühlseite (Grubenwasser 2) zeigt sich, dass die Anti-Biofouling-Beschichtungen, die PTFE-Beschichtung sowie die Edelstähle und das Referenzmaterial auf einem ähnlichen Niveau liegen (siehe Abbildung 94). Am besten schneidet dabei NiMo16Cr15W ab. Die Ablagerungen fallen bei diesem Material um 10 %-Punkte geringer aus als beim Referenzmaterial. Das bedeutet eine relative Verbesserung von 22 %. Am besten schneidet die Chitosan-Beschichtung ab, auf dieser sind die Ablagerungen 29-%-Punkte geringer als beim Referenzmaterial, das bedeutet eine Reduktion von 67 % im Vergleich zum Standardmaterial. Deutlich schlechter als das Referenzmaterial schneidet die GPTES-ZV-Beschichtung (ebenfalls auf Chitosan-Basis) ab, auf dieser haben sich 15 %-Punkte mehr Ablagerungen gebildet als auf dem Referenzmaterial. Es zeigte sich dabei, dass die Beschichtung nicht auf der Platte gehalten hat und sich im Laufe des Versuchs ablöste und mit den Ablagerungen vermischte. Im Mittel lag die Reduktion des übertragbaren Wärmestroms bei 40 %.

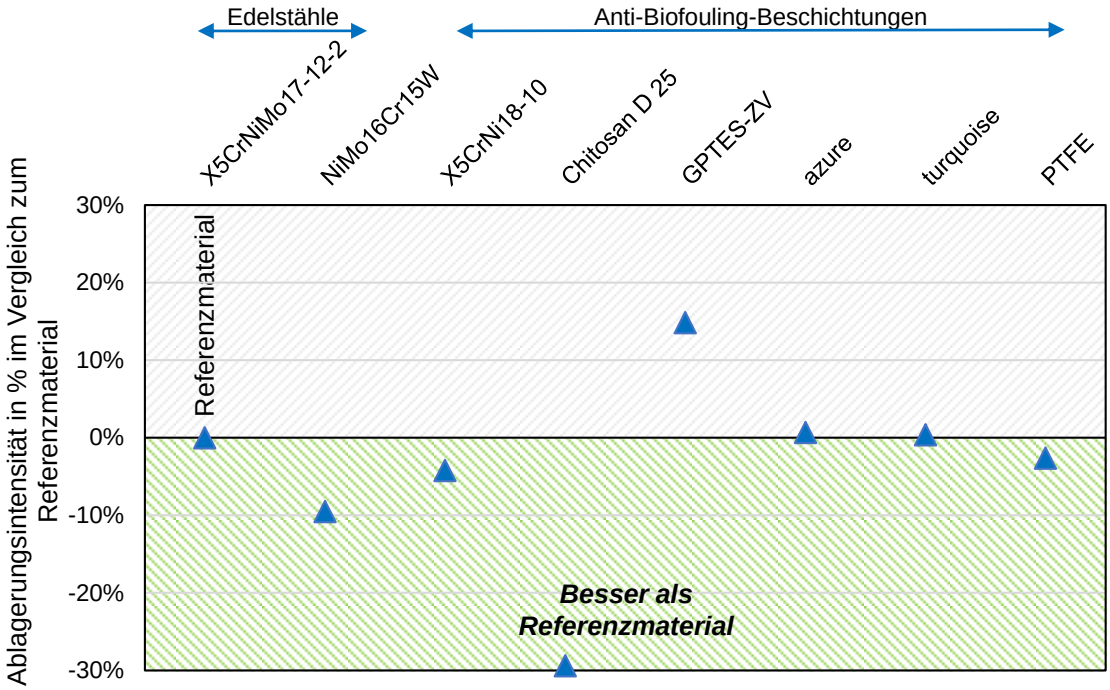


Abbildung 94: Ergebnisse der Versuchsreihe für die unterschiedlichen Materialien im WÜ auf der Kühlseite (Grubenwasser 2)

Auch an diesem Versuchsstandort wurde eine Analyse der Ablagerungen durchgeführt. Dazu wurde erneut der im Versuchsstandort 1 beschriebene handgehaltene Röntgenfluoreszenz-Analysators verwendet. Eine Analyse der Ablagerungen auf den Platten ist in Abbildung 95 dargestellt.

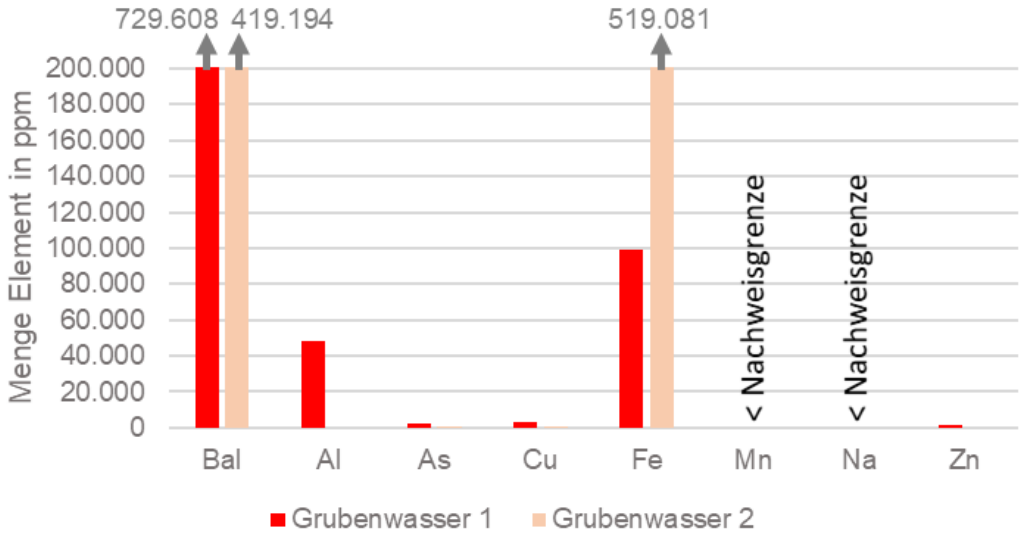


Abbildung 95: Ergebnisse der Feststoffanalysen der Ablagerungen in den Wärmeübertragern

Aus der Analyse zeigt sich, dass ein großer Teil der Ablagerungen das Element Eisen beinhalten, wobei nicht festgestellt werden konnte, in welcher Bindungsform dieses vorlag. Weiterhin können bei Grubenwasser 1 (Heizseite) ebenfalls Aluminium, Arsen und Zink nachgewiesen werden. Die Eisenmenge von Grubenwasser 2 ist mehr als 5-mal so hoch wie die von Grubenwasser 1. Ein Großteil der anderen Ele-

mente liegt unterhalb der Nachweisgrenze. Zu beachten ist noch der Bal-Wert, dieser liegt auch bei beiden über 400.000 ppm. Auch hier deutet ein hoher Bal-Wert u.a. auf eine hohe Menge an Organik in den Ablagerungen hin.

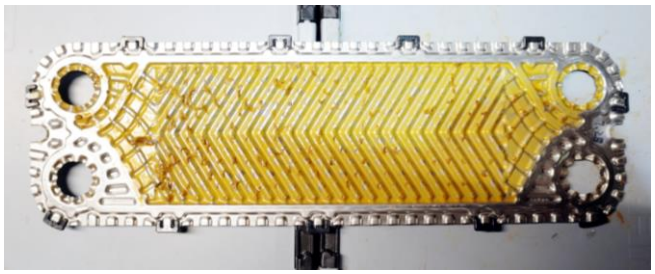


Abbildung 96: Verschmutzungen auf der ersten AISI-316-Platte auf der Seite des Grubenwassers

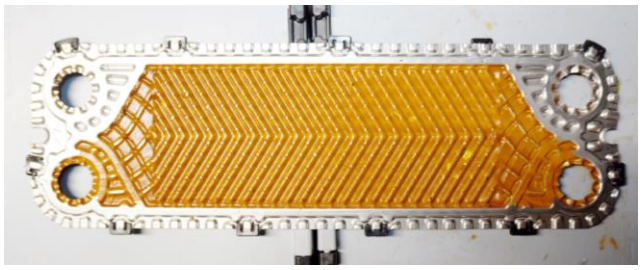


Abbildung 97: Verschmutzung auf der AISI-316-Platte auf der Seite des Grubenwassers 2

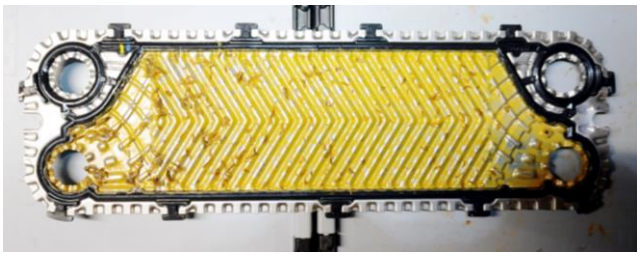


Abbildung 100: Verschmutzungen auf der letzten AISI 316-Platte auf der Seite des Grubenwassers 1

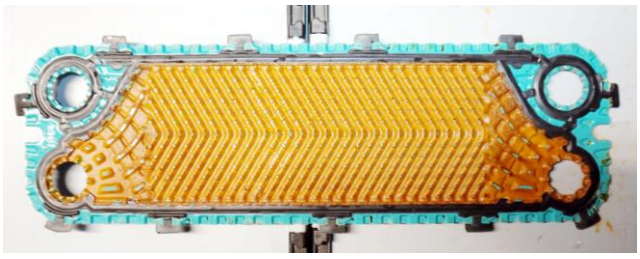


Abbildung 98: Verschmutzung auf der ersten ABL-Türkis-Platte auf der Seite des Grubenwassers 2

Zusammenfassung Versuchsstandort 2

Die Kernergebnisse der Untersuchungen mit dem Wärmeübertragerversuchsstand am zweiten Versuchsstandort sind nachfolgend stichpunkthaft aufgeführt:

- schnelle Bildung von Ablagerungen (Versuchsdauer 2 Monate), die sich in einer Reduktion des übertragbaren Wärmestroms niederschlagen (Grubenwasser 1: –25 %, Grubenwasser 2: –39 %),
- auf der Kühlseite in Grubenwasser 2 haben sich mehr Ablagerungen gebildet, Ursache sind hier auch die schwierigeren Ausgangsbedingungen (niedriger pH-Wert, hoher Eisengehalt),
- die Positionierung der Testmaterialien im Wärmeübertrager hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Ablagerungsbildung,
- als Empfehlung für das Wärmeübertragermaterial ergeben sich die Chitosan-Beschichtung sowie der Edelstahl NiMo16Cr15W, sie sorgen für eine Verbesserung von mind. 25 % gegenüber dem Referenzmaterial,
- die Feststoffproben zeigen hohe Eisenmengen in den Ablagerungen, welche allerdings bei Grubenwasser 2 deutlich höher als bei Grubenwasser 1 ausfallen,
- hohe Balance-Werte deuten bei beiden Wärmeübertragern auf hohe Organik-Anteile (Biofouling) in den Ablagerungen hin,
- zur Haltbarkeit der Beschichtungen bei Langzeittests kann hier keine Aussage getroffen werden.

Empfehlungen für die Betriebsweise

Zur energetischen Nutzung des Grubenwassers am Versuchsstandort 2 können durch den Versuch erste Erkenntnisse gezogen werden. Zum einen unterscheiden sich die beiden Grubenwässer markant in ihrer Auswirkung auf die Wärmeübertragerplatten.

Insbesondere anhand von

Abbildung 96 bis Abbildung 98 kann der Unterschied zwischen den Ablagerungen, welche in Abbildung 95 analysiert wurden, visuell erkannt werden. Während die Ablagerungen auf Grubenwasserseite 1 mehr organische Ablagerungen enthalten, ist auf Grubenwasserseite 2 eine deutliche Eisenablagerung zu erkennen (intensive rostbraune Farbe). Eine hohe Strömungsgeschwindigkeit kann das Bilden einer organischen Schicht aus Mikroorganismen vorbeugen. Gleichzeitig ist diese ebenfalls bei Partikelfouling wirksam, was hauptsächlich die Eisenablagerungen betrifft. Aus Praxisversuchen konnte festgestellt werden, dass insbesondere durch Mangan getriebenes Kristallisationsfouling eine

dünnere, dafür härtere Ablagerungsschicht hervorruft (ABEYWICKRAMA et al., 2021). Da sich diese hauptsächlich durch hohe Temperaturunterschiede bildet, wird empfohlen, diese zwischen Grubenwasser und Wärmeübertragerplatte, zu minimieren. Dies kann ebenfalls durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bewerkstelligt werden, was gleichermaßen einen effektiven Wärmeübergang gewährleistet. Zusätzlich kann eine abgestimmte Beschichtung wie Chitosan D 25 eine signifikante Verminderung der Ablagerungen erzielen.

Reinigungsmöglichkeiten

Grubenwasser 1 ähnelt dem Grubenwasser des Versuchsstandorts 1 und demnach kann eine ähnliche Reinigungsempfehlung ausgesprochen werden. Ein Lösen durch mechanische Reinigung durch zum Beispiel Bürsten ist möglich. Zur Unterstützung einer zeiteffizienten Reinigung sollte eine Cleaning-in-Place Anlage verwendet werden, die ein saures Reinigungsfluid zirkuliert. Dieses sollte bestenfalls erwärmt sein. Auf der Seite von Grubenwasser 2 muss hingegen gesagt werden, dass durch die eisendominierten und härteren Ablagerungen eine Reinigung mit einem sauren Reinigungsfluid unerlässlich ist, um einen adäquaten Reinigungsgrad zu erzielen. Dies kann mit einer weiteren Methode der in-situ Reinigung kombiniert werden. Untersuchungen zeigen, dass von außen auf Wärmeübertrager aufgebrachter Ultraschall in der Lage ist, harte Ablagerungen vorzubeugen und zu beseitigen (KIESER et al., 2011; BANAKAR et al., 2023). Abbildung 99 zeigt den Wirkmechanismus der Ultraschallbehandlung einer Oberfläche.

.

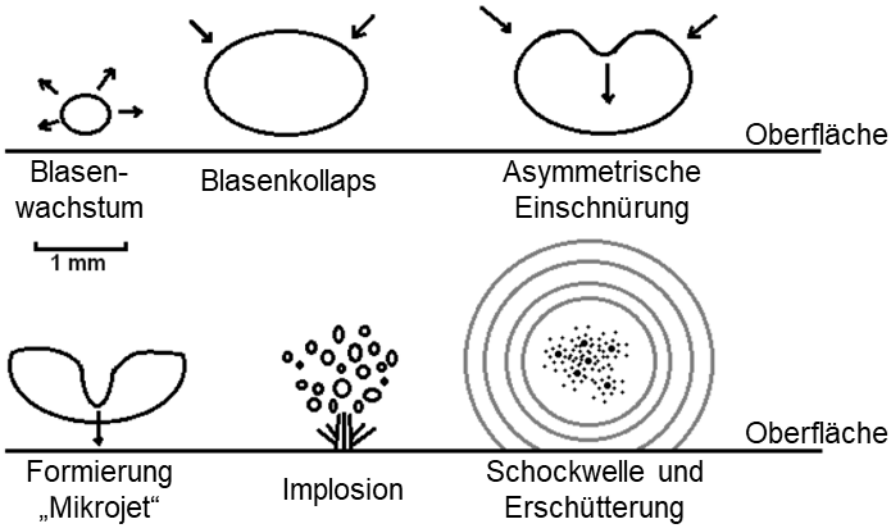


Abbildung 99: Schema des Reinigungsmechanismus des Ultraschalls nach KIESER et al. (2011)

Insbesondere für harte Ablagerungen kann eine kombinierte Behandlung mittels Cleaning-in-Place und Ultraschall eine vollständige Reinigung in-situ, das heißt ohne die Notwendigkeit eines Öffnens des Wärmeübertragers, ermöglichen.

5.2.3 Zusammenfassung der Versuchsstandexperimente

Durch die Durchführung der praktischen Messungen des mWPVS sollte das Ablagerungsverhalten von in Grubenwässern gelösten Stoffen an Wärmeübertragern untersucht werden. Dafür wurden zwei unterschiedliche Standorte mit insgesamt drei unterschiedlichen Grubenwässern gewählt. An beiden Standorten sollten Aussagen zur Wahl von Wärmeübertragermaterialien getroffen werden, welche die Wartungsintensität für eine potenzielle großskalige Grubenwassergeothermieanlage verringern. Dazu wurden 7 Plattenmaterialen und 11 Plattenoberflächen für die Untersuchung getestet. Die Kernaussagen dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- beide Standorte weisen unabhängig vom Material Foulingwachstum auf,
- am Versuchsstandort 1 entstand eine überwiegend biologisch geprägte Foulingschicht, deren Wachstum durch die vergleichsweise hohe Temperatur noch begünstigt wurde und welche sich am effektivsten durch den Edelstahl NiCr23Mo16Cu, eine Silber- oder eine Anti-Biofoulingbeschichtung vermindern ließ,
- am Versuchsstandort 2 begünstigte das für die Untersuchung der Wärmeübertragermaterialien gewählte Grubenwasser 2 die Bildung einer eisendominierten Ablagerungsschicht, welche sich am effektivsten durch den Edelstahl NiMo16Cr15W sowie eine Chitosan-Beschichtung vermindern ließ. Grubenwasser 1 hingegen bildete ebenfalls eine biofoulingdominierte Schicht aus, was eine weitestgehend temperaturunabhängige Bildung an diesem Standort nahelegt,
- am Versuchsstandort 1 wie am Versuchsstandort 2 konnten Foulingverminderungen von jeweils bis zu 40 % und 30 % erzielt werden.

Für künftige Untersuchungen der Wärmeübertragermaterialien können aus den Versuchen ebenfalls Versuchsoptimierungen abgeleitet werden. So sollte über eine Vorauswahl von Materialien und Oberflächen die Anzahl so eingeschränkt werden, dass jedes Wärmeübertragermaterial in jedem Wärmeübertrager mehrfach installiert ist, um die Genauigkeit der Aussagen zu den Materialien zu erhöhen. Des Weiteren muss die Wärmeleitfähigkeit der Platten in kommenden Versuchen für praktische Aussagen zur Anlageneffizienz einbezogen werden, da eine Beschichtung mit geringeren Ablagerungen nicht zwangsläufig eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweist. Auch ist die Reinigung ein praktisch relevanter Aspekt der bei weiteren Versuchen mit untersucht werden muss. Die Erfahrungen der während der Versuche durchgeführten mechanischen Reinigung legen nahe, dass die Ablagerungen unterschiedlich stark

anhaften und sich Reinigungen somit unterschiedlich aufwändig durchführen lassen. Dies könnte in kommenden Versuchsreihen zunächst durch die Verwendung von einfachem Druckwasser und nachfolgend durch die Anwendung einer säurebetriebenen mobilen CIP-Einheit getestet werden.

