

Für die Lausitz Energie Bergbau AG



Wasserrechtliche Belange im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde

Prognose und Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit im Zusammenhang mit dem Grundwasserwiederanstieg im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde

Bestellung E65-4504223900 vom 11.09.2020
Projektnummer 06/20



Neu errichtete Grundwassermessstelle 11931 östlich Jänschwalde,
Blick nach Westen auf das Kraftwerk Jänschwalde (Foto: Denke, 24.09.2020)

Dresden, am 21.03.2022



Für die Lausitz Energie Bergbau AG



Wasserrechtliche Belange im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde

Prognose und Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit im Zusammenhang mit dem Grundwasserwiederanstieg im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde

Auftraggeber: Lausitz Energie Bergbau Aktiengesellschaft
Hauptverwaltung, Leagplatz 1, 03050 Cottbus

Bestellnummer: E65-4504223900 vom 11.09.2020

Auftragnehmer: Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann
Lungkwitzer Str. 12, 01259 Dresden

Projektnummer: 06/20

Bearbeiter: Dr. Wilfried Uhlmann
Dipl.-Geol. Julia Denke
Dipl.-Geoökol. Dirk Seiler
M. Sc. (Geografie) Elisa Klein
Dipl.-Hydrologe Kai Zimmermann

Dresden, am 21.03.2022

Dr. Wilfried Uhlmann
(Verfasser)



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Anlagenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung	14
1 Veranlassung und Aufgabenstellung	18
2 Genese der Grundwasserbeschaffenheit unter Bergbaueinfluss.....	21
2.1 Grundlagen	21
2.1.1 Pyritverwitterung und Pufferung	21
2.1.2 Versauerungsdisposition des Grundwassers	24
2.1.3 Bewertung der potenziellen Versauerungsdisposition	25
2.2 Methodik	26
2.2.1 Konservative Berechnung der Pyritverwitterung und der Sulfatkonzentration im Grundwasser	26
2.2.2 Hydrogeochemisches Genesemodell.....	31
2.2.3 Berechnungsbeispiele.....	34
3 Beschreibung des Untersuchungsgebietes	37
3.1 Abgrenzung	37
3.2 Geologie und Hydrogeologie	38
3.3 Landschaft, Bodenformen und Landnutzung	41
3.4 Gewässernetz.....	43
3.4.1 Fließgewässer.....	43
3.4.2 Standgewässer	45
3.5 Fauna-Flora-Habitate (FFH)	45
3.6 Wasserhaushalt.....	47
3.6.1 Klimatische Verhältnisse	47
3.6.2 Verdunstung.....	50
3.6.3 Grundwasserneubildung	51
3.6.4 Grundwassergang.....	52
4 Erkundungsarbeiten	57
4.1 Teilgebiete	57
4.2 Bohrungen und Grundwassermessstellen	58
4.3 Probennahme und Analytik.....	59
4.3.1 Bohrkerne	59
4.3.2 Grundwasser.....	62
5 Untersuchungsergebnisse	64
5.1 Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne	64
5.1.1 Übersicht.....	64
5.1.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter	65
5.1.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	65
5.1.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter	66



5.1.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	67
5.1.6	Grundwasserbeschaffenheit nach Wiederanstieg.....	68
5.2	Kleinsee und Großsee.....	69
5.2.1	Übersicht.....	69
5.2.2	Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter.....	69
5.2.3	Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	70
5.2.4	Kationenaustauscher der Grundwasserleiter.....	71
5.2.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	73
5.2.6	Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg.....	74
5.3	Schwarzes Fließ.....	75
5.3.1	Übersicht.....	75
5.3.2	Pyrit- und Calcitgehalte der Grundwasserleiter.....	76
5.3.3	Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	76
5.3.4	Kationenaustauscher der Grundwasserleiter.....	77
5.3.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	80
5.3.6	Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg.....	81
5.4	Calpenzmoor.....	82
5.4.1	Übersicht.....	82
5.4.2	Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter.....	82
5.4.3	Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	83
5.4.4	Kationenaustauscher der Grundwasserleiter.....	84
5.4.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	85
5.4.6	Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg.....	86
5.5	Pastlingsee und -moor.....	87
5.5.1	Übersicht.....	87
5.5.2	Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter.....	87
5.5.3	Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	88
5.5.4	Kationenaustauscher der Grundwasserleiter.....	88
5.5.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	89
5.5.6	Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg.....	90
5.6	Grabkoer Seewiesen.....	91
5.6.1	Übersicht.....	91
5.6.2	Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter.....	92
5.6.3	Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	92
5.6.4	Kationenaustauscher der Grundwasserleiter.....	93
5.6.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	97
5.6.6	Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg.....	97
5.7	Moaske und Auenbereich Eilenzfließ.....	98
5.7.1	Übersicht.....	98
5.7.2	Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter.....	99
5.7.3	Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	100
5.7.4	Kationenaustauscher der Grundwasserleiter.....	100
5.7.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	104
5.7.6	Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg.....	105
5.8	Jänschwalder Laßzinswiesen.....	106
5.8.1	Übersicht.....	106
5.8.2	Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter.....	107
5.8.3	Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter.....	108
5.8.4	Kationenaustauscher der Grundwasserleiter.....	108



5.8.5	Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit.....	111
5.8.6	Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg	112
5.9	Integration der Ergebnisse.....	114
5.9.1	Vorbemerkungen.....	114
5.9.2	Bewertungsmaßstäbe	114
5.9.3	Sulfat.....	116
5.9.4	Eisen	117
5.9.5	Versauerungsdisposition	119
5.9.6	Ammonium	122
5.9.7	Zusammenfassung.....	123
6	Schlussfolgerungen.....	126
7	Quellenverzeichnis	127



Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Übersichtskarte mit Erkundungsbohrungen und Grundwasser- messstellen.....	1 Blatt
Anlage 2	Schichtenverzeichnisse, Bohrprofile und Ausbaudaten der Erkundungsbohrungen	121 Blatt
Anlage 3	Laborberichte	
	Anlage 3.1 Laborberichte zu den geochemischen Untersuchungen	237 Blatt
	Anlage 3.2 Protokolle der Grundwasserprobennahme	20 Blatt
	Anlage 3.3 Laborberichte zu den Grundwasseruntersuchungen.....	15 Blatt
Anlage 4	Profildarstellung der geochemischen Untersuchungen	24 Blatt



Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Zyklischer Prozess des Eisens bei der Pyritverwitterung.	22
Bild 2:	Stofffreisetzung und Bildung von Sekundärphasen bei der Pyritverwitterung.....	23
Bild 3:	Methodik zur statischen (ortsbezogenen) konservativen Prognose der Sulfatkonzentration in Grundwasserabsenkungs- und Grundwasserwiederanstiegsgebieten.....	27
Bild 4:	Methodik zur Prognose der Sulfatkonzentration in Grundwasserabsenkungs- und Grundwasserwiederanstiegsgebieten.	27
Bild 5:	Angepasstes hydrogeochemisches Modell für die Genese der Grundwasserbeschaffenheit im G100/120/130 in den Grundwasserabsenkungs- und -wiederanstiegsgebieten unter dem Einfluss der Pyritverwitterung und Karbonatlösung.....	32
Bild 6:	Nutzung des hydrogeochemischen Genesemodells (PHREEQC) zur Prognose nicht konservativer Kennwerte der Grundwasserbeschaffenheit. Beispiel: G100/G120/G130: $\text{FeS}_2\text{-S} = 0,03 \text{ M\%}$; löslicher Calcit = $0,0225 \text{ M\%}$	33
Bild 7:	Geologisch-geochemisches Profil am Standort der Bohrung CAL02.....	35
Bild 8:	Lage des Untersuchungsgebietes.	37
Bild 9:	Topographische Lage des Tagebaus Jänschwalde (Stand 2021), Grundwasserkörper nach EG-WRRL und pleistozäne Rinnen.....	39
Bild 10:	Geologisches Normalprofil im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde [LEAG 2017].	40
Bild 11:	Legende zum regionalgeologischen Schnitt in Bild 10, aus [LEAG 2017].	40
Bild 12:	Leitbodentypen und Ausgangsgesteine (LBA) im Untersuchungsgebiet entsprechend der BÜK 1000.	41
Bild 13:	CORINE-Land-Cover-Landnutzungsarten im Untersuchungsgebiet im Jahr 2018.	42
Bild 14:	Gewässernetz im Untersuchungsgebiet.	44
Bild 15:	FFH-Gebiete im Untersuchungsgebiet.	46
Bild 16:	Jahresmittel der Lufttemperatur an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.	47
Bild 17:	Jahressummen des korrigierten Niederschlags an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.	48
Bild 18:	Jahressummen des potenziellen Landoberflächenverdunstung nach HAUDE an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.	48
Bild 19:	Klimatische Wasserbilanz (unteres Diagramm) als Differenz aus dem korrigierten Niederschlag und der potenziellen Landoberflächenverdunstung nach HAUDE (oberes Diagramm) an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahre der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020.	49
Bild 20:	Dauerlinien der klimatischen Wasserbilanz an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre und Halbjahre der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020.	50
Bild 21:	Reale Verdunstung E_{Tr} im Untersuchungsgebiet im Mittel der 30 hydrologischen Jahre von 1991 bis 2020.	51
Bild 22:	Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet im Mittel der 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.	52



Bild 23:	LfU-Grundwassermessstellen des LfU Brandenburg auf drei ausgewählten Transekten vom Tagebau Jänschwalde.	53
Bild 24:	Ganglinien der Grundwassermessstellen 4053 6006 (schwarz), 4053 6005 (grün), 4053 6004 (rot) und 4053 6003 (blau) im Transekt 1 vom Tagebau Jänschwalde nach Norden.	54
Bild 25:	Ganglinien der Grundwassermessstellen 4052 5009 (blau), 4052 5029 (grün) und 4052 0981 (rot) im Transekt 2 vom Tagebau Jänschwalde nach Nordwesten.	55
Bild 26:	Ganglinien der Grundwassermessstellen 4152 6058 (blau) und 4152 6808 (grün) im Transekt 3 vom Tagebau Jänschwalde nach Westen.	56
Bild 27:	Teilgebiete für die geo- und hydrochemische Erkundung und zugehörige FFH-Gebiete.	57
Bild 28:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und beprobten Grundwassermessstellen.	58
Bild 29:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen, der Grundwassermessstellen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.	64
Bild 30:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G124 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G124 in der Bohrung KRA01 (rechts).	66
Bild 31:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung KRA02 (rechts).	67
Bild 32:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen, der Grundwassermessstellen im Bereich des Kleinsees und Großsees.	69
Bild 33:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung PIN01 (rechts).	72
Bild 34:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung PIN02 (rechts).	72
Bild 35:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung PIN03 (rechts).	73
Bild 36:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen, der Grundwassermessstellen im Bereich des Schwarzen Fließes.	75
Bild 37:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU01 (rechts).	78
Bild 38:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU02 (rechts).	78
Bild 39:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU03 (rechts).	79
Bild 40:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU03 (rechts).	80
Bild 41:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Calpenzmoor“.	82



Bild 42:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung CAL01 (rechts).....	84
Bild 43:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben der G130 und G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze in den G130 und G150 in der Bohrung CAL02 (rechts).....	85
Bild 44:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Pastlingsee- und -moor“	87
Bild 45:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung PAS01 (rechts).	89
Bild 46:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Grabkoer Seewiesen“	91
Bild 47:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben der G130 und G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze in den G130 und G150 in der Bohrung GSW01 (rechts).	94
Bild 48:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung GSW02 (rechts).	95
Bild 49:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung GSW03 (rechts).	96
Bild 50:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung GSW04 (rechts).	96
Bild 51:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“	99
Bild 52:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI01 (rechts).....	102
Bild 53:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI02 (rechts).....	102
Bild 54:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI03 (rechts).....	103
Bild 55:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI04 (rechts).....	103
Bild 56:	Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Jänschwalder Laßzinswiesen“	107
Bild 57:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G122 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G122 in der Bohrung PEI01 (rechts).....	109
Bild 58:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G122 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G122 in der Bohrung PEI02 (rechts).....	110
Bild 59:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben der G122 und G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze in den G122 und G130 in der Bohrung PEI03 (rechts).....	110



Bild 60:	Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G122 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G122 in der Bohrung PEI04 (rechts).....	111
Bild 61:	Prognose der Sulfatkonzentration im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg.	117
Bild 62:	Prognose der Eisenkonzentration im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg.	119
Bild 63:	Prognose des Neutralisationspotenzials (Säurekapazität KS4, 3ox) im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg.	121
Bild 64:	Prognose der Ammoniumstickstoffkonzentration im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg.	123
Bild 65:	Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde im Zuge des Grundwasserwiederanstiegs in Form von Dauerlinien relevanter hydrochemischer Kennwerte.	125



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bewertung der Säure-Base-Reaktion auf der Grundlage des Versauerungspotentials.	25
Tabelle 2:	Bewertung der potentiellen Versauerungsdisposition.	26
Tabelle 3:	Bodenphysikalische Eingangsdaten für die GWL.....	28
Tabelle 4:	Luftkapazität (Angaben in Vol.-%) in Abhängigkeit von der Bodenart und von der Trockenrohdichte des Bodens.	29
Tabelle 5:	Prognose der Sulfatkonzentration in den G150 und G130 am Standort der Bohrung CAL02 (Calpenzmoor)	36
Tabelle 6:	Bodeneinheiten im Untersuchungsgebiet nach BÜK 1000 mit absoluten und relativen Flächenanteilen.	42
Tabelle 7:	CORINE-Land-Cover-Landnutzungsarten im Untersuchungsgebiet im Jahr 2018.	43
Tabelle 8:	Fließgewässer im Untersuchungsgebiet.....	44
Tabelle 9:	Standgewässer im Untersuchungsgebiet.	45
Tabelle 10:	Fauna-Flora-Habitate im Untersuchungsgebiet.....	45
Tabelle 11:	Statistik der klimatischen Wasserbilanz an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre und Halbjahre der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020.	49
Tabelle 12:	Grundwassermessstellen im Transekt 1 vom Tagebau Jänschwalde nach Norden.	53
Tabelle 13:	Grundwassermessstellen im Transekt 2 vom Tagebau Jänschwalde nach Nordwesten.	55
Tabelle 14:	Grundwassermessstellen im Transekt 3 vom Tagebau Jänschwalde nach Westen.	56
Tabelle 15:	Teilgebiete für die geo- und hydrochemische Erkundung.	57
Tabelle 16:	Stammdaten der Bohrstellen.	59
Tabelle 17:	Stratigraphiebezogener Probenumfang der Bohrerkundung.....	60
Tabelle 18:	Laboranalytische Untersuchungen der Bohrproben.	61
Tabelle 19:	Stammdaten der Grundwassermessstellen.....	62
Tabelle 20:	Analytikprogramm für die Grundwasseruntersuchung.	63
Tabelle 21:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.	65
Tabelle 22:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.	65
Tabelle 23:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen KRA01 und KRA02 im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.....	66
Tabelle 24:	Ausgewählte Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“ (Dezember 2020).	67
Tabelle 25:	Aktuelle Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“ (Dezember 2020).	67
Tabelle 26:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen KRA01 und KRA02 im Teilbereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.	68



Tabelle 27:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.	68
Tabelle 28:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Kleinsee und Großsee“.	70
Tabelle 29:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Kleinsee und Großsee“.	70
Tabelle 30:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen PIN01, PIN02 und PIN03 im Bereich „Kleinsee und Großsee“.	71
Tabelle 31:	Ergebnisse der aktuellen Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Kleinsee und Großsee“ (Dezember 2020).	73
Tabelle 32:	Aktuelle Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Kleinsee und Großsee“ (Dezember 2020).	74
Tabelle 33:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen PIN01, PIN02 und PIN03 im Bereich „Kleinsee und Großsee“.	74
Tabelle 34:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Kleinsee und Großsee“.	75
Tabelle 35:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Schwarzes Fließ“.	76
Tabelle 36:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Schwarzes Fließ“.	77
Tabelle 37:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen FEU01, FEU02, FEU03 und FEU04 im Bereich „Schwarzes Fließ“.	77
Tabelle 38:	Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Schwarzes Fließ“.	80
Tabelle 39:	Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Schwarzes Fließ“.	80
Tabelle 40:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen FEU01 bis FEU04 im Bereich „Schwarzes Fließ“.	81
Tabelle 41:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Schwarzes Fließ“.	81
Tabelle 42:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Calpenzmoor“.	83
Tabelle 43:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Calpenzmoor“.	83
Tabelle 44:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen CAL01, CAL02, CAL03 und CAL04 im Bereich „Calpenzmoor“.	84
Tabelle 45:	Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Calpenzmoor“.	85
Tabelle 46:	Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Calpenzmoor“.	85
Tabelle 47:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen CAL01 und CAL02 im Teilbereich „Calpenzmoor“.	86
Tabelle 48:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Calpenzmoor“.	86
Tabelle 49:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Pastlingsee und -moor“.	88
Tabelle 50:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrung PAS01 im Bereich „Pastlingsee und -moor“.	88
Tabelle 51:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in der Bohrung PAS01 im Bereich „Pastlingsee und -moor“.	88



Tabelle 52:	Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Pastlingsee und -moor“.	90
Tabelle 53:	Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Pastlingsee und -moor“.	90
Tabelle 54:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrung PAS01 im Bereich „Pastlingsee und -moor“.	90
Tabelle 55:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Pastlingsee und -moor“.	90
Tabelle 56:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich der Grabkoer Seewiesen.	92
Tabelle 57:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.	93
Tabelle 58:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen GSW01, GSW02, GSW03 und GSW04 im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.	93
Tabelle 59:	Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.	97
Tabelle 60:	Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.	97
Tabelle 61:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen GSW01 bis GSW04 im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.	97
Tabelle 62:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.	98
Tabelle 63:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	100
Tabelle 64:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	100
Tabelle 65:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen NEI01, NEI02, NEI03 und NEI04 im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	101
Tabelle 66:	Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	104
Tabelle 67:	Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	104
Tabelle 68:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen GSW01 bis GSW04 im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	105
Tabelle 69:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	105
Tabelle 70:	Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Jänschwalder Laßzinswiesen“.	108
Tabelle 71:	Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Jänschwalder Laßzinswiesen“.	108
Tabelle 72:	Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen NEI01, NEI02, NEI03 und NEI04 im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.	108
Tabelle 73:	Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen aus 2020 im Bereich der Jänschwalder Laßzinswiesen.	112
Tabelle 74:	Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich der Jänschwalder Laßzinswiesen.	112



Tabelle 75:	Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen PEI01 bis PEI04 im Bereich „Laßzinswiesen“.....	112
Tabelle 76:	Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Laßzinswiesen“.....	113
Tabelle 77:	Kategorisierung der Kennwerte Grundwasserbeschaffenheit.....	115
Tabelle 78:	Kategorisierung des Versauerungspotentials des Grundwassers.....	115
Tabelle 79:	Hintergrundwerte für ausgewählte Kennwerte in der hydrogeochemischen Einheit Berlin-Brandenburger Jungpleistozän nach HÜK200 HGW [BGR & SGD 2014], Werte auf zwei signifikante Stellen gerundet.....	115
Tabelle 80:	Vergleich der aktuellen mit der prognostischen Sulfatkonzentration im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.....	116
Tabelle 81:	Vergleich der aktuellen mit der prognostischen Eisenkonzentration im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.....	118
Tabelle 82:	Vergleich des aktuellen mit dem prognostischen Neutralisationspotenzial (Säurekapazität KS4, 3ox) im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.....	120
Tabelle 83:	Vergleich der aktuellen mit der prognostischen Ammoniumstickstoffkonzentration im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.....	122



Abkürzungsverzeichnis

DIN	Deutsche Industrienorm
ETr	reale Verdunstung
FFH	Fauna-Flora-Habitate
FiUK	Filterunterkante
FiOK	Filteroberkante
G ^{***}	Grundwasserleiter mit nachfolgender Nummer
GM	Grundmoräne
GW	Grundwasser
GWK	Grundwasserkörper
GWL	Grundwasserleiter (im Text)
GWM	Grundwassermessstelle
GWRA	Grubenwasserreinigungsanlage
HGM JaWa	Hydrogeologisches Großraummodell Jänschwalde
IBGW	Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH Leipzig
IWB	Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden
KAK _{eff}	effektive Kationenaustaschkapazität
KW	Kalenderwoche
LE-B	Lausitz Energie Bergbau AG
LfU	Landesamt für Umwelt Brandenburg
MQ	Mittlerer Durchfluss
m u GOK	Meter unter Geländeoberkante
M%	Masseprozent, Gewichtsprozent
OWK	Oberflächenwasserkörper
ROK	Rohroberkante
TR	Trockenrückstand
WE	Wassereinleitstelle
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WVA	Wasserversorgungsanlage



Zusammenfassung

- (1) Als Voraussetzung für die zu führenden berg- und wasserrechtlichen Verfahren zum Tagebau Jänschwalde werden Prognosen zur Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit im Zusammenhang mit dem Grundwasserwiederanstieg im Umfeld des Tagebaues Jänschwalde gefordert.
- (2) Die Grundwasserabsenkung infolge der Sumpfung des Tagebaus Jänschwalde reicht weit über das Abbaufeld hinaus. Dadurch werden unverritzte Sedimente in der Kontur des Grundwasserabsenkungstrichters belüftet und, insofern Pyrit in den Sedimenten enthalten ist, der Pyritverwitterung ausgesetzt. Je nach geochemischer Konstellation der Sedimente wird durch die Pyritverwitterung und ihre Begleitreaktionen die Grundwasserbeschaffenheit verändert.
- (3) Im Norden des Tagebaus Jänschwalde erfasst der Grundwasserabsenkungstrichter grundwasserabhängige Landökosysteme, Gewässer und wassergebunden Schutzgebiete. Aufgabe der vorliegenden Untersuchungen war es, standortkonkret die Grundwasserbeschaffenheit beim Grundwasserwiederanstieg zu prognostizieren und daraus ableitend die Gefahren für den Zustand der Gewässer und Schutzgebiete vornehmlich hinsichtlich der Versauerung und Verockerung zu bewerten.
- (4) Für die Prognose der Grundwasserbeschaffenheit in den Grundwasserabsenkungs- und -wiederanstiegsgebieten war bislang keine Methodik verfügbar. Die deshalb neu entwickelte Methodik bilanziert in erkundeten Bohrprofilen bis zur tiefsten Absenkung die bereits vorhandene und die noch zu erwartende Sulfatfreisetzung durch Pyritverwitterung. Durch ein sogenanntes hydrogeochemisches Genesemodell werden unter Verwendung standortkonkreter hydrochemischer (aktuelle Grundwasserbeschaffenheit) und geochemischer Daten (Kalkgehalt und Kationenaustauschkapazität im Bohrprofil) für den aus der Sulfatkonzentration abgeleiteten Fortschritt der Pyritverwitterung mittels hydrogeochemischer Modellierung nichtkonservative hydrochemische Kennwerte, wie die Eisenkonzentration und die Versauerungsdisposition, berechnet. Die Aussagen zur Grundwasserbeschaffenheit gelten des oberen, von der Grundwasserabsenkung und vom Grundwasserwiederanstieg betroffenen Grundwasserleiters bei Abschluss des Grundwasserwiederanstiegs als Profilmittel.
- (5) Zur Gewinnung der erforderlichen Eingangsdaten für die Prognose wurden Erkundungsbohrungen geteuft und in den Bereichen der bereits vorhandenen Absenkungslamelle und der noch zu erwartenden Grundwasserabsenkung gekernt und geochemisch untersucht. Die Untersuchungen erfassten den eluierbaren Sulfatgehalt, den Pyritgehalt, den Calcitgehalt und die Kationenaustauschkapazität. Des Weiteren wurden am gleichen Standort entweder in der zur Grundwassermessstelle ausgebauten Erkundungsbohrung oder in einer Grundwassermessstelle in unmittelbarer Nachbarschaft die Grundwasserbeschaffenheit erfasst. Die Prognosen erfolgen standortbezogen für die Erkundungsbohrungen.