Weiterhin war Ziel der Versuche festzustellen, ob sich die wärmeübertragenden Flächen je nach Position in den Wärmeübertragern unterschiedlich schnell zusetzen. Die entstandenen Ablagerungen sollten einen Anhaltspunkt dafür liefern, ob eine Auswirkung im praktischen großskaligen Anlagenbetrieb vorliegt und ob Korrekturfaktoren für die Interpretation der Untersuchung der Wärmeübertragermaterialien verwendet werden müssen. Die Ergebnisse sind nachfolgend vertiefende aufgeführt:

- die Position der durchströmten Platten in Plattenwärmeübertragern hat keinen nachweisbaren Trend für eine veränderte Ablagerungsbildung gezeigt,
- die Positionsunabhängigkeit kann nur für parallel-durchflossene Wärmeübertragerflächen bestätigt werden, so dass andere Wärmeübertrager strömungstechnisch bedingt abweichende Ergebnisse aufweisen können (zum Beispiel Rohrbündelwärmeübertrager).

Zuletzt wurden Aussagen über Ablagerungen aus dem Grubenwasser getroffen. Dazu wurden Proben von den Ablagerungen der Platten nach den Versuchen genommen und mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse auf die elementaren Bestandteile untersucht. Für die Grubenwässer an den Untersuchungsstandorten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- unabhängig von der Grubenwassertemperatur wiesen alle Ablagerungen auf einen hohen Anteil von organischen Verbindungen hin,
- neben organischen Verbindungen war Eisen in allen Versuchen dominierend in der Zusammensetzung der Ablagerungen, welches sich durch das Vorliegen im ungelösten Zustand hauptsächlich durch Partikelfouling ablagert. Dieser Zusammenhang konnte ebenfalls in früheren Versuchen gezeigt werden (Oppelt et al., 2020; Abeywickrama et al., 2021).

In Hinblick auf das Biofouling sollte in kommenden Versuchen zielgerichtet der in dem Balance-Wert (Bal) zusammengefasste Anteil der vorhandenen organischen Verbindungen untersucht werden, um so Aussagen zur Art des Biofoulings zuzulassen. Neben einer weiteren Eingrenzung von Wärmeübertragermaterialien lassen diese vertiefenden Untersuchungen ebenfalls Rückschlüsse zu Reinigungsmethoden zu, welche durch Praxisversuche validiert werden können.

Durch die Voruntersuchung mit dem mWPVS konnten demnach praxisrelevante Aussagen über die Ablagerungsvorgänge der ausgewählten Standorte gegeben werden. Weiterhin können in künftigen Versuchen Materialien auf Basis der vorhandenen Ergebnisse vorausgewählt werden. Dies ermöglicht

durch die potenzielle Mehrfachtestung bestimmter Wärmeübertragermaterialien einen genaueren Vergleich und bietet eine Basis für Reinigungsversuche.

6 Iststandanalyse bestehender Anlagen

Um praxisrelevante Empfehlungen für künftige Anlagen zu geben, ist ein wichtiger Aspekt das Untersuchen und Abgleichen von Besonderheiten bereits bestehender Grubenwassergeothermieanlagen. Die in Sachsen betriebenen Anlagen sind in Tabelle 31 abgebildet. Durch die Zusammenarbeit der TU Bergakademie Freiberg mit den externen Einrichtungen, welche solche Anlagen betreiben und durch die Erfahrung mit der eigenen uniinternen Anlage, konnte bereits ein Fundus an Erfahrungen gesammelt werden.

Tabelle 31: In Sachsen errichtete Grubenwassergeothermieanlagen geordnet nach aktuellem Betriebsstatus (Stand 30.04.2024)

Ort	Grube/ Revierteil	T_{ein} (°C)	T_{aus} °C)	$Q_{WP,Heiz}$ (kW)	Nutzungsart	Inbetriebnahme	Projektstatus
Ehrenfriedersdorf	Nord-West-Feld	10	-	95	Mittelschule	1994	in Betrieb
Ehrenfriedersdorf	Revier Sauberg	11	4	120	Museum, Besucherbergwerk Zinngrube	1998	in Betrieb
Aue-Bad Schlema	Projekt "Leon"	21	-	-	Einfamilienhaus	2007	in Betrieb
Zwickau	Grube Zwickau	24	10	600	Hochschulgebäude	2018	Sensorwartung
Aue-Bad Schlema	Schiller-Schule, Grube Schlema-Aberoda	11	5	106	Friedrich-Schiller-Schule	2013	In Revision
Freiberg	Rothschönberger Stollen	15	17	200	IEC TUBAF	2013	Stollenwartung
Freiberg	Rothschönberger Stollen	14	-	860	Kreiskrankenhaus Freiberg	2014	Stollenwartung
Pobershau	Walfisch-Stollen, Weiße Villa	-	-	15	Zweifamilienhaus	2008	nicht bekannt
Freiberg	Alter Fürstenstollen	10,2	-	130	Schloss Freudenstein	2009	außer Betrieb, Prüfung Wiederinbetriebnahme
Marienberg	Wismut-Schacht 302	12	7	800-1.700	Freizeitbad Aqua Marien	2007	rückgebaut

Dabei ist es wichtig zu beachten, dass die Situation eines jeden Bergbaureviers und damit des Grubenwassers (zum Beispiel Chemie, Temperatur, Erschließbarkeit) individuell zu bewerten ist. Gewonnene

Erkenntnisse aus einer Anlage in Freiberg können damit beispielsweise nur bedingt verallgemeinert auf andere Reviere, wie zum Beispiel dem Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz übertragen werden. Jedoch lassen sich aus den gewonnenen Erfahrungen der Anlagen verschiedene Herausforderungen herauskristallisieren, die den erfolgreichen Betrieb erschweren. Diese können in Herausforderungen während der Planungs- und Bauperiode sowie in Herausforderungen während der Betriebsperiode eingeordnet werden.

6.1 Herausforderungen - Planung und Bau

Tabelle 32 stellt die zusammengetragenen Herausforderungen in der Erschließungsperiode des Grubenwassers dar. Neben dem spezifizierten Problem sind weiterhin qualitatives Kostenrisiko, die Anzahl betroffener Anlagen in Sachsen sowie Maßnahmen zur Vorbeugung und Beseitigung aufgelistet.

Tabelle 32: Aufgetretene Probleme bei der Planung und des Baus in bestehenden sächsischen Anlagen und Maßnahmen zur Vorbeugung und Beseitigung

Problem	Kosten	betroffene Anzahl (bekannt)	Vorbeugung	Beseitigung
Fehlbohrungen	mittel - hoch	1	- gutes Risskartenmaterial - erfahrenes Planungsbüro - Erkundungsbohrung	- Sprengmaßnahmen wenn möglich
Grubenwassertemperatur bei Erschließung gering	mittel	1	- konservative Planung	/
Grubenwasservolumenstrom zu gering	mittel - hoch	0	- Austausch mit Fachleuten zur Grube und Bohrpunkt (zum Beispiel Alter, Verbruchrisiko) - Erkundungsbohrung - Pumptests	- zusätzliche Bohrungen

Fehlbohrungen

Wird das Grubenwasser durch Bohrungen erschlossen, ist es essenziell, dass das Risiko einer Fehlbohrung (nicht Treffen der anvisierten Grubenstruktur) minimiert wird. Das Risiko einer Fehlbohrung steigt u. a. mit der Bohrtiefe, der Größe der anvisierten Struktur und der Qualität des Risskartenmaterials. Ein Bestandteil ist daher das Auswerten von zuverlässigen Risskarten. Da in alten Gruben Risswerke unterschiedlicher Qualität zur Verfügung stehen, müssen zur Auswertung erfahrene Planer dafür eingesetzt und ggf. ebenfalls lokale Fachexperten und Behörden eingebunden werden. Um das Risiko einer Fehlbohrung weiterhin zu minimieren, können kleinere Erkundungsbohrungen vorgenommen werden, die aufgrund der geringeren Kosten ein geringeres wirtschaftliches Risiko tragen.

Konnte bei einer Grubenwasserbohrung das Grubengebäude nicht getroffen werden, so besteht, je nach Abstand zur Struktur, die Möglichkeit einen hydraulischen Durchbruch durch eine Sprengung zu erzielen. Um diese Möglichkeit als Alternativmaßnahme nutzen zu können, ist es unabdingbar zuvor mit den zuständigen Behörden abzuklären, ob und in welchem Ausmaß dies durchführbar ist. Schäden an Eigentum und Infrastruktur durch induzierte Schwingungen sollten durch eine Voruntersuchung ausgeschlossen werden.

Je nach Projektplanung kann eine unerwartete Fehlbohrung zu hohen wirtschaftlichen Nachteilen führen, die ebenfalls die Projektumsetzbarkeit gefährden können.

Grubenwassertemperatur bei Erschließung gering

Je nach Bergbaurevier und Standort der geplanten Grubenwassererschließung kann die Informationslage über die genaue Temperatur des Wassers unklar sein. In Revieren, an denen Temperaturanomalien in den Strecken und Schächten bekannt sind, liegt daher nahe, für die wirtschaftlichste Projektplanung von diesen höheren Temperaturen auszugehen. Insbesondere in oberflächennahen Strecken muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Bewegung des unterschiedlich temperierten Grubenwassers innerhalb einer verwahrten Grube nicht mit Sicherheit beschrieben werden kann. Bei der Planung einer Grubenwasseranlage sollte daher immer die Möglichkeit abgedeckt sein, dass das Wasser nur die übliche Jahresmitteltemperatur aufweist (in sächs. Gruben etwa 10°C). Durch moderne Wärmepumpentechnologien können auch bereits diese Temperaturen bei korrekter Anlagenauslegung wirtschaftlich genutzt werden.

Grubenwasservolumenstrom zu gering

Für den auslegungsgemäßen Betrieb der Anlage müssen bestimmte Volumenstromwerte des geförderten Wassers erreicht werden, um die notwendige Energie bereitzustellen. Um sicherzustellen, dass der zu erschließende Grubenteil ein entsprechend großes mobilisierbares Grubenwasserreservoir besitzt, sollten bereits bei der Planung entsprechende Fachexperten zu den lokalen Gegebenheiten konsultiert werden.

Ist ein wasserführender Grubenbau durch eine Bohrung getroffen, so müssen für eine Sicherstellung der Wasserverfügbarkeit Pumptests durchgeführt werden. Durch die Messung des Volumenstroms sowie des Wasserspiegels in der Bohrung können so Rückschlüsse auf die maximale Förderrate getroffen werden.

6.2 Herausforderungen - Betrieb

Tabelle 33 stellt die zusammengetragenen Herausforderungen in der Erschließungsperiode des Grubenwassers dar. Neben dem spezifizierten Problem sind weiterhin qualitative Kostenrisiken, die Anzahl betroffener Anlagen in Sachsen sowie Maßnahmen zur Vorbeugung und Beseitigung aufgelistet.

Tabelle 33: Aufgetretene Probleme bei dem Betrieb in bestehenden sächsischen Anlagen und Maßnahmen zur Vorbeugung sowie zur Beseitigung

Problem	Kosten	Betroffene Anzahl (bekannt)	Vorbeugung	Beseitigung
Verschmutzung der Wärmepumpe durch Grubenwasser (GW)	hoch	1	- Zwischenkreis installieren (Abkopplung GW-Wärmepumpe WP)	- Instandsetzung/Austausch WP
Verschmutzung der Wärmeübertrager durch GW	niedrig - mittel	>5	- Standortauswahl - Auswahl Ansaugstelle - Beschichtungen - Anlagenfahrweise - Zykloneinsatz, Grobfilter - Vermeidung O_2-Eintrag - Druckhaltung	- optimiertes Wärmeübertrager-Material - Rückspülung (Wasser, Druckluft…) - Cleaning-In-Place Einheit mit Säure (CIP) - mech. Reinigung (Demontierbarkeit!)
Verschmutzung der Rohrleitungen	niedrig - mittel	1	- Vermeidung O_2-Eintrag - Druckhaltung - Anlagenfahrweise	- Hochdruckreinigung (Molchung → Rohrzugang nötig)
Bohrlochfilter zugesetzt	niedrig-mittel	1	- angepasste Pumpe - angepasste Filter	- Reinigung mechanisch - Reinigung hydraulisch - Austausch
Wasserverfügbarkeit bei Wasserhaltungsmaßnahmen	niedrig-hoch	2	- Klärung Wasserhaltung Besonderheiten (zum Beispiel Stollen-Sanierung, Pumpbetrieb) - Absprache zu Eingriffen während unkritischen Perioden - Unterstützungssystem	/
Druckstöße in Rohrleitungen	niedrig - mittel	1	- freien Versturz vermeiden (Druckhalteventil)	- Einbau Druckhalteventil

Problem	Kosten	Betroffene Anzahl (bekannt)	Vorbeugung	Beseitigung
wärmepumpentechnischer Defekt	niedrig - hoch	3	- Monitoring - vollständige Dokumentation - geschultes Personal - Wartung	- geschultes Personal - Wärmepumpen Fachfirma
Grubenwassertemperatur fällt ab	mittel	-	- korrekte Auslegung der Anlage (Tools zur Hilfestellung) - Nutzung von Kühlung im Sommer - Abwärmeeinspeisung	- Regeneration durch langfristige Wärmeeinspeisung
Temperatur nach Wärmepumpe zu gering	gering - mittel	2	- WP Heiztemperatur korrekt planen (Grundlastfähigkeit) - hydraulischer Abgleich	- Kalibrierung WP
Bei GW-Abschlagung: Grenzwerte im Oberflächenwasser (OW) überschritten	niedrig - hoch	1	- GW-Volumenstrom auf OW-Volumenstrom anpassen (saisonal) - höhere Temp.-differenz nutzen	- Reinjektion in Grube
Abnehmerleistung zu gering	niedrig - hoch	1	-frühzeitige Einbindung möglicher Interessensgruppen	- Erweiterung/Neubau eines Wärmeverteilnetzes zur weiteren Abnehmererschließung

<u>Verschmutzung der Wärmepumpe durch Grubenwasser</u>

Insbesondere bei den ersten Grubenwassergeothermieanlagen stand das Grubenwasser aufgrund nicht vorhandener praktischer Erfahrungen im direkten Kontakt mit der Wärmepumpe. Ablagerungen, die sich durch den Temperaturunterschied in der Wärmepumpe bildeten, konnten durch die Bauweise der Wärmepumpe nicht leicht beseitigt werden und führten zu kostenintensiven Instandsetzungs- oder Austauschmaßnahmen.

In nachfolgenden Generationen von Grubenwasseranlagen wurde daher der Grubenwasserkreislauf hydraulisch von den Wärmepumpen durch einen Zwischenkreislauf getrennt. Das Grubenwasser kommt daher nur mit einem Wärmeübertrager in Kontakt, der bei der Reinigung nur geringe Kosten verursacht. In diesem nimmt das Fluid des Zwischenkreislaufs die Wärme auf und transportiert sie zu den Wärmepumpen.

Besonders ist zu beachten, dass der Wärmeübertrager, der Grubenwasser und Zwischenkreislauffluid koppelt, korrekt montiert ist. Unsachgemäße Montage kann zu Diffusion des Grubenwassers oder der gelösten Mineralien in den Zwischenkreislauf und somit erneut zu kostenintensiven Ablagerungen in den Wärmepumpen führen.

Verschmutzung der Wärmeübertrager durch Grubenwasser

Durch die Fracht des Grubenwassers besteht ein nicht vermeidbares Risiko, dass sich Ablagerungen an den thermisch aktivierten Bauteilen im Wärmeübertrager bilden. Durch den Temperaturunterschied im Wärmeübertrager können sich Biofilme bilden und zuvor gelöste Mineralien ausfallen. Schwebstoffe können sich weiterhin an den Flächen absetzen.

Dieses als Fouling bezeichnete Verhalten variiert je nach Beschaffenheit des Grubenwassers und den eingesetzten Wärmeübertragermaterialien. Diese Faktoren bestimmen somit ebenfalls die Wartungsintensität und sind ein wichtiger Kostenfaktor im Betrieb. Gleichfalls gibt es mehrere Ansätze, welche effektiv gegen das Verschmutzen der Wärmeübertrager eingesetzt werden können. Dies beginnt bei der Wahl einer geeigneten Ansaugstelle. Die Saugpumpen sollten so installiert werden, dass sie nicht an einer Stelle das Wasser anpumpen, wo sich Schwebstoffe akkumulieren. Sie sollten beispielsweise daher nicht am Grund eines Reservoirs oder Stollens "liegen" sondern sich nahe der Wasseroberfläche befinden. Anlagentechnisch können weiterhin Optimierungen hinsichtlich der mit dem Grubenwasser in Kontakt stehenden Oberflächen vorgenommen werden. Beschichtungen sind nachgewiesen eine effektive Maßnahme, um Ablagerungen zu vermindern (Oppelt et al., 2021; TUBAF, 2022a). Eine Anlagenfahrweise mit Strömungsgeschwindigkeiten über 1 m/s im Wärmeübertrager und eine möglichst niedrige Temperaturdifferenz helfen weiterhin die Ablagerungsmechanismen zu hemmen (siehe Abbildung 91). Bauteile wie Zyklone oder Grobfilter vor dem Wärmeübertrager können sich je nach Grubenwasser wirtschaftlich auswirken, wobei zu beachten ist, dass nur bereits im Wasser vorhandene Schwebstoffe abgeschieden werden und Ausfällungen gelöster Stoffe weiterhin möglich sind. Diese Ausfällungen werden neben dem Temperaturunterschied im Wärmeübertrager durch den Eintrag von Sauerstoff begünstigt. Dies geschieht durch den Kontakt mit Luft in der Anlage, wodurch Oxidationsmechanismen in Gang gesetzt werden. Grubenwasseranlagen sollten daher auch im Grubenwasserkreis auf ihre Dichtheit geprüft werden.

Je nach Größe der Anlage kann es vorteilhaft sein, eine Druckhaltung zu implementieren, welche verhindert, dass Mineralien durch einen abfallenden Druck in der Ablage (beispielsweise bei Geometrieänderung der durchströmten Bauteile) ausfallen. Eine Druckhaltung sollte aufgrund der hohen technischen Anforderungen jedoch nur bei Großanlagen in Betracht gezogen werden.

Verschmutzung der Rohrleitungen

Die vorgenannten Ablagerungsprozesse der im Grubenwasser mitgeführten Frachten finden ebenfalls in allen nicht thermisch aktivierten Bauteilen, wie Rohrleitungen statt. Da an diesen Flächen im Vergleich zu Wärmeübertragerflächen keine relevanten Temperaturunterschiede vorhanden sind, sind weniger bis keine Foulingschichten durch das Ausfallen von Mineralien zu erwarten. Jedoch können mitgeführte Partikel und Mikroorganismen weiterhin zu Ablagerungen führen. Auch können Undichtigkeiten zum Eintrag von Sauerstoff und Ausfällungen führen, die sich partikulär ablagern können. Wie bereits bei der Verschmutzung der Wärmeübertrager erwähnt, kann auch hier eine entsprechende Anlagenfahrweise Ablagerungen minimieren.

Hohe Strömungsgeschwindigkeiten minimieren das Ablagerungsrisiko über die verschiedenen Foulingmechanismen. Bei größeren Systemen kann eine Druckhaltung ebenfalls dazu beitragen, Ausfällungen zu verhindern.

Bohrlochfilter zugesetzt

Bei Förderbohrungen ist ein Standardvorgehen, den zu erschließenden Horizont mit einem Bohrlochfilter zu versehen. Dieser ist dafür ausgelegt die Pumpvorrichtung vor groben Partikeln zu schützen. Je nach Partikelfracht des Grubenwassers ist es jedoch möglich, dass sich über den Betriebszeitraum die Filterschlitze zusetzen und der Druckabfall beim Durchströmen ansteigt. Die installierte Pumpe kann demnach mit ihrer Leistung nicht mehr den ursprünglich ausgelegten Volumenstrom erbringen und die Wärmeleistung der Anlage kann abfallen. Um das zu verhindern, kann eine stabilere Pumpe verwendet werden, welche im Betrieb nicht von kleineren Partikeln gestört wird. Dies erlaubt den Einsatz eines Filters mit gröberen Schlitzen und vermindert das Risiko des Zusetzens.

Ein zugesetzter Filter kann durch eine mechanische Reinigung (Bürsten) oder eine hydraulische Reinigung (Hochdruckspülen) gewartet werden. Sind die Ablagerungen nicht zu entfernen, muss der Filter durch einen neuen Filter ersetzt werden.

Wasserverfügbarkeit bei Wasserhaltungsmaßnahmen

Viele Altbergbaureviere besitzen eine Tiefe auf der das Grubenwasser mithilfe von aktiver oder passiver Wasserhaltung auf einem Level gehalten wird. Da sich Altbergbaugebiete teilweise noch im Sanierungsprozess befinden, ist daher die Möglichkeit zu beachten, dass sich dieses Niveau während der Lebensdauer der Anlage durch diese temporär ändert. Sanierungen der Entwässerungsstollen oder Absenkungen des Pumpniveaus können je nach Förderteufe zu einem Trockenfallen der Pumpen führen. Um dies

zu berücksichtigen, müssen vor der Standortauswahl der Entnahmebohrungen die lokalen Wasserhaltungsverhältnisse mit den zuständigen Behörden und Sanierungsfirmen abgeklärt werden. So können Ausnahmefälle direkt berücksichtigt und Ausfälle vermieden werden.

Druckstöße in Rohrleitungen

Druckstöße treten in Bezug auf Grubenwasseranlagen dort auf, wo eine schlagartige Druckänderung in einem geschlossenen Rohrleitungssystem stattfindet. Das kann beispielsweise durch das freie Verstürzen der Wassersäule in die Grube hervorgerufen werden. Wird die Grubenwasserförderung gestoppt, so führt das weiterhin in die Grube verstürzende Wasser zu einem Unterdruck im Rohrsystem, da das inkompressible Wasser den Druck selbst nicht kompensieren kann und das so entwichene Volumen nicht ausgeglichen wird. Je nach Ausmaß kann der sich schlagartig ausbreitende Unterdruck dazu führen, dass sich Kavitationsblasen bilden, die kurz nach ihrer Entstehung hörbar und mit mechanischer Belastung der Bauteile implodieren.

Um dies kostengünstig zu verhindern und gleichzeitig den Eintrag von Luft in das System zu verhindern, ist es notwendig, ein Druckhalteventil an den Rohrleitungen der Versturzbohrungen zu installieren. Im Stillstand befindet sich immer eine stehende Wassersäule in den Versturzbohrungen. Erst durch den Pumpbetrieb wird der Ansprechdruck des Ventils überwunden und das Wasser verstürzt.

Wärmepumpen technischer Defekt

Als technisches Bauteil unterliegen Wärmepumpen Verschleißerscheinungen. Auch wenn diese in der Anlagenauslegung und Kostenkalkulation mit einberechnet sind, ist es essenziell anfallende Wartungsarbeiten so optimiert wie möglich durchzuführen. Ein Grundstein dafür ist bereits der korrekte Aufbau der Anlage mit entsprechenden Monitoringvorrichtungen (zum Beispiel Volumenströme, Temperaturen, Drücke). Zusammen mit einer vollständigen Dokumentation der Anlage können dadurch größere Ausfälle verhindert werden. Um kleinere Defekte einzugrenzen, ist ein weiterer wichtiger Baustein die Verfügbarkeit von verantwortlichem Personal, das die Anlage betreut. Die Verantwortlichen sollten vor Inbetriebnahme und währenddessen umfassend einbezogen werden und die Möglichkeit haben, wahrgenommene Herausforderungen offen zu kommunizieren. Durch diesen Einbezug kann ebenfalls sichergestellt werden, dass Wartungen nach Plan und vorschriftsgemäß verlaufen. Sollte dennoch ein mit dem Personal vor Ort nicht behebbarer Anlagenmangel festgestellt sein, so muss eine Wärmepumpenfachfirma für die Wartung konsultiert werden.

Grubenwassertemperatur fällt ab

Durch den Anlagenbetrieb und den Wärmeentzug aus dem Gestein kann es zu Abkühlungseffekten kommen, die bei mangelhafter Anlagenauslegung zu einem kritischen Abfall der Extraktionstemperatur des Grubenwassers führen können. Die Anlagenleistung kann dann nicht mehr vollständig erbracht werden. Weiterhin können durch das Unterschreiten einer Mindestreinjektionstemperatur regulatorische Vorgaben verletzt werden, was zwangsläufig zur Einstellung des Betriebs der Anlage führen kann. Dies betrifft insbesondere Anlagen, wo abgekühltes Grubenwasser reinjiziert wird. Um dies zu verhindern, ist eine korrekte thermodynamische Berechnung der im Untergrund verfügbaren Energie notwendig. Ist das Energiepotenzial für eine alleinige Nutzung zum Heizen oder Kühlen nicht ausreichend, so ist eine Kombination dieser Nutzungsvarianten zu empfehlen. Im Winter entzogene Wärme kann im Sommer dem Bergwerkssystem wieder zugeführt werden, indem überschüssige Wärme aus den Gebäuden in das Grubenwasser abgegeben wird. Die Gebäude können insbesondere bei direkter Kühlung (keine Wärmepumpe notwendig) dadurch kostengünstig klimatisiert werden.

Weiterhin ist zu empfehlen, Abwärmequellen aus diversen Großbetrieben in das Grubensystem einzuspeisen und so das Versorgungspotenzial zu erhöhen. So kann auch ein bereits zu weit abgekühlter Grubenwasserkreislauf wieder regeneriert werden.

Temperatur nach Wärmepumpe zu gering

Da die Temperatur im Grubenwasser meist nicht ausreicht, um den Vorlauf eines Heizsystems zu bedienen, wird die Energie durch die Wärmepumpen auf das notwendige Temperaturniveau gebracht. Dabei ist es wichtig, dass diese die für das System notwendige Vorlauftemperatur ohne Unterstützung eines Hilfssystems (zum Beispiel Gaskessel) erreichen. Ist die ausgegebene Temperatur der Wärmepumpe zu gering, so muss andernfalls kontinuierlich ein nachgeschaltetes Heizsystem den letzten Temperaturhub erbringen, was zu gesteigerten Wartungs- und Energiekosten führt. Wenn die Solltemperatur im Heizsystem der Verbraucher nicht abgesenkt werden kann, sollten in der Planungsphase daher Wärmepumpen berücksichtigt werden, welche die angestrebte Temperatur bedienen können.

Weiterhin kann ein hydraulischer Abgleich des Heizsystems dazu beitragen, dass die Wärme gleichmäßig in die zu beheizenden Räume transportiert wird. Dies kann ebenfalls ermöglichen, die Vorlauftemperatur abzusenken. Ist die Vorlauftemperatur in einer bestehenden Anlage zu gering, so kann nach Möglichkeit eine Kalibrierung der Wärmepumpe stattfinden, um das System zu optimieren

Bei Grubenwasser-Abschlagung: Grenzwerte im Oberflächenwasser überschritten

Wird das abgekühlte Grubenwasser nicht reinjiziert, sondern direkt in ein Oberflächengewässer abgeschlagen, so darf nur eine bestimmte Menge an potenziell belastetem Grubenwasser eingeleitet werden. Dies richtet sich nach den Bestimmungen der jeweiligen unteren Wasserbehörde und betrifft insbesondere den Volumenstrom des Oberflächenwassers und den Grubenwasserchemismus. Daraus ergibt sich ein maximaler Volumenstrom, der gleichzeitig die Limitierung für eine wärmetechnische Nutzung darstellt. Sollte das Grubenwasser zur Kühlung verwendet und wärmer in das Oberflächenwasser eingeleitet werden, so ergeben sich zusätzliche Limitierungen durch die maximal zulässige Temperaturerhöhung des Gewässers. Der maximal nutzbare Grubenwasservolumenstrom ist somit ebenfalls direkt vom Wasserstand des Oberflächengewässers abhängig und variiert je nach Jahreszeit. Neben der Optimierung des Grubenwasserstroms kann ein Ansatzpunkt die Vergrößerung der genutzten Temperaturspanne sein. Durch eine größere entnommene Temperaturdifferenz ist es möglich, bei konstantem Volumenstrom eine höhere Leistung zu entziehen.

Ausfällungsreaktionen bei starken Abkühl- oder Aufheizvorgängen im Wärmeübertrager sollten dabei beachtet werden. Schließlich ist ein weiterer Weg, die Limitierung von Grenzwerten in Oberflächenwässern zu umgehen, das Wasser in die Grube zu reinjizieren.

Abnehmerleistung zu gering

Dieses Problem kann insbesondere dann auftreten, wenn mehrere Parteien für ein Wärmeversorgungsprojekt eingeplant sind. Aufgrund von geänderten Interessenslagen kann sich ein zunächst dem Projekt verschriebener Interessenshalter entschließen, das Projektkonsortium zu verlassen und die Anschlusszusage an eine solche Wärmeversorgungsanlage zurückzuziehen. Dies kann dazu führen, dass bereits getätigte Wirtschaftlichkeitsberechnungen nicht mehr zutreffen. Fehlende Abnehmerleistung bei hohen Investkosten kann unter diesen Umständen zu einem kritischen wirtschaftlichen Engpass führen. Um dies zu vermeiden wird empfohlen, frühzeitig potenzielle Abnehmer einzubeziehen und transparent über das Projekt zu informieren. Im weiteren Verlauf sollte festgestellt werden, welches Interesse von diesen Abnehmern einer Teilnahme entgegengebracht wird.

Sollte sich einer der Projektpartner dennoch entscheiden, während des Projektes als Abnehmer auszuscheiden, so müssen alternative Wege geprüft werden, die Wärme einem wirtschaftlichen Nutzen zuzuziehen. Dies kann im ersten Schritt durch eine Überprüfung stattfinden, inwiefern eine Erweiterung oder ein Neubau eines Wärmenetzes zusätzliche Abnehmer erschließt.

6.3 Zusammenfassung

Bei der Planung, der Konstruktion und der Inbetriebnahme von Grubenwasseranlagen besitzen die natürlichen Gegebenheiten des Standorts einen übergeordneten Einfluss auf eine erfolgreiche Umsetzung. Geologische, hydrologische und chemische Faktoren umweltseitig werden durch anthropogene Faktoren wie die untertägigen Grubenstrukturen und die übertägige Abnehmerseite ergänzt. Die zeitigen Umsetzungen von Anlagen in den 1990er Jahren wiesen überwiegend auf technischer Seite Herausforderungen auf. Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnten diese in den 2000er Jahren überwiegend vermieden werden. Bei Anlagen dieser Generation verlagerte sich der Problemschwerpunkt auf äußere Gegebenheiten. Insbesondere der plötzliche Wegfall von Abnehmern während der Bauphase kann erhebliche Auswirkungen auf die Umsetzbarkeit einer Anlage besitzen. Auch Wartungen an Entwässerungsstollen können als externe Faktoren die Nutzung einer Grubenwasseranlage beeinträchtigen.

Insgesamt ergaben sich aus allen bisher durchgeführten Projekten Herausforderungen, aus denen eine Vielzahl von Lösungsansätzen entwickelt wurde. Diese wurden als Iststandsanalyse in diesem Kapitel qualitativ analysiert und aufgelistet. Je nach Standort werden unterschiedliche der genannten Probleme zutreffen. Es wird empfohlen sich Erfahrungen von geeigneten Forschungsstellen, Anlagenbetreibern sowie betreffenden Ämtern einzuholen. So können potenziell auftretende Hindernisse bewertet und beispielsweise durch eine Risikomatrix visualisiert werden. Gemäß der Analyse können geeignete Maßnahmen zur Problemvorbeugung und -beseitigung getroffen werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung der Wärme in gefluteten Bergwerken durch Grubenwasser ist eine Form der Geothermie. Trotz der damit einhergehenden vorteilhaften Eigenschaften wie zum Beispiel geringer Emissionen oder Grundlastfähigkeit zeigt sich ein niedriger Durchsetzungsgrad dieser Technologie. Dies betrifft trotz guter Umsetzungsvoraussetzungen ebenfalls die sächsischen Bergbauregionen. Das gesetzte Ziel der vorliegenden Studie ist daher, die Technologie der Grubenwassergeothermie auf verschiedenen Ebenen beleuchten und die Umsetzungspotenziale speziell in Sachsen aufzuzeigen. So wird die Akzeptanz für die Energieform gesteigert, Chancen offengelegt und Hürden abgebaut. Um dies umzusetzen, wurde eine große Sammlung an Literatur zu sächsischen Bergbauregionen zusammengetragen, gesichtet und für die Bewertung einbezogen.

Um eine Basis für die Technologie zu legen, wurden die primären Nutzungsarten der Grubenwassergeothermie beschrieben. Geschlossene wie offene Anlagen lassen sich durch die Art des Transportmediums unterscheiden und bringen daher Unterschiede in den zu erwartenden Leistungsdichten, Sicherheitskonzepten und Wartungszyklen mit sich. Da die Wärme in offenen Systemen direkt über das Grubenwasser, in geschlossenen Systemen hingegen über ein Sekundärfluid erschlossen wird, muss eine Vorberechnung der energetischen Potenziale unter dementsprechend angepassten Randbedingungen erfolgen. Möglichkeiten zur Berechnung, Erläuterungen und weiterführende Literatur sind für die vertiefende Recherche aufgeführt.

Um konkrete Standorte in der sächsischen Region bezüglich ihrer Grubenwasserpotenziale zu bewerten, wurde die zusammengetragene Literatur gesichtet und eine Auswahl von 14 Standorten getroffen. In diesen wurde das Grubenwasserpotenzial in einer weiterführenden Analyse untersucht. Um die Ergebnisse darzustellen, wurde ein quantitatives Bewertungssystem abgeleitet, nach welchem die Standorte zunächst in zwei Kategorien bewertet wurden. In der untertägigen Bewertung fließt die recherchierte und relevante Bergbauliteratur zum entsprechenden Standort ein und es werden Wichtungen für untertägige Bewertungsparameter definiert. Gleichgestellt findet in der zweiten Kategorie eine Analyse der obertägigen Wärmebedarfsstrukturen statt. Dort werden die Wärmebedarfe der Gemeinden und Städte über Modelle bestimmt und in Bedarfspolygonen zusammengefasst, welche anschließend ihrem Wärmebedarf entsprechend bewertet wurden. Untertägige und obertägige Bewertung wurden anschließend in einem Potenzial-Layer vereinigt, welcher Wärmeverfügbarkeit und Wärmebedarf somit zusammenbringt. Alle Ergebnisse wurden in visuell darstellbaren GIS-Layern verarbeitet und legen die Grundlage für eine Übersichtskarte des Grubenwasserpotenzials in Sachsen.

Neben der theoretischen Analyse und Bewertung der Standorte wurde der praktische Kenntnisstand von sächsischen Grubenwässern im Chemismus als auch in der Interaktion mit Wärmeübertragern erweitert. Dies wurde zum einen durch 16 Grubenwasserprobenahmen und -analysen umgesetzt, welche

an 9 der ausgewählten Gemeinden und Städten durchgeführt wurden. Sie beinhalten Informationen über Fließ- sowie Standwässer und geben somit stichpunktartig Einblick in die Grubenwasserzusammensetzung des jeweiligen Reviers. Innerhalb von zwei Standorten wurden zudem Versuche an einer Grubenwassergeothermieanlage im Labormaßstab durchgeführt. Hauptgegenstand dieser Untersuchungen waren die Interaktion von Ablagerungen aus dem Grubenwasser im Zusammenhang mit der Verwendung verschiedener Wärmeübertragermaterialien. An beiden Versuchsstandorten konnten Ablagerungen um 30 % bis 40 % reduziert werden.

Praktische Erfahrungen mit bestehenden Grubenwasseranlagen sind wichtige Werkzeuge, um den Bau- und Betriebsprozess neuer Anlagen zu unterstützen. Über 30 Jahre Betrieb von Grubenwasseranlagen in Sachsen führten zu Erkenntnissen, welche in dieser Studie daher gesammelt und aufbereitet wurden. Genehmigungen, Bauberichte, Prüfprotokolle und persönlicher Kontakt zu Anlagenverantwortlichen ergaben 14 Faktoren, welche den Prozess der Umsetzung einer Grubenwassergeothermieanlage gefährden können. Dementsprechend wurden diese beleuchtet und Maßnahmen zur Vermeidung der aufgetretenen Probleme abgeleitet.

Die Ergebnisse der Studie wurden abschließend in einer Handlungsempfehlung zusammengefasst. Die dort eingearbeiteten Inhalte bringen die Aussagen der Studie auf eine praxisorientierte Ebene. Neben Berechnungsmöglichkeiten zur Leistungsauslegung wird der Ablauf des Beantragungsprozesses bei den zuständigen Behörden erläutert. Weiterhin wurden derzeit verfügbare finanzielle Fördermöglichkeiten übersichtlich aufgezeigt und Informationen zu den jeweiligen Programmen gegeben.

Die in dieser Studie beinhalteten Themen greifen den Großteil der Schlüsselfragestellungen in der praktischen Nutzung der Grubenwassergeothermie auf. Um diese lokale Energieressource effizient zu nutzen, sind jedoch weitere Entwicklungen notwendig. Darunter zählt insbesondere die flächendeckende Bereitstellung von digital aufbereiteten Risskarten. Die analog vorhandenen Bergbaukarten müssen dafür über Scans digitalisiert und anschließend in einer GIS-Software georeferenziert werden. Weiterhin müssen realitätsgetreue und handhabbare Berechnungsmethoden erarbeitet werden, um das grubenwassergeothermische Potenzial detailliert vorhersagen zu können. Durch die Erweiterung der Datenbasis und Berechnungsmöglichkeiten können komplexere Anlagenszenarien analysiert werden, welche vertiefte Aussagen zu Grubenwässern als Kältequellen und als großtechnisches Speichermedium für Wärme zulassen. Durch die Umsetzung in Energiesystemen kann dieses eine Vorreiterrolle als regenerative Energieressource einnehmen und einen wichtigen Nachnutzungsbestandteil in den traditionsgeprägten Bergbaugemeinden darstellen.