- (6) Die Untersuchungen im Umfeld des Tagebaues Jänschwalde erstreckten sich auf acht Teilgebiete: 1) die Krayner Teiche und das Speicherbecken Krayne, 2) den Kleinsee und Großsee, 3) das Schwarze Fließ (Feuchtwiesen Atterwasch), 4) das Calpenzmoor, 5) den Pastlingsee und das Pastlingmoor, 6) die Grabkoer Seewiesen, 7) die Moaske und den Auenbereich Eilenzfließ sowie 8) die Jänschwalder Laßzinswiesen.
- (7) Der Untersuchungsraum ist von tiefen in das Tertiär eingeschnittenen pleistozänen Rinnen geprägt, in denen gut durchlässige Grundwasserleiter überwiegen. Interglaziale Sedimente und holozäne Bildungen haben nur lokale Bedeutung. Die Sanderschüttungen (G124) und fluviatilen Mittel- bis Grobsande (G130) der Weichsel-Kaltzeit sind oberflächennah ausgebildet. Die Nachschüttbildungen des Baruther Urstromtals (G122) liegen teilweise neben dem G124 vor. Die Sedimente des Saale-Komplexes dominieren die quartären Ablagerungen. Es sind drei Stadiale mit Sanden aus Vorschüttbildungen, Geschiebemergeln, Schluffen und Sanden aus Nachschüttbildungen in vergleichbaren Abfolgen ausgebildet, wobei die Mächtigkeit zu den jüngeren Bildungen hin abnimmt. Die Nachschüttbildungen der Saale-I-Kaltzeit bilden den Grundwasserleiter G150. Die Rinnenfüllungen sind von elsterkaltzeitlichen Sedimenten (G180) geprägt.
- (8) Die Untersuchungen umfassten 24 geochemische Erkundungsbohrungen mit 317 laufende Meter Bohrkerne, aus denen 262 Proben für die geochemischen Untersuchungen entnommen wurden. Von den Erkundungsbohrungen wurden drei Bohrungen zu neuen Grundwassermessstellen ausgebaut. Des Weiteren wurden vierzehn Grundwasserproben aus Bestandsmessstellen sowie vier aus den jährlichen Monitorings der LE-B in die Untersuchungen einbezogen.
- (9) Durch die bereits vorhandene Grundwasserabsenkung im nördlichen Umfeld des Tagebaus Jänschwalde liegt die prognostizierte Veränderung der künftigen Grundwasserbeschaffenheit durch die Pyritverwitterung in der bestehenden Absenkungslamelle bereits überwiegend vor. Durch die weiter zu erwartende Absenkung des Grundwasserspiegels werden zusätzliche Bereiche von der Pyritverwitterung erfasst. Die Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit in den Wiederanstiegsgebieten des Braunkohlenbergbaus im nördlichen Umfeld des Tagebaus Jänschwalde betreffen hauptsächlich die Sulfatkonzentration, die Eisenkonzentration, die Versauerungsdisposition und die Ammoniumkonzentration.
- (10) Bei eher geringen Beträgen der vorhandenen und der künftigen Grundwasserabsenkung prägen die Geochemie der Sedimente und die Mächtigkeit des Grundwasserleiters dominant die örtliche Belastung. In nahezu allen Erkundungsprofilen wird ein Anstieg der **Sulfatkonzentration** im Grundwasser prognostiziert. Tendenziell fallen die Sulfatkonzentrationen an den tagebau-nahen Standorten höher aus, weil die bereits vorhandene Grundwasserabsenkung und die zu erwartende Grundwasserabsenkung betragsmäßig am größten sind. In tagebaufernen Bereichen ist die Entwicklung uneinheitlich.



- (11) In etwa der Hälfte der betrachteten Fälle (Bohrstandorte) ist der Anstieg der Sulfatkonzentration moderat. In der anderen Hälfte der betrachteten Fälle wird der Schwellenwert für die Sulfatkonzentration nach Grundwasserverordnung Anlage 2 (250 mg/L) überschritten. Die Überschreitungen liegen meist zwischen 250 und 600 mg/L. In drei von 24 Fällen werden jedoch höhere Sulfatkonzentrationen zwischen 600 und 800 mg/L prognostiziert.
- (12) Im Zuge der Pyritverwitterung wird neben Sulfat auch Eisen freigesetzt. Die **Eisenkonzentration** im Grundwasser ist jedoch gegenüber der Sulfatkonzentration beim Vergleich zur Pyritstöchiometrie deutlich niedriger. Das Eisen kommt im anoxischen Grundwasser als Spezies ausschließlich in zweiwertiger und echt gelöster Form vor. Deshalb wird im Grundwasser nur von Eisen gesprochen. Die Mobilität des Eisens ist im Grundwasser im Vergleich zum Sulfat stark verringert. In gepufferten (kalkhaltigen) geologischen Substraten wird Eisen hochgradig als Eisenkarbonat (Siderit) und am Kationenaustauscher festgehalten.
- (13) Die Prognose ergibt in vielen Fällen eine leichte Erhöhung der Eisenkonzentration bis etwa 6 mg/L Eisen. Die Erhöhung der Eisenkonzentration beträgt in zwei Drittel der Fälle gegenüber dem Ausgangszustand weniger als 1 mg/L. In fünf von 24 Fällen werden hohe Eisenkonzentrationen von 10 mg/L bis über 30 mg/L prognostiziert. In einem Fall wird jedoch auch eine drastische Verringerung der Eisenkonzentration von aktuell 125 auf etwa 4 mg/L nach dem Grundwasserwiederanstieg prognostiziert. Der derzeit stark abgesenkte Grundwasserspiegel liegt hier in den karbonatfreien Horizonten des G130, weshalb das Grundwasser derzeit sogar schwach versauerungsdisponiert ist. Der Grundwasserwiederanstieg wird jedoch den karbonatreichen G122 überstreichen, der das Eisen hochgradig zurückhält. Die prognostizierten Eisenkonzentrationen im Grundwasser nach dem Grundwasserwiederanstieg bilden kein räumliches Muster.
- (14) Eine erhöhte Eisenkonzentration von 25 mg/L wurde für eine Bohrstelle in der Neißeaue unmittelbar neben der Dichtwand erfasst. In der zugehörigen Grundwassermessstelle ist die Eisenkonzentration bereits im abgesenkten Zustand erhöht.
- (15) Für eine Bohrstelle am nördlichen Rand der Laßzinswiesen wurde eine erhöhte Eisenkonzentration von 33 mg/L prognostiziert. Von den untersuchten Bohrstellen an der östlichen und nördlichen Tangente der Laßzinswiesen liegt diese Stellen am weitesten von der Tagbaukante entfernt. Auch der Absenkungs- und Wiederanstiegsbetrag sind hier am geringsten. Die Ursachen sind die Grundwasserabsenkung und der Grundwasserwiederanstieg in den kalkarmen Substraten des G122.
- (16) Eine erhöhte Eisenkonzentration von 25 mg/L wird auch für eine Bohrstelle im Bereich der Grabkower Seewiesen prognostiziert. Hier werden aufgrund der Tagebaunähe sowohl für die Grundwasserabsenkung als auch für den Grundwasserwiederanstieg große Amplituden erwartet. Außerdem erfolgt der Grundwasserwiederanstieg überwiegend in versauerungsdisponierten Sedimenten des G130.



- (17) Erhöhte Eisenkonzentrationen von 12 bzw. 21 mg/L werden weiterhin in zwei Bohrstellen in der Nähe des Kleinsees prognostiziert. Hier erfolgt der Grundwasserwiederanstieg in karbonatarmen Substraten des G122 mit einem schwachen Kationenaustauscher.
- (18) Eine wesentliche hydrochemische Größe, die die Wirkung der Pyritverwitterung auf die Grundwasserbeschaffenheit beschreibt, ist die **Versauerungsdisposition**. Die Versauerungsdisposition pH_{ox} ist der pH-Wert, der sich im Falle einer Belüftung des typischerweise anoxischen Grundwassers nach vollständiger Oxidation des zweiwertigen Eisens einstellt. Die dazugehörige extensive Größe ist das Neutralisationspotenzial $K_{\text{S}_{4,3}}^{\text{ox}}$ bzw. das Versauerungspotenzial $K_{\text{B}_{4,3}}^{\text{ox}}$.
- (19) Das mit einem Neutralisationspotenzial $K_{\text{S}_{4,3}}^{\text{ox}}$ zwischen 1,5 und 2,5 mmol/L natürlicherweise moderat gepufferte Grundwasser in den pleistozänen Grundwasserleitern im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde erfährt beim Grundwasserwiederanstieg unterschiedliche Veränderungen. In karbonatreichen Horizonten erhöht sich durch die Karbonatverwitterung das Neutralisationspotenzial $K_{\text{S}_{4,3}}^{\text{ox}}$ bis auf Werte um 5 mmol/L. In karbonatarmen Horizonten wird die Säurekapazität des Grundwassers gezehrt. In Einzelfällen verbleiben mit $K_{\text{S}_{4,3}}^{\text{ox}} = 0,2 \dots 0,6$ mmol/L sehr niedrige Werte. Lediglich in einem Fall ist nachbergbaulich mit einer Versauerungsdisposition zu rechnen, die von einem Versauerungspotenzial von $K_{\text{B}_{4,3}}^{\text{ox}} = 0,6$ mmol/L begleitet wird.
- (20) Ein räumliches Muster für das Neutralisations- bzw. Versauerungspotenzial im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg ist nicht ableitbar. Das Neutralisations- bzw. Versauerungspotenzial des Grundwassers wird dominant von den geochemischen Standortbedingungen geprägt.
- (21) Die Entwicklung des Neutralisationspotentials im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg verhält sich ambivalent. An einem reichlichen Drittel der Standortprofile ist mit einem Versauerungsschub zu rechnen, der nur in einem Fall zur Versauerungsdisposition des Grundwassers führt, These (19). An knapp zwei Drittel der Standorte ist mit einem Zuwachs des Neutralisationspotentials durch Karbonatpufferung zu rechnen.
- (22) Die **gewässerökologische Relevanz** der untersuchten hydrochemischen Kennwerte besteht in der Reihenfolge Versauerungsdisposition, Eisenbelastung, Sulfatbelastung und Ammoniumbelastung.
- (23) Aufgrund verbreitet karbonathaltiger Substrate in den oberflächennahen, von der Grundwasserabsenkung und vom Grundwasserwiederanstieg erfassten pleistozänen Horizonten sind die meisten Grundwässer nach den Grundwasserwiederanstieg gut gepuffert, These (19). Eine Versauerungsdisposition stellt lediglich eine lokale Ausnahme dar, These (19). Damit ist die wichtigste hydrochemische Voraussetzung für die Formierung einer gewässerökologisch verträglichen Wasserbeschaffenheit in den mit dem Grundwasser wechselwirkenden Fließgewässern, Standgewässern und grundwasserabhängigen Landökosystemen im nördlichen Umfeld des Tagebaus Jänschwalde gegeben.



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Lausitzer Energie Bergbau AG (kurz. LE-B) betreibt den Braunkohlentagebau Jänschwalde nordöstlich von Cottbus. Als Voraussetzung für die zu führenden berg- und wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren sind Aussagen zur Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit im Zusammenhang mit der Grundwasserabsenkung und dem Grundwasserwiederanstieg im Umfeld des Tagebaues notwendig. Konkret betrifft das folgende Verfahren:

- 1) den Hauptbetriebsplan für die Weiterführung des Tagebaues bis 2023,
- 2) den Abschlussbetriebsplan für die Wiedernutzbarmachung und Herstellung der Bergbaufolgelandschaft ab 2024,
- 3) den Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis 2023-2044 für die Sumpfung und Einleitung bis zum Abschluss der Restseeflutung und
- 4) die Planfeststellungsverfahren zur Herstellung der Bergbaufolgeseeen.

Zur Gewährleistung der geotechnischen Sicherheit der Tagebauböschungen wird entsprechend bodenmechanischer Vorgaben das Grundwasser abgesenkt. Die Sumpfung erfolgt mittels Filterbrunnen. Nach Beendigung der Rohkohleförderung voraussichtlich im Jahr 2023 werden im Jahr 2024 noch 116 Mio. m³ Wasser aus ca. 980 Filterbrunnen gehoben. In den Folgejahren nehmen die Wasserhebung und die Anzahl der betriebenen Filterbrunnen sukzessive ab. Der notwendige Betrieb der Filterbrunnen zur Gewährleistung der geotechnischen Sicherheit hängt von der Entwicklung der Flutung der Bergbaufolgeseeen ab. Die Ableitung des gehobenen Sumpfungswassers aus den Rand- und Feldriegeln erfolgt über Ableitungssysteme zur GWRA Jänschwalde und zur GWRA Briesnig.

Mit der Weiterführung des Tagebaues Jänschwalde bis zum Jahr 2023 und der anschließenden Wiedernutzbarmachung wird es im Umfeld des Tagebaues zu einer weiteren Grundwasserabsenkung kommen. Diese findet in bereits abgesenkten Bereichen sowie weiter nördlich in bergbaulich noch weitgehend unbeeinflussten Gebieten statt. Zur Begrenzung des Grundwasserabsenkungsbereiches nach Osten wurde in den Jahren 1979 bis 2000 sowie 2007 bis 2009 entlang der Ostmarkscheide des Tagebaus Jänschwalde eine 52 bis 84 Meter tiefe und rund 11 km lange Dichtwand (DW) errichtet. Mit der Verringerung der Sumpfung und mit dem Beginn der Flutung der Restseen wird Mitte der 2030er Jahre eine Trendumkehr erwartet, in deren Folge das bergbaulich verursachte Wasserdefizit wieder aufgefüllt wird.

Mit der Belüftung bei der Grundwasserabsenkung des Deckgebirges finden in den Grundwasserleitern aerobe Verwitterungsprozesse (Pyritverwitterung) statt. Im Zuge des späteren Grundwasserwiederanstiegs werden die Verwitterungsprodukte vom Grundwasser gelöst. Mit der Grundwasserströmung sind eine Mobilisierung von Stofffrachten im Grundwasser und ggf. ein Austrag in verbundene Oberflächengewässer und grundwasserabhängige Landökosysteme zu erwarten.



Die Absenkung und der Wiederanstieg des Grundwassers haben Einfluss auf das Wasserdargebot und ggf. auch auf die Wasserbeschaffenheit der im Nordraum befindlichen Oberflächengewässer sowie die dazugehörigen grundwasserabhängigen Landschaftsteile. Innerhalb der Zone der bergbaulichen Grundwasserbeeinflussung befinden sich neben den nach WRRL zu bewertenden Oberflächenwasserkörpern (OWK) und Grundwasserkörpern (GWK) mehrere Natura-2000-Gebiete. Die Auswirkungen der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und des folgenden Grundwasserwiederanstiegs sind für diese Gebiete zu beurteilen. Dafür sind entsprechende Verträglichkeitsuntersuchungen durchzuführen, die bezüglich des Wirkpfades der Wasserbeschaffenheit auf Prognosen im Grundwasser und in den Oberflächengewässern beruhen.

Für folgende grundwasserabhängige Bereiche sind Aussagen zur Beschaffenheit des anströmenden Grundwassers notwendig:

- 1) Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne,
- 2) Kleinsee und Großsee,
- 3) Schwarzes Fließ (Feuchtwiesen Atterwasch),
- 4) Calpenzmoor,
- 5) Pastlingsee und -moor,
- 6) Grabkoer Seewiesen,
- 7) Moaske und Auenbereich Eilenzfließ sowie
- 8) Jänschwalder Laßzinswiesen.

Vom IWB Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann wurde im Jahr 2019 auf der Basis des laufenden Grundwassermonitorings eine Kurzeinschätzung zur Beschaffenheit des Grund- und Kippenwassers und zur voraussichtlichen Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den geplanten Restseen erstellt [IBW 2019]. Die Bearbeitung war auf die Restseen fokussiert.

Zur Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse, ihrer Entwicklung und zur Prognose des Grundwasserwiederanstiegs nach Beendigung des aktiven Tagebaubetriebs wurde von der IBGW Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH Leipzig das Hydrogeologische Großraummodell Jänschwalde (kurz: HGMJaWa) aufgebaut [IBGW 2019]. Für die laufenden Anforderungen der Planungen zur Grundwasserabsenkung und zum Grundwasserwiederanstieg, zur bodenmechanischen Standsicherheit und zum Wasserbau wird das HGMJaWa regelmäßig fortgeschrieben, aktualisiert und qualifiziert. Die Prognosen erfolgen bis zum Erreichen stationärer Grundwasserströmungsverhältnisse nach Beendigung der bergbaulichen Sümpfung. Formal wurde der Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2100 gewählt, da er lange genug nach dem tatsächlichen Erreichen stationärer Grundwasserverhältnisse liegt. Der Prognose liegt das Bodenwasserhaushaltsmodell zur Ermittlung der Grundwasserneubildung auf Basis der Klimanormalperiode von 1981 bis 2010 zugrunde. Für die Fließgewässer wurden mittlere Abflussverhältnisse verwendet.

Auf der Grundlage der Prognosen des HGMJaWa [IBGW 2019], vorliegender Daten und weiterführender Erkundungsarbeiten zur Geochemie der vom Tagebau beeinflussten Grundwasserleiter und zur Beschaffenheit des Grundwassers sollen folgende Fragen beantwortet werden:



- (1) Welche Bereiche im hydrologischen Wirkungsbereich außerhalb des Tagebaus neigen zur Versauerung?
- (2) Wie hoch sind die möglichen Konzentrationen von Sulfat, Eisen und Ammonium im Grundwasser unter Beachtung der Grundwasserabsenkung und der Belüftungsdauer?
- (3) Mit welchen Stofffrachten und Konzentrationen ist im flurnahen Grundwasser nach Abschluss des Grundwasserwiederanstieges zu rechnen?
- (4) Welche Maßnahmen zum Schutz der grundwasserabhängigen Schutzgüter sind nach dem Stand der Technik realisierbar?

Das Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann wurde mit der Bestellung E65-4504223900 vom 11.09.2020 mit der vorstehenden Aufgabe beauftragt.



2 Genese der Grundwasserbeschaffenheit unter Bergbaueinfluss

2.1 Grundlagen

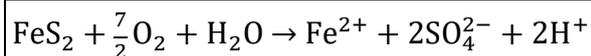
2.1.1 Pyritverwitterung und Pufferung

Der Betrieb eines Braunkohlentagebaus ist durch die vorlaufende Entwässerung, den Aufschluss an der Abbauböschung, den Transport und die Verkipfung des Deckgebirges sowie durch die nachfolgende Liegezeit der verkippten Massen unabwendbar mit einer Belüftung der Deckgebirgssedimente verbunden. Da insbesondere das tertiäre Deckgebirge natürlicherweise Pyrit enthält, führt die Belüftung der Sedimente zur Pyritverwitterung. Die Pyritverwitterung in den Kippen der Braunkohlentagebaue der LE-B im Lausitzer Revier wurde in der jüngeren Vergangenheit bereits umfänglich untersucht.

Die Grundwasserabsenkung eines Braunkohlentagebaus, hier des Tagebaus Jänschwalde, reicht stellenweise weit über das unmittelbare Abbaufeld hinaus. Dadurch werden unverritzte Sedimente in der Kontur des Grundwasserabsenkungstrichters belüftet. Auch pleistozäne Sedimente, insbesondere fluviatile Sedimente in den glazialen Rinnen, die die Braunkohlenlagerstätten häufig begrenzen, enthalten gelegentlich Pyrit. In der belüfteten Lamelle des Grundwasserabsenkungstrichters kann dieser Pyrit ebenfalls verwittern.

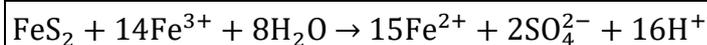
Im ersten Schritt führt die Pyritverwitterung zu einer Freisetzung von Eisen, Sulfat und Säuren (Gleichung 1).

Gleichung 1: Bruttogleichung der Pyritverwitterung mit anoxischem Finale (bei Sauerstofflimitierung) im Untergrund.



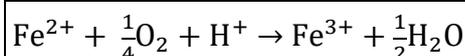
Im chemischen Mikromilieu der Sedimente wirkt nicht der gasförmige Sauerstoff als Oxidationsmittel für die Pyritverwitterung, sondern das gelöste dreiwertige Eisen, [Evangelou 1996]. Die Gleichung 2 beschreibt diesen Prozess.

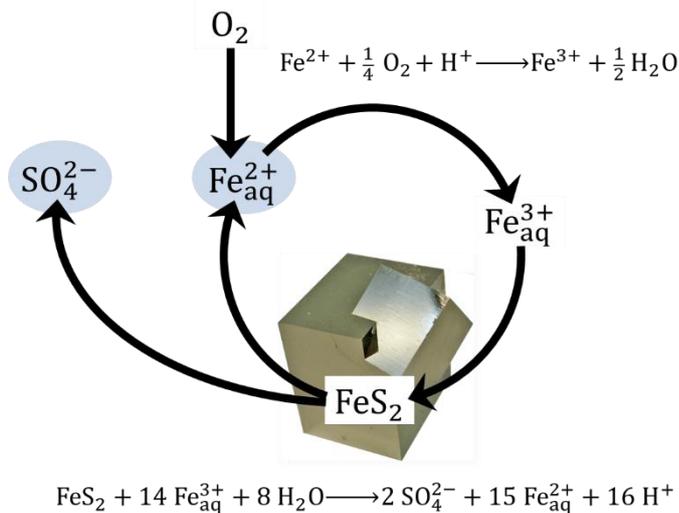
Gleichung 2: Pyritverwitterung durch dreiwertiges Eisen als Oxidationsmittel.



Solange Sauerstoff zur Verfügung steht, wird durch die Oxidation des zweiwertigen Eisens mit Sauerstoff das dreiwertige Eisen als Oxidationsmittel für die Pyritverwitterung permanent erneuert (Gleichung 3 und Bild 1). Diese Reaktion stellt die Verbindung zwischen der Sauerstoffdiffusion in den Untergrund und der Pyritverwitterung her.

Gleichung 3: Regeneration des Oxidationsmittels Eisen(III) für die Pyritverwitterung durch Oxidation des zweiwertigen Eisens mit Sauerstoff.



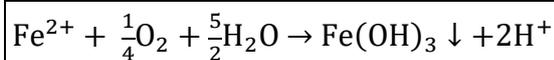
**Bild 1: Zyklischer Prozess des Eisens bei der Pyritverwitterung.**

Bei Unterbrechung der Sauerstoffzufuhr, z. B. durch Luftabschluss beim Grundwasserwiederanstieg, kommen zunächst die Eisenoxidation nach Gleichung 3 und schließlich die Pyritverwitterung nach Gleichung 2 zum Erliegen.

Die Pyritverwitterung in den Sedimenten ist diffusionslimitiert. Das heißt, der Umfang des verwitterten Pyrits und die Tiefenwirkung der Pyritverwitterung hängen neben dem Pyritgehalt maßgeblich von der Sauerstoffdiffusion ab. Diese ist ihrerseits vom Luftporenanteil und vom Diffusionsweg (Grundwasserflurabstand) abhängig.

In karbonatfreien Substraten entsteht in der Folge der Pyritverwitterung ein versauerungsdisponiertes Grundwasser. Da in den Grundwasserleitern überwiegend ein anoxisches Milieu herrscht, liegt die Säure bei moderaten pH-Werten ($5 < \text{pH} < 6$) im Wesentlichen als mobiles zweiwertiges Eisen vor. Die Eisenkonzentration erreicht in versauerungsdisponierten Kippenwässern mitunter mehrere Hundert Milligramm pro Liter. Die im zweiwertigen Eisen gebundene Säure wird erst beim Austritt des Grundwassers an die Oberfläche wirksam. Die stöchiometrische Gleichung 4 steht für die Effekte der Verockerung und Versauerung.

Gleichung 4: Oxidation des zweiwertigen Eisens mit den Effekten der Verockerung und Versauerung.



Als geochemische Begleiter sind im Pyrit Arsen als Schwefelsubstituent sowie Zink und Kobalt als Eisensubstituenten enthalten (Gleichung 5). Nickelsulfid ist ein häufiges Begleitmineral des Pyrits.