8 Handlungsempfehlungen für Planung, Errichtung und Betrieb einer Grubenwassergeothermieanlage

8.1 Einleitung

Die Neuausrichtung der Energieversorgung mit der Integration erneuerbarer Energien spielt aktuell eine wichtige Rolle. Darüber hinaus sorgen Nachsorgemaßnahmen für stillgelegte Bergwerke für Ewigkeitsaufgaben. Ein wichtiger Aspekt der Nachsorge ist die Kontrolle des Grubenwassers. In stillgelegten Bergwerken kann es durch passive (Entwässerungsstollen, diffuse Austritte) oder aktive Entwässerungsprozesse (Pumpstationen) an die Tagesoberfläche gelangen. Je nach Chemismus können Aufbereitungsanlagen notwendig sein, um das Wasser zu reinigen. Die energetische Nutzung dieser Energiequelle kann helfen, einen Teil der Kosten zurückzugewinnen. Auch für die Steigerung der Versorgungsunabhängigkeit bietet sich Grubenwasser als Quelle lokaler Umweltwärme ideal für eine Nutzung in regenerativen Energiesystemen an.

Als Energiequelle kann die Nutzung von Grubenwassergeothermie für eine Einsparung von CO_2-Emissionen beitragen. Gegenüber anderen regenerativen Energiequellen wie die Nutzung von Luft in Wärmepumpen besteht hier auch der Vorteil, dass Grubenwasser ganzjährig ein nahezu konstantes Temperaturniveau besitzt, was sich positiv auf die Effizienz auswirkt. In Hinblick auf den Klimaschutz und die geplante Erreichung der Ziele im klimaneutralen Gebäudebestand 2050 kann Grubenwassergeothermie in Bergbauregionen einen wesentlichen Beitrag leisten.

Aktuell existieren in Deutschland knapp 20 realisierte Pilotanlagen, diese versorgen beispielsweise eine Forschungseinrichtung, ein Krankenhaus oder Wohngebäude mit Heizwärme (Oppelt et al., 2024). Ein weites Spektrum an Abnehmern wurde somit bereits erschlossen. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der Möglichkeit Abnehmer mit Kälte zu versorgen. Durch das Temperaturniveau der erschließbaren Grubenwässer können diese oft direkt und ohne Hilfsenergie zur Kühlung verwendet werden. Durch die fortschreitende Notwendigkeit der Gebäudeklimatisierung wird dieser Vorteil künftig weiter zum Tragen kommen.

Die Handlungsempfehlungen dient interessierten Bürgern, Eigentümern von Bergwerken, Kommunen und öffentlichen Einrichtungen als Zugang zu Informationen über das Thema Grubenwassergeothermie. Neben der Erläuterung der prinzipiellen energetischen Bewertung einer Grubenwasseranlage wird auf den rechtlichen Rahmen und den Beantragungsprozess eingegangen. Auf Grundlage von Erfahrungen von Anlagenplanern, Betreibern und Experten wurden Hinweise zur Planung und den Betrieb einer Anlage erarbeitet und integriert. Letztlich werden aktuell vorhandene Fördermöglichkeiten zur Finanzierung einer solchen Anlage betrachtet.

8.2 Grundlagen zur energetischen Bewertung

Die Handlungsempfehlungen konzentrieren sich auf die geothermische Nutzung von Grubenwasser als Wärmequelle oder –senke zur Beheizung oder Kühlung von Gebäuden. Um die energetische Bewertung eines Standorts durchzuführen, werden verschiedene Parameter benötigt. Dazu gehört der nutzbare Volumenstrom und die Temperatur des Grubenwassers sowie die Temperaturdifferenz, um die das Grubenwasser bei der Wärmeübertragung abgekühlt werden kann. Abbildung 100 soll eine Hilfestellung liefern, um das energetische Potenzial zum Heizen an einem Standort abzuschätzen. Als Eingangsgrößen werden dabei nur die Grubenwassertemperatur und der nutzbare Volumenstrom benötigt. Anhand der Wassertemperatur kann die mögliche Abkühlung des Grubenwassers zum Entzug der Wärme bestimmt werden. Hilfestellung bieten dabei im oberen Diagramm in Abbildung 100 die eingetragenen Auslegungsdaten von weltweit realisierten Anlagen. Die unterbrochene Linie stellt dabei einen empirischen Maximalwert dar, der anhand der maximalen Abkühlung bei niedrigster Grubenwassertemperatur festgelegt wurde. Die ausgewählte mögliche Temperaturspreizung, zum Beispiel 6 K liegt dann in einem farbig markierten Bereich, zum Beispiel orange.

Anschließend ist es möglich, durch dieselbe Farbe im unteren Diagramm zusammen mit dem nutzbaren Grubenwasservolumenstrom die theoretische maximale Heizleistung abzulesen. Durch die Nutzung einer Wärmepumpe erhöht sich diese Heizleistung um die aufgenommene elektrische Antriebsenergie. Für die Anlage des Kreiskrankenhauses Freiberg kann so beispielsweise eine Heizleistung von 860 kW bereitgestellt werden (GRAB et al., 2018). Durch die Multiplikation der abgelesenen Leistung mit den möglichen Volllaststunden (für Geothermie zum Beispiel 2.500-3.000 h/a) kann die theoretisch mögliche Heizenergiemenge über ein Jahr berechnet werden (BRACKE, 2022; LUND et al., 2021; BUND E.V., 2019).

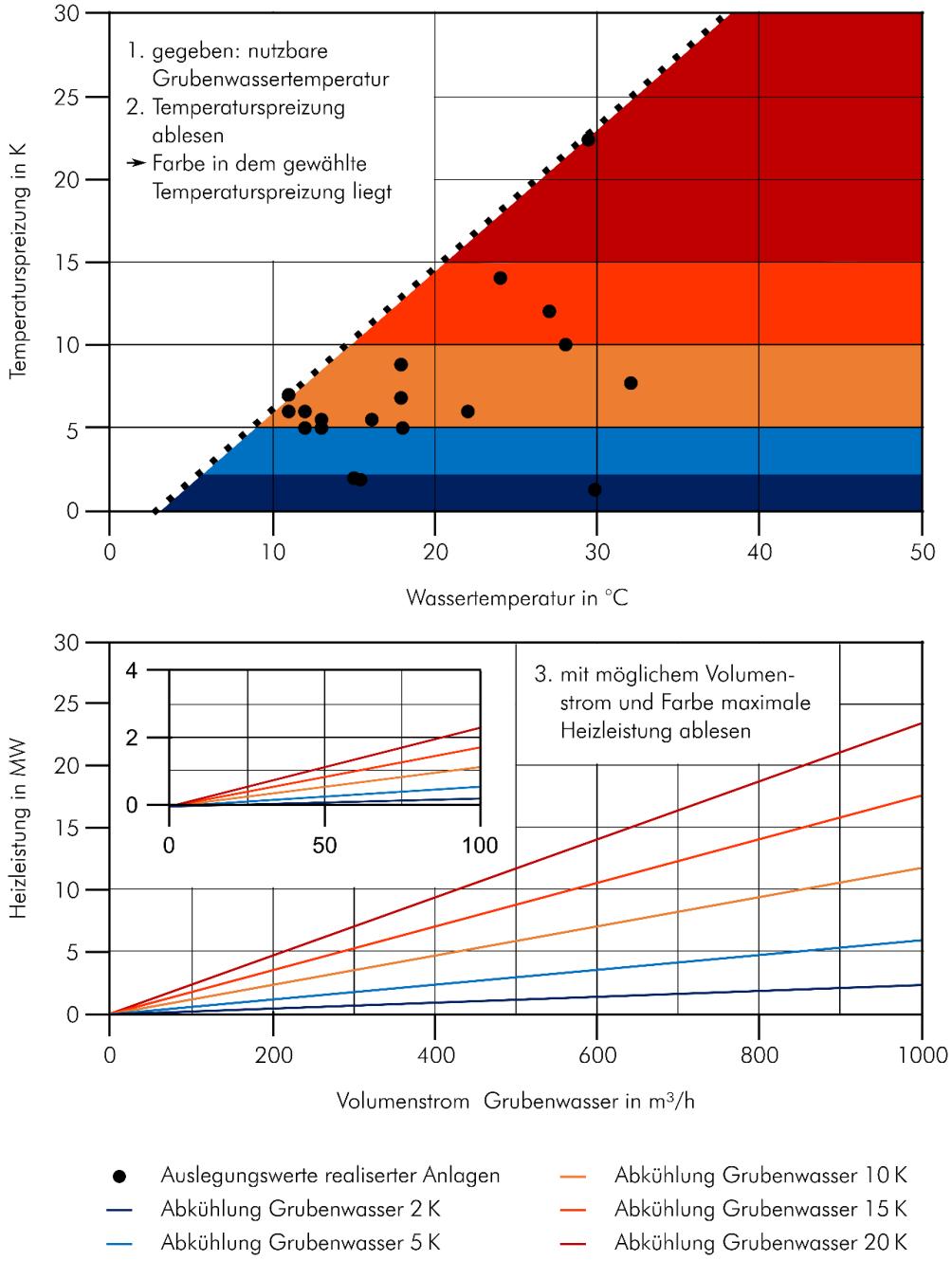


Abbildung 100: Grafik zum Abschätzen des energetischen Potenzials eines Grubenwasserstandorts anhand der Wassertemperatur und dem verfügbaren Volumenstrom

Die gezeigte Grafik kann als praktische Abschätzung für alle Grubenwasserstandorte verwendet werden, an denen Grubenwasser mit der gegebenen Temperatur und dem gegebenen Volumenstrom verfügbar ist. Da der Grubenwasservolumenstrom je nach Erschließungsort jedoch variieren kann (zum Beispiel niederschlagsbeeinflusster Durchfluss in Entwässerungsstollen), sollten Anlagen in solchen Fällen mit einem erwartbaren Mindestvolumenstrom ausgelegt werden. Weiterhin kann die Temperatur je nach Systembauweise variieren. So muss bei einer Anlage, welche das Grubenwasser zur Regeneration untertägig in Streckensystemen zirkuliert, auf eine fachgemäße Auslegung geachtet werden (Anlagenschema siehe Abbildung 101).

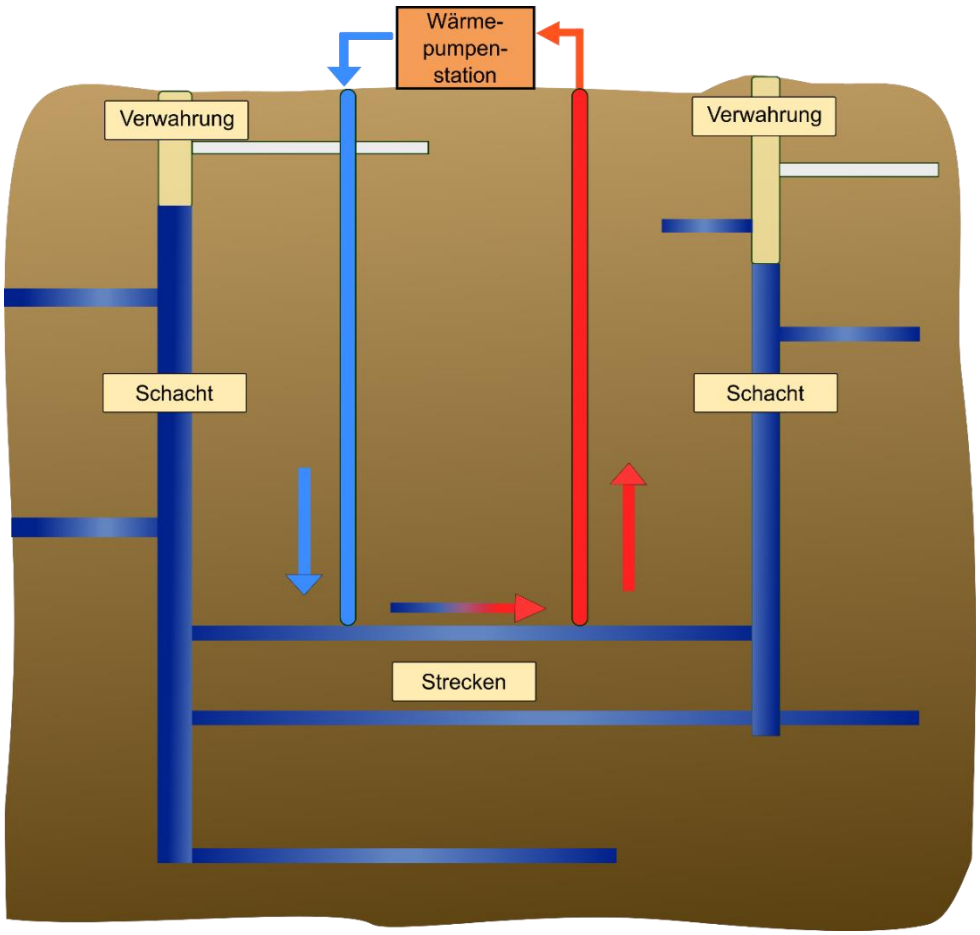


Abbildung 101: Schema einer Anlage mit Grubenwasserzirkulation in den Strecken (TUBAF, 2024a)

Eine nicht fachgemäß ausgelegte Entzugsleistung kann dazu führen, dass eine zu hohe Wärmeenergie dem Grubenwasser und dem Gestein entzogen wird. Dies macht sich durch eine kontinuierliche Abkühlung des geförderten Grubenwassers bemerkbar, was die gewinnbare Wärmeleistung nachfolgend limitiert.

Um dies vorzubeugen, ist es ratsam, bereits früh in der Planungsphase die Energieressourcen überschlägig zu bewerten. Dafür wurden bereits Modelle entwickelt, welche als vereinfachte Annäherungen verwendet werden können (RODRIGUEZ et al., 2009; GHOREISHI-MADISEH et al., 2012). Weiterhin werden diese Modelle als Ausgangsbasis verwendet, um flexiblere und zugänglichere Berechnungstools zu erstellen. Diese werden zurzeit unter anderem von der TU Bergakademie Freiberg und der Universität Durham entwickelt (KRAUSE, 2024; TUBAF, 2024b; DURHAM UNIVERSITY, 2023). Es ist jedoch ebenfalls zu empfehlen, bei einer fortgeschrittenen Projektierung einer solchen Anlage genauere numerische Berechnungen zur Kalkulation der gewinnbaren Wärme- und Kälteleistung durchzuführen. Dies sollte durch das ausführende Planungsbüro geschehen.

8.3 Rechtlicher Rahmen und Beantragung

In Deutschland existiert bisher kein einheitliches Gesetz, das die Nutzung geothermischer Energie regelt. Die rechtlichen Rahmenbedingungen lassen sich jedoch grundsätzlich aus dem Bundesberggesetz, dem Wasserhaushaltsgesetz und dem Geologiedatengesetz ableiten. Der Sonderfall der geothermischen Grubenwassernutzung unterliegt deshalb ebenfalls keiner zugeschnittenen Gesetzgebung und wird stattdessen entsprechend zu den Bestimmungen und zum Teil einzelfallbezogen behandelt.

Da der Beantragungsprozess von Grubenwassergeothermieanlagen im Einklang mit den rechtlichen Grundlagen ein bisher nicht standardisierter Fall ist, wird zur Hilfestellung nachfolgend eine Struktur in Form eines Ablaufschemas gegeben. Dieses bietet Projektinitiatoren eine kompakte Orientierungshilfe, welche den Beantragungsprozess verständlich aufzeigt. Das Schema ist in Abbildung 102 dargestellt.

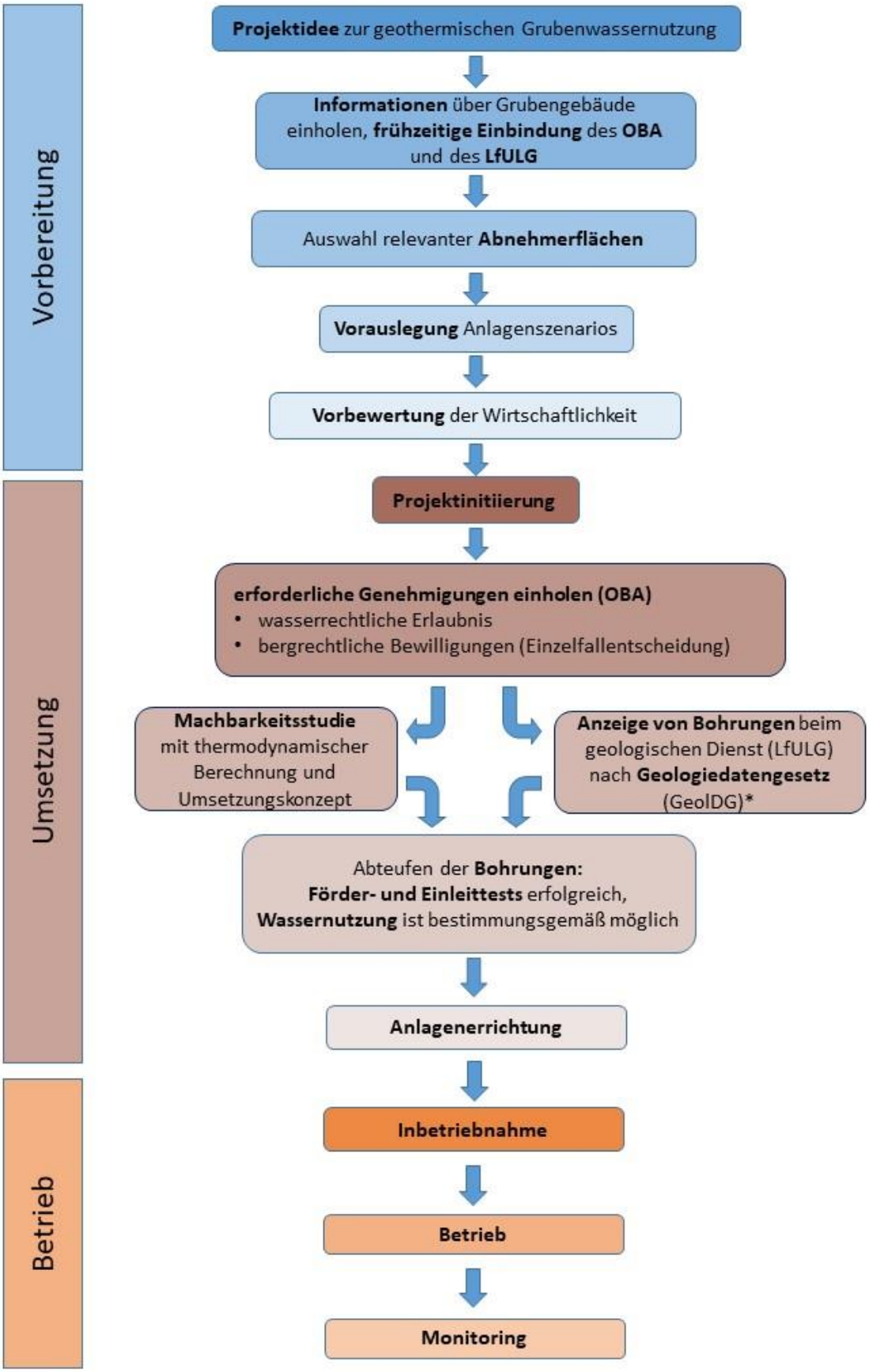


Abbildung 102: Orientierungsschema zum Ablauf einer Errichtung und Inbetriebnahme einer Grubenwassergeothermieanlage

Das frühzeitige Kontaktieren der entsprechenden Behörden ist für eine Bearbeitung des Beantragungsprozesses förderlich. Die einzelnen Phasen des Beantragungsschemas werden nachfolgend erläutert.

8.3.1 Vorbereitung

In dieser Phase liegt der Schwerpunkt in der Sammlung von Informationen, die eine Abschätzung über eine Durchführbarkeit eines Grubenwassergeothermieprojektes erlauben. Eine Voraussetzung für eine solche Anlage ist primär die Verfügbarkeit von gefluteten untertägigen Hohlräumen. Ist Bergbau unter dem entsprechenden Standort bekannt, so muss festgestellt werden, welches Informationsmaterial verfügbar ist. Dabei sind das Alter und die Qualität entscheidend. Um diese Punkte beurteilen zu können, empfiehlt es sich, in entsprechenden Archiven zu recherchieren und Fachleute zu konsultieren. Anlaufstellen hierfür sind unter anderem:

- das zuständige Sächsische Oberbergamt (OBA),
- das LfULG,
- Sanierungsfirmen (zum Beispiel Wismut GmbH, Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH),
- lokale Besucherbergwerke,
- Ansprechpartner an Forschungsinstituten (zum Beispiel Technische Thermodynamik - TU Bergakademie Freiberg).

Die Kommunikation mit diesen Stellen hilft, eine Einschätzung für die untertägige Situation hinsichtlich der Grubenwassernutzung aufzubauen. Ist die erste Bestandsaufnahme diesbezüglich erfolgreich und nutzbares Grubenwasser im Grubengebäude verfügbar, so gilt es potenzielle Abnehmerstrukturen über Tage zu identifizieren, die sich im Nahbereich des Grubenwasservorkommens befinden. Ist die Nutzung über ein Nahwärmenetz angedacht, so können Grubenwasser und Abnehmer ebenfalls örtlich versetzt sein, da eine gewisse Distanz über das Netz überbrückt werden kann.

Als weiterer Teil der Vorbereitungsphase gilt die Erstauslegung der Anlage. Dieser Schritt bedeutet, die bekannten verfügbaren Informationen zu nutzen, um ein vereinfachtes Anlagenkonzept und Nutzungsszenarios zu erstellen. Folgende Parameter sollten beinhaltet sein:

- verfügbarer Grubenwasservolumenstrom,
- Grubenwassertemperatur,
- nutzbarer Fließweg unter Tage (bei offener Nutzung mit Reinjektion),
- Eigenschaften des durchflossenen Gesteins / Typ des Gesteins (bei offener Nutzung mit Reinjektion),
- Wärmebedarf der Abnehmer,
- Kältebedarf der Abnehmer (bei Nutzung eines kalten Nahwärmenetzes).

Diese Parameter können genutzt werden, um in vereinfachten Berechnungsverfahren eine erste Machbarkeitsabschätzung zu geben. Diese ist grundlegend optional, dient jedoch der Feststellung, ob eine umfangreichere Detailstudie eingeleitet werden kann oder ob das überschlägige Anlagenpotenzial dies nicht rechtfertigt. Zurzeit befinden sich mehrere Vorauslegungstools in der Entwicklung welche auch von fachfremden Nutzern angewendet werden können, um eine Machbarkeitsabschätzung zu geben (TUBAF, 2024b; DURHAM UNIVERSITY, 2023). Sind die getroffenen Annahmen realistisch und ist eine Machbarkeit gegeben, so kann die Aufsuchungsphase begonnen werden.

8.3.2 Beantragung und Umsetzung

In dieser Phase wird das Projekt mit dem Beantragungs- und Informationsprozess bei den zuständigen Behörden abgestimmt und geprüft.

Die zuständige Behörde für die Beantragungen der Genehmigungen im Rahmen einer beabsichtigten Grubenwassernutzung ist in der Regel das Sächsische Oberbergamt (OBA). Grundlage für die Erteilung einer Bergbauberechtigung ist das Bundesberggesetz (BBergG). Nach § 3 III BBergG istE rdwärme aus Bohrungen ab einer Teufe von 400 Metern und die im Zusammenhang mit ihrer Gewinnung auftretenden anderen Energien ein bergfreier Bodenschatz. Gemäß § 6 des Bundesberggesetzes (BBergG) bedarf, wer bergfreie Bodenschätze aufsuchen will, einer Erlaubnis, wer bergfreie Bodenschätze gewinnen will, einer Bewilligung. Die Nutzung der Erdwärme aus Grubengebäuden wird im Einzelfall geprüft und bewertet.

Für Anträge auf Erteilung einer Erlaubnis nach § 7 BBergG oder einer Bewilligung nach § 8 BBergG hat das Oberbergamt eine entsprechende Richtlinie (SOBA, 2004) und ein Merkblatt (SOBA, 2018a) veröffentlicht.

Neben dem Antrag auf die Nutzung des bergfreien Bodenschatzes Erdwärme muss die Nutzung des Grubenwassers als das Medium, durch welches die Wärme gefördert wird, behördlich genehmigt werden. Es liegt daher eine Erlaubnispflicht nach § 8 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) vor. Mit dieser Erlaubnis wird die Befugnis gewährt, ein Gewässer zu einem bestimmten Zweck, in einer nach Art und Maß bestimmten Weise zu benutzen (§ 10 Abs. 1 WHG). Die Erteilung geschieht durch einen gesonderten Erlaubnisantrag für die Nutzung des Grubenwassers. Dieser ist bisher ebenfalls beim OBA zu stellen, welche diesen daraufhin mit der unteren Wasserbehörde abstimmt.

Erstellung der Betriebspläne

Nach § 51 BBergG gilt, dass alle Vorhaben, welche die Aufsuchung, die Gewinnung oder die Aufbereitung eines Rohstoffes aus dem Untergrund zum Ziel haben, nur aufgrund von Betriebsplänen durchgeführt werden dürfen. Im Bereich der geothermischen Grubenwassernutzung sind Betriebspläne primär für zwei Aspekte notwendig. Dazu zählen die Erschließung des Grubenwassers durch Bohrungen sowie die anschließende Gewinnung der Erdwärme mit der technischen Anlage. Für beide Aspekte kann im Fall einer Grubenwassernutzung ein Betriebsplan zu erstellen sein. Die Inhalte eines Hauptbetriebsplanes sind nachfolgend, gemäß eines verfügbaren Merkblattes des OBA, skizziert und sind in Abstimmung mit dem OBA situationsbedingt anzupassen (SOBA, 2023b):

- allgemeine Angaben und Aufgabenstellung,
- Berechtsamsverhältnisse/Eigentumsverhältnisse,
- StandortsituationGeographische Situation, Geologische Situation, Hydrogeologische Situation, Kultur- und sonstige Sachgüter, Infrastruktur, Schutzgebiete (zum Beispiel NATURA 200, LSG, NSG, Biotope, Wasserschutzgebiete),
- technische Konzeption für die Aufsuchung
  Örtliche Lage der Bohrungen, Bohrarbeiten/geophysikalische Angaben, zeitweilige Inanspruchnahme von Flächen, Zufahrtswegen und Versorgungseinrichtungen,
- Berücksichtigung öffentlicher Belange
  Raumordnung und Landesplanung (zum Beispiel Immissionsschutz, Naturschutz, Abfälle und Bodenschutz, Wasser, Wald),
- Genehmigungen nach anderen Rechtsvorschriften,
- Bergbau und öffentliche Sicherheit
  Arbeitssicherheit, Gesundheitsschutz/Erste Hilfe, Brand- /Explosionsschutz, Verhalten bei besonderen Ereignissen und nicht bestimmungsgemäßen Betrieb,
- Wiedernutzbarmachung der Oberfläche,
- Verantwortlichkeiten
  Angabe von Verantwortlichen, Einsatz von Fremdfirmen,
- Anlagen
  Übersichtspläne, Rechtliche Verhältnisse.

Durch Kommunikation mit dem OBA wird im Einzelfall festgestellt, welche der allgemein oben genannten Punkte in welchem Detailgrad auszuführen sind. Gemäß den Vorgaben und unter Zuhilfenahme des Merkblattes können die notwendigen Punkte dann im entsprechenden Betriebsplan konkretisiert werden. Da die Durchführung einer Testbohrung, sofern notwendig, vor dem eigentlichen Gewinnungsbetrieb stattfindet, sollte ein diesbezüglicher Aufsuchungsbetriebsplan entsprechend zeitig gestellt werden. Dies fördert eine zeiteffiziente Durchführung des Verfahrens.

8.3.3 Anlagenbetrieb

Die Fertigstellung der Anlage ist mit einem entsprechenden Bericht an die Bergbehörde sowie an die untere Wasserbehörde zu melden. Wurden alle technischen Installationen planmäßig durchgeführt, kann die Inbetriebnahme der Anlage in Form eines Probebetriebs beginnen. Für die Betriebsphase kann

die zuständige Behörde zu beachtende Nebenbestimmungen erlassen. Diese sollen sicherstellen, dass unvorhergesehene Risiken in der Anlaufphase schnell erkannt werden und keine Schäden entstehen.

Ein entsprechendes Monitoring kann neben dem Nachweis eines planmäßigen Anlagenbetriebs weiterhin nützliche Informationen für künftige Anlagenoptimierungen liefern. Monitoringdaten werden in entsprechenden Protokollen erfasst und nach Erfordernis dargelegt. Nach dem Probebetrieb erfolgt der Nachweis, dass die Bestimmungen des Hauptbetriebsplanes eingehalten werden. Danach kann der Übergang zum Regelbetrieb erfolgen. Ein weiterführendes Monitoring und die Wartung der Anlage sind zu berücksichtigen. Es ist zu empfehlen, eine fortlaufende Information der Öffentlichkeit während des Planungsprozesses und des Betriebs der Anlage aufrechtzuerhalten.

8.4 Hinweise für den Bau und Betrieb von Grubenwassergeothermieanlagen

Durch die individuellen Voraussetzungen jeder geothermischen Grubenwasseranlage gibt es standortspezifische Besonderheiten zu beachten. Dies betrifft die Bau- sowie die Betriebsphase. In der nachfolgenden Tabelle 34 sind aufgetretene Probleme als Auszug aus dem Kapitel 6 dargestellt. Im zugehörigen Kapitel des Hauptberichtes der Grubenwasserpotenzialstudie Sachsen umfasst jeder Problempunkt eine detailliertere Ausführung. Es wird empfohlen diese nach Bedarf nachzuschlagen, um ein genaueres Verständnis zu erhalten und einen besseren Bezug zu den Gegebenheiten vor Ort herzustellen. Für eine effiziente Vermeidung von Risiken, sollte weiterhin für jedes Projekt eine individuelle Risikoanalyse unter Verständigung mit Fachexperten vorgenommen werden. Darunter zählen entsprechende Forschungsinstitute, Anlagenbetreiber und Behörden.

Als natürliche Energiequelle muss das Grubenwasser in der Umwelt erschlossen werden. Anders als mit fossilen "Plug & Play"-Konzepten ist eine Beachtung der Besonderheiten im Erschließungsprozess und im Verhalten des Anlagenbetriebes essenziell, um diese Ressource voll auszuschöpfen. Erfahrungen aus bestehenden Anlagen zeigen, dass dieses Verständnis einen Schlüsselaspekt darstellt, welcher einen erfolgreichen Anlagenbetrieb ausmacht. Dies kann in der Planungsphase durch die Wahl eines erfahrenen Ingenieurbüros wie auch durch den Einbezug der Expertise von Ämtern und Forschungseinrichtungen unterstützt werden. Im Betrieb ist es effektiv, einen oder mehrere dedizierte Anlagenverantwortliche zu besitzen, welche im Bestfall ebenfalls persönliches Interesse der Nutzung dieser lokalen regenerativen Energiequelle besitzen. Die Nutzung der in dieser Studie gestellten Inhalte sind erste Schulungsaspekte, welche eine Sensibilisierung dafür ermöglichen. Auch Kontakt zu weiteren Anlagenbetreibern, Ämtern und Forschungseinrichtungen ist für diesen Zweck ratsam.

Tabelle 34: aufgetretene Probleme bei Grubenwasseranlagen und Maßnahmen zur Vorbeugung sowie zur Beseitigung

Projekt-phase	Problem	Vorbeugung	Beseitigung
Bau	Fehlbohrungen	- Gutes Risskartenmaterial - Erfahrenes Planungsbüro - Erkundungsbohrung	- Sprengmaßnahmen wenn möglich
	Grubenwassertemperatur bei Erschließung gering	-Konservative Planung	/
	Grubenwasservolumen-strom zu gering	- Austausch mit Fachleuten zur Grube und Bohrpunkt (zum Beispiel Alter, Verbruchrisiko) - Erkundungsbohrung - Pumptests	- Zusatzbohrungen
Betrieb	Verschmutzung der Wär-mepumpe durch Gruben-wasser (GW)	- Zwischenkreis installieren (Abkopplung GW- Wärme-pumpe WP)	- Instandsetzung/ Austausch WP
	Verschmutzung der Wär-meübertrager durch GW	- Auswahl Ansaugstelle - Beschichtungen - Anlagenfahrweise - Zykloneinsatz, Grobfilter - Vermeidung O_2-Eintrag - Druckhaltung	- optimiertes Wärmeüber-trager-Material - Rückspülung (Wasser, Druckluft…) - Cleaning-In-Place Einheit mit Säure (CIP) - mech. Reinigung (Demon-tierbarkeit!)
	Verschmutzung der Rohr-leitungen	- Vermeidung O_2-Eintrag - Druckhaltung - Anlagenfahrweise	- Hochdruckreinigung (Molchung → Rohrzugang nötig)
	Bohrlochfilter zugesetzt	- angepasste Pumpe - angepasste Filter	- Reinigung mechanisch - Reinigung hydraulisch - Austausch
	Wasserverfügbarkeit bei Wasserhaltungsmaßnah-men	-Klärung Wasserhaltung Beson-derheiten (zum Beispiel Stol-len-Sanierung, Pumpbetrieb) - Absprache zu Eingriffen wäh-rend unkritischen Perioden - Unterstützungssystem	/
	Druckstöße in Rohrleitun-gen	- freien Versturz vermeiden (Druckhalteventil)	- Einbau Druckhalteventil
	Wärmepumpen technischer Defekt	- Monitoring - Vollständige Dokumentation - geschultes Personal - Wartung	- geschultes Personal - Wärmepumpen Fachfirma

Projekt-phase	Problem	Vorbeugung	Beseitigung
	Grubenwassertemperatur fällt ab	- Korrekte Auslegung der Anlage (Tools zur Hilfestellung) - Nutzung von Kühlung im Sommer - Abwärmeeinspeisung	- Regeneration durch langfristige Wärmeeinspeisung
	Vorlauf Heiztemperatur zu gering	- WP Heiztemperatur korrekt planen (Grundlastfähigkeit) - hydraulischer Abgleich	- Kalibrierung WP
	Bei GW-Abschlagung: Grenzwerte im Oberflächenwasser (OW) überschritten	- GW-Volumenstrom auf OW-Volumenstrom anpassen (saisonal) - Höhere Temp.-differenz nutzen	- Reinjektion in Grube
	Abnehmerleistung zu gering	- frühzeitige Einbindung möglicher Interessensgruppen	- Erweiterung/Neubau eines Wärmeverteilnetzes zur weiteren Abnehmererschließung

Die zusammengestellten aufgetretenen Probleme und Herausforderungen stellen zusammen mit den Möglichkeiten der Vorbeugung und Beseitigung einen Fundus an Empfehlungen dar. Werden diese Faktoren in der Umsetzung einer Grubenwasseranlage beachtet und dediziertes Personal mit der Anlage betraut, sind Grubenwasseranlagen zuverlässige Lieferanten für lokal gewonnene Wärme- und Kälteenergie.

8.5 Fördermöglichkeiten

Da Grubenwasseranlagen regenerative Energieanlagen darstellen, die nicht in Serienfertigung verfügbar sind, ist in jedem Fall eine individuelle Auslegung notwendig. Das bedeutet, dass die Investitionskosten im Vergleich zu serienverfügbaren Energieanlagen höher ausfallen und damit einen übergeordneten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage ausüben. Die staatlichen Institutionen erkennen jedoch die Bedeutung einer Unterstützung dieser Vorhaben, und dementsprechend existiert eine Reihe an Fördermöglichkeiten. Diese dienen dazu, die Wirtschaftlichkeitshürde der Investitionskosten abzusenken.

Dabei kann zum einen die wärmeerzeugende Anlage selbst gefördert werden. Ein weiterer Förderschwerpunkt stellen Wärmenetze dar. Da Grubenwassergeothermiesysteme insbesondere bei größeren Versorgungskonzepten oft Wärmenetze umfassen, kann dadurch ein weiterer Förderweg eröffnet werden. Förderungen für diese Systembestandteile können von verschiedenen öffentlichen Fördermittelgebern bereitgestellt werden. Dazu zählen verschiedene öffentliche Regierungsebenen, die durch Sachsen, Deutschland und die EU repräsentiert werden. In jeder dieser Institutionen werden Aspekte

von erneuerbaren und nachhaltigen Energiesystemen als förderfähig in entsprechenden Programmen und Richtlinien spezifiziert.

Die Vergabe von Fördermitteln erfolgt über Stellen wie das BAFA auf Bundesebene oder die SAB in Sachsen. Fördermittel stehen in der Regel als Darlehen oder Zuschüsse zur Verfügung. Je nach Förderprogramm können diese auch kombiniert sein, wobei beispielsweise die Tilgungszahlungen des entsprechenden Darlehens oder Kredits bezuschusst werden. Ebenfalls können gegebenenfalls Zinsvergünstigungen in Anspruch genommen werden. Insbesondere für Zuschüsse müssen oft eine Reihe von Bedingungen erfüllt werden, die auch die Höhe des Zuschusses festlegen. Diese können Steigerungen der Endenergieeffizienz, Minderungen in Treibhausgasemissionen oder einen Mindestanteil an der Nutzung erneuerbarer Energien umfassen.

Eine Auswahl an möglichen Förderinitiativen wird nachfolgend in Tabelle 35 aufgelistet. Die Auswahl bezieht sich auf den Stand von August 2024. Für eine genaue Feststellung der Förderbarkeit eines Projektes sind die jeweiligen Fördermittelgeber zu kontaktieren.