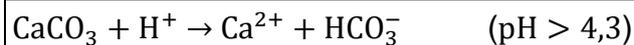
Gleichung 5: Theoretische chemische Zusammensetzung des Pyrits in den tertiären Stratigraphien des Lausitzer Braunkohlenreviers.



Bei der Pyritverwitterung werden die genannten Metalle (Co, Zn, Ni) und Halbmetalle (As) freigesetzt. Ihre Löslichkeit im Grundwasser ist vom geochemischen Milieu, insbesondere vom pH-Wert abhängig. Unter neutralen und schwach alkalischen Bedingungen ist die Löslichkeit gering. In sauren Wässern ist die Löslichkeit erhöht.

In karbonathaltigen Stratigraphien werden die Säuren aus der Pyritverwitterung gepuffert. Der geochemisch wirksamste natürliche Pufferprozess ist die Karbonatverwitterung (Gleichung 6).

Gleichung 6: Karbonatverwitterung als Pufferreaktion.



Die Karbonatverwitterung vermag die Pyritverwitterung in den belüfteten Sedimenten nicht zu verhindern, kompensiert aber sehr effektiv die Versauerung und mindert damit die Mobilität der Metalle.

Abweichend zur ursprünglichen Wasserbeschaffenheit im unverritzten Gebirge werden im Grundwasser unter dem Einfluss der Belüftung, der Pyritverwitterung und der Pufferung deutlich erhöhte Konzentrationen von Sulfat, Kohlensäure, der Härtebildner Calcium und Magnesium, von Eisen und ggf. weiteren pedogenen Metallen (Aluminium, Mangan), von den Spurenmetallen Arsen, Kobalt, Zink und Nickel sowie von Ammonium gemessen. Die Kohlensäure stammt aus der Karbonatverwitterung und vom aeroben Abbau organischer Substanz. Bei letzterem wird auch Ammonium freigesetzt. Die aufgezählten Stoffe können nach dem Grundwasserwiederanstieg in die Oberflächengewässer und in die grundwasserabhängigen Landökosysteme ausgetragen werden (Bild 2).

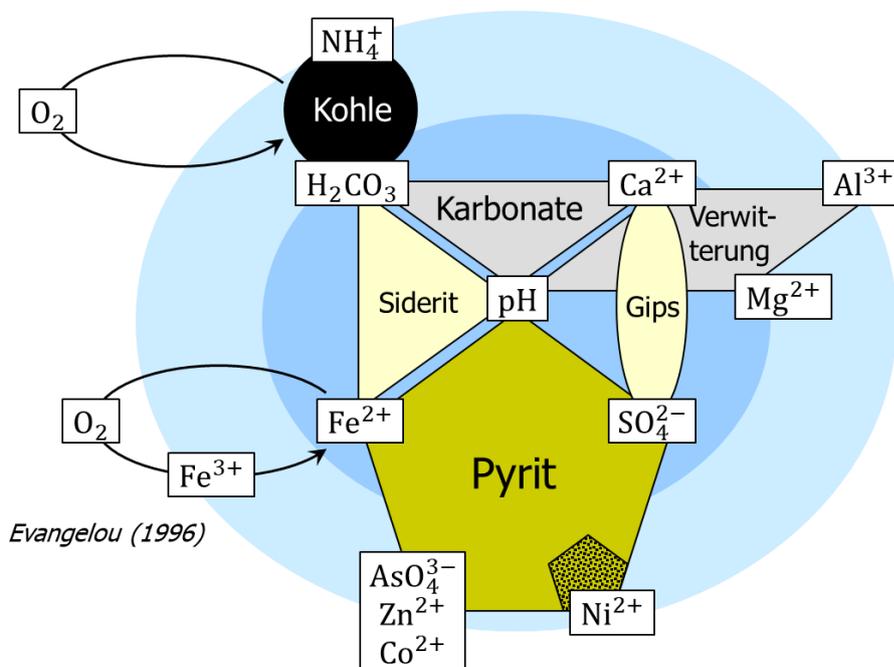


Bild 2: Stofffreisetzung und Bildung von Sekundärphasen bei der Pyritverwitterung.



Bei Überschreitung von Lösungsgleichgewichten können sich im Grundwasser neue Mineralphasen bilden. Bei entsprechend hohen Konzentrationen, die meist auf die Kippen beschränkt sind, können sich Gips und Siderit bilden (Bild 2). Die Kenntnis der neugebildeten Sekundärminerale hat Bedeutung für die Retardation beim Stofftransport im Grundwasser.

2.1.2 Versauerungsdisposition des Grundwassers

Ein anoxisches und in diesem Zustand meist nur schwach saures Grundwasser mit einer hohen Konzentration an zweiwertigem Eisen, das nach einer Belüftung stark versauert, wird als versauerungsdisponiert bezeichnet. Damit wird die Versauerungsneigung des Grundwassers beschrieben. Die quantitative (extensive) Größe der entstehenden Acidität nach vollständiger Oxidation des zweiwertigen Eisens ist das Versauerungspotential. Dessen Kenntnis ist zur Bemessung von Maßnahmen der Wasserbehandlung erforderlich. Zur Kennzeichnung der Versauerungsdisposition und des Versauerungspotentials werden folgende Kennwerte eingeführt:

pH_{ox} der pH-Wert eines Grundwassers nach vollständiger Oxidation des zweiwertigen Eisens, Hydrolyse des dreiwertigen Eisens und anteiligen Ausfällung desselben sowie unter Wirkung der Pufferung,

$K_{B4,3}^{ox}$ die Basenkapazität zum pH = 4,3 des oxidierten Wassers mit pH_{ox} und

$K_{B8,2}^{ox}$ die Basenkapazität zum pH = 8,2 des oxidierten Wassers mit pH_{ox} .

Für ein nicht versauerungsdisponiertes Grundwasser, d. h. mit $pH_{ox} > 4.3$, gilt die hydrochemische Konvention:

$$K_{S4,3}^{ox} \approx -K_{B4,3}^{ox}$$

Die Versauerungsdisposition und das Versauerungspotential eines anoxischen Grundwassers können sowohl laboranalytisch als auch rechnerisch ermittelt werden. Rechnerisch können die Versauerungsdisposition und das Versauerungspotential entweder durch vereinfachte bilanzierende Methoden, wie nach der Gleichung 7, oder durch hydrochemische Modellierung bestimmt werden.

Gleichung 7: Bilanzierung des Versauerungspotentials.

$$K_{B4,3}^{ox} \approx 2 \cdot [Fe^{2+}] - K_{S4,3}$$

$$K_{B8,2}^{ox} \approx 2 \cdot [Fe^{2+}] + 3 \cdot [Al^{3+}] - K_{S4,3}$$

Mit bilanzierenden Methoden können nur die extensiven Größen $K_{B4,3}^{ox}$ bzw. $K_{B8,2}^{ox}$ näherungsweise ermittelt werden, was für die meisten praktischen Belange ausreichend ist. Zur Versauerungsdisposition eines belüfteten Grundwassers können nach der Gleichung 7 lediglich folgende Aussagen getroffen werden (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Bewertung der Säure-Base-Reaktion auf der Grundlage des Versauerungspotentials.**

Acidität nach Gleichung 7	Erwartungsbereich des pH_{ox} -Wertes	Einschätzung
$K_{\text{B4,3}}^{\text{ox}} > 0$	$\text{pH}_{\text{ox}} < 4,3$	versauerungsdisponiert
$K_{\text{B4,3}}^{\text{ox}} < 0$	$\text{pH}_{\text{ox}} > 4,3$	nicht versauerungsdisponiert

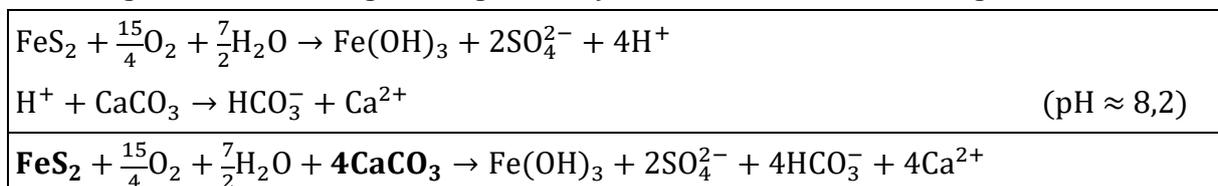
Mittels hydrochemischer Modellierung können sowohl die intensive Zustandsvariable pH_{ox} als auch die extensive Zustandsvariable $K_{\text{B4,3}}^{\text{ox}}$ (oder jede beliebige andere Basenkapazität) rechnerisch ausgewiesen werden. Da die hydrochemische Modellierung mit PHREEQC nach [Parkhurst & Appelo 1999] Stand der Technik ist, drängt sich die modellgestützte Ermittlung der Versauerungsdisposition und des Versauerungspotentials auf. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit erfolgt die Berechnung der Versauerungsdisposition und des Versauerungspotentials für standardisierte thermodynamische Bedingungen, wie in der Chemie allgemein üblich. Im konkreten Fall werden empfohlen und benutzt:

- Wassertemperatur: $T = +10 \text{ °C}$,
- O_2 -Partialdruck: $P_{\text{O}_2} = 210 \text{ mbar}$,
- CO_2 -Partialdruck: $P_{\text{CO}_2} = 0,4 \text{ mbar}$ und
- Gleichgewicht mit der Festphase Ferrihydrit ($\text{SI}=0$), wobei nur die Ausfällung zugelassen ist.

2.1.3 Bewertung der potenziellen Versauerungsdisposition

Sofern in den Sedimenten, die von der Grundwasserabsenkung erfasst werden, disulfidischer Schwefel, d. h. Pyritschwefel, enthalten ist, muss im Worst Case davon ausgegangen werden, dass dieser Pyrit vollständig verwittern kann. Hinsichtlich der Versauerungsdisposition ist entscheidend, wieviel Karbonat in den gleichen Sedimenten zur Pufferung zur Verfügung steht. Formalchemisch sind zur vollständigen Neutralisation ($\text{pH} \geq 7$) der bei der Pyritverwitterung gebildeten Säuren unter oxidischen Bedingungen 4 Mol Calcit pro Mol Pyrit erforderlich (Gleichung 8).

Gleichung 8: Reaktionsgleichungen der Pyrit- und Karbonatverwitterung.



Anhand des molaren Verhältnisses von Calcit zu Pyrit können die Sedimente hinsichtlich ihrer potentiellen Versauerungsdisposition im Worst Case bewertet werden (Tabelle 2). Gepuffert heißt, in jedem Fall gepuffert. Versauerungsdisponiert heißt dagegen nicht zwingend versauernd. In diesem Fall ist der tatsächlich zur Verwitterung gelangende Pyrit zu ermitteln. Das erfolgt anhand einer Sauerstoffbilanz.

**Tabelle 2: Bewertung der potentiellen Versauerungsdisposition.**

Molares Verhältnis von Calcit zu Pyrit	Potentielle Versauerungsdisposition
$\geq 4 : 1$	Gepuffert
2...4 : 1	Partiell gepuffert
$\leq 2 : 1$	Versauerungsdisponiert

Darüber hinaus wurde die Erfahrung gemacht, dass auch das in den geologischen Profilen analytisch nachgewiesene Karbonat nicht vollständig zur Pufferung zur Verfügung steht. Der größte Anteil des Karbonats ist häufig in bindigen Substraten (Geschiebemergel, limnische Schluffe) gebunden, die mit dem beweglichen Porenwasser nur bedingt wechselwirken. Deshalb war eine Weiterentwicklung der Bewertungsmethodik erforderlich.

2.2 Methodik

2.2.1 Konservative Berechnung der Pyritverwitterung und der Sulfatkonzentration im Grundwasser

Die Prognose der Sulfatkonzentration in den Grundwasserabsenkungs- und Grundwasserwiederanstiegsgebieten erfolgt statisch an den Erkundungsstandorten. Statisch bedeutet in diesem Fall, dass nur ein vertikaler Stoffaustausch, aber kein lateraler Stoffaustausch Berücksichtigung findet. Die Betrachtungen entsprechen denen in einer Bodenkatena.

Die Betrachtungen beschränken sich auf den/die oberen, von der Grundwasserabsenkungen betroffenen Grundwasserleiter bis zum ersten relevanten Grundwasserstauer (Bild 3). Für abgesenkte Grundwasserleiter unter einem Stauer kann davon ausgegangen werden, dass hier kein Sauerstoff eindringt, so dass sie von der Pyritverwitterung nicht erfasst werden.

Die finale Grundwasserbeschaffenheit an einem Erkundungsstandort ergibt sich aus (1) den zwischengespeicherten Verwitterungsprodukten in der bereits abgesenkten Lamelle, (2) der Stofffreisetzung durch die Pyritverwitterung in der noch erwarteten Absenkungslamelle und (3) der Grundwasserbeschaffenheit im gesättigten Bereich (Bild 3). Das Grundwasser mischt sich beim Grundwasserwiederanstieg gemäß den Modellannahmen über die gesamte grundwassererfüllte (gesättigte) Mächtigkeit. Die zwischengespeicherten Verwitterungsprodukte werden durch Eluatuntersuchungen bestimmt, die Stofffreisetzung durch Pyritverwitterung wird durch Modellrechnungen bestimmt und die Grundwasserbeschaffenheit am Standort wird durch das Monitoring erfasst.

Die Basis der Berechnungen bilden Daten der Bohrerkundung zur Petrographie und Geochemie der Grundwasserleitersedimente (Bild 4). Im Idealfall wurde die geochemische Erkundungsbohrung im gesättigten Bereich zu einer Grundwassermessstelle ausgebaut. Eine günstige Konstellation besteht weiterhin, wenn die geochemische Erkundungsbohrung neben einer bestehenden Grundwassermessstelle errichtet wird.

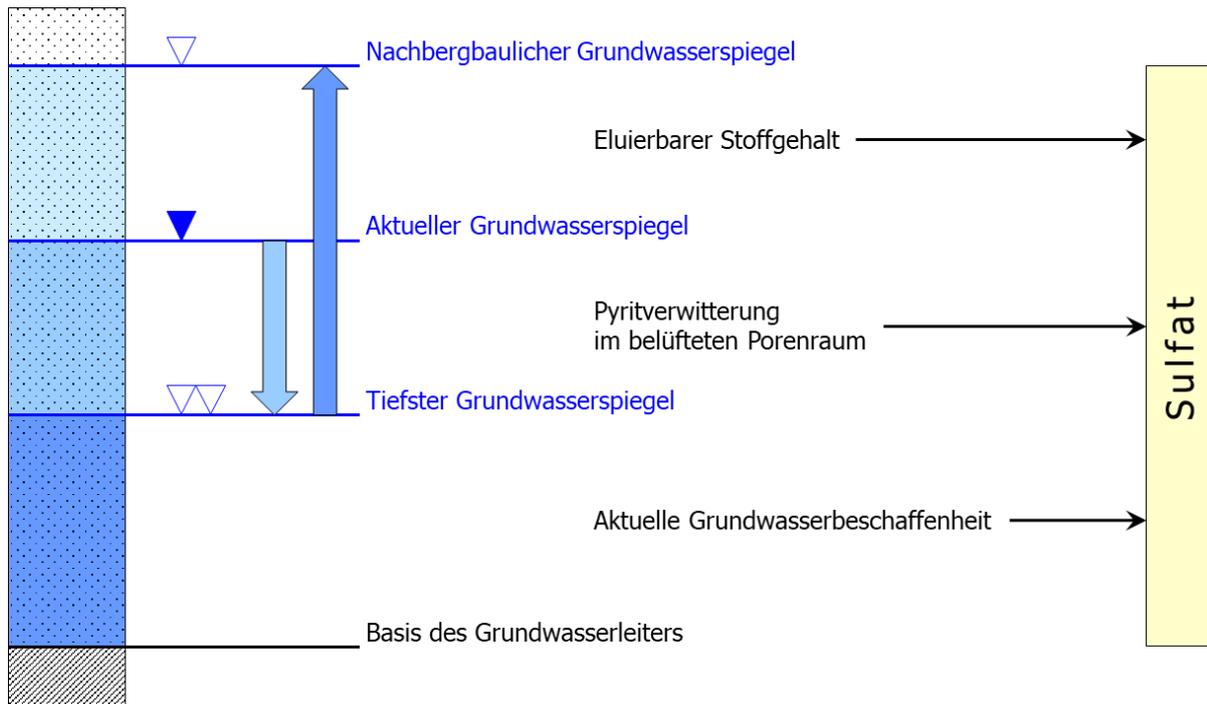


Bild 3: Methodik zur statischen (ortsbezogenen) konservativen Prognose der Sulfatkonzentration in Grundwasserabsenkungs- und Grundwasserwiederanstiegsgebieten.

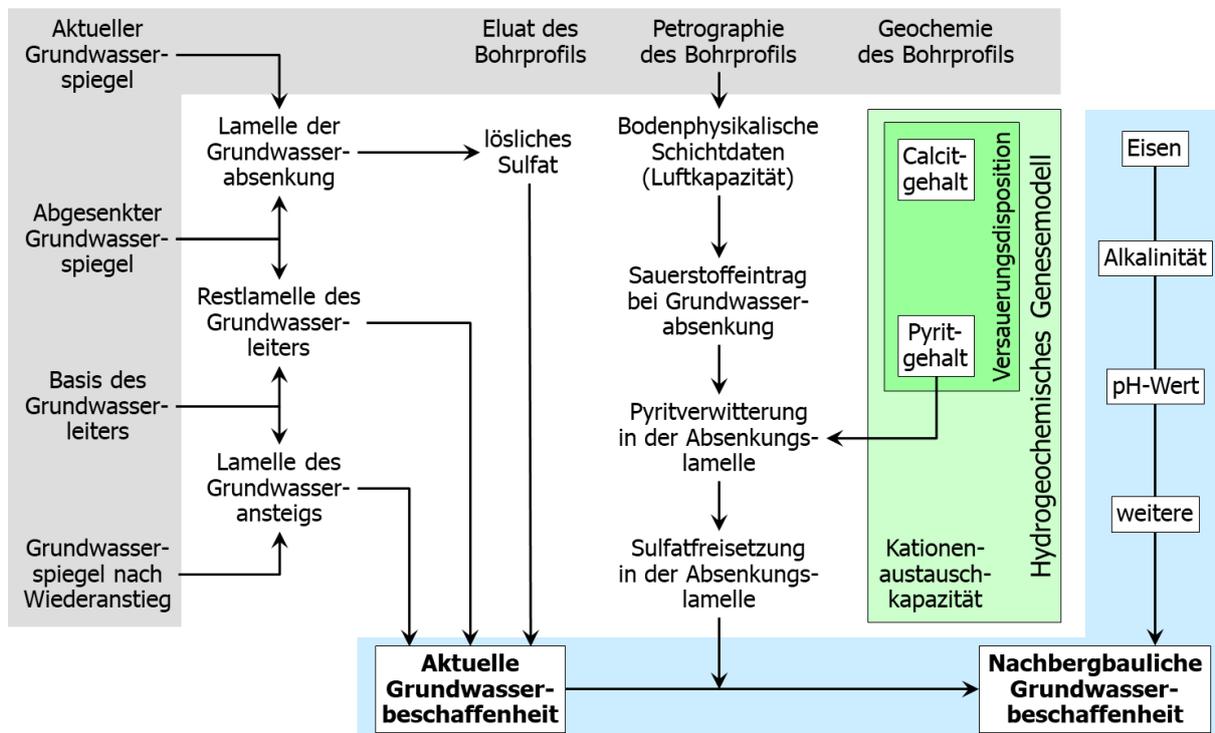


Bild 4: Methodik zur Prognose der Sulfatkonzentration in Grundwasserabsenkungs- und Grundwasserwiederanstiegsgebieten.



Die maßgeblichen Eingangsgrößen für die Berechnung sind die Luftkapazität, die in der Phase der Grundwasserabsenkung den konvektiven Sauerstoffeintrag in den Grundwasserleiter bestimmt, sowie der Gesamtporenanteil (Gleichung 9), der beim Wiederanstieg des Grundwassers das Phasenverhältnis zwischen dem Grundwasser und dem Mineralkörper des Grundwasserleiters bestimmt (Gleichung 10).

Gleichung 9: Berechnung des Gesamtporenanteils.

$$n_0 = 1 - \frac{\rho_{tr}}{\rho_0} \quad \text{mit} \quad \bar{\rho}_0 = \frac{\rho_{Min} \cdot \rho_{Org}}{\rho_{Min} \cdot GV + \rho_{Org} \cdot (1 - GV)}$$

- n_0 Gesamtporenanteil [-]
- GV Glühverlust des Trockenrückstandes [M% TR]
- ρ_{min} Reindichte der mineralischen Substanz [g/cm³]
- ρ_{Org} Reindichte der organischen Substanz [g/cm³]
- ρ_0 mittlere Reindichte des Feststoffs [g/cm³]
- ρ_{tr} Trockenrohddichte bzw. Lagerungsdichte [g/cm³]

Gleichung 10: Wasser-Boden-Verhältnis (WBV) bzw. des Boden-Wasser-Verhältnis (BWW).

$$WBV \left[\frac{L}{kg} \right] = \frac{V_W}{M_F} = \frac{n_0 \cdot S}{\rho_{tr}} \quad \text{bzw.} \quad BWW \left[\frac{kg}{L} \right] = \frac{1}{WBV \left[\frac{L}{L} \right]}$$

- WBV Wasser-Boden-Verhältnis [L/kg]
- V_W Volumen des Wassers [L]
- M_F Masse des Feststoffs [kg]
- n_0 Gesamtporenanteil [-]
- S relative Wassersättigung [-]
- ρ_{tr} Trockenrohddichte [g/cm³]

Unabhängig von der Petrographie der einzelnen Schichten wurden für die mittlere Reindichte $\rho_0 = 2,65 \text{ g/cm}^3$ und für die Trockenrohddichte $\rho_{tr} = 1,70 \text{ g/cm}^3$ angenommen. Daraus berechnen sich der Gesamtporenanteil zu 36 Vol.-% und das gesättigte Wasser-Boden-Verhältnis zu 0,211 L/kg (Tabelle 3).

Tabelle 3: Bodenphysikalische Eingangsdaten für die GWL.

Kennwert	Maßeinheit	GWL	Erläuterung
Reindichte	g/cm ³	2,65	Quarz, Feldspat
Trockenrohddichte	g/cm ³	1,70	Schätzwert
Gesamtporenanteil	-	0,36	Gleichung 9
Wasser-Boden-Verhältnis (bei Sättigung S = 1)	L/kg	0,211	Gleichung 10

Für die Luftkapazität der entwässerten Lamelle des Grundwasserleiters wurden tabellierte Daten aus [DBG 2008] übernommen (Tabelle 4). Für die geschätzte Trockenrohddichte der Sedimente in Höhe von 1,7 g/cm³ liegt die Luftkapazität zwischen etwa 3 Vol.-% für schluffige Tone und rund 30 Vol.-% für Grobsande bis Feinkiese.



Tabelle 4: Luftkapazität (Angaben in Vol.-%) in Abhängigkeit von der Bodenart und von der Trockenrohdichte des Bodens.

Bodenart	Kürzel	Trockenrohdichte in g/cm ³				Quelle
		1,3	1,5	1,7	1,8	
Feinkies, mittelkiesig	KF_KM	47	39	31	27	geschätzt
Feinkies	KF	46	38	30	26	geschätzt
Feinkies, grobsandig	KF_SG	45	37	29	25	geschätzt
Grobsand, feinkiesig	SG_KF	45	37	29	25	geschätzt
Grobsand	SG	44	36	28	24	[DBG 2008], Tab. 16b
Grobsand, mittelsandig	SG_SM	43	35	27	23	[DBG 2008], Tab. 16b
Mittelsand, grobsandig	SM_SG	43	34	26	22	[DBG 2008], Tab. 16b
Mittelsand	SM	42	33	25	20	[DBG 2008], Tab. 16b
Mittelsand, feinsandig	SM_SF	41	32	24	19	[DBG 2008], Tab. 16b
Feinsand, mittelsandig	SF_SM	38	28	20	15	[DBG 2008], Tab. 16b
Feinsand	SF	36	26	18	13	[DBG 2008], Tab. 16b
Feinsand, schluffig	SF_U	25	19	14	9	[DBG 2008], Tab. 4
Schluff, feinsandig	U_SF	20	14	9	5	[DBG 2008], Tab. 4
Schluff	U	17	11	6	2	[DBG 2008], Tab. 4
Schluff, tonig	U_T	19	12	6	1	[DBG 2008], Tab. 4
Ton, schluffig	T_U	11	7	3		[DBG 2008], Tab. 4
Ton	T	6	3	1		[DBG 2008], Tab. 4

Für den Sauerstoffeintrag in den abgesenkten Grundwasserleitern wird angenommen, dass der entwässerte Porenraum (= Luftkapazität) einmal mit der atmosphärischen Sauerstoffkonzentration von 0,265 kg O₂/m³ gefüllt wird. Respiratorische, d. h. sauerstoffzehrende Prozesse in der Bodenzone, die ggf. mit der Pyritoxidation um den eingetragenen Sauerstoff konkurrieren, werden im Sinne des Worst Case vernachlässigt.

Der auf 1 m³ des entwässerten GWL bezogene Sauerstoffgehalt errechnet sich gemäß Gleichung 11. Die Umrechnung der Volumenkonzentration des Sauerstoffs in eine molare Feststoffkonzentration erfolgt nach der Gleichung 12.

Gleichung 11: Volumenbezogener Sauerstoffgehalt des entwässerten GWL.

$$[O_2]_{GWL}^{Vol} = \frac{n_a \cdot f \cdot [O_2]_{atm}}{100}$$

[O₂]_{GWL}^{Vol} volumenbezogener Sauerstoffgehalt des GWL $\left[\frac{kg O_2}{m^3} \right]$
 [O₂]_{atm} Sauerstoffgehalt der atmosphärischen Luft bei 1 bar..... $\left[= \frac{0,265 kg O_2}{m^3} \right]$
 n_a Luftkapazität bzw. entwässerbarer Porenraum des GWL [Vol%]
 f..... Faktor für die Belüftung (Luftvolumen/Luftkapazität)..... [-]

Gleichung 12: Umrechnung des volumenbezogenen Sauerstoffgehaltes in eine molare Feststoffkonzentration.

$$[O_2]_{GWL}^{TR} = \frac{[O_2]_{GWL}^{Vol} \cdot 1000}{m_{O_2} \cdot \rho_{tr}}$$

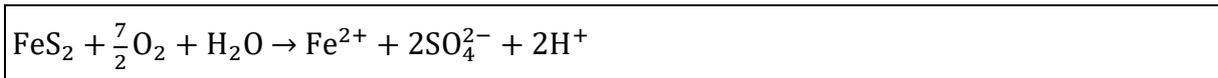
[O₂]_{GWL}^{TR} feststoffbezogener Sauerstoffgehalt des GWL $\left[\frac{mmol O_2}{kg TR} \right]$



$$\begin{aligned}
 [O_2]_{GWL}^{Vol} & \dots \text{volumenbezogener Sauerstoffgehalt des GWL} \dots \dots \dots \left[\frac{\text{kg } O_2}{m^3} \right] \\
 m_{O_2} & \dots \dots \dots \text{molare Masse des Sauerstoffs (O}_2\text{)} \dots \dots \dots \left[= \frac{31,998 \text{ g}}{\text{mol}} \right] \\
 \rho_{tr} & \dots \dots \dots \text{Trockenrohddichte} \dots \dots \dots \left[\text{g/cm}^3 \right]
 \end{aligned}$$

Der stöchiometrische Sauerstoffbedarf der Pyritoxidation beträgt 3,5 Mol Sauerstoff je Mol Pyrit bzw. 1,75 Mol Sauerstoff je Mol Pyritschwefel. Je Mol oxidiertem Pyrit (FeS₂) entstehen zwei Mol Sulfat (Gleichung 1).

Gleichung 13: Bruttogleichung der Pyritverwitterung mit anoxischem Finale (bei Sauerstofflimitierung) im Untergrund.



Aus dem löslichen Gehalt an Sulfatschwefel (Gleichung 15), dem feststoffbezogenen Sauerstoffgehalt des ggf. abgesenkten und dabei belüfteten Grundwasserleiters (Gleichung 11 und Gleichung 12), dem stöchiometrischen Sauerstoffbedarf der Pyritoxidation sowie dem Boden-Wasser-Verhältnis des nach dem Grundwasserwiederanstieg gesättigten Grundwasserleiters (Gleichung 10) wird die Sulfatkonzentration des Grundwassers nach der Gleichung 16 berechnet. Der Quotient aus dem Sauerstoffgehalt und dem Sauerstoffbedarf der Pyritoxidation kann dabei maximal den Wert des analytisch nachgewiesenen Gehaltes an Pyritschwefels (FeS₂-S) annehmen (Gleichung 14).

Gleichung 14: Berechnung des Ausgangsgehaltes an Pyritschwefel im Grundwasserleiter.

$$[FeS_2 - S]_{GWL}^{TR} = \frac{S_{dis} \cdot 10.000}{m_S}$$

$$\begin{aligned}
 [FeS_2 - S]_{GWL}^{TR} & \text{feststoffbezogener Pyritschwefel-Gehalt des GWL} \dots \dots \dots \left[\frac{\text{mmol FeS}_2 - S}{\text{kg TR}} \right] \\
 S_{dis} & \dots \dots \dots \text{Disulfid-/Sulfidschwefel-Gehalt (DIN 51 724 T2)} \dots \dots \dots [M\%] \\
 m_S & \dots \dots \dots \text{molare Masse des Schwefels} \dots \dots \dots \left[= \frac{32,06 \text{ g}}{\text{mol}} \right]
 \end{aligned}$$

Gleichung 15: Berechnung des Gehaltes an löslichem Sulfatschwefel im GWL.

$$[SO_4 - S]_{GWL}^{TR} = \frac{S_{SO4} \cdot 10.000}{m_S}$$

$$\begin{aligned}
 [SO_4 - S]_{GWL}^{TR} & \dots \text{feststoffbezogener Sulfatschwefel-Gehalt des GWL} \dots \dots \dots \left[\frac{\text{mmol SO}_4 - S}{\text{kg TR}} \right] \\
 S_{SO4} & \dots \dots \dots \text{analytischer Sulfatschwefel-Gehalt (DIN 51 724 T2)} \dots \dots \dots [M\%] \\
 m_S & \dots \dots \dots \text{molare Masse Schwefel (S)} \dots \dots \dots \left[= \frac{32,06 \text{ g}}{\text{mol}} \right]
 \end{aligned}$$

Gleichung 16: Berechnung der Sulfatkonzentration des Grundwassers im entwässerten und/oder wiederaufgefüllten Porenraum.

$$[SO_4]_{GW} = \left([SO_4 - S]_{GWL}^{TR} + \frac{[O_2]_{GWL}^{TR}}{f_{O_2/S_{dis}}} \right) \cdot m_{SO4} \cdot BWV \quad \frac{[O_2]_{GWL}^{TR}}{f_{O_2/S_{dis}}} \leq [FeS_2 - S]_{GWL}^{TR}$$

$$\begin{aligned}
 [SO_4]_{GW} & \dots \dots \dots \text{Sulfatkonzentration des Grundwassers in der Absenkungslamelle} \dots \dots \dots \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] \\
 [SO_4 - S]_{GWL}^{TR} & \dots \text{feststoffbezogener Sulfatschwefelgehalt des GWL} \dots \dots \dots \left[\frac{\text{mmol SO}_4 - S}{\text{kg TR}} \right]
 \end{aligned}$$



$[O_2]_{GWL}^{TR}$	feststoffbezogener Sauerstoffgehalt des GWL.....	$\left[\frac{\text{mmol } O_2}{\text{kg TR}} \right]$
$[FeS_2 - S]_{GWL}^{TR}$	feststoffbezogener Pyritschwefelgehalt des GWL.....	$\left[\frac{\text{mmol } FeS_2 - S}{\text{kg TR}} \right]$
$f_{O_2/S_{dis}}$	stöchiometrischer Sauerstoffbedarf der Pyritoxidation	$\left[= \frac{1,75 \text{ mol } O_2}{\text{mol Pyrit-S}} \right]$
m_{SO_4}	molare Masse für Sulfat.....	$\left[= \frac{96,056 \text{ g}}{\text{mol}} \right]$
BWV	Boden-Wasser-Verhältnis (im Sättigungszustand).....	$[\text{kg/L}]$

Die nach Gleichung 16 berechnete Sulfatkonzentration gilt schichtbezogen für den von der Absenkung und/oder vom Wiederanstieg des Grundwassers betroffenen Bereich. Für Schichten unterhalb des niedrigsten Grundwasserstandes wird angenommen, dass sich die aktuell gemessene Sulfatkonzentration nicht verändert.

Die gewichtete, mittlere Sulfatkonzentration für den gesamten Grundwasserleiter, einschließlich tieferer Abschnitte, die ggf. nicht von der Absenkung erreicht wurden, wird nach der Gleichung 17 berechnet.

Gleichung 17: Berechnung der mittleren, gewichteten Sulfatkonzentration.

$$\overline{[SO_4]_{GW}} = \frac{\sum_{i=1}^n ([SO_4]_i \cdot M_i \cdot n_i)}{\sum_{i=1}^n (M_i \cdot n_i)}$$

$\overline{[SO_4]_{GW}}$...	mittlere, gewichtete Sulfatkonzentration im Grundwasserleiter	$\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]$
$[SO_4]_i$	Sulfatkonzentration einer Schicht	$\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]$
M_i	Mächtigkeit einer grundwassergefüllten Schicht.....	$[m]$
n_i	Gesamtporenanteil der grundwassergefüllten Schicht.....	$[m]$

2.2.2 Hydrogeochemisches Genesemodell

Mit der im Abschnitt 2.2.1 erläuterten Methodik wurde die standortspezifische Sulfatkonzentration in den Grundwasserwiederanstiegsgebieten bestimmt. Damit bestehen jedoch noch keine Erkenntnisse zur Eisenbelastung und zur Versauerungsdisposition des Grundwassers. Zur Ermittlung nichtkonservativer Zustandsgrößen des Grundwassers wurde die Methode des hydrogeochemischen Genesemodells gewählt.

Diese Methodik geht davon aus, dass die verfügbaren Befunde zur Grundwasserbeschaffenheit im Untersuchungsgebiet zu einer Grundgesamtheit gehören. Das heißt, die Genese der Grundwasserbeschaffenheit findet unter vergleichbaren bodenphysikalischen und geochemischen Verhältnissen im Grundwasserleiter statt. Die Mineralisierung des Grundwassers mit den bergbaulich relevanten Inhaltsstoffen (Sulfat, Eisen u. a.) und die Alkalinität bzw. Acidität folgen je nach örtlichem Umfang der Pyritoxidation und der Karbonatverwitterung als maßgeblicher Pufferreaktion einer gerichteten Entwicklung. Dabei stellt die Sulfatkonzentration den Leitparameter dar. Der pH-Wert, die Eisenkonzentration, die Acidität bzw. Alkalinität und weitere hydrochemische Kennwerte werden vom Vorhandensein von löslichem Calciumkarbonat bestimmt.

Das Genesemodell nutzt PHREEQC [Parkhurst & Appelo 1999] als hydrochemischen Simulator. Es definiert für ein repräsentatives Einheitsvolumen (REV) des Grundwasserleiters mit mittleren bodenphysikalischen Eigenschaften (Porosität, Wasser-

Boden-Verhältnis bei Sättigung) die maßgeblichen Mineral- und Gasphasen (Pyrit, Calcit, Siderit, Gips, Kohlendioxid) mit spezifischen Sättigungsindizes, Partialdrücken und Gehalten sowie eine Kationenaustauschkapazität und simuliert anschließend die Pyritoxidation unter dem Einfluss des Sauerstoffeintrags in den Grundwasserleiter.

Die Gehalte an Pyrit und Calciumkarbonat sowie die Kationenaustauschkapazität werden standortspezifisch aus geochemischen Erkundungsbohrungen abgeleitet. Da Calciumkarbonat überwiegend in bindigen quartären Stratigraphien (z. B. Geschiebemergel, limnische Tone und Schluffe) enthalten ist, die jedoch vom Grundwasser kaum oder gar nicht durchströmt werden, führt die Übernahme der erkundeten Calcitgehalte ins Modell zu einer Überschätzung der Karbonatlösung. Wieviel Calciumkarbonat tatsächlich löslich ist und für die Pufferung der bei der Pyritverwitterung gebildeten Säuren zur Verfügung steht, ist nicht bekannt und kann sich örtlich stark unterscheiden.

Um den an der Grundwassergenese teilhabenden Karbonatgehalt zu schätzen, wurde das Genesemodell zunächst an die vorhandenen Grundwasseranalysen angepasst. Dazu wurde der mittlere Pyritgehalt im Grundwasserleiter in Stufen oxidiert und der Karbonatgehalt gleichzeitig als Anpassungsgröße variiert. Das Ergebnis der Anpassungsberechnung ist im Bild 5 für insgesamt 18 Grundwasseranalysen aus dem G100, G120 und G130 des Untersuchungsgebietes gezeigt.

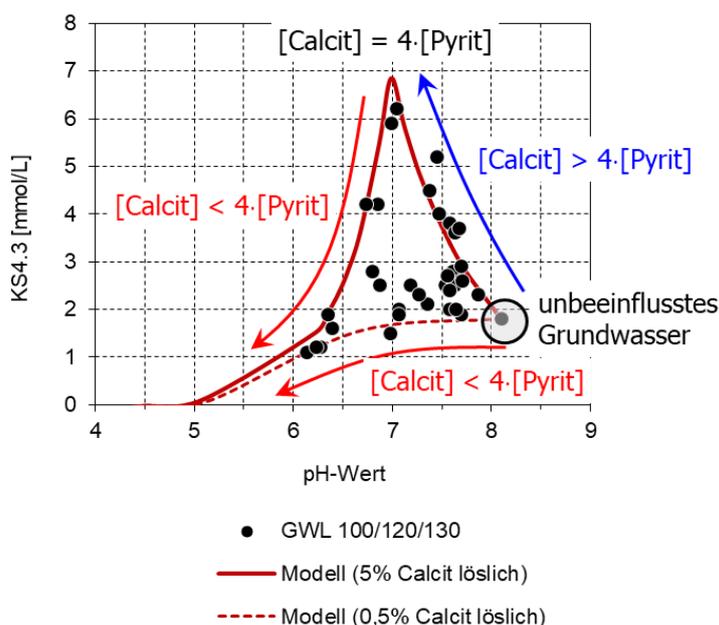


Bild 5: Angepasstes hydrogeochemisches Modell für die Genese der Grundwasserbeschaffenheit im G100/120/130 in den Grundwasserabsenkungs- und -wiederanstiegsgebieten unter dem Einfluss der Pyritverwitterung und Karbonatlösung.

Ausgehend von einem bergbaulich unbeeinflussten Grundwasser steigt die Säurekapazität $K_{S4,3}$ des Grundwassers zunächst an, solange löslicher Calcit im Überschuss zum oxidierten Pyrit vorliegt (blauer Pfeil). Ist das verfügbare Calciumkarbonat aufgebraucht, überwiegen bei fortschreitender Pyritoxidation die gebildeten Säuren. Die Säurekapazität $K_{S4,3}$ wird gezehrt (absteigender, roter Pfeil). Die beste Anpassung für den Umkehrpunkt $[Calcit] = 4 \cdot [Pyrit]$ wurde im vorliegenden Fall für einen löslichen



Karbonatgehalt von 0,0225 M% erzielt. Das entspricht etwa 5 % des mittleren Ausgangsgehaltes.

Je geringer der lösliche Karbonatgehalt ist, desto früher wird der Umkehrpunkt erreicht. Die untere Hüllkurve der Analysen (gestrichelte Reihe) beschreibt die Grundwasser-
genese ohne lösliche Karbonate.

Im Bild 6 sind die Ergebnisse der Anwendung des hydrochemischen Genesemodells nach Abschnitt 2.2.2 mit 5 % löslichem Calciumkarbonatgehalt für den pH-Wert, die Acidität sowie die Konzentration von Sulfat und Eisen exemplarisch dargestellt. Die Abszisse beschreibt den relativen Fortschritt der Pyritverwitterung. Die rechte Ordinate kennzeichnet den Umsatz der primären Mineralphasen (Calcit) und der zugelassenen sekundären Mineralphasen (Siderit, Gips). Die linke Ordinate kennzeichnet Konzentrationen bzw. den pH-Wert.

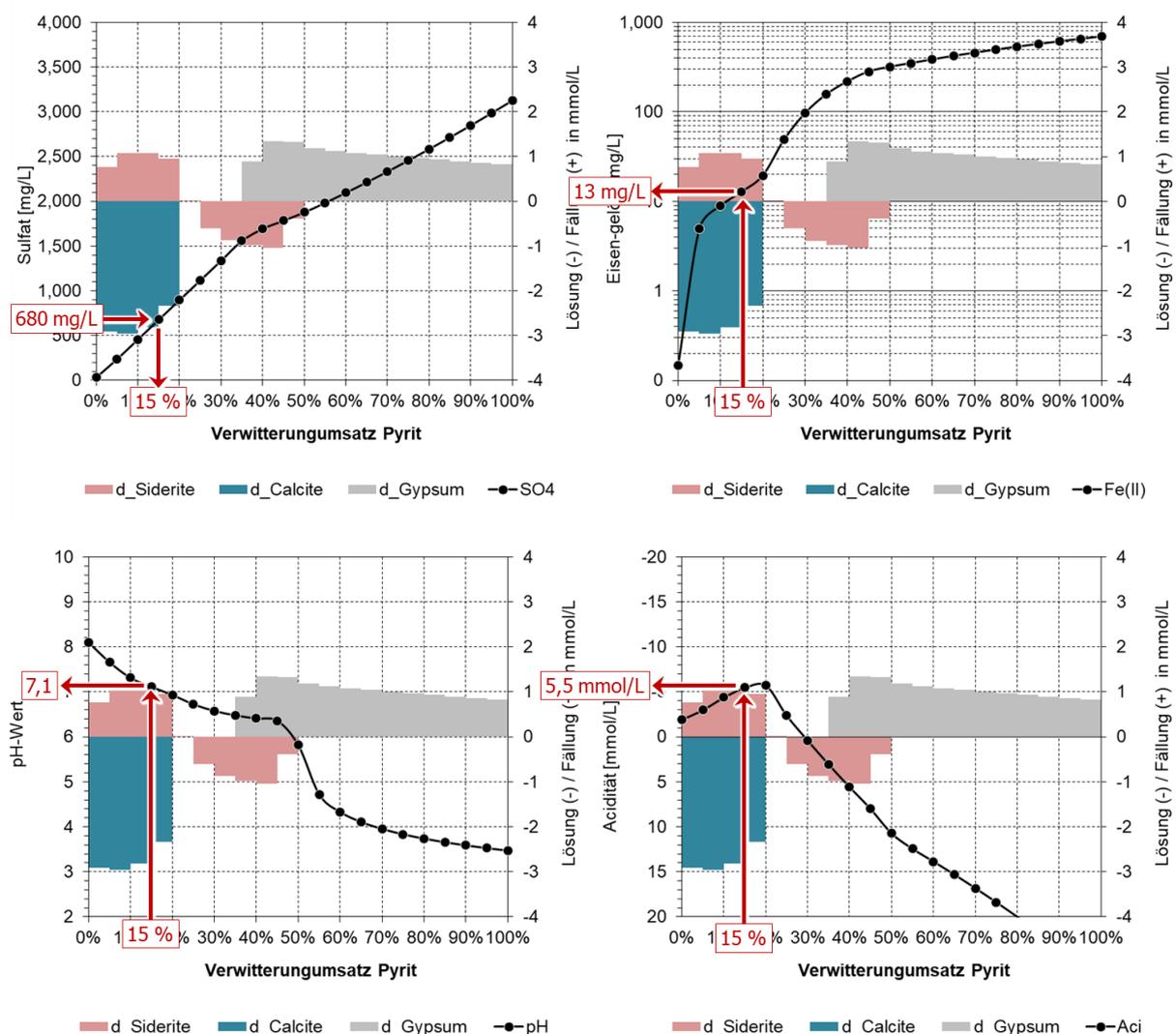


Bild 6: Nutzung des hydrogeochemischen Genesemodells (PHREEQC) zur Prognose nicht konservativer Kennwerte der Grundwasserbeschaffenheit. Beispiel: G100/G120/G130: $\text{FeS}_2\text{-S} = 0,03 \text{ M\%}$; löslicher Calcit = $0,0225 \text{ M\%}$.



Im gezeigten Beispiel ergab die vorlaufende, konservative Bilanzierung der Pyritverwitterung und Sulfatfreisetzung eine mittlere Sulfatkonzentration des Grundwassers in Höhe von 680 mg/L. Anhand des Modells wird daraus eine mittlere Umsatzrate der Pyritverwitterung von 15 % ermittelt (Bild 6 links oben). Aus dem Umsatz leiten sich des Weiteren eine Eisenkonzentration von 13 mg/L (Bild 6 rechts oben), ein pH-Wert von 7,1 (Bild 6 links unten) und eine Alkalinität von 5,5 mmol/L ab (Bild 6 rechts unten).

Auf diese Weise ermöglicht der Modellansatz, dass aus der konservativ bestimmten Sulfatkonzentration im wiederangestiegenen Grundwasser (Abschnitt 2.2) auch auf nichtkonservative Kennwerte der Grundwasserbeschaffenheit, wie die Eisenkonzentration und die Versauerungsdisposition, geschlossen werden kann.

Die vorgestellte Methode entspricht dem fortgeschrittenen Stand von Wissenschaft und Technik. Sie ist derzeit der einzige Zugang zur Ermittlung nichtkonservativer Kennwerte der Grundwasserbeschaffenheit beim Grundwasserwiederanstieg.

2.2.3 Berechnungsbeispiele

In der Tabelle 5 ist die im Abschnitt 2.2.1 erläuterte Berechnungsmethodik zur Ermittlung der Sulfatkonzentration im ansteigenden Grundwasser am Beispiel der Bohrung CAL02 (Standort „Calpenzmoor“) exemplarisch gezeigt, siehe auch Abschnitt 5.4. Die Bohrung wurde bis 15 m u GOK in den G150 geteuft. Das Grundwasser wurde bei 10,5 m unter Gelände, an der Liegendgrenze des G130, angetroffen. Nach den Ergebnissen der hydrogeologischen Modellierung wird der Grundwasserstand im G150 bis zum Jahr 2033 voraussichtlich noch um weitere 1,0 Meter abgesenkt und steigt nachbergbaulich auf 7,5 m u GOK an (Bild 7). In der Absenkungslamelle werden rund 0,6 mmol/kg Disulfid-Schwefel zu Sulfatschwefel oxidiert. Bereits aktuell liegt im Absenkungs- und Wiederanstiegsbereich des Grundwassers zwischen 0,3 und 1,6 mmol/kg Sulfatschwefel vor.

Mit dem Grundwasserwiederanstieg in die von der Absenkung betroffene Lamelle des **G150** formiert sich dort eine hohe Sulfatkonzentration von rund 930 mg/L. Unterhalb des niedrigsten Grundwasserstandes im G150 (11,5 m u GOK) bis zu seiner Liegendgrenze bei 61,0 m u GOK beträgt die Sulfatkonzentration 84 mg/L (Grundwasserprobe vom 16.12.2020). Durch Grundwasserströmung, Dispersion und Diffusion kommt es zu einer vertikalen Verlagerung des Sulfats aus der Absenkungslamelle in tiefere Schichten des G150. Im Fall einer idealen Vermischung stellt sich im G150 eine mittlere Sulfatkonzentration von rund 100 mg/L ein.

Bis zum Abschluss der Grundwasserwiederanstiegs steigt das Grundwasser im hangenden **G130** bis 7,5 m u GOK an. Die grundwassergefüllte Mächtigkeit des G130 beträgt dann 3,0 Meter.