Tabelle 35: Auflistung einer Auswahl von Förderinitiativen für grubenwassergeothermische Systeme (Stand: 27.08.2024)

Förderung	Art	Berechtigte	Bereich	Fördermittelgeber	Bedingungen und Zusatzinformationen
Förderrichtlinie Energie und Klima vom 4. Juli 2023 – Punkt II: Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduzierung von Treibhausgasemissionen	Zuschuss oder Festbetragsfinanzierung, bis zu 70% Förderung je nach Endenergieeffizienzsteigerung	Kommune, Unternehmen, Öffentliche Einrichtungen	investive und nicht-investive Maßnahmen	Strukturfonds Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und Just Transition Fund (JTF), SAB als Bewilligungsstelle	bei investiven Maßnahmen zur Verringerung von Treibhausgas-Emissionen (in CO_2-Äquivalenten): mindestens 20 Prozent Verringerung und Steigerung der Endenergieeffizienz um mindestens 10 Prozent
Sachsenkredit „Energie und Speicher“ der Sächsischen Aufbaubank–Förderbank (SAB)	Darlehen zwischen 35.000 € und 5 Mio. € (mit bis zu 10 % Tilgungszuschuss)	Kommunen, Unternehmen, Privatpersonen	Energie und Umwelt (PV-Anlagen, dezentrale Speicher, elektrisch betriebene Geothermie WP)	SAB	Investition im Freistaat Sachsen, für Wärmeleistung > 100 kW: nur Erdwärmepumpe in Kaskadenausführung mit JAZ >= 3,8 und Monitoringsystem, Vorhaben darf nicht durch die Förderrichtlinie Energie und Klima/2023 des SMEKUL förderbar sein
SAB Sachsenkredit "Nachhaltiges Kommunaldarlehen"	Darlehen zwischen 150.000 € und 20 Mio. € bei möglicher Zinsvergünstigung bis zu 0,75 %	Kommunen, Öffentliche Einrichtungen	nachhaltige kommunale Vorhaben und kommunale Verwaltungen	SAB	genehmigte Kreditermächtigung in entsprechender Höhe, Einhaltung und Nachweis von Nachhaltigkeitskriterien (Kombination mit anderen Fördermitteln möglich)

Förderung	Art	Berechtigte	Bereich	Fördermittelgeber	Bedingungen und Zusatzinformationen
Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG): Zuschuss für die Wärmepumpe (WP)	Zuschuss mit bis zu 35 %	Kommune, Unternehmen, Öffentliche Einrichtungen, Privatpersonen	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Wohnungsbau & Modernisierung	BMWK	Einhaltung eines Mindestwertes der jahreszeitbedingten Raumheizungs-Energieeffizienz 35 % (30 % Grundförderung, 5 % Effizienzbonus für Verwendung einer Erdwärmepumpe), ebenso 30 % Einkommensbonus, bei geringem Haushaltseinkommen, Förderhöchstsatz ist 70 % pro Wohneinheit, Staffelung der förderfähigen Ausgaben: 30.000 € (1. Wohneinheit) – 15.000 € (2. Bis 6. Wohneinheit) – 8.000 € (ab 7. Wohneinheit) Für die systemische Sanierung der Gebäude dienen die Förderprogramme BEG – Wohngebäude und BEG – Nicht-Wohngebäude
Bundesförderung für effiziente Wärmenetze	Zuschuss je nach Fördermodul bis zu 50 % und bis zu 100 Mio. €	Kommune, Unternehmen, Öffentliche Einrichtungen, Verband/Vereinigung	Transformationspläne, Machbarkeitsstudien, Netzerweiterung – und Neubau, Einzelmaßnahmen, Betriebskosten	BMWK	Maßnahmen zur Transformation bestehender und zur Errichtung neuer Wärmenetzsysteme, die zu mindestens 75 % durch erneuerbare Energien und Abwärme gespeist werden, Modul 1: Transformationspläne/Machbarkeitsstudien Modul 2: Transformation (Neubau) bestehender (neuer) Wärmenetze Modul 3: Einzelmaßnahmen (u.a. Wärmepumpen) Modul 4: 10 Jahre Bewilligungszeitraum
KFW-Kredit 270: Erneuerbare Energien – Standard	Darlehen bis zu 150 Mio. €	Unternehmen, öffentliche Einrichtungen, Privatpersonen	für Anlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme, für Netze und Speicher	KFW	Mindestlaufzeit 2 Jahre, pro Vorhaben ab 5,21 % eff. Jahreszins (Kombination mit anderen Fördermitteln möglich)

Förderung	Art	Berechtigte	Bereich	Fördermittelgeber	Bedingungen und Zusatzinformationen
KFW-Zuschüsse: Heizungsförderung für Wohn- und Nichtwohngebäude	Zuschuss bis zu 35 %	Kommunen (Zuschuss Nr. 422), Unternehmen (Zuschuss Nr. 459 und Zuschuss Nr. 522)	Heizungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden	KFW	Erhöhung Energieeffizienz und/oder EE-Anteil am Endenergieverbrauch, Gebäude muss älter als 5 Jahre sein und Heizungseinbau muss mit Optimierung des Verteilsystems erfolgen (Zuschuss 459) Zusätzlich bei Zuschuss 422: Gebäude muss nach Maßnahmenanwendung in GEG-Bereich fallen Vorhabensabschluss spätestens 36 Monate nach KFW-Zusage

Literaturverzeichnis

AG ENERGIEBILANZEN (2023): Auswertungstabellen zur Energiebilanz 2020. https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/ (Zugriff am 4. März 2024).

AGEE-STAT (2024): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. https://www.umweltbundesamt.de/dokument/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren (Zugriff am 4. März 2024).

AIA AUE GMBH (2006): Erläuterungsbericht zur Erarbeitung einer Machbarkeitsstudie: Untersuchung der Restrukturierung von besonders rechts der (Zwickauer) Mulde liegenden Bergbaufolgeflächen in Aue, Hartenstein und Bad Schlema. Erläuterungsbericht.

BANAKAR, V., GOGATE, P.R., RAHA, A. (2023): Application of ultrasound in heat exchanger handling supersaturated CaSO4 solution for reduction of scaling by induced precipitation and in-situ cleaning. In: Journal of Chemical Engineering Science. https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118814

BBW MARIE LOUISE STOLLN (2023): Montanhistorie im mittleren Gottleubatal. https://marie-louise-stolln.de/home/geschichte (Zugriff am 28. August 2023).

BERGARCHIV FREIBERG (1692): Bergregister der Glück Auf Neu Glück Fundgrube unter der neuen Herrenmühle am Schwarzwasser bei Johanngeorgenstadt. (Bestand 40186, Nr. 35060).

BESUCHERBERGWERK MARKUS-SEMMLER (2024): Besucherbergwerk Markus-Semmler. https://www.kurort-schlema.de/kultur/freizeit/besucherbergwerk/ (Zugriff am 09. August 2024).

BESUCHERBERGWERK ZSCHORLAU (2024): Besucherbergwerk Zschorlau. https://www.besucherbergwerk-zschorlau.de/ (Zugriff am 09. August 2024).

BOGSCH, W. (1933): Der Marienberger Bergbau in der ersten Hälfte des 16. Jahrhunderts. Leipzig. Glückauf-Verlag.

BUND E.V. (2019): Strom und Wärme aus Tiefengeothermie. Berlin. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland.

BÜTTNER, R., KUPKA M., WERNER S. (2010): Wärmepumpentechnik bei Einsatz von Grubenwasser am Beispiel "Schloss Freudenstein". Studienarbeit. TU Bergakademie Freiberg.

C&E (2001): Problemanalyse einer geothermischen Nutzung von Flutungswasser im Gebiet Schlema-Alberoda. Wismut GmbH, Archivnummer A44/3B.

C&E (2003): Thermische Nutzung der Abflusswässer der Grube Schlema-Alberoda/Sachsen zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden. Wismut GmbH. Archivnummer A44/6.

DBI GTI (2023): Methodikbeschreibung der GIS-Analysen. unveröffentlichte Auftragsbeschreibung. Freiberg, 2023.

DEGNER, T. (2003): Prognose von geochemischen Auswirkungen der Nachnutzung stillgelegter Bergbau-Stollen-Systeme am Beispiel des Freiberger Grubenrevieres. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg.

DURHAM UNIVERSITY (2023): Geothermal Energy from Mines and Solar Geothermal Heat. GEMS-Project. Department of Earth Sciences, Science Labs.

DWD (2022): CDC (Climate Data Center). https://www.dwd.de/EN/climate_environment/cdc/cdc_node_en.html (Zugriff am 14. 03 2022).

ELBELABE (2024): Bergbaumuseum Altenberg. https://www.elbelabe.eu/poi/m/bergbaumuseum-altenberg/ (Zugriff am 09. August 2024).

ENERGIEATLAS RHEINLAND-PFALZ (2018): Grubenwasserwärmenutzung zur Beheizung des Rathauses der Verbandsgemeinde Bad Ems. https://www.energieatlas.rlp.de/earp/praxisbeispiele/projektsteckbriefe/projekt-steckbriefe/anzeigen/kommune/94. (Zugriff am 19. Januar 2024).

ENGELSCHALL, J. (1723): Beschreibung der Exulanten- und Bergstadt Johanngeorgenstadt. Leipzig.

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2019): The European Green Deal. Mitteilung der Kommission, Brüssel.

EVANS, A. M., NEUMANN, U. (1992): Erzlagerstättenkunde. Stuttgart.

FELIX, M., GÖRNE, S., BERGER, H., ASSMANN, L., MÖLLMANN, G., KABUS, F., WAGNER, S. (2007): Zur geothermischen Nutzbarkeit des Grubenwassers im Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz. Forschungsbericht. Landesamt für Umwelt und Geologie

FISCHER & PARTNER (1998): Nutzbarmachung des Bergwassers vom Lampertusstollen. Auftragsbericht, Stadtverwaltung Hohenstein-Ernstthal.

FISCHER, A., FISCHER, S. (2020): Geschichte der Stadt Bad Gottleuba-Berggießhübel, Teil 3 - Bergbau und Eisenverarbeitung. Dresden.

BRACKE, R., HUENGES, E. (2022): Roadmap tiefe Geothermie Für Deutschland - Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende. Fraunhofer IEG.

G.E.O.S. (2007): Geothermische Grubenwassernutzung der Grube Schlema-Alberoda - Potenziale und Möglichkeiten. Tagungsband - Sächsischer Geothermietag Spezial. Freiberg: Geokompetenzzentrum Freiberg e.V. Heft 01 / 2007

G.E.O.S. (2013): Bergbau und Wasserpfade in Zinnwald / Cínovec. Maßnahmen zur Einhaltung der Wassergüte und eines geordneten Abflusses. Altenberg: Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie

GHOREISHI-MADISEH, S. A., GHOMSHEI M., HASSANI F., UND ABBASY F. (2012): Sustainable heat extraction from abandoned mine tunnels: A numerical model. Journal of Renewable and Sustainable Energy 4.

GOERKE-MALLET, P., WESTERMANN, S., MELCHERS, C. (2016): Die Verwahrung der Bergwerke im Döhlener Becken durch die Wismut GmbH. Eine Evaluierung des Grubenwasseranstiegsprozesses. Technische Hochschule Georg Agricola zu Bochum.

GOOGLE (2023): Höhenprofilmessung, Google Earth Version 7.3.6.

GOTTE W., RICHTER, G. (1960): Geologische und bergmännische Probleme beim Anfahren der wasserführenden Gangzone im Brander Revier. Freiberger Forschungshefte A176, 1960: 5-25.

GRAB, T., STORCH, T., GROß, U. (2018): Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken. In Handbuch Oberflächennahe Geothermie, von Bauer, Freeden, Jacobi, & Neu, 523–586. Berlin: Springer Spektrum.

GRAB, T., WUNDERLICH, T., EBEL, T., OPPELT, L., FIEBACK, T. M., WENZEL, T., HEINRICH, P., MANIG, R. (2024): Standortgenaue Machbarkeitsstudie zur regenerativen Energieversorgung von Gebäuden mittels Grubenwassergeothermie in den durch Folgen des Steinkohlebergbaus geprägten sächsischen Gemeinden Oelsnitz i.E., Lugau, Gersdorf und Hohndorf. Freiberger Forschungsheft A 947 Energie, Freiberg: TU Bergakademie Freiberg.

GREIF, A., KLEMM, W. (2007): Studie zur Belastung von Gewässern durch den Altbergbau - Erarbeitung fachlicher Grundlagen und Problemstudien zur Aufstellung von Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen. LfULG.

GREIF, A., KLEMM, W. (2010): Geogene Hintergrundbelastung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

GRIMM, R., JORDAN, H. (2001): Bewertung des Grubenwasserpotenzials Sachsens und Verifizierung umsetzbarer Standorte unter Einbeziehung des Eintrags solarer Wärmegewinne. Abschlussbericht „Grubenwasserpotenzial Sachsen". Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

GUB (2014a): Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlereviers - Auswertung des Leistungspumpversuchs, Abschlussdokumentation.

GUB (2014b): Geothermische Nutzung von Grubenwässern im Bereich Rothschönberger Stolln/Krankenhaus Freiberg. Kreiskrankenhaus Freiberg.

HÄHNE, R., STOLL, R., PELZ, F. (2002): Chances and risks of the geothermal use of mine water in Schlema / Saxony. In: Merkel, B.J., Planer-Friedrich, B., Wolkersdorfer, C. (eds) Uranium in the Aquatic Environment. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55668-5_110

HILLER, A. (2012): Hydrogeologische Schwerpunkte der Sanierung am Standort Schlema-Alberoda und Einführung zur Fachexkusion. DWA-Fachtagung „Sanierung des Uran-Bergbaus nach 20 Jahren: Halbzeit oder Schlussspurt“. Wismut GmbH.

HOFMANN, K., BÖRNER, S., BRÜNNER, A., SCHRÖTER, A. (2023): Verfahrenshandbuch für oberflächennahe Erdwärmenutzung. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.

HOFFMANN, M. (2010a): Thermische Nutzung von Grubenwässern, Projekt Zwickau, 7. Bergbaukonferenz FLOEZ. Westsächsische Hochschule Zwickau.

HOFFMANN, U. (2010b): „Vorkommen Johanngeorgenstadt.“ BIUG - Beratende Ingenieure für Umweltgeotechnik.

HÖSEL, G., HOTH, K., JUNG, D., LEONHARDT, D., MANN, M., MEYER, H., TÄGL, U. (1994): Das Zinnerz-Lagerstättengebiet Ehrenfriedersdorf/Erzgebirge. Freiberg: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie & Sächsische Oberbergamt, 1994.

HÖSEL, G., FRITSCH, E., JOSIGER, E., WOLF, P. (1996): Das Lagerstättengebiet Geyer. Bergbaumonographie, Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie & Sächsisches Oberbergamt.

HOTH, K. (2008): Bergbau in Sachsen: Band 15: Die Steinkohlelagerstätte Zwickau. Bergbaumonographie, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.

HUBER G. (1989): Das Brander Grubenrevier. Begleituntersuchung zur Dissertation: Energetische Nutzung von Grubenwässern. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg.

HUBER G. (1990): Energetische Nutzung von Grubenwässern. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg.

IBRAR, I., NAJI, O., SHARIF, A., MALEKIZADEH, A., ALHAWARI, A., ALANEZI, A., ALTAEE, A. (2019): A Review of Fouling Mechanisms, Control Strategies and Real-Time Fouling Monitoring Techniques in Forward Osmosis, Journal of Water, https://doi.org/10.3390/W11040695.

IGEM (2010): Optimierung und Ausbau des geothermischen Potentials von Heil und Grubenwässern in Bad Ems. Machbarkeitsstudie. Institut für geothermisches Ressourcenmanagement.

INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR UMWELTSCHUTZ MBH (1993): Beilage 1 zur Druckwasserleitung: Alternative Beheizung Mittelschule Ehrenfriedersdorf. Erläuterungsbericht, Ehrenfriedersdorf.

IWU (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden - zweite erweiterte Auflage. Institut für Wohnen und Umwelt.

IWU (2020): Gradtagszahlen Deutschland. https://www.iwu.de/nachricht/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=292&cHash=a295d1987306c0dbadecc7d829e3ba48 (Zugriff am 14.03.2022).

JAHNS, C. (2018): Überwachung der langjährigen Grubenflutung im Steinkohlenrevier Lugau / Oelsnitz. 1. Fachkonferenz "Vita-Min". Dresden.

KAISER, N. (ohne Datum): Zur Geschichte des Bergbaus in Brand-Erbisdorf. https://www.bergbaufreunde-sachsen.de/erzgebirge/brand-erbisdorf/ (Zugriff am 10. Januar 2024).

KIESER, B., PHILLION, R., SMITH, S., MCCARTNEY, T. (2011): The Application of Industrial Scale Ultrasoniv Cleaning to Heat Exchangers. Kreta: Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning.

KLEMM, W., PAUL, M., JENK, U., MEYER, J., GREIF, A., HARTMANN, J. (2015): Die Langzeitentwicklung der Belastung von Flutungswässern in Gruben des Sächsischen Erzgebirges - Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Konferenzpaper, Bad Schlema.

KÖHLER, S. (2020): Zur Bergbaugeschichte von Hohenstein-Ernstthal. http://www.unbekannter-bergbau.de/inhalte/spot_12_2020_HOT-Lampertus.htm (Zugriff am 19. September 2023).

KONRAD, C., GRUND, K. (2010): Geothermische Grubenwassernutzung für den Standort Reiche Zeche in Freiberg. 61. Berg- und Hüttenmännischer Tag. TU Bergakademie Freiberg.

KRANZ, K. (2011): Hydrogeologische Untersuchungen und Konzept für ein Monitoring im Alten Tiefen Fürstenstollen zur geothermischen Grubenwassernutzung im Schloss Freudenstein. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.

KRAUSE, W. (2024): Entwicklung und Vergleich von Modellen zur Berechnung des Wärmeentzugs in Strecken mit Grubenwasser. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2024.

KRAUSE, T. (2011): Erläuterungsbericht zum Antrag auf wasserrechtliche Genehmigung zur Entnahme von Grubenwasser in Schlema aus dem Markus-Semmler-Stollen (MSS). Blankenhain.

KRAUß, M. (2024): Auszug aus der Geschichte / Chronik des Bergwerks. https://www.frisch-glueck.de/site-assistent/cms-admin/user/index.php?page_id=4&click=true (Zugriff am 6. März 2024).

KUGLER, J., EHRENTRAUT, J. (2011): Umsetzungsstudie Bergbaugebiet Brand-Erbisdorf, Festlegung und Definition der Welterbe-Gebiete und Pufferzonen im Rahmen des Projekts Montanregion Erzgebirge.

KUKULKA, D. J., UND M. DEVGUN, M. (2007): Fluid temperature and velocity effect on fouling. Applied Thermal Engineering, Vol. 27, Issue 16, 2007: 2732-2744.