Mit dem Wiederanstieg in den G130 löst das Grundwasser den im Porenraum vorhandenen Sulfatschwefel, der schichtbezogen zwischen 0,3 und 1,5 mmol/kg erkundet wurde. Die resultierenden Sulfatkonzentrationen liegen zwischen rund 110 und 700 mg/L sowie bei rund 210 mg/L im mächtigkeitsgewichteten Profilmittel.

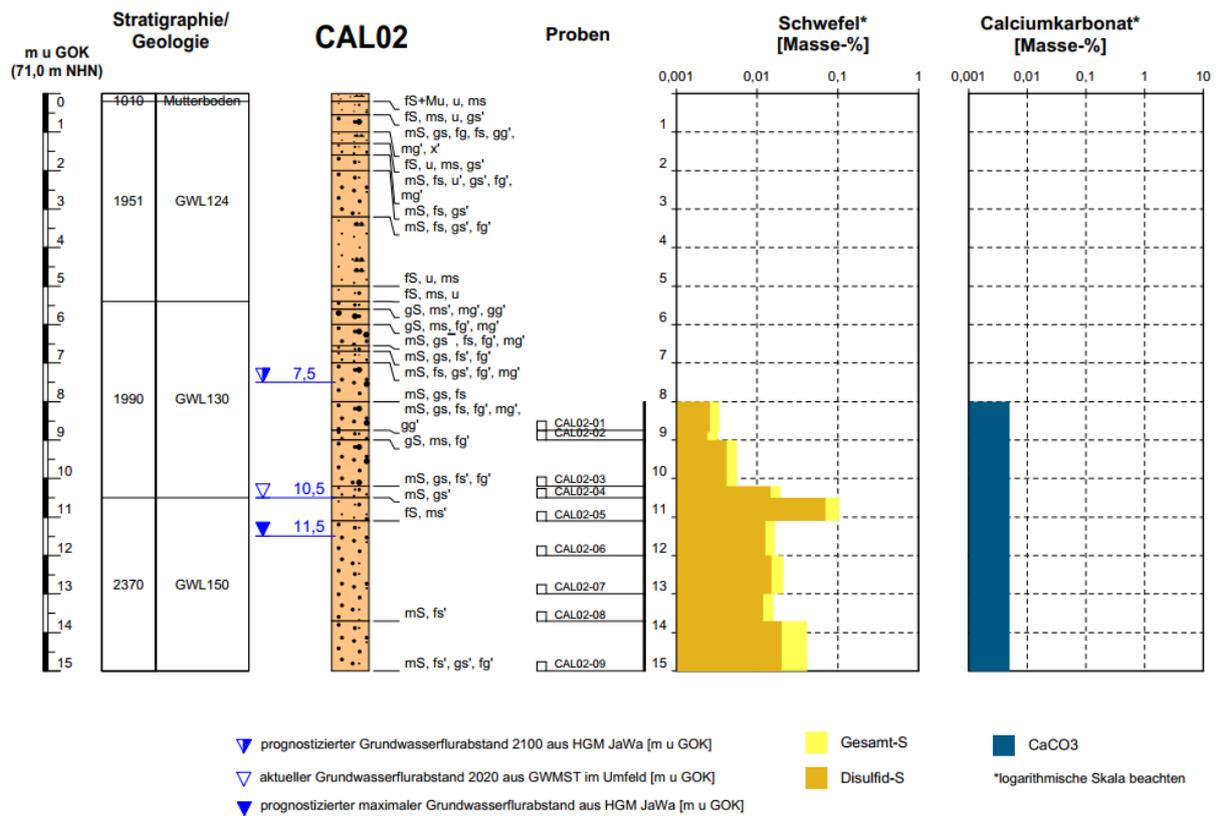


Bild 7: Geologisch-geochemisches Profil am Standort der Bohrung CAL02.

Tabelle 5: Prognose der Sulfatkonzentration in den G150 und G130 am Standort der Bohrung CAL02 (Calpenzmoor)

	m u GOK	m NHN
Geländehöhe (GOK)	---	+71,00
Bohrteufe	15,0	+56,00
Liegendgrenze GWL	61,0	+10,00

¹⁾ grau: Keine Bestimmung S-Dis bei S-Ges < 0,03 M%,
Annahme S-Dis = 0,75 · S-Ges (75%) bis maximal
S-Dis = 0,015 M% (BG/2)

²⁾ grau: Keine Bestimmung S-SO4 bei S-Ges < 0,03 M%,
Annahme S-SO4 = 0,25 · S-Ges (25%) bis maximal
S-SO4 = 0,005 M% (BG/2)

Grundwasserprobennahme:	16.12.2020
Messstelle:	19153
Grundwasserleiter:	100
Sulfatkonzentration, mg/L:	84

GwSp

Schicht-Nr.	Schichtdaten				Bodenphysik					Analytik / Stoffgehalte				Belüftung				Pyrit-oxidation		Sulfat-konzentration			
	OK	UK	Mächtigkeit	Geologie	Petrographie	Trockenrohdichte (TRD)	Porenanteil (PA, Gleichung 9)	Wasser-Boden-Verhältnis, gesättigt (Gleichung 10)	Luftkapazität (LK, Tabelle 4)	Feldkapazität (FK = PA - LK)	Proben-Nr.	Gesamt-Schwefel	Disulfid-Schwefel ¹⁾	Sulfat-Schwefel ²⁾	Disulfid-Schwefel (Gleichung 14)	Sulfat-Schwefel, (Gleichung 15)	Sauerstoffeintrag bei Absenkung (Gleichung 11)	Sauerstoffgehalt (Gleichung 12)	Pyrit, verwittert	S-Dis, verwittert	schichtbezogen (Gleichung 16)	Gewichtetes Mittel (Gleichung 17)	
	m u GOK	m				g/cm ³	-	L/kg	-	-	M%	M%	M%	mmol/kg	mmol/kg	kg O ₂ /m ³	mmol O ₂ /kg	%	mmol/kg	mg/L			
1	0,0	0,2	0,2	GWL124	SF_U	1,70	0,358	0,211	0,140	0,218													
2	0,2	0,6	0,4		SF_SM	1,70	0,358	0,211	0,200	0,158													
3	0,6	1,0	0,4		SM_SG	1,70	0,358	0,211	0,260	0,098													
4	1,0	1,3	0,3		SF_U	1,70	0,358	0,211	0,140	0,218													
5	1,3	3,2	1,9		SM_SF	1,70	0,358	0,211	0,240	0,118													
6	3,2	5,0	1,8		SF_U	1,70	0,358	0,211	0,140	0,218													
7	5,0	5,4	0,4		SF_SM	1,70	0,358	0,211	0,200	0,158													
8	5,4	6,0	0,6		SG_SM	1,70	0,358	0,211	0,270	0,088													
9	6,0	7,5	1,5		SM_SF	1,70	0,358	0,211	0,240	0,118													
10	7,5	8,8	1,3	GWL130	SM_SG	1,70	0,358	0,211	0,260	0,098	CAL02-01	0,0035	0,0026	0,0009	0,8	0,3	0	0	0%	0,00	123	210	
11	8,8	9,0	0,2		SG_SM	1,70	0,358	0,211	0,270	0,088	-02	0,0033	0,0024	0,0008	0,8	0,3	0	0	0%	0,00	114		
12	9,0	10,2	1,2		SM_SG	1,70	0,358	0,211	0,260	0,098	-03	0,0056	0,0042	0,0014	1,3	0,4	0	0	0%	0,00	200		
13	10,2	10,5	0,3		SM	1,70	0,358	0,211	0,250	0,108	-04	0,0196	0,0147	0,0049	4,6	1,5	0	0	0%	0,00	697		
14	10,5	11,1	0,6	GWL150	SF	1,70	0,358	0,211	0,180	0,178	-05	0,1050	0,0700	0,0050	21,8	1,6	0,0477	0,8769	2%	0,50	938	101	
15	11,1	11,5	0,4		SM	1,70	0,358	0,211	0,250	0,108	-06	0,0168	0,0126	0,0042	3,9	1,3	0,0663	1,2179	18%	0,70	913		
16	11,5	12,0	0,5		SM	1,70	0,358	0,211	0,250	0,108	-06	0,0168	0,0126	0,0042	3,9	1,3	0	0	0%	0,00	84		
17	12,0	13,0	1,0		SM	1,70	0,358	0,211	0,250	0,108	-07	0,0211	0,0150	0,0050	4,7	1,6	0	0	0%	0,00	84		
18	13,0	13,7	0,7		SM	1,70	0,358	0,211	0,250	0,108	-08	0,0158	0,0119	0,0040	3,7	1,2	0	0	0%	0,00	84		
19	13,7	15,0	1,3		SM	1,70	0,358	0,211	0,250	0,108	-09	0,0420	0,0200	0,0050	6,2	1,6	0	0	0%	0,00	84		
20	15,0	61,0	46,0				1,70	0,358	0,211														84
Profilmittelwert																					107		





3 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

3.1 Abgrenzung

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in der Nähe der Stadt Cottbus im Südosten Brandenburgs, an der Grenze zu Polen im Osten und nahe der Grenze zu Sachsen im Süden (Bild 8). Es hat eine Größe von ca. 420 km², mit einer maximalen Nord-Süd-Ausdehnung von ca. 27 Kilometer und einer maximalen Ost-West Ausdehnung von ca. 24 Kilometer. Die Abgrenzung erfolgt entsprechend dem mit HGMJaWa ermittelten potentiellen Wirkbereich der Grundwasserbeeinflussung durch den Tagebau Jänschwalde [IBGW 2019]. Das Untersuchungsgebiet umfasst weite Teile der Hornower Hochfläche. Im Osten stellt die Lausitzer Neiße die Begrenzung dar. Im Süden des Untersuchungsgebietes liegen der Tagebau Jänschwalde sowie Teile der Peitzer Teiche. Im Westen reicht das Untersuchungsgebiet bis zur Lieberoser Hochfläche und zur Ortslage Lieberose. Im Norden reicht das Untersuchungsgebiet bis zur Gubener Hochfläche und wird durch den Schwansee sowie die Lutzke begrenzt.

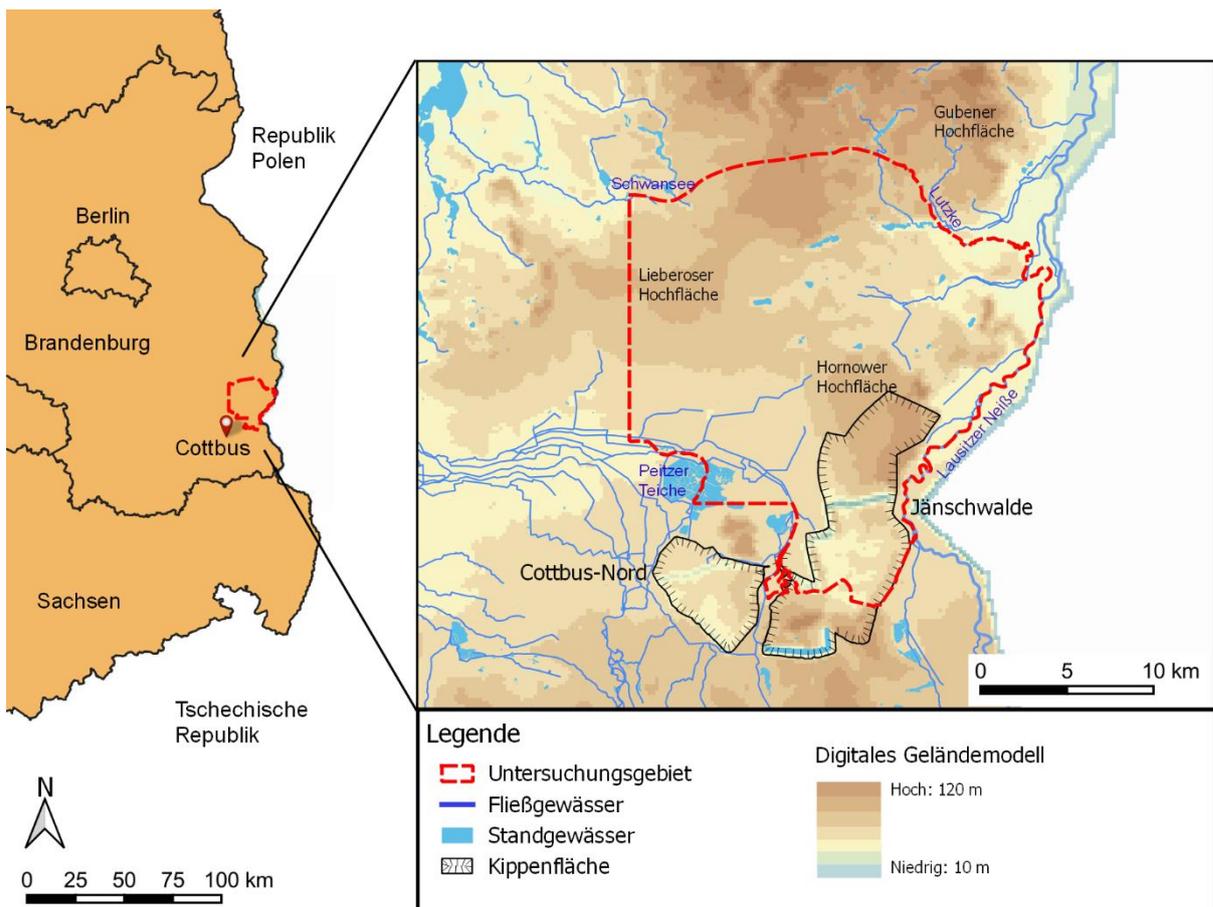


Bild 8: Lage des Untersuchungsgebietes.



3.2 Geologie und Hydrogeologie

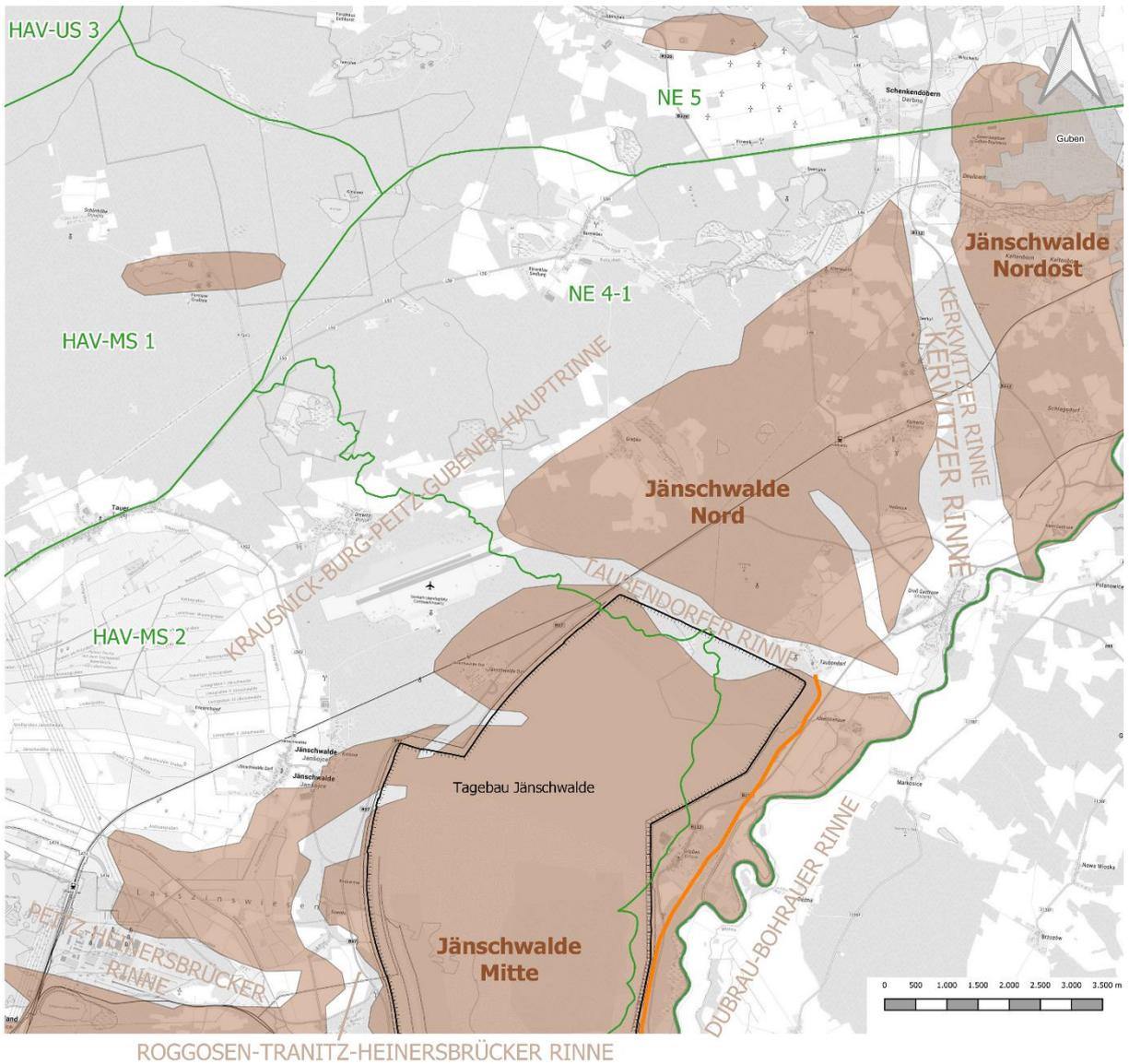
Der Untergrund im Untersuchungsraum besteht aus etwa 200 Meter mächtigen tertiären und quartären Sedimenten. Das Quartär der Umgebung des Tagebaus Jänschwalde ist durch elster- bis weichselglaziale Sedimente vertreten, wobei die Sedimente des Saale-Komplexes dominieren. Das Elsterglazial ist in Rinnen durch Geschiebemergel, Bänderschlufler und Feinsande des Elster-2-Stadials lokal verbreitet (Bild 10). Von den saaleglazialen Sedimenten sind alle drei Stadiale ausgebildet, wobei die Mächtigkeit zu den jüngeren Bildungen hin abnimmt. Die Saalestadiale weisen jeweils eine vergleichbare Abfolge ihrer petrographischen Zusammensetzung auf: Vorschüttbildungen (Sande, teilweise Schluffe), Grundmoräne (Geschiebemergel und Schluffe) sowie Nachschüttbildungen mit ähnlicher Korngrößenverteilung wie die Vorschüttbildungen. Das Weichselglazial besteht überwiegend aus Sanden und Kiesen. Interglaziale Sedimente der Holstein- und Eem-Warmzeit, interstadiale Bildungen des Trinitzfluviatils sowie holozäne Bildungen haben nur lokale Bedeutung.

Im Norden des Untersuchungsraumes dominieren weitreichende Sanderflächen, von Nordwest nach Südost: der Schwanheide-Sander, der Reicherskreuzer Sander und der Taubendorfer Sander. Im Nordwesten und Nordosten wird der Untergrund durch die Endmoränen und glazialen Hochflächen des Brandenburg-Stadiums der Weichsel-Kaltzeit mit Grundmoränen und Schmelzwassersanden gebildet. In den glazialen Hochflächen der Weichselkaltzeit sind mehrere Endmoränen aushaltbar. Die südliche Grenze der weichselzeitlichen glazialen Hochfläche markiert etwa die maximale Ausdehnung der Weichselkaltzeit. Südlich davon wird der Untergrund zunächst von Grundmoränen der Saale-III-Kaltzeit gebildet, bis sich im weiteren Verlauf nach Süden das Baruther Urstromtal mit seinen Talsanden, zwischen denen vereinzelt tertiäre Schollen aufragen, anschließt.

Der Untersuchungsraum ist von mächtigen pleistozänen Rinnen geprägt, in denen gut durchlässige Grundwasserleiter dominieren. Die pleistozänen Rinnen durchschneiden mitunter das gesamte Tertiär. So unterteilen im Nordosten des Tagebaus Jänschwalde die Taubendorfer und Kerkwitzer Rinne den 2. Lausitzer Flözhorizont in die Kohlenfelder Jänschwalde-Mitte, Jänschwalde-Nord und Jänschwalde-Nordost. Der südliche Bereich des Kohlenfeldes Jänschwalde-Mitte wird im Westen von der Dubrau-Bohrauer Rinne und im Osten von der Roggosen-Trinitz-Heinersbrücker Rinne begrenzt (Bild 10).

Die Hauptgrundwasserleiter werden im Untersuchungsgebiet aus den pleistozänen Ablagerungen der späten Saale- und der Weichsel-Kaltzeit gebildet. Die fluviatilen Mittel- bis Grobsande (G130) der Weichsel-Kaltzeit sind oberflächennah auf den Hochlagen ausgebildet. Die Sanderschüttungen (G124) bilden den Übergang zu den Talagen. Die fluviatilen Nachschüttbildungen des Baruther Urstromtals (G122) füllen die Flusstäler aus. Die Nachschüttbildungen der Saale-I-Kaltzeit bilden den mächtigen und nahezu flächendeckend verbreiteten Grundwasserleiter G150. In tief eingeschnittenen Rinnen werden als Grundwasserleiter lokal die Vorschüttbildungen der Elster-I-Vereisung (G1802) angetroffen (Bild 10).

Um die Grundwasserabsenkung in der Neißeau zu begrenzen und auf polnischem Staatsgebiet zu vermeiden, wurde entlang der Ostmarkscheide des Tagebaus Jänschwalde eine Dichtwand gebaut. Die Dichtwand hat eine Länge von ca. 10 Kilometer.



ROGGOSEN-TRANITZ-HEINERSBRÜCKER RINNE

Bild 9: Topographische Lage des Tagebaus Jänschwalde (Stand 2021), Grundwasserkörper nach EG-WRRL und pleistozäne Rinnen.

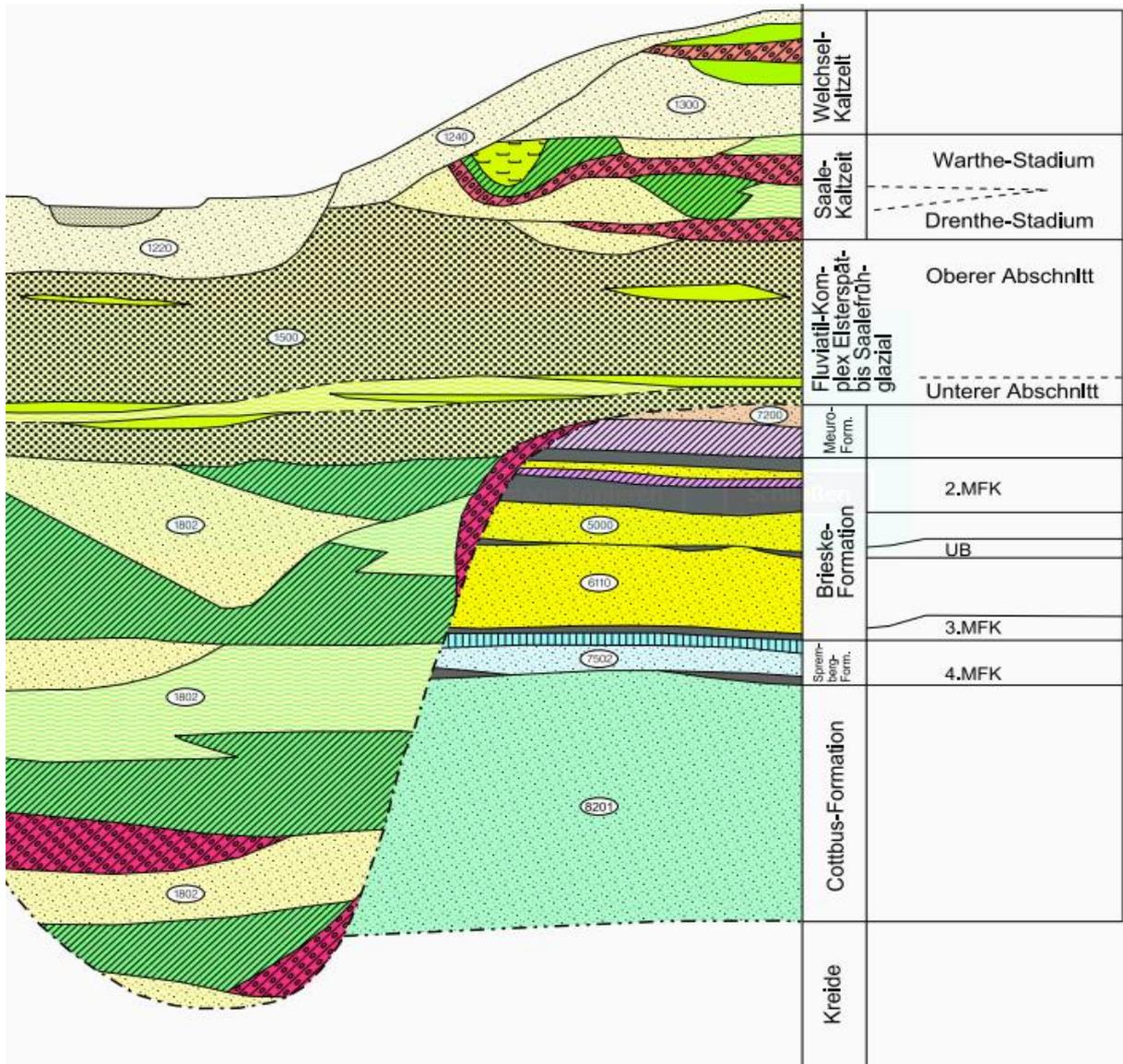


Bild 10: Geologisches Normalprofil im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde [LEAG 2017].

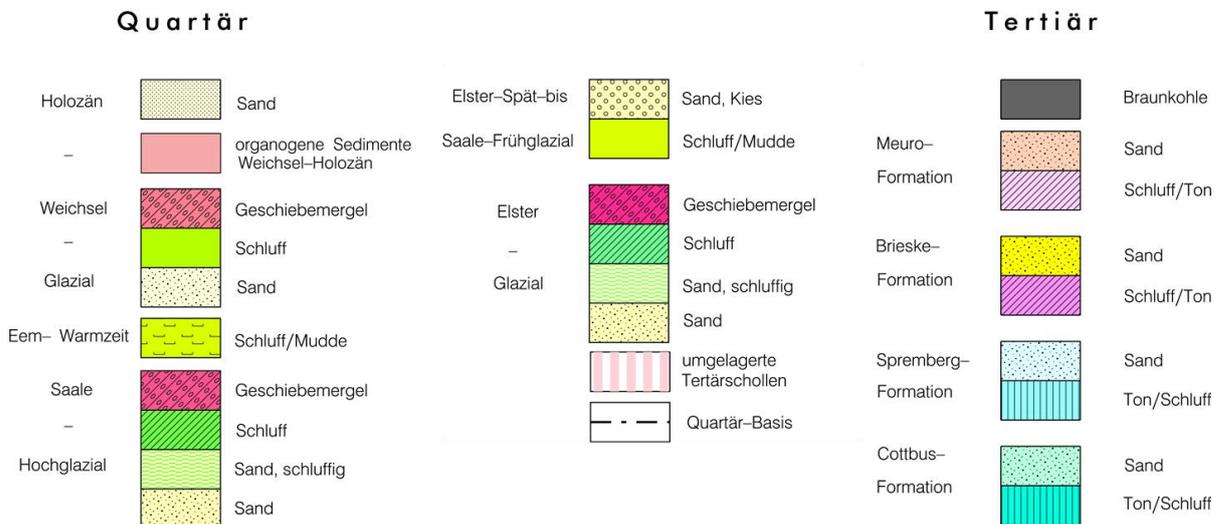


Bild 11: Legende zum regionalgeologischen Schnitt in Bild 10, aus [LEAG 2017].

3.3 Landschaft, Bodenformen und Landnutzung

Das Untersuchungsgebiet wird von der Lieberoser Hochfläche dominiert. Die oberflächlich anstehenden geologischen Schichten bestehen vor allem aus Lockersedimenten. Darauf bildeten sich vor allem Braunerden, Bänderparabraunerden, Braunerde-Podsole und Fahlerden aus (siehe Tabelle 6 sowie Bild 12). Im Neißetal sowie in den Jänschwalder Laßzinswiesen bildeten sich Gleye und Niedermoorböden aus.

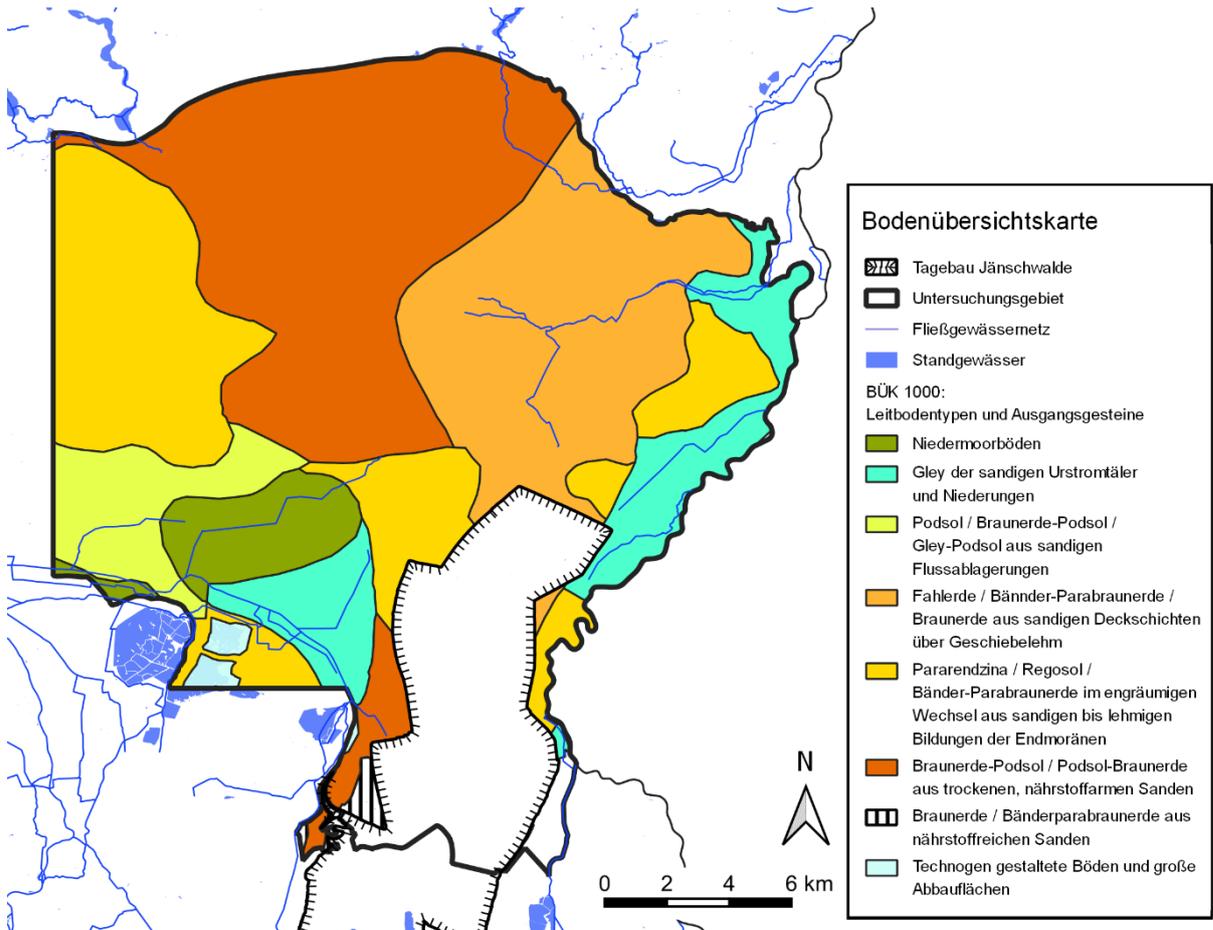


Bild 12: Leitbodentypen und Ausgangsgesteine (LBA) im Untersuchungsgebiet entsprechend der BÜK 1000.

Auf den sandigen Böden im Untersuchungsgebiet befinden sich große zusammenhängende Flächen von Nadelwäldern. Die CORINE Land Cover (CLC) Landnutzungsarten für das Jahr 2018 sind im Bild 13 dargestellt. Hier sind die Nadelwälder dunkelgrün dargestellt. Sie stellen mit ca. 196 km² den größten Anteil der Flächennutzung dar. Die nächstgrößten Flächenanteile besitzen das Ackerland mit ca. 72 km², Wiesen und Weiden mit ca. 43 km² sowie die Abbaufächen des Braunkohlenbergbaus mit ca. 42 km². Alle weiteren Landnutzungsarten sind von untergeordneter Bedeutung (vgl. Tabelle 7).



Tabelle 6: Bodeneinheiten im Untersuchungsgebiet nach BÜK 1000 mit absoluten und relativen Flächenanteilen.

Leitbodentypen und Ausgangsgesteine		Fläche	Anteil
LBA	Legende	[km ²]	[%]
6	Niedermoorboden	18	4 %
12	Gley der sandigen Urstromtäler und Niederungen	38	9 %
17	Podsol, Braunerde-Podsol und Gley-Podsol aus sandigen Flussablagerungen	22	5 %
26	Fahlerde, Bänderparabraunerde und Braunerde aus sandigen Deckschichten über Geschiebelehm	76	18 %
31	Braunerde-Podsol und Podsol-Braunerde aus trockenen, nährstoffarmen Sanden	86	20 %
32	Braunerde und Bänderparabraunerde aus nährstoffreichen Sanden	117	28 %
71	Technogen gestaltete Böden und große Abbauflächen	2	<1 %
72	Gewässer	3	1 %
---	Tagebau Jänschwalde	58	14 %
---	Gesamt	420	100 %

LBA Leitbodentypen und Ausgangsgesteine

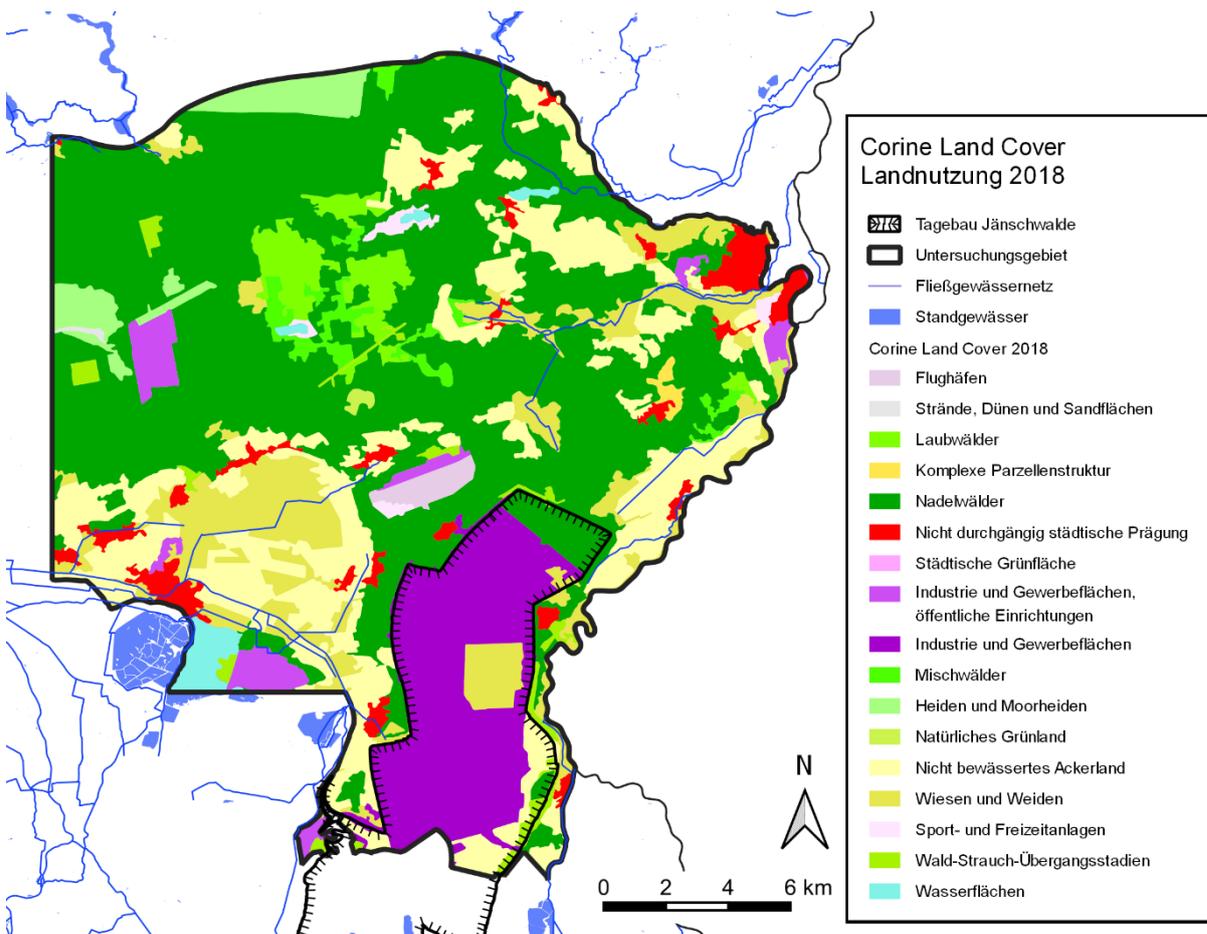


Bild 13: CORINE-Land-Cover-Landnutzungsarten im Untersuchungsgebiet im Jahr 2018.



Tabelle 7: CORINE-Land-Cover-Landnutzungsarten im Untersuchungsgebiet im Jahr 2018.

CORINE Land Cover Landnutzungsart	Fläche [km ²]	Anteil
	km ²	
Nadelwälder	196,0	46,7 %
Ackerland	71,5	17,0 %
Wiesen und Weiden	43,1	10,3 %
Abbauflächen	42,0	10,0 %
Nicht durchgängig städtische Prägung	13,7	3,3 %
Laubwälder	10,8	2,6 %
Heiden und Moorheiden	10,4	2,5 %
Industrie und Gewerbeflächen, Öffentliche Einrichtungen	9,63	2,3 %
Mischwälder	6,48	1,5 %
Wald-Strauch-Übergangsstadien	5,73	1,4 %
Wasserflächen	4,34	1,0 %
Flughäfen	2,66	0,6 %
Sport- und Freizeitanlagen	2,04	0,5 %
Komplexe Parzellenstruktur	0,98	0,2 %
Natürliches Grünland	0,77	0,2 %
Strände, Dünen und Sandflächen	0,29	0,1 %
Gesamtfläche	420	100,0 %

3.4 Gewässernetz

3.4.1 Fließgewässer

Das Untersuchungsgebiet wird nach Nordosten durch das Grano-Buderoser-Mühlenfließ sowie durch das Schwarze Fließ (mit dem Zufluss Großer Seegraben und dem parallel verlaufenden Alten Mutterfließ) zur Lausitzer Neiße entwässert. Nach Osten entwässern die Moaske und das Eilenzfließ in die Lausitzer Neiße. Nach Westen entwässern die Puschelnitza Jänschwalde, der Laßzinsener Wiesengraben und der Präsidentengraben über die Malxe zur Spree. Die Fließgewässer des Untersuchungsgebiets sind in der Tabelle 8 zusammengefasst. Die Wasserscheide zwischen der Lausitzer Neiße (Ostsee) und der Spree (Nordsee) verläuft durch das Untersuchungsgebiet in Nord-Süd-Richtung (Bild 14).

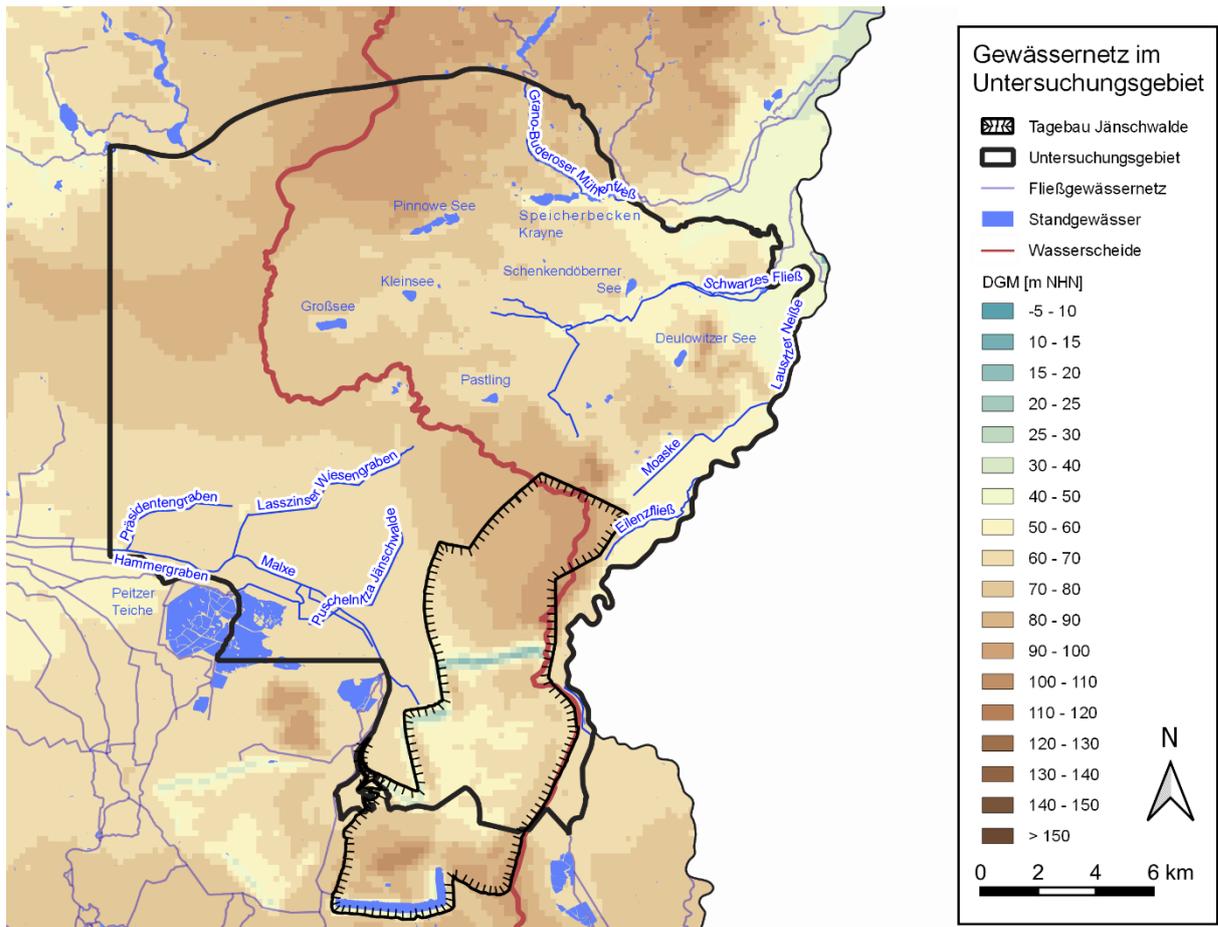


Bild 14: Gewässernetz im Untersuchungsgebiet.

Tabelle 8: Fließgewässer im Untersuchungsgebiet.

Bezeichnung	OWK	Quelle	Mündung	Länge	Oberirdisches Einzugsgebiet
				km	km ²
Grano-Buderoser Mühlenfließ	DEBB 67496_546	Südwestlich Ortslage Göhlen	Lausitzer Neiße	11,77	131
Schwarzes Fließ	DEBB 67492_544	Westlich Ortslage Bärenklau	Lausitzer Neiße	15,08	132
Altes Mutterfließ	---	Nordwestlich Ortslage Deulowitz	Schwarzes Fließ	3,96	9
Bullgraben	---	Südlich Ortslage Bärenklau	Schwarzes Fließ	2,02	7
Großer Seegraben	DEBB 674924_1064	Südöstlich Grabko	Schwarzes Fließ	4,98	24
Lausitzer Neiße	DEBB 674_1739 DEBB 674_70	Isergebirge im Norden der Tschechischen Republik	Oder	57,94 16,24	
Moaske	DEBB 674792_1063	Nördlich Ortslage Taubendorf	Lausitzer Neiße	6,24	18
Eilenzfließ	---	Nordöstlich Ortslage Grieben	Lausitzer Neiße	5,12	5



Bezeichnung	OWK	Quelle	Mündung	Länge	Oberirdisches Einzugsgebiet
				km	km ²
Puschelnitza Jänschwalde	DEBB 58262234_1600	Nördlich Ortslage Jänschwalde Dorf	Malxe (Altlauf)	4,14	39
Laßzinsler Wiesengraben	DEBB 58262238_1601	Bei Ortslage Drewitz	Malxe	8,45	48
Präsidentengraben	DEBB 5826224_1246	Jänschwalder Laßzinswiesen bei Ortslage Preilack	Malxe	4,59	31
Malxe	DEBB 582622_745 DEBB 582622_746	Sogenannter GST-Teich bei Döbern	Nordumfluter	43,67 4,53	

3.4.2 Standgewässer

Im Untersuchungsgebiet befinden sich zahlreiche natürliche Seen, wie der Großsee, Kleinsee und der Pastlingsee, die durch das Abschmelzen von Toteisblöcken in der letzten Eiszeit entstanden (Tabelle 9). Die Standgewässer sind keine Oberflächenwasserkörper (OWK) nach Wasserrahmenrichtlinie und damit nicht berichtspflichtig.

Tabelle 9: Standgewässer im Untersuchungsgebiet.

Gewässer	OWK	Seenkennzahl	Fläche	Umfang	Anbindung an Fließgewässer
			ha	km	
Kleinsee	---	80003674921	14,0	1,4	-
Großsee	---	80002674921	31,0	2,7	-
Pastlingsee	---	80001674924	12,1	1,6	-
Krayner Teiche	---	800036749617	43,4		Grano-Buderoser Mühlenfließ
Speicherbecken Krayne	---	800026749617	23,0	4,7	Grano-Buderoser Mühlenfließ
Pinnower See	---	80001674921	43,8	5,1	---
Schenkendöberner See	---	80002674925	13,9	1,7	Schwarze Fließ
Deulowitzer See	---	80001674925	15,0	1,6	---

3.5 Fauna-Flora-Habitate (FFH)

Im hydrologischen Wirkungsbereich des Tagebaus Jänschwalde befinden sich die folgenden Fauna-Flora-Habitate (FFH). Eine Lageübersicht des Untersuchungsgebietes mit den FFH-Gebieten befindet sich in Bild 15.

Tabelle 10: Fauna-Flora-Habitate im Untersuchungsgebiet

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Code	Schutzziele
1	Krayner Teiche/Lutzketal	DE4053303	Erhaltung des Lutzketals mit natürlichen Bachmäandern in einem durch steile Hänge gekennzeichneten Kerbtal.
2	Pinnower Läuche und Tauerse Eichen	DE4052301	Erhaltung der Traubeneichen-Kiefern-mischwälder zur Erforschung der Verjüngungsdynamik und der Bestandsstrukturierung.



Lfd. Nr.	Bezeichnung	Code	Schutzziele
			Erhalt mesotropher Kesselmoore zur wissenschaftlichen Begleitung von Sukzessionsabläufen und Renaturierungsmaßnahmen.
3	Feuchtwiesen Atterwasch	DE4053302	Erhaltung und Entwicklung des Gebietes wegen seiner besonderen Eigenart als naturnahes, reich strukturiertes und von Fließ- und Stillgewässern geprägtes Feuchtgebiet im Neißeeraum.
4	Calpenzmoor	DE4053301	Erhaltung des naturnahen Wasserhaushaltes und der Wasserspeicherfähigkeit der Moorkörper.
5	Pastlingsee	DE4053304	Erhaltung und Entwicklung des Gebietes aus ökologischen und wissenschaftlichen Gründen, insbesondere des naturnahen Wasserhaushaltes und der Wasserspeicherfähigkeit der Moorkörper zur Erforschung der Lebensgemeinschaften der Torfmoosmoore und Kleingewässer.
6	Grabkoer Seewiesen	DE4053305	Stabilisierung des Wasserhaushalts zur Erhaltung und zum Schutz der vorkommenden Übergangs- und Schwingrasenmoore, Torfmooschlenken und Kiefern-Moorwälder.
7	Neißeau	DE4354301	Für Repräsentanz und Kohärenz des Netzes nicht ersetzbares Fließgewässersystem und dessen begleitende Auen- und Trockenstandorte mit jeweils charakteristischer Artenpalette.
8	Peitzer Teiche	DE4152302	Stabilisierung des Wasserhaushalts in den Jänschwalder Laßzinswiesen.