KUNZE, S., LANGER, F. (2011): Wismut-Bergbau in und um Annaberg-Buchholz (1946-1959). https://www.untertage.com/publikationen/16-sachsen/176-wismut-bergbau-in-und-um-annaberg-buchholz-1946-1959.html (Zugriff am 12. August 2023).

KUNZMANN, J., BAACKE, D. (2007): Untersuchungen zur Schaffung eines geregelten Flutungswasserablaufes für das Grubengebäude Annaberg-Buchholz. 7. Altbergbau-Kolloquium, Freiberg.

LAGERPUSCH, K. (2010): Stellenwert Bergbau – Geothermie in Sachsen. Workshop „Bergbau-Geothermie“ im Rahmen der ReSource-Arbeitsgruppe „Natürliche Potentiale“. Bad Schlema.

LANDRATSAMT MARIENBERG (1991): Niederschrift zur Beratung zur Nutzung geothermischer Energie in der Stadt Marienberg. Marienberg.

LANUV (2018): Potenzialstudie Warmes Grubenwasser, Fachbericht 90. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen.

LAQUAI, B. (2015): Johanngeorgenstadt - Ruiniert von der Gier nach Uran. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://oiger.de/2023/10/03/das-verschwundene-johanngeorgenstadt/188432&ved=2ahUKEwj-j8j9qdyJAxUaBNsEHRlTOh4QFnoECBcQAQ&usg=AOvVaw0d1LfVpPubiKQYigGOhP19 (Zugriff am 6. März 2023).

LFUG (2003): Wismut-, Kobalt-, Nickel- und Silbererze im Nordteil des Schneeberger Lagerstättenbezirks. Bergbaumonographie, Band 10. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

LFULG (2010): „Geologie und Bergbaufolgen im Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz, Geoprofil 13." Geoprofil 13. Dresden.

LFULG (2014): Verbesserung der Wassergüte in Bergbaugebieten, Schriftenreihe, Heft 15/2014. Heft 15. Dresden.

LFULG (2016): Stollen-Steckbriefe. Emissionen aus sächsischen Wasserlösestollen. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.bergbaufolgen.sachsen.de/download/LfULG_Steckbrief_Stolln_.pdf&ved=2ahUKEwiBtIHsrNyJAxXcB9sEHXA7NbYQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw1TV5ki0OYXy_hGFdcaCC8q (Zugriff am 14. November 2024)

LFULG (2022): „Persönliche Kommunikation, Abteilung Montanhydrogeologie." 2022.

LFULG (2023): Stellungnahme zum städtebaulichen Konzept Johanngeorgenstadt des Büros für Städtebau GmbH Chemnitz.

LMBV (2023): Persönliche Kommunikation, 18.07.2023, IMWA-Konferenz, New Port, Wales.

MATTHES, R. (2007): Sanierung des WISMUT-Schachtes 302 in Marienberg und geothermische Nutzung des Grubenwassers, Fachbericht, Bergbau, 2007, 445-446, Chemnitz.

MEIER, G. (1999): Ingenieurgeologische Problemstellungen bei der Erkundung und Verwahrung von tagesnahen Hohlräumen und Altbergbau im mitteldeutschen Raum. Ingenieurbüro Dr. G. Meier GmbH. Freiberg.

MEIER, G., SCHREYER, J. (2006): Geotechnisch-markscheiderische Bewertungen und bergtechnische Maßnahmen zur geothermischen Grubenwassernutzung aus dem ehemaligen Wismutschacht 302 in Marienberg (Erzgebirge). 6. Altbergbaukolloquium, Aachen.

MEIER, G. (2013): Geothermische Grubenwassernutzung aus dem alten Wismutschacht 302 in Marienberg (Erzgebirge) - Entstehung – Nutzung – Erfahrungen. Ingenieurbüro Dr. G. Meier GmbH. Freiberg.

MERKEL, B., SCHIPEK M. (2010): Grubenwässer – Herausforderungen und Lösungen. 61. Berg- und Hüttenmännischer Tag. TU Bergakademie Freiberg. Freiberg.

MEYER, M. (1960): Die Wasserverhältnisse in der Betriebsabteilung Freiberg des VEB Bleierzgruben Albert Funk Freiberg unter besonderer Berücksichtigung der Hochwassersicherungsmaßnahmen. Freiberger Forschungshefte A 176, 1960: 26-40.

MEYER F. (2007): Der Marienberger Bergbau um 1600. Tagungsband 10, Internationaler Montanhistorik Workshop. Dittrichshütte.

MOERMAN, F., RIZOULIÈRES, P., MAJOOR, F. A. (2013): Cleaning in place (CIP) in food processing. Hygiene in Food Processing: Principles and Practice, 2013: 305-383.

MUGOVA, E., WOLKERSDORFER, C. (2018): A Review of Mine Water Stratification. 18. ALTBERGBAU - KOLLOQUIUM. Tagungsband. 125-132. Wieliczka.

MÜLLER, H. (1890): Über die Erzlagerstätten in der Umgegend von Berggießhübel. Erläuterungen zur geologischen Specialkarte des Königreichs Sachsen. Leipzig.

MÜLLER, H. (1894): Die Erzgänge des Annaberger Bergreviers, Erläuterungen zur geologischen Specialkarte des Königreichs Sachsen. Erläuterungen zur geologischen Specialkarte des Königreichs Sachsen. Leipzig.

MÜLLER, B., ROTTLUFF, F. (2001): Ursachen der Durchflussminderung an der Wärmepumpenheizungsanlage in der Mittelschule Ehrenfriedersdorf. Abschlussbericht. Energiemodell Sachsen e.V.

MÜLLER-STEINHAGEN, H. (2001): Handbuch Wärmeübertrager-Reinigungssysteme: Verfahren zur Verminderung und Beseitigung von Ablagerungen und Verschmutzungen. Publico-Publ. Essen

MUSEUM HUTHAUS EINIGKEIT (2024): Persönliche Kommunikation. 31. März 2024, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Freiberg.

OCHS, F., ZOTTL, A., LAUERMANN, M., SCHRANZHOFER, H., HALMDIENST, C., REITERER, D. (2015): Optimierte Erdbecken-Wärmespeicher für Wärmenetze. Smart Energies #2/2015, Blue Globe Report, 2015.

OELSNER, C. (1983): Ergebnisse der Temperaturmessungen in Freiberger Schächten - Schlussfolgerungen hinsichtlich der Nachnutzung geothermischer Ressourcen zur Wärmeversorgung im Stadtgebiet Freiberg, unveröffentlicht. TU Bergakademie Freiberg.

OELSNER, C., KOHLSTOCK, H., HUBER, G. (1988): Studie zur Nutzung der Marienberger Grubenwässer zur Wärmeversorgung im Stadtgebiet Marienberg zur Substitution von Importerdgas. TU Bergakademie Freiberg.

OPPELT, L., GRAB, T., EICHINGER, S., KAPLIN, K., WENZKE, B., GRIMMER, M., ABEYWICKRAMA, J., MEZOVSKA, V., HOTH, N., FIEBACK, T. M. (2020): Vodamin II - Grubenwasser als Energiequelle. Abschlussbericht. TU Bergakademie Freiberg.

OPPELT, L., GRAB, T., POSE, S., STORCH, T., FIEBACK, T. M. (2021): Mine water geothermal energy as a regernative energy source - status quo and results from five years of monitoring. Oil Gas European Magazine. March, 1/2021.

OPPELT, L., GRAB, T., TIMM, W., EBEL, T., RAITHEL, F., FIEBACK, T. M. (2024): Mine water as an energy source - Overview of technical basics, existing plants and monitoring results

WARTZACK, S. (2020): Auswahl- und Bewertungsmethoden, in: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 9. Auflage. Rostock, Bochum: Kilian Gericke, Beate Bender, 2020.

PRETZSCHNER, C., KÖCKRITZ, V. (1993): Erstellung eines Berechnungsmodells zur Wärmeversorgungskonzeption im NW-Feld der Zinngrube Ehrenfriedersdorf. Abschlussbericht "Wärmeprojekt" Ehrenfriedersdorf, Freiberg.

REICHEL, W., SCHAUER, M. (2007): Bergbau in Sachsen: Band 12: Das Döhlener Becken bei Dresden – Geologie und Bergbau. Bergbaumonographie. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.

RESOURCE PROJECT (2011): Pre-investment study geothermal energy from mining sources. CENTRAL EUROPE Project, 1CE084P4 ReSOURCE, Zwickau.

RÖDER, U. (2012): Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers im Energieforschungsprogramm des Bundes. Präsentation, SIB Zwickau.

RÖDER, U. (2015): Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers. Präsentation, SIB Zwickau.

RÖDER, U. (2023): Interview geführt von Grab T., & Ebel, T. SIB Zwickau (4. Mai 2023).

RODRIGUEZ, R., DIAZ, M. B. (2009): Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method. Journal of Renewable Energy 34, 2009: 1716-1725.

ROTTLUFF, F. (1993): Energiemodell Sachsen: Grubenwassernutzung im Erzgebirge. 5. Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e.V., Juni 1993, 2. Ausg.

ROTTLUFF, F. (1994): Grubenwasser aus dem Nord-West-Feld als Wärmequelle, Das Energiemodell. Informationsschrift des "Energiemodell Sachsen e.V., Ehrenfriedersdorf.

ROTTLUFF, F. (1998): Neue Wärmepumpenanlage im Besucherbergwerk Zinngrube Ehrenfriedersdorf. 21. Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e.V., 1 Ausg.

RUDOLPH, A., POPPEI, J., MÜLLER, W., KELLNER, T., HORN, H., HARFMANN, W., BACHMANN, I., BUDDENBOHM, C. (1991): Energetische Nutzung der Flutungswässer der Lagerstätte Niederschlema/Alberoda. Studie der Geothermie - Engineering GmbH Neubrandenburg. Wismut GmbH.

RUNGE, W. (1999): Chronik der Wismut: mit erweitertem Sanierungsteil (1998 - 2010), Wismut GmbH, Chemnitz

SCHABERG, A. (1998): Nutzung von gefluteten Grubenräumen zur Langzeitwärmespeicherung. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg.

SCHILKA, W., EHRT, E., WENZEL, H. (2022): Bergbaulexikon Zwitterstock Altenberg und Umgebung, Manuskripte zum Montanwesen um Altenberg und Zinnwald. Heft 5/2022. Bergbaumuseum und Knappenverein Altenberg e.V.

SCHRAPS, A. (2008): St. Lampertus Fundgrube. http://www.lampertus.de/frames/frame_historisches.htm (Zugriff am 28. Februar 2024).

SCHRÖDER, C. (2024): Besucherbergwerk Zinnwald. https://besucherbergwerk-zinnwald.de/ (Zugriff am 1. März 2024).

SENNEWALD, R., MARTIN, M. (2013): Bergbau und Wasserpfade in Zinnwald/Cínovec Maßnahmen zur Einhaltung der Wassergüte und eines geordneten Abflusses. Vodamin - Projektabschlusskonferenz.

SIB ZWICKAU (2020): Forschungsprojekt "Geothermische Nutzung von Flutungswässern aus den Abbauhohlräumen des Zwickauer Steinkohlenreviers“ - Stadtgebiet Zwickau, Abschlussbericht. Zwickau.

SMWA (2008): Neubewertung von Spat- und Erzvorkommen im Freistaat Sachsen. Steckbriefkatalog, Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit. Freiberg.

SOBA (2004): Richtlinie des Sächsischen Oberbergamtes für die Erteilung einer Erlaubnis zur Aufsuchung sowie einer Bewilligung zur Gewinnung bergfreier Bodenschätze. Freiberg.

SOBA (2018): Fachkonzept Oelsnitz/Erzgebirge. https://www.oba.sachsen.de/fachkonzept-oelsnitz-erzgebirge-5002.html (Zugriff am 22. August 2024).

SOBA (2018a): Merkblatt für Anträge auf Erteilung einer Erlaubnis nach § 7 Bundesberggesetz (BBergG) oder einer Bewilligung nach § 8 BBergG. Freiberg.

SOBA (2022): Übersichtsriss Zinngrube Ehrenfriedersdorf. Archiveintrag, Freiberg.

SOBA (2023a): Hohlraumkarte. https://www.oba.sachsen.de/hohlraumkarte-4918.html (Zugriff am 29. März 2023).

SOBA (2023b): Merkblatt zur Aufstellung von Betriebsplänen für Tagebaue. Freiberg.

SOBA (2024): Persönliche Kommunikation und Recherche im SOBA Archiv. 03. Mai 2024. Freiberg.

ST. LAMPERTUS FUNDGRUBE (2008): Geschichte der St. Lampertus Fundgrube. Hohenstein-Ernstthal. http://www.lampertus.de/frames/frame_historisches.htm (Zugriff am 1. März 2024).

ST. LAMPERTUS FUNDGRUBE (2023): Übersichtsriss und Saigerriss, Eigene Aufnahme. Hohenstein-Ernstthal.

STADT FREITAL (2024): Freital in Zahlen. https://www.freital.de/Unsere-Stadt/Informationen-zur-Stadt/Freital-in-Zahlen/ (Zugriff am 2. Februar 2024).

STADTVERWALTUNG ANNABERG-BUCHHOLZ (2023): Persönliche Kommunikation, Ebel, T., Oppelt, L., Heinrich, P., 1. November 2023.

STEINKOHLENBERGBAUVEREIN ZWICKAU (2000): Der Steinkohlenbergbau im Zwickauer Revier. Buch, Förster & Borries 2000. Zwickau.

STEYER, N., WUNDERLICH, T., PANITZ, F. (2024): Quartierskonzept Aue-Bad Schlema. Erarbeitung eines integrierten energetischen Quartierskonzeptes für den Kurortteil Bad Schlema. DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH.

TELLER, F. (2001): Bergbau und Bergstadt Johanngeorgenstadt. Johanngeorgenstadt: Förderverein Pferdegöpel Johanngeorgenstadt e. V.

TELLER, F. (2009): Umbruch, Aufbruch, Abbruch. Johanngeorgenstadt 1945–1961. Johanngeorgenstadt: Förderverein Pferdegöpel Johanngeorgenstadt e. V.

TELLER, H., FEUERHERM, T., LANGE, K., KRAUS, W. (2023): Johanngeorgenstadt - Stadt des Schwibbogens. 20. Dezember 2023. https://www.pferdegoepel.de/jst.html (Zugriff am 6. März 2024).

TITZMANN, O. (1995): Radiumbad Oberschlema: Die Geschichte eines Kurortes. Kurgesellschaft.

TSAI, Y. P. (2005): Impact of flow velocity on the dynamic behaviour of biofilm bacteria. Biofouling, Vol. 21, 2005: 267-277.

TUBAF (2022a): Projekt "MareEn": Standortgenaue Machbarkeitsstudie zur regenerativen Energieversorgung von Gebäuden, TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für technische Thermodynamik. Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft.

TUBAF (2022b): Projekt „MineATES“: Nutzung grundwassererfüllter bergbaulicher Hohlräume als thermische Energiespeicher.“ TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrochemie (in Bearbeitung).

TUBAF (2023a): Messfahrt Annaberg-Buchholz. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, 1. November 2023. Freiberg.

TUBAF (2023b): Analyse und Wiederinbetriebnahme der Grubenwasseranlage Schiller-Schule in Aue-Bad Schlema. Projektarbeit von Christoph Sachse und Lars Ladusch. Technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg.

TUBAF (2023c): Vektorisiertes Risswerk nach Risskarten der Wismut GmbH. Lehrstuhl für technische Thermodynamik, Freiberg.

TUBAF (2023d): TUBAF-Homepage des Forschungs- und Lehrbergwerks. 2023. https://tu-freiberg.de/lfbw (Zugriff am 13. August 2023).

TUBAF (2023e): Messfahrt Elbstollen. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, 9. November 2023. Freiberg.

TUBAF (2023f): Messfahrt Markus-Semmler-Stollen. Lehrstuhl für technische Thermodynamik, 15. Mai 2023, Freiberg.

TUBAF (2024): Messfahrt Schneeberg. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, 2. Mai 2024. Freiberg.

TUBAF (2024a): Grubenwasserschemata. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Freiberg.

TUBAF (2024b): Projekt "GEoQart": Klimaneutrale und sektorenübergreifende Wärme- und Kälteversorgung. in Bearbeitung, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Freiberg.

TUBAF (2024c): Messfahrt Berggießhübel, Zinnwald, Brand-Erbisdorf. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, 23. April 2024. Freiberg.

TUBAF (2024d): Rissdatenbank des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Freiberg.

TUBAF (2024e): Messfahrt Johanngeorgenstadt. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, 23. Mai 2024. Freiberg.

VATER, A. (2012): Geothermische Nutzung von Grubenwasser aus der Grube Schlema - Alberoda, Arbeitsgruppe Geothermie und Grubenwassernutzung. Aue-Bad Schlema.

VDI 4640 (2021): VDI 4640, Blatt 1. Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Verein Deutscher Ingenieure e.V.

VDI-GESELLSCHAFT (2013): VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage. Düsseldorf: Springer-Verlag.

VEB BERGERKUNDUNG (1989): Möglichkeiten der Förderung von Grubenwässern im Marienberger Bergbaurevier. Studie, Oelsnitz.

VOGEL, R. (1993): Das Lugau-Oelsnitzer Steinkohlenrevier. Oelsnitz: Mugler Druck-Service GmbH Hohenstein-Ernstthal.

WAGENBRETH, O. (1984): Der Freiberger Bergbau, Technische Denkmale und Geschichte. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

WAGENBRETH, O. (1990): Technische Denkmäler und Geschichte, Der Bergbau auf Silber, Zinn, Wismut, Kobalt und Nickel. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

WAGENBRETH, O. (2008): „Die Technische Universität Bergakademie Freiberg und ihre Geschichte: dargestellt in Tabellen und Bildern." TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

WEINHOLD G. (2001): Die Zinnerzlagerstätte in Altenberg/Osterzgebirge. Bergbaumonographie. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.

WEIßER HIRSCH SCHNEEBERG E.V. (2024): Fundgrube Weißer Hirsch in Schneeberg. 22. August 2024. http://www.bergbauverein-weisser-hirsch.de/home.htm (Zugriff am 2. Mai 2024).

WINZER, T. (2024): Ende eines Millionenprojekts. 8. Januar 2016. https://www.saechsische.de/ende-eines-millionenprojekts-3291891.html (Zugriff am 2. Februar 2024).

WISMUT GMBH (1992): Sanierungskonzept - Sanierungsbetrieb Aue.

WISMUT GMBH (2006): Umweltbericht 2006. Chemnitz.

WISMUT GMBH (2010): Chronik der Wismut. Chemnitz.

WISMUT GMBH (2012a): Geothermie in Bad Schlema - Projekt Schillerschule. Aue-Bad Schlema.

WISMUT GMBH (2012b): Wetterprojekt zur Senkung der bergbaulichen Radonbelastung in den Häusern der Bergstadt Schneeberg. 6. Sächsischer Radontag - 8. Tagung Radonsicheres Bauen. Dresden.