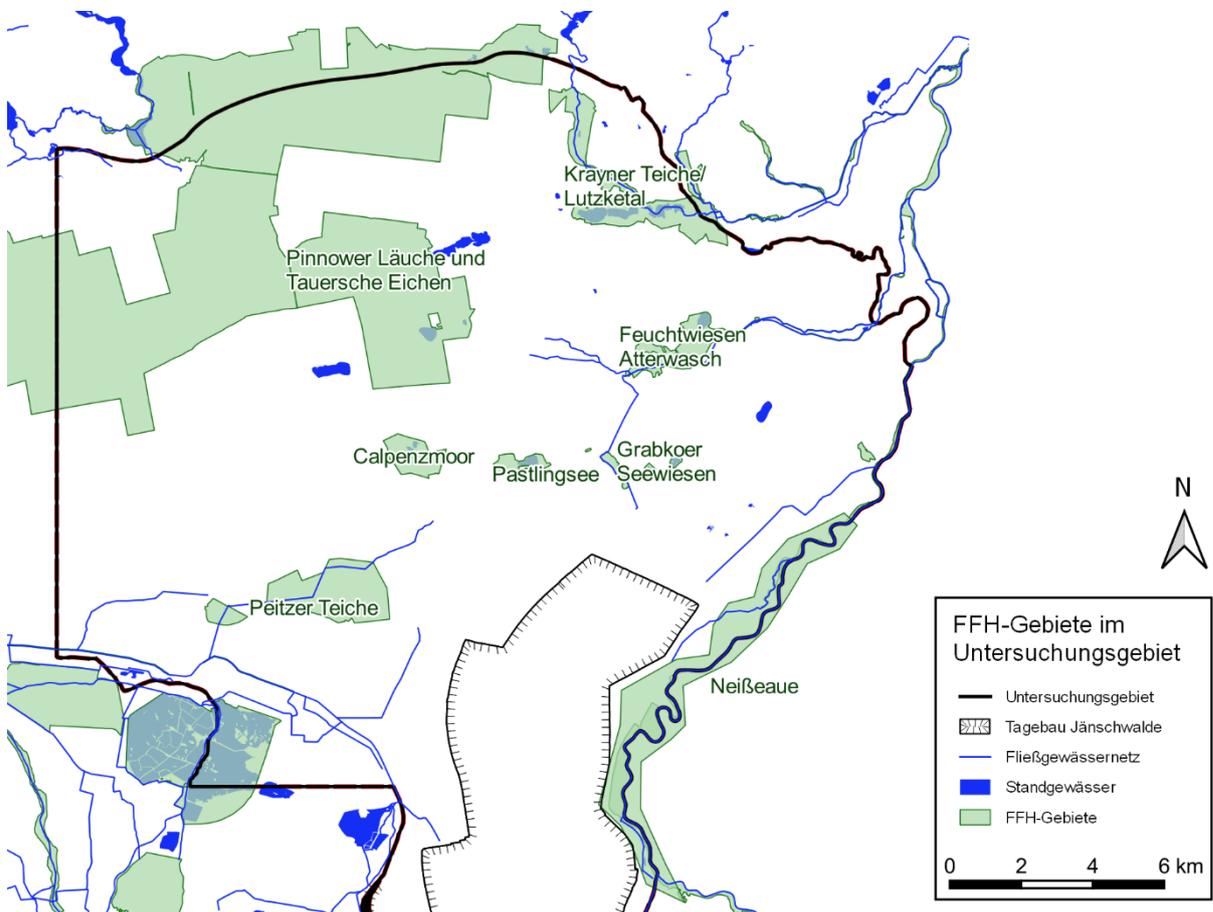


Bild 15: FFH-Gebiete im Untersuchungsgebiet.

3.6 Wasserhaushalt

3.6.1 Klimatische Verhältnisse

Für die Einschätzung der klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet wurden die frei verfügbaren Daten zur Lufttemperatur, zur Niederschlagshöhe und zur potenziellen Landoberflächenverdunstung nach HAUDE an der ca. 10 Kilometer südwestlich des Untersuchungsgebietes gelegenen Messstation Cottbus des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Die Niederschlagsdaten wurden pauschal mit +10 % korrigiert.

Die **Lufttemperatur** an der Station Cottbus lag im Mittel der 30 hydrologischen Jahre von 1991 bis 2020 (Normalperiode) bei +10,0 °C. Das Jahresmittel der Lufttemperatur in der Einzeljahre schwankte zwischen +7,5 °C (1996) und +11,3 °C (2020) (Bild 16).

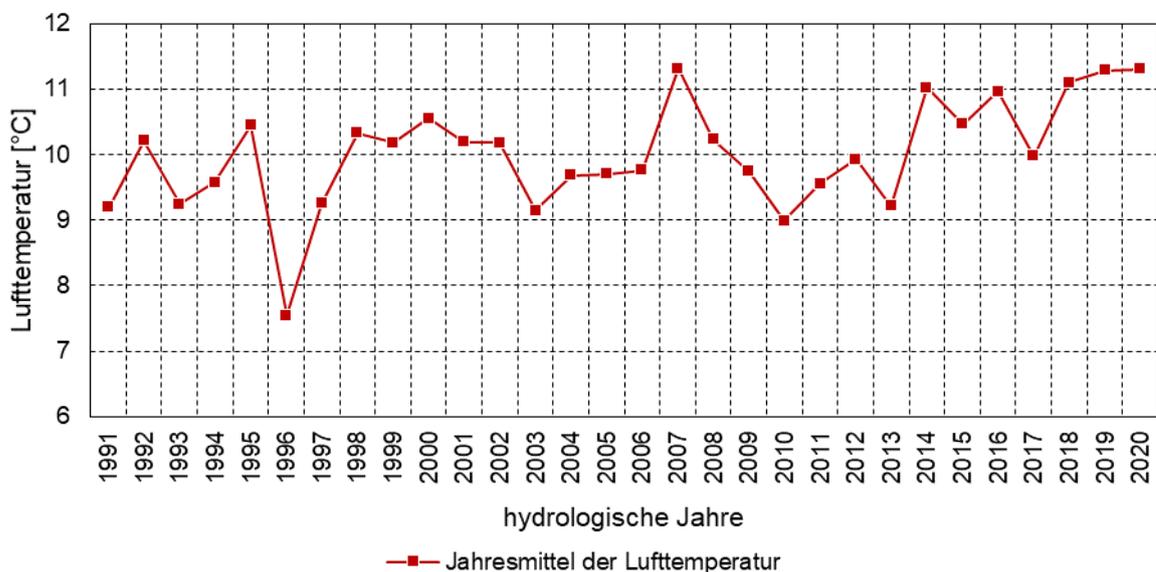


Bild 16: Jahresmittel der Lufttemperatur an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.

Die mittlere jährliche korrigierte **Niederschlagshöhe** an der Station Cottbus lag in den 30 hydrologischen Jahren von 1991 bis 2020 bei 626 mm, wobei die korrigierten Niederschlagssummen der Einzeljahre zwischen 423 mm (2006) und 803 mm (2011) schwankten (Bild 17).

Die mittlere Jahressumme der **potenziellen Landoberflächenverdunstung** nach HAUDE lag an der Station Cottbus in den 30 hydrologischen Jahren von 1991 bis 2020 bei 779 mm. Die Höhe der potenziellen Landoberflächenverdunstung schwankte in den Einzeljahren zwischen 608 mm (1996) und 1.000 mm (2018) (Bild 18). Die potenzielle Landoberflächenverdunstung nach HAUDE ist maßgeblich von der Lufttemperatur abhängig, wobei höhere Lufttemperaturen zu einer höheren Landoberflächenverdunstung führen. Die Dynamik der Lufttemperatur findet sich deshalb in der Dynamik der Landoberflächenverdunstung wieder (vgl. Bild 16 und Bild 18).

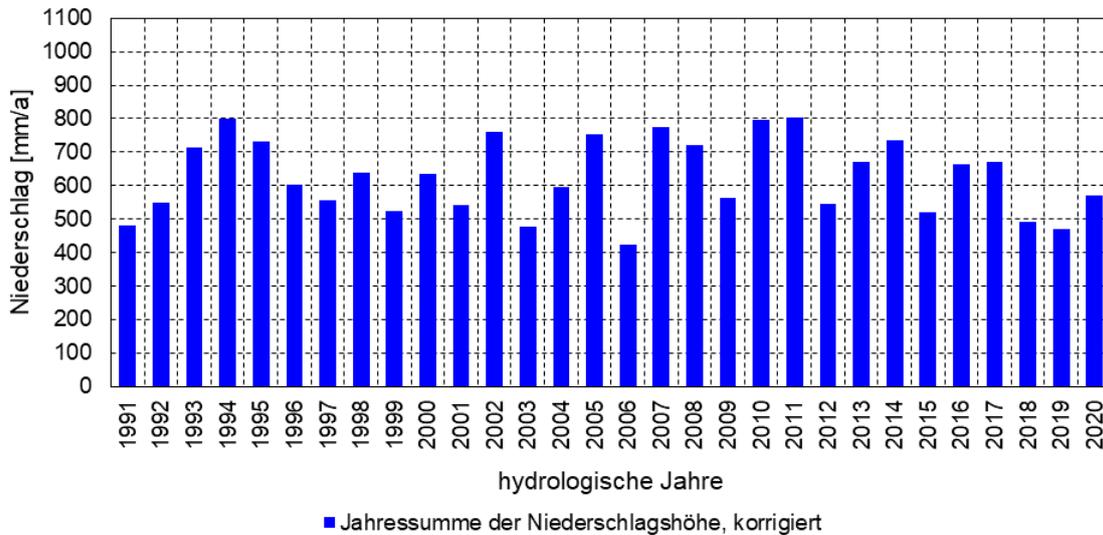


Bild 17: Jahressummen des korrigierten Niederschlags an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.

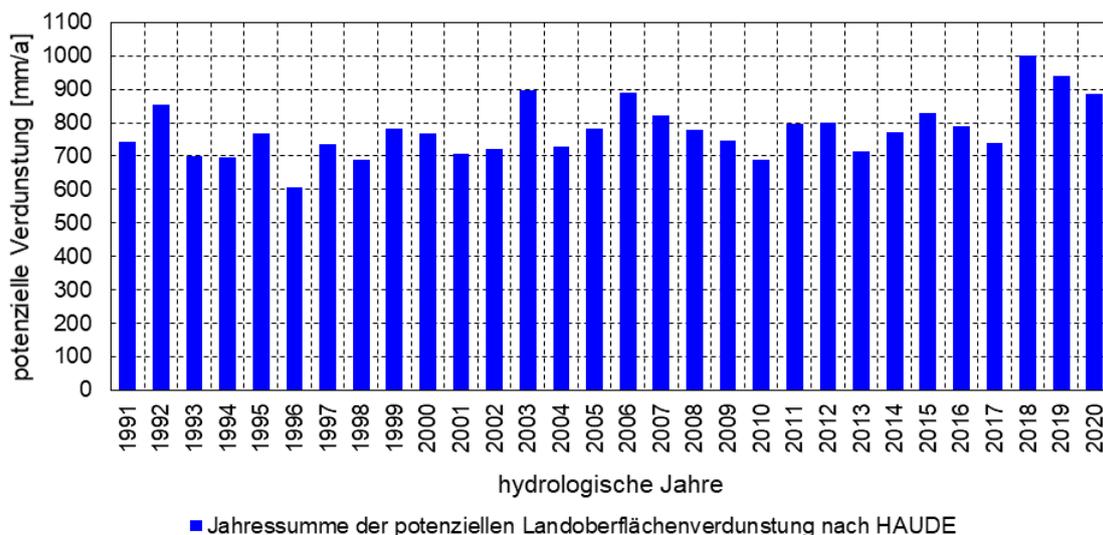


Bild 18: Jahressummen des potenziellen Landoberflächenverdunstung nach HAUDE an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.

Die **klimate Wasserbilanz** (KWB) als Differenz des korrigierten Niederschlags (Bild 17) und der potenziellen Landoberflächenverdunstung (Bild 18) liefert erste Anhaltspunkte zur Charakterisierung des Wasserdargebots im Untersuchungsraum. Die klimatische Wasserbilanz an der Messstation Cottbus ist im Mittel der 30 hydrologischen Jahre von 1991 bis 2020 mit -153 mm defizitär (Tabelle 11). In den hydrologischen Winterhalbjahren ist die klimatische Wasserbilanz überwiegend überschüssig und in den Sommerhalbjahren überwiegend defizitär (Bild 20 und Bild 19). Ausnahmen bilden niederschlagsreiche und kühle Sommerhalbjahre, wie z. B. 2010, sowie niederschlagsarme und warme Winterhalbjahre, wie z. B. 2020 (Bild 19). Für die dreißig hydrologischen Winterhalbjahre wurde ein mittlerer Bilanzüberschuss von +82 mm und für die dreißig hydrologischen Sommerhalbjahre ein mittleres Bilanzdefizit von -235 mm ermittelt (Tabelle 11 und Bild 19).



Tabelle 11: Statistik der klimatischen Wasserbilanz an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre und Halbjahre der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020.

Klimatische Wasserbilanz	Maßeinheit	Hydrologisches Jahr	Hydrologisches Sommerhalbjahr	Hydrologisches Winterhalbjahr
Anzahl	a	30	30	30
Minimum	mm	-507	-564	-23
Mittelwert	mm	-153	-235	+82
Maximum	mm	+107	+32	+268

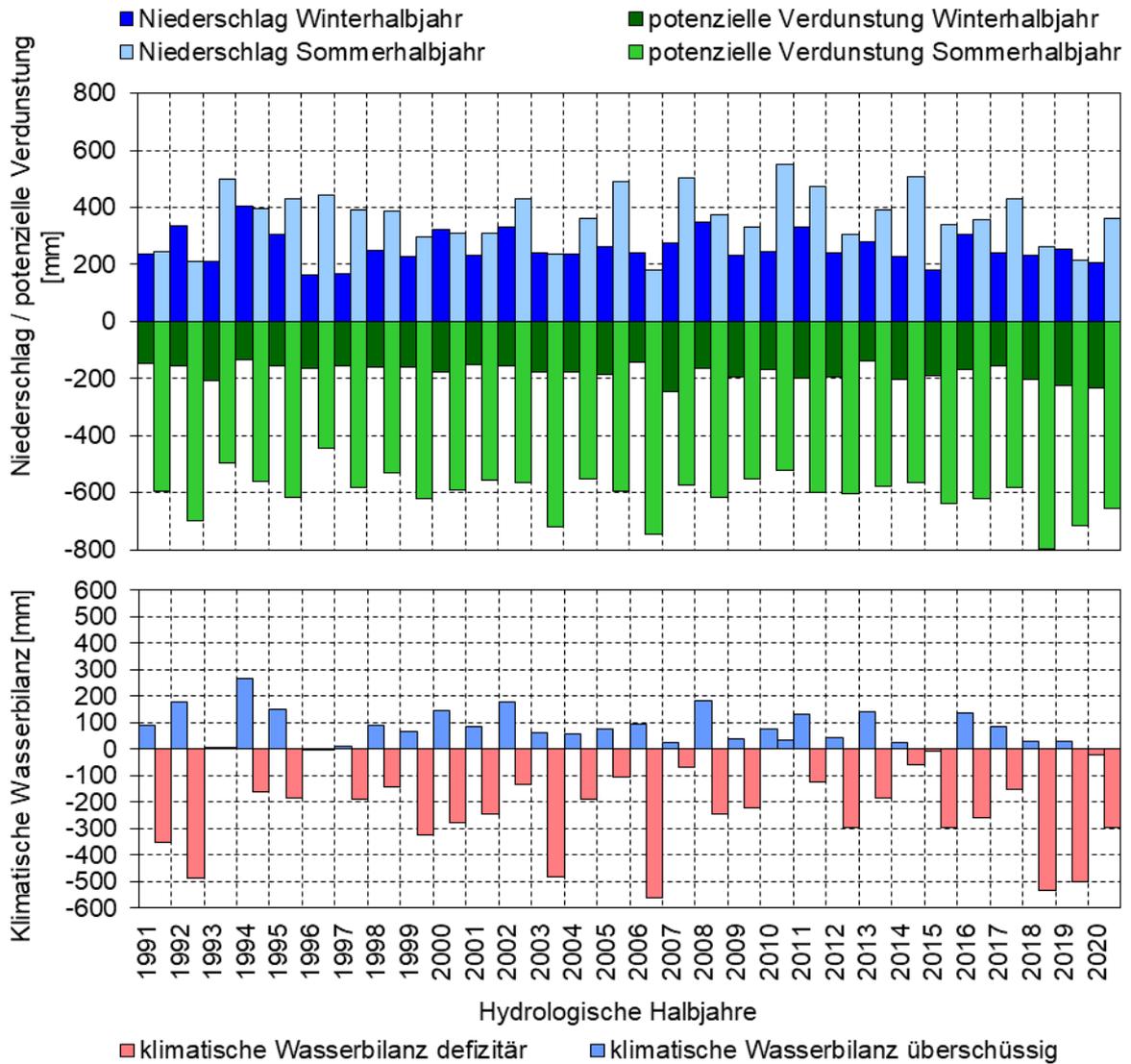


Bild 19: Klimatische Wasserbilanz (unteres Diagramm) als Differenz aus dem korrigierten Niederschlag und der potenziellen Landoberflächenverdunstung nach HAUDE (oberes Diagramm) an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahre der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020.

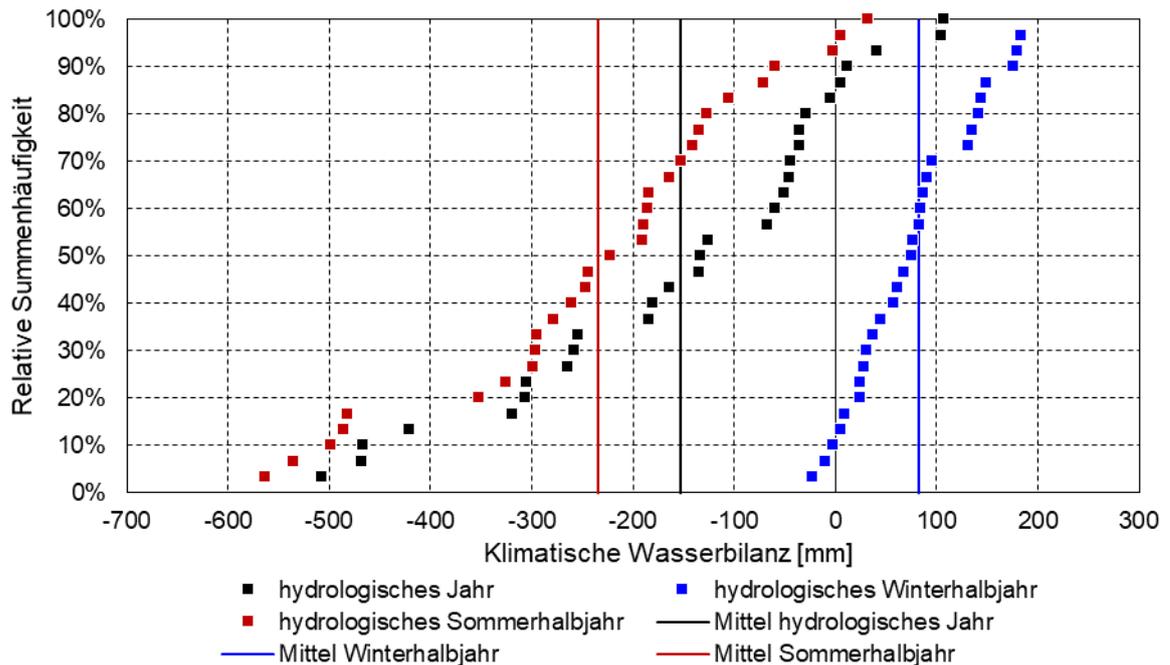


Bild 20: Dauerlinien der klimatischen Wasserbilanz an der Messstation Cottbus für die 30 hydrologischen Jahre und Halbjahre der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020.

3.6.2 Verdunstung

Die für das Untersuchungsgebiet nach dem BAGROV-GLUGLA-Verfahren [ATV-DVWK 2002] berechnete reale Verdunstung E_{Tr} liegt im Mittel der hydrologischen Jahre 1991 bis 2020 bei ca. 550 mm/a. Versiegelte und vegetationslose Flächen weisen die geringsten und die Gewässerflächen die höchsten Verdunstungsraten auf (Bild 21). Die Gewässerverdunstung wurde nach dem DALTON-Ansatz berechnet [DWA 2018]. Für die Standgewässer im Untersuchungsgebiet wurde eine mittlere Gewässertiefe von 1,5 Metern angenommen. Die Gewässerverdunstung im Untersuchungsgebiet liegt im Durchschnitt der 30 hydrologischen Jahre der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020 entsprechend bei rund 800 mm/a.

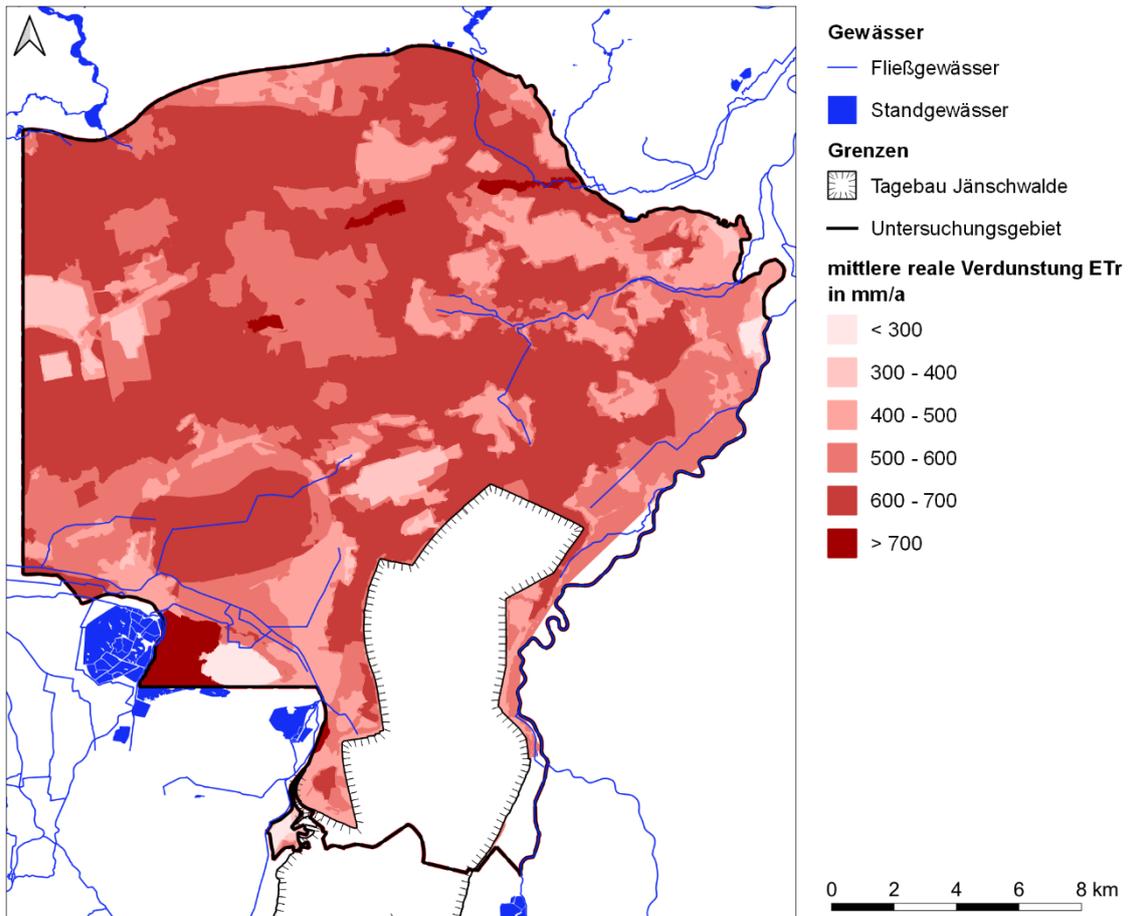


Bild 21: Reale Verdunstung ETr im Untersuchungsgebiet im Mittel der 30 hydrologischen Jahre von 1991 bis 2020.