WISMUT GMBH (2014): Grubenwasserbeschaffenheit im Bereich der Fiedrich-Schiller-Schule in Bad-Schlema, Untersuchungsergebnisse der Wismut GmbH. Vortrag zur Gemeinderatssitzung Bad Schlema. Aue-Bad Schlema.

WISMUT GMBH (2016): Umweltbericht 2016. Chemnitz.

WISMUT GMBH (2017a): Umweltbericht 2017. Chemnitz.

WISMUT GMBH (2017b): 15 Jahre Sanierung sächsischer Wismut-Altstandorte. Chemnitz.

WISMUT GMBH (2021): Haldenlandschaft Aue-Bad Schlema. https://www.wismut.de/de/haldenlandschaft.php (Zugriff am 08. August 2024).

WISMUT GMBH (2022): „20 Jahre Sanierung sächsischer Wismut-Altstandorte." Chemnitz, 2022.

WISMUT GMBH (2023a): Tätigkeitsbericht 2021/2022. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.wismut.de/de/download.php%3Fdownload%3DWi_T%25C3%25A4tigkeitsbericht%2BPTALT%2B2022-Stand%2B05092023_web.pdf&ved=2ahUKEwjsrNTvlN6JAxVuQ_EDHawsKP4QFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2GioZCVPGPwWpZqoS_X9_r (Zugriff am 08. August 2024).

WISMUT GMBH (2023b): Stellungnahme zum städtebaulichen Konzept Johanngeorgenstadt des Büros für Städtebau GmbH Chemnitz.

WISMUT GMBH (2024): Wasserlösung Tiefer Jung-Andreas-Stolln, https://www.wismut.de/de/altstandorte_projekte.php?id=855&back=altstandorte_projekte.php%3Fyear%3D2015%26index%3D0 (Zugriff am 26. Juni 2024).

WISMUT GMBH (k.A.): Voruntersuchungen zur Schaffung eines geregelten Flutungswasserablaufs für das Grubengebäude von Johanngeorgenstadt. https://www.wismut.de/de/altstandorte_projekte.php?id=553 (Zugriff am 11. April 2024).

ZACHARAKIS, Z. (2017): Lithium: Der Berg erwacht. https://www.zeit.de/wirtschaft/2017-11/lithium-rohstoff-batterien-elektroautos-erzgebirge (Zugriff am 1. März 2024).

ZINNGRUBE EHRENFRIEDERSDORF (2024): Zinngrube Ehrenfriedersdorf. https://www.zinngrube-ehrenfriedersdorf.de/ (Zugriff am 20. August 2024).

ZINNWALD LITHIUM (2024): Das Projekt. https://zinnwaldlithium.com/de/project/ (Zugriff am 21. Oktober 2024).

ZSCHERNIG J. (1991): Untersuchungen und Berechnungen zur energetischen Nutzung von Grubenwässern in Freiberg - Studie. Dresdner Ökotherm GmbH, Dresden.

A 1 Grubenwasserprobenahmen

Tabelle A 1: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 1

Datum		23.04.2024		01.11.2023		01.11.2023		15.05.2023	
Revier		Altenberg		Annaberg-Buchholz		Annaberg-Buchholz		Aue-Bad Schlema	
Probename		ZW-THGS		DOR-ST1		MR-ST1		A-BS MSS	
Lokation		Tiefer Hilfe Gottes Stolln, 50.74611556, 13.77311338		Grube Himmlisch Heer 50.5582424, 13.0020081		Markus-Röhling-Stollen, 50.5981682, 12.9952590		Markus-Semmler Stolln Mundloch, 50.6192856, 12.6806951	
Bemerkung		Rohr Mundloch		Entwässerungskanal ca. 30 m hinter Mundloch		Mundloch		Entwässerungsstolln	
Art der Probe		Schöpfprobe		Schöpfprobe		Schöpfprobe		Schöpfprobe	
Farbe		farblos, ohne Trübung		farblos, ohne Trübung/ Bodensatz		farblos, ohne Trübung/ Bodensatz		farblos, ohne Trübung/ Bodensatz	
Geruch		geruchlos		geruchlos		geruchlos		geruchlos	
T	°C	9,1		9,5		9,2		11,5	
pH	-	7,25		7,16		7		7,77	
ELF	µS/cm	412		1002		400		496	
U_{mess}	mV	240		277,6		258,2		371	
Eh	mV	458,2		495,5		476,3		587,4	
m-Wert	mmol/L	0,7		2,8		2,5		1,6	
p-wert	mmol/L	-0,2		-0,8		-0,8		-0,4	
TIC	mg/L	10,8		43,2		39,6		24	
Filter (µm)		kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45
O_2	mg/L	7,3			< 0,02		< 0,02		< 0,02
Fe II	mg/L		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,07	< 0,02
Fe III	mg/L	0,06	< 0,02	260		60		82	
Sulfat	mg/L	15		97		10,8		56,3	
Chlorid	mg/L	59,40		23,97		22,82		14,10	
TIC	mg/L	4,39		3,06		1,64		2,27	
TOC	mg/L	2,2		9,4		3,8		4,6	
TN	mg/L	1,8		< 0,02	< 0,02	0,03	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Al	mg/L	0,240	0,220	0,165	0,163	< 0.01	< 0,01	0,242	0,228
As	mg/L	<0,01	< 0,01	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,03
Ba	mg/L	0,2	0,3	68,3	66,0	35,1	34,9	53,5	52,9
Ca	mg/L	21,44	22,19	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cd	mg/L	<0,03	< 0,03	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,1	< 0,1
Co	mg/L	<0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cr	mg/L	<0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cu	mg/L	0,04	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,07	< 0,02
Fe	mg/L	0,06	< 0,02	8,57	8,58	2,66	2,66	3,94	3,02
K	mg/L	4,23	4,43	0,021	0,021	0,019	0,019	0,04	0,031
Li	mg/L	0,0	0,0	35,0	35,3	15,4	15,3	26,3	25,8
Mg	mg/L	1,56	1,81	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,01	< 0,005
Mn	mg/L	0,0	0,0	50,7	53,2	6,9	6,9	24,3	23,6
Na	mg/L	31,05	30,99	< 0.02	< 0.02	0,06	0,05	< 0,02	< 0,02
Ni	mg/L	<0,02	<0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,05
Pb	mg/L	<0,1	<0,1	7,02	6,79	5,97	5,80	8,86	7,16
Si	mg/L	7,13	7,94	0,93	0,87	0,21	0,24	0,21	0,16
Sr	mg/L	0,06	0,08	0,52	0,52	< 0,1	< 0,1	0,11	< 0,1
Zn	mg/L	<0,1	<0,1	-6,44424		5,41114		14,8072	
IBF	%	5,74		1,6611		1,4767		1,101	
HCO_3^-	mmol/L	0,464							

Tabelle A 2: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 2

Datum		23.04.2024		23.04.2024		09.11.2023		23.05.2024	
Revier		Bad Gottleuba-Berggießhübel		Brand-Erbisdorf		Freital		Johanngeorgenstadt	
Probename		BGH-ZWES		BED-TBSt		Elbstollen-VS-GW		JGS-ELBohr	
Lokation		Mundloch Zwieseler Erbstolln, 50.87795382, 13.96709852		10 m vor Mundloch Thelersberger Stolln, 50.8785033, 13.2820170		Elbstollen, 51.0628433, 13.6825440		Wismut-Entlastungsbohrung (vor Glück-Auf-Stollen), 50.44105609,12.72757542	
Bemerkung								GAST-A (Wismut)	
Art der Probe		Schöpfprobe		Schöpfprobe		Pumpprobe		Schöpfprobe	
Farbe		farblos, ohne Trübung		farblos, ohne Trübung		braun, stark trüb		schwach, gelb, schwache Trübung	
Geruch		geruchlos		geruchlos		erdig		sulfidisch	
T	°C	9,2		8,8		12,2		10,9	
pH	-	6,86		7,58		7,61		6,92	
ELF	µS/cm	344		454		1898		401	
U_{mess}	mV	142		188		199		-9,3	
Eh	mV	360,1		406,4		414,9		207,6	
m-Wert	mmol/L	1,7		1,1		9		2,2	
p-wert	mmol/L	-0,5		-0,2		-1		-1,2	
TIC	mg/L	26,4		15,6		120		40,8	
Filter (µm)		kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45
O_2	mg/L	7,45		7,65			< 0,02	0,27	
Fe II	mg/L		0,1		0,08	0,69	0,02		1,89
Fe III	mg/L	< 0,02	< 0,02	1,1	< 0,02	560		0,12	< 0,02
Sulfat	mg/L	42		90		122		52	
Chlorid	mg/L	25,30		24,10		87,88		41,90	
TIC	mg/L	18,40		9,02		2,46		24,38	
TOC	mg/L	3,3		1,2		6,3		1,4	
TN	mg/L	2,72		4,77		< 0,02	< 0,02	1,3786175	
Al	mg/L	0,120	0,120	< 0,02	< 0,02	0,053	< 0,01	< 0,01	< 0,01
As	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	0,05	0,09	0,08
Ba	mg/L	0,1	0,1	0,0	0,0	150,8	152,3	0,0	0,0
Ca	mg/L	38	37,16	36,35	37,15	< 0,03	< 0,03	28,32	27,39
Cd	mg/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,05	< 0,05	< 0,03	< 0,03
Co	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05
Cr	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Cu	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,69	0,02	< 0,02	< 0,02
Fe	mg/L	0,1	0,11	1,18	0,08	12,1	11,61	2,01	1,87
K	mg/L	1,98	2,03	4,62	4,59	0,439	0,422	2,89	2,98
Li	mg/L	0,0	0,0	0,0	0,0	38,9	39,4	0,0	0,0
Mg	mg/L	8,40	8,58	12,46	12,77	0,07	0,06	17,66	17,36
Mn	mg/L	0,0	0,0	1,0	0,7	219,1	217,5	1,0	1,1
Na	mg/L	14,46	14,41	15,97	16,13	< 0,02	< 0,02	15,75	15,5
Ni	mg/L	<0,02	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,02
Pb	mg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	6,12	5,77	< 0,05	< 0,05
Si	mg/L	8,05	7,92	9,39	9,00	3,06	2,93	5,87	5,87
Sr	mg/L	0,12	0,11	0,12	0,12	< 0,1	< 0,1	0,18	0,17
Zn	mg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-3,52439		< 0,1	< 0,1
IBF	%	12,21		2,3		6,7099		-1,11	
HCO_3^-	mmol/L	1,121		0,694				1,546	

Tabelle A 3: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 3

Datum		05.04.2023		05.04.2023		05.04.2023		05.04.2023	
Revier		Hohenstein-Ernstthal		Hohenstein-Ernstthal		Hohenstein-Ernstthal		Hohenstein-Ernstthal	
Probename		HOT-1		HOT-2		HOT-3		HOT-4	
Lokation		Lampertusfundgrube, 50.805345, 12.725788		Lampertusfundgrube, 50.805345, 12.725788		Lampertusfund-grube, 50.805345, 12.725788		Augustastolln, 50.8114483, 12.7130032	
Bemerkung		Wasserüberlauf in Kontakt mit Gruben-körper		Entwässerungsstol-len, hoher Oberflä-chenwassereinfluss		in ca. 30m Schacht-tiefe ca. 10 min ge-pumpt und beprobt		Entwässerungsstolln	
Art der Probe		Schöpfprobe		Schöpfprobe		Pumpprobe		Schöpfprobe	
Farbe		farblos, ohne Trü-bung/ Bodensatz		farblos, ohne Trü-bung/ Bodensatz		farblos, ohne Trü-bung/ Bodensatz		farblos, ohne Trü-bung/ Bodensatz	
Geruch		geruchlos		geruchlos		stark sulfidisch		geruchlos	
T	°C	10,3		10,1		10,5		8,4	
pH	-	7,04		6,74		6,99		6,27	
ELF	µS/cm	489		426		665		607	
U_{mess}	mV	228		169		148		240	
Eh	mV	445,3		386,5		365,2		458,7	
m-Wert	mmol/L	0,9		0,3		3,9		0,3	
p-wert	mmol/L	-0,3		-0,3		-0,3		-0,3	
TIC	mg/L	14,4		7,2		50,4		7,2	
Filter (µm)		kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45
O_2	mg/L		< 0,02		0,25		0,06		< 0,02
Fe II	mg/L	0,07	< 0,02	0,13	< 0,02	0,23	< 0,02	0,18	< 0,02
Fe III	mg/L	72		68		98		54	
Sulfat	mg/L	54,5		38,8		44,9		121	
Chlorid	mg/L	9,88		3,34		52,20		2,60	
TIC	mg/L	2,36		2,05		1,66		2,66	
TOC	mg/L	10,3		16,3		1,7		5,9	
TN	mg/L	0,16	0,03	0,1	0,03	0,02	< 0,01	0,97	0,14
Al	mg/L	0,007	< 0,005	0,013	0,009	0,031	0,017	0,006	< 0,005
As	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04
Ba	mg/L	34,0	33,9	34,9	36,3	59,2	61,6	23,9	26,9
Ca	mg/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cd	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Co	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cr	mg/L	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	< 0,01	0,01	< 0,01
Cu	mg/L	0,07	< 0,02	0,38	0,21	0,29	0,05	0,18	< 0,02
Fe	mg/L	5,35	5,40	4,16	4,10	3,35	3,19	3,78	3,59
K	mg/L	0,008	0,008	0,006	0,006	0,023	0,023	0,004	0,004
Li	mg/L	11,0	10,8	10,0	9,9	32,0	31,6	7,9	7,9
Mg	mg/L	0,43	0,42	0,17	0,16	1,69	1,69	0,22	0,18
Mn	mg/L	35,6	27,2	15,6	19,3	14,5	14,5	57,4	59,1
Na	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	< 0,02	< 0,02
Ni	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Pb	mg/L	4,44	4,30	4,66	4,54	6,31	6,02	3,67	3,42
Si	mg/L	0,15	0,15	0,18	0,18	0,17	0,17	0,11	0,11
Sr	mg/L	0,13	0,12	0,18	0,19	0,05	0,06	0,13	0,10
Zn	mg/L	3,13		14,9		-2,42		0,52	
IBF	%	0,66		0,19		3,38		0,09	
HCO_3^-	mmol/L								

Tabelle A 4: Probenahmestellen und Ergebnisse der Grubenwasseranalysen, Teil 4

Datum		21.04.2023		02.05.2024		02.05.2024		02.05.2024	
Revier		Schneeberg		Schneeberg		Schneeberg		Schneeberg	
Probename		SCE-1		SCE-FS		SCE-MS-Zul		SCE-CobFl	
Lokation		Stolln direkt am Sumpf Peter & Paul Schacht, 50.5718404,12.6162634		Fürstenstollenzulauf Schacht "Weißer Hirsch", 50.58829077, 12.63747556		Zulauf Markus-Semmler, Rtg. Schacht 50, 50.58829077, 12.63747556		Coburger Flügel Überlauf, 50.58829077, 12.63747556	
Bemerkung		Fließgewässer		Grubenwasser stehend				Ablauf gespanntes Grubenwasser	
Art der Probe		Schöpfprobe		Schöpfprobe		Schöpfprobe		Schöpfprobe	
Farbe		farblos, schwache Trübung		schwach gelb-grün, schwache Trübung		farblos, keine Trübung		farblos, keine Trübung	
Geruch		geruchlos		geruchlos		geruchlos		geruchlos	
T	°C	8,9		9,8		10,5		11,3	
pH	-	6,06		6,69		7,47		6,95	
ELF	µS/cm	246		465		450		527	
U_{mess}	mV	235		209		122		131	
Eh	mV	453,4		426,7		339,2		347,6	
m-Wert	mmol/L	0,4		1,5		1,3		2,1	
p-wert	mmol/L	-0,8		-0,4		-0,2		-0,5	
TIC	mg/L	14,4		22,8		18		31,2	
Filter (µm)		kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45	kein Filter	0,45
O_2	mg/L		< 0,02	7,5		10,14		3,75	
Fe II	mg/L	1,14	0,03		< 0,02		< 0,02		< 0,02
Fe III	mg/L	32		2,13	< 0,02	0,2	< 0,02	0,18	< 0,02
Sulfat	mg/L	34,5		82		42		110	
Chlorid	mg/L	12,90		55,50		56,90		26,20	
TIC	mg/L	1,89		11,70		7,83		13,92	
TOC	mg/L	1,6		1,7		1,0		1,5	
TN	mg/L	0,04	< 0,01	4,86		8,7		4,67	
Al	mg/L	< 0,01	< 0,01	0,700	< 0,01	0,070	< 0,01	0,060	< 0,01
As	mg/L	0,10	0,09	0,14	0,05	0,03	0,02	0,34	0,33
Ba	mg/L	17,9	17,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
Ca	mg/L	< 0,03	< 0,03	45,33	44,61	23,92	23,54	41,68	40,8
Cd	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Co	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cr	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cu	mg/L	1,14	0,03	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fe	mg/L	2,96	2,99	2,13	<0,02	0,2	<0,02	0,18	<0,02
K	mg/L	0,03	0,032	5,05	4,68	2,98	2,97	3,23	3,27
Li	mg/L	6,5	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mg	mg/L	0,49	0,37	12,19	11,57	16,50	16,51	20,38	19,76
Mn	mg/L	11,5	11,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	< 0,005
Na	mg/L	0,02	0,02	16,41	15,87	18,56	18,79	15,69	14,79
Ni	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Pb	mg/L	10,77	10,82	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Si	mg/L	0,07	0,06	6,76	5,81	4,67	4,59	7,76	7,61
Sr	mg/L	< 0,05	< 0,05	0,22	0,22	0,17	0,16	0,18	0,18
Zn	mg/L	1,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
IBF	%	0,31		-2,07		13,62		9,81	
HCO_3^-	mmol/L			0,6367		0,5941		0,8972	

Herausgeber
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0; Telefax: + 49 351 2612-1099
E- Mail: Poststelle @lfulg.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autor
M. Sc. Tom Ebel, Dr.-Ing. Thomas Grab, Dipl.-Wi.-Ing. Lukas Oppelt, MBA Timm Wunderlich, M. Sc. Fritz Raithel, Dipl.-Wi.-Ing. Willi Krause, Prof. Dr.-Ing. Tobias Fieback
Institut für technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg
Gustav-Zeuner-Straße 7, 09599 Freiberg
Telefon: + 49 3731 392276;
E-Mail: Tom.Ebel@ttd.tu-freiberg.de

Redaktion
Karina Hofmann, Steffi Lasch
Abteilung Geologie
Halsbrücker Straße 31a, 09599 Freiberg
Telefon: + 49 3731 294-1409; Telefax: + 49 3731 294-1099
E-Mail: Karina.Hofmann@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis
Titelbild: TUBA Freiberg, M. Sc. Tom Ebel
alle anderen Fotos s. Abbildungsunterschriften

Redaktionsschluss
30.05.2025

Bestellservice
Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (https:/publikationen.sachsen.de).

Hinweis
Dieser Abschlussbericht wird vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Er ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.
www.lfulg.sachsen.de