3.6.3 Grundwasserneubildung

Die nach [ATV-DVWK 2002] berechnete Grundwasserneubildung in den hydrologischen Jahren 1991 bis 2020 ergibt für das Untersuchungsgebiet ein Gebietsmittel von 75 mm/a bzw. 2,4 L/(s·km²). In Bild 22 ist die berechnete Grundwasserneubildung des Untersuchungsgebietes landnutzungsspezifisch dargestellt. Die großen Flächenanteile der Nadelwälder (siehe Bild 13) fallen durch geringe Grundwasserneubildungsraten auf. Gewässerflächen weisen eine Zehrung (rote Färbung) auf.

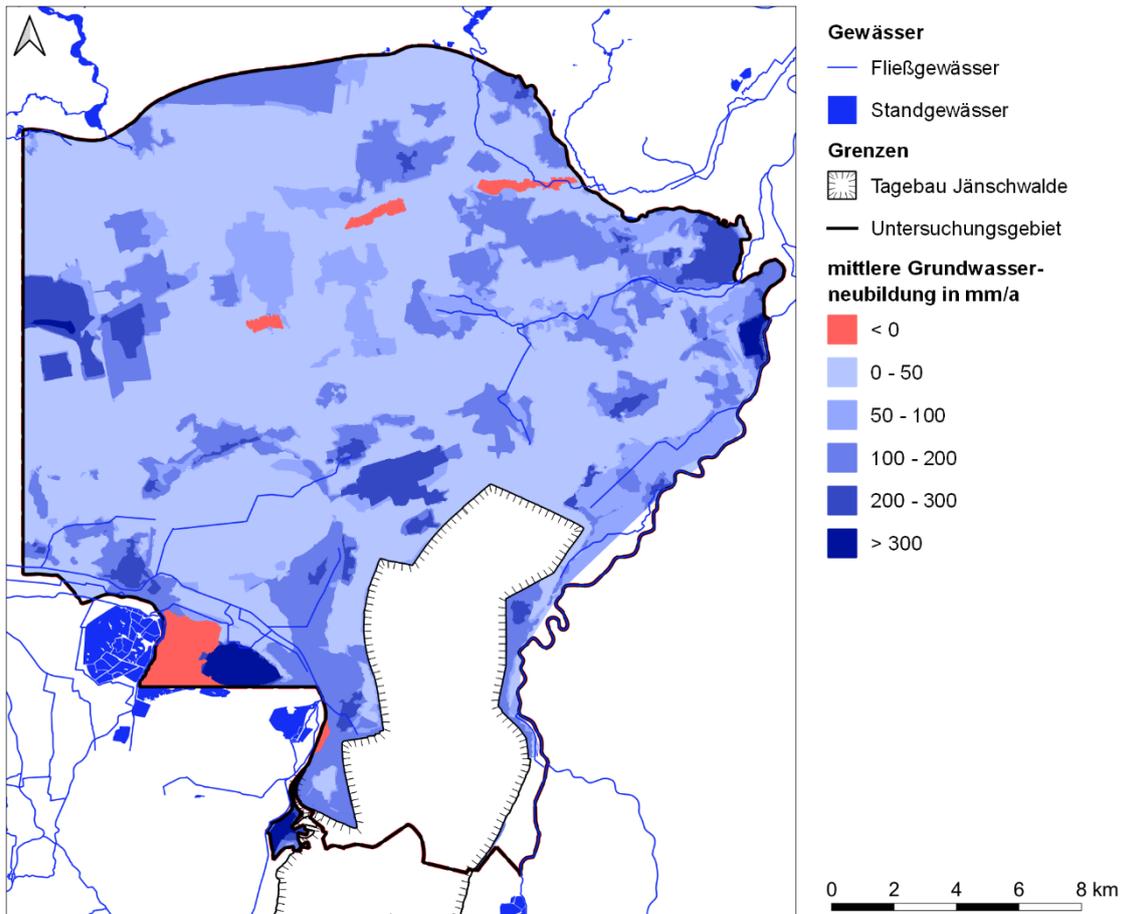


Bild 22: Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet im Mittel der 30 hydrologischen Jahre 1991 bis 2020.

3.6.4 Grundwassergang

3.6.4.1 Vorgehensweise

Durch die Sumpfung im Tagebau Jänschwalde wird der Grundwasserstand in den Messstellen des Untersuchungsgebiet unterschiedlich beeinflusst. Im Folgenden werden die Ganglinien ausgewählter Grundwassermessstellen dargestellt. Die Auswahl der Grundwassermessstellen erfolgte anhand sogenannter Transekte, die jeweils vom Tagebau Jänschwalde nach Norden, Nordwesten und Westen abstrahlen und durch eine unterschiedliche Anzahl von Messstellen belegt sind (Bild 23).

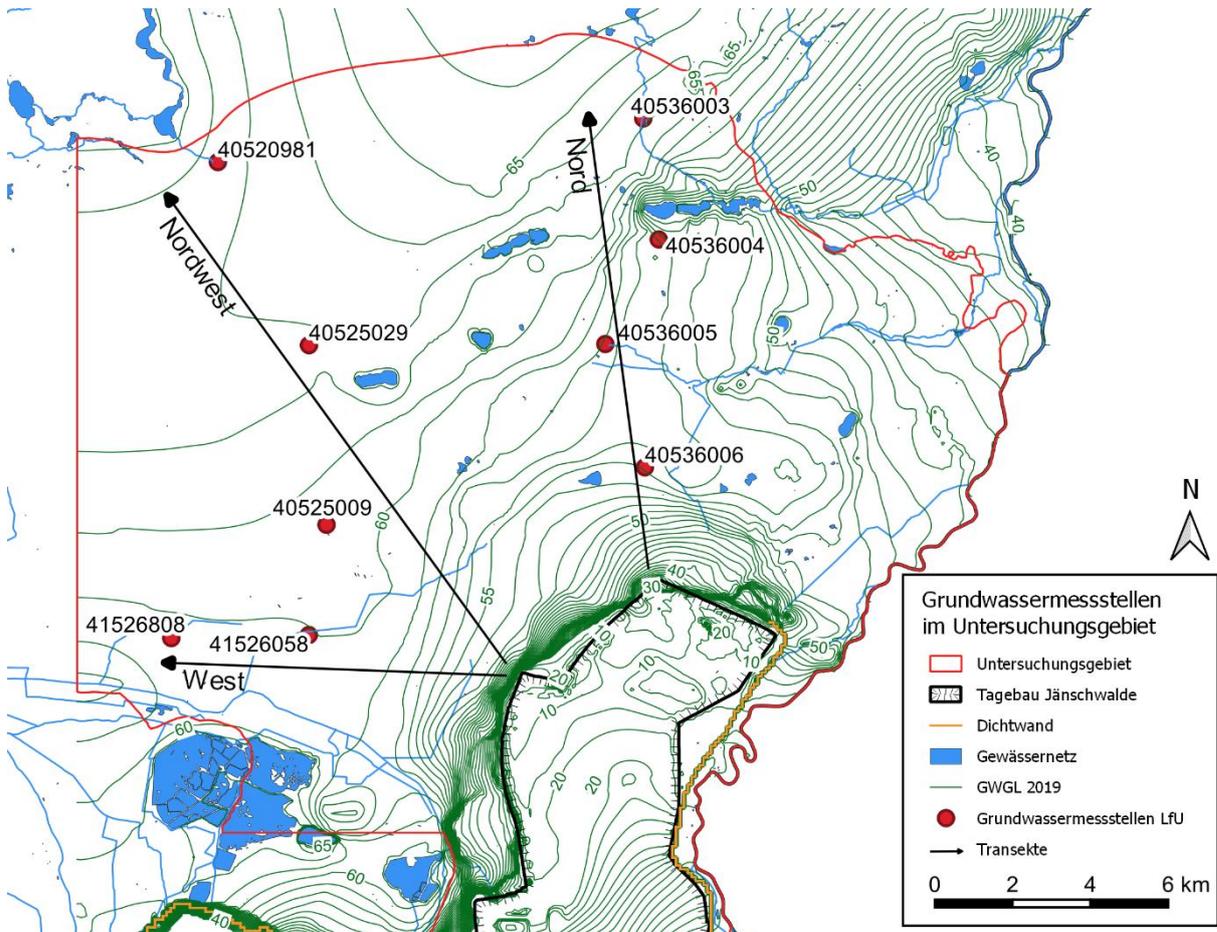


Bild 23: LfU-Grundwassermessstellen des LfU Brandenburg auf drei ausgewählten Transekten vom Tagebau Jänschwalde.

3.6.4.2 Transekt 1 vom Tagebau Jänschwalde nach Norden

Die Ganglinien der vier LfU-Grundwassermessstellen **40536006** (schwarz), **40536005** (grün), **40536004** (rot) und **40536003** (blau) im Transekt 1 nach Norden sind im Bild 24 dargestellt (Tabelle 12). Die Messreihen sind nahezu gleich lang.

Tabelle 12: Grundwassermessstellen im Transekt 1 vom Tagebau Jänschwalde nach Norden.

GWM	Name	GWL	Entfernung vom Tagebau	Datenreihe	kumulative Abnahme in der Reihe
40536006 (schwarz)	Grabko	weitgehend unbedeckter GWL	ca. 3 km	Nov 2000 - Jan 2020	ca. 5 m
40536005 (grün)	Bärenklau	weitgehend bedeckter GWL	ca. 6 km	Nov 2000 - Okt 2020	ca. 3 m
40536004 (rot)	Lübbinchen	weitgehend unbedeckter GWL	ca. 9 km	Nov 1999 - Okt 2020	ca. 2 m
40536003 (blau)	Groß Drewitz	weitgehend bedeckter GWL	ca. 12 km	Jun 2001 - Okt 2020	ca. 2 m

Alle vier Ganglinien zeigen eine Zäsur im Jahr 2001, kurz nach Beginn der Messreihen, und eine weitere im Jahr 2010 durch einen spontanen Anstieg des Grundwasserstandes mit einer individuell unterschiedlichen Amplitude. Beide Jahre, insbesondere

jedoch die hydrologischen Sommerhalbjahre waren durch ein überschüssiges Wasserdargebot gekennzeichnet. Nach den genannten Zäsuren sank jeweils der Grundwasserstand tendenziell.

Während die Ganglinie der Messstelle 40536004 solche von Anfang an nicht aufwies, zeigten die Ganglinien der Grundwassermessstellen 40536003, 40536005 und 40536006 zu Beginn innerjährliche Schwankungen. Diese gingen in den Messstellen 40536005 und 40536006 spätestens nach der zweiten Zäsur verloren. Je tiefer der Grundwasserstand sank, umso geringer wurde der Witterungseinfluss (Tabelle 12).

In der Ganglinie der Grundwassermessstelle 40536003 blieben die witterungsbedingten innerjährlichen Schwankungen bislang über den gesamten Zeitraum erhalten.

Der Grundwasserstand wird in unterschiedlichem Maß vom Witterungsgeschehen, von der naturräumlichen Lage (Hochfläche, Aue), von der Lage bezüglich der Grenzen der unterirdischen Einzugsgebiete, vom Grundwasserflurabstand, von den geologischen Verhältnissen und von der Wirkung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung beeinflusst.

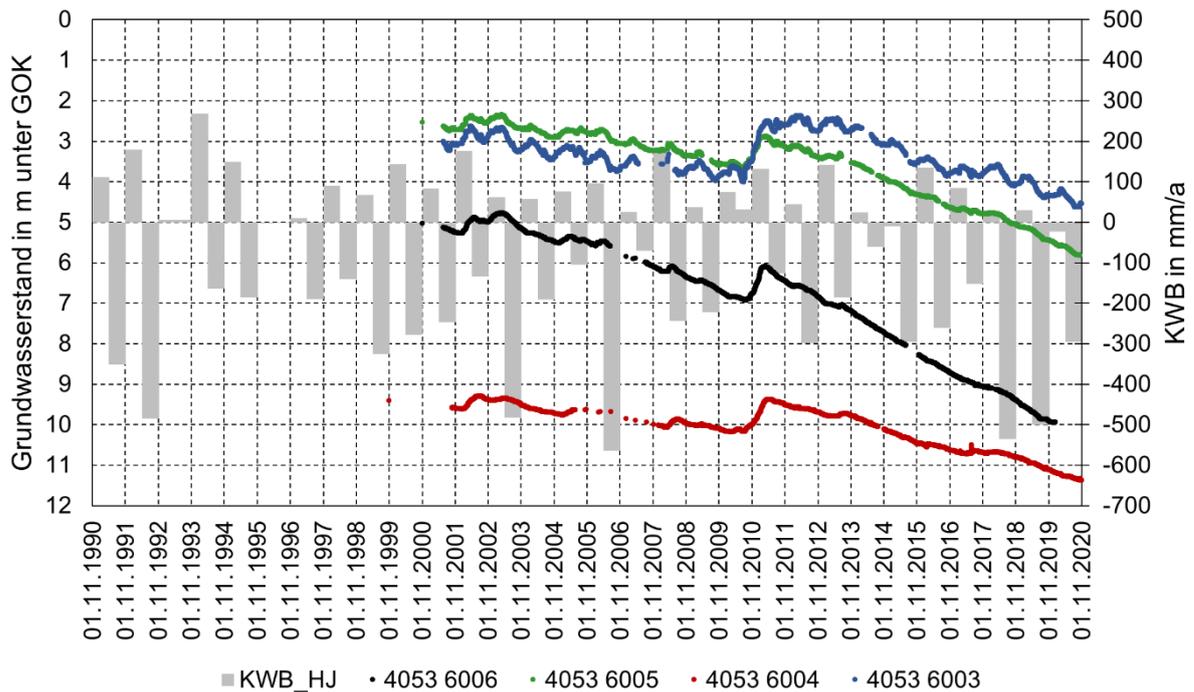


Bild 24: Ganglinien der Grundwassermessstellen 4053 6006 (schwarz), 4053 6005 (grün), 4053 6004 (rot) und 4053 6003 (blau) im Transekt 1 vom Tagebau Jänschwalde nach Norden.

3.6.4.3 Transekt 2 vom Tagebau Jänschwalde nach Nordwesten

Die Ganglinien der LfU-Grundwassermessstellen **40525009** (blau), **40525029** (grün) und **40520981** (rot) des Transekts 2 nach Nordwesten sind im Bild 25 dargestellt (Tabelle 13). Die Messreihen sind unterschiedlich lang.



Tabelle 13: Grundwassermessstellen im Transekt 2 vom Tagebau Jänschwalde nach Nordwesten.

GWM	Name	GWL	Entfernung vom Tagebau	Datenreihe	kumulative Abnahme in der Reihe
40525009 (blau)	Tauer	weitgehend unbedeckter GWL	ca. 6 km	Jun 1997 - Okt 2020	ab Mitte 2018: ca. 2 m
40525029 (grün)	Schönhöhe	weitgehend unbedeckter GWL	ca. 10 km	Dez 1998 - Okt 2020	ca. 2 m
40520981 (rot)	Staakow	weitgehend bedeckter GWL	ca. 16 km	Nov 1990 - Jun 2020	ca. 1 m

Die Ganglinie der tagebaufernen Grundwassermessstelle **40525009** (blau) ist durch eine deutliche innerjährliche Saisonalität gekennzeichnet. Witterungsbedingt fällt vor allem eine Zäsur im Jahr 2010/2011 mit hohem Grundwasserstand auf. Bis 2018 schwankt der Grundwasserstand um ein stabiles Niveau. Ab 2018 sinkt der Grundwasserstand unter Beibehaltung der innerjährlichen Saisonalität deutlich um ca. 2 Meter.

Die Ganglinien der Grundwassermessstellen **40525029** (grün) und **40520981** (rot) haben keine innerjährliche Saisonalität. Sie sind durch Zäsuren in den frühen 1990er Jahren, nach einer Trockenperiode 1990-1993, und durch die markante Zäsur 2010/2011 gekennzeichnet. Durch die zweite Zäsur wird das sukzessive Absinken des Grundwasserstandes unterbrochen. Ab 2018 sinkt der Grundwasserstand auch in diesen beiden Messstellen.

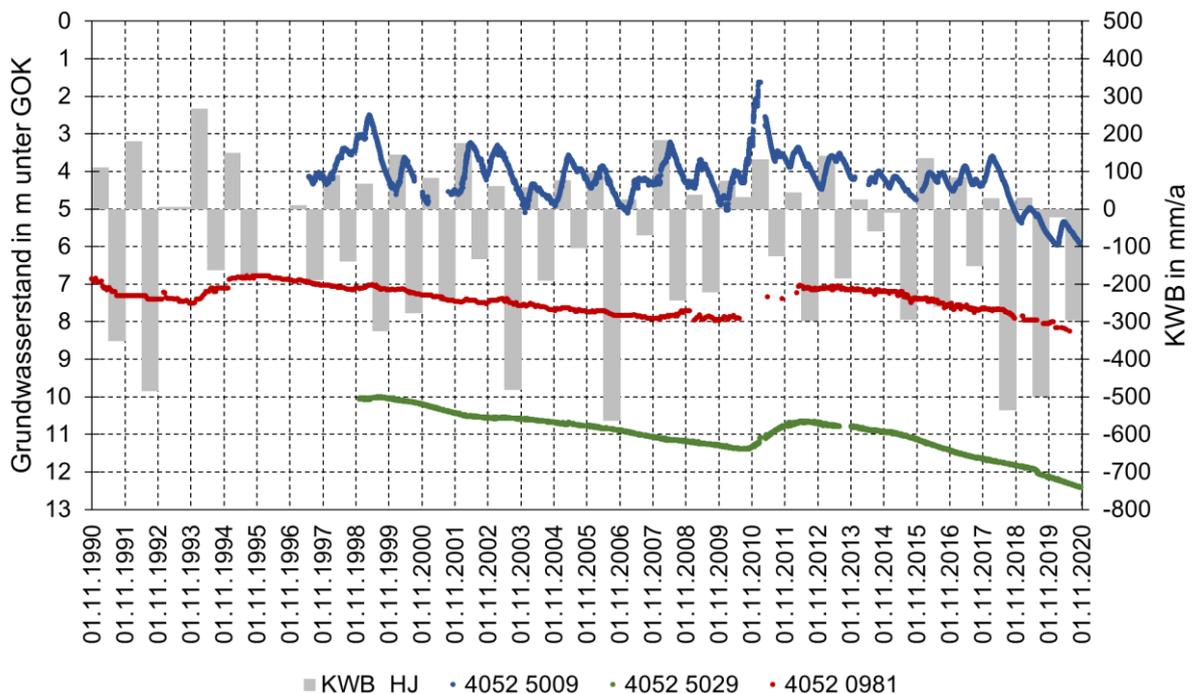


Bild 25: Ganglinien der Grundwassermessstellen 4052 5009 (blau), 4052 5029 (grün) und 4052 0981 (rot) im Transekt 2 vom Tagebau Jänschwalde nach Nordwesten.



3.6.4.4 Transekt 3 vom Tagebau Jänschwalde nach Westen

Die Ganglinien der Grundwassermessstellen des LfU **41526058** (blau) und **41526808** (grün) des Transekts 3 vom Tagebau Jänschwalde nach Westen (Bild 26) sind unterschiedlich lang (Tabelle 14). Die Messreihe der GWM 41526808 (grün) liegt seit 1990 vor, während die Messreihe 41526058 (blau) erst 2012 beginnt. Die Messstellen liegen in den Laßzinswiesen. Beide Messreihen weisen eine jährliche Saisonalität auf, die auf den Witterungseinfluss zurückzuführen sind. In ausgewählten Jahren treten mehrere Höchst- und Tiefststände des Grundwasserspiegels auf. Die bekannten witterungsbedingten Zäsuren sind in den Ganglinien nur schwach ausgeprägt. Die Grundwasserganglinien sind maßgeblich durch die Wasserbewirtschaftung der Laßzinswiesen geprägt. Seit 2018 ist an beiden Ganglinien ein schwacher Trend sinkender Grundwasserstände zu erkennen, der auf die Witterungsverhältnisse zurückgeführt wird.

Tabelle 14: Grundwassermessstellen im Transekt 3 vom Tagebau Jänschwalde nach Westen.

GWM	Name	GWL	Entfernung vom Tagebau	Datenreihe	kumulative Abnahme in der Reihe
41526058 (blau)	Tauer	weitgehend unbedeckter GWL	ca. 6 km	Jun 2012 - Okt 2020	ca. 0,5 m
41526808 (grün)	Turnow	GWL in tieferen quartären und tertiären Schichten	ca. 9 km	Nov 1990 - Okt 2020	ca. 0,5 m

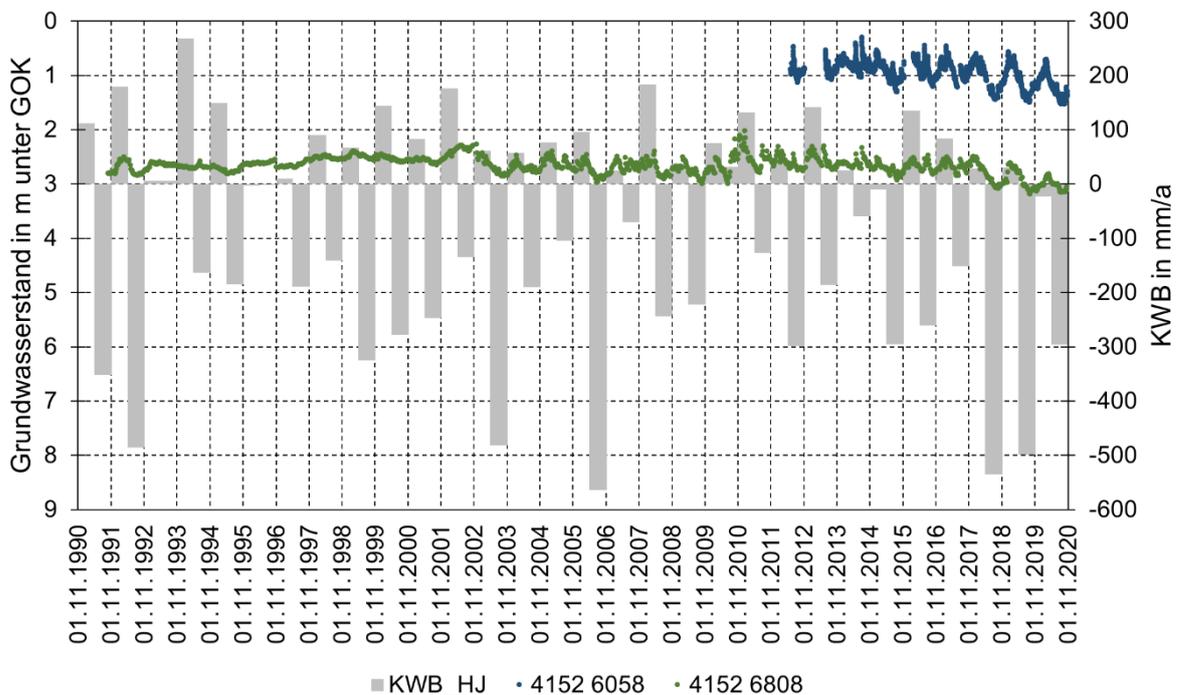


Bild 26: Ganglinien der Grundwassermessstellen 4152 6058 (blau) und 4152 6808 (grün) im Transekt 3 vom Tagebau Jänschwalde nach Westen.

Im Osten des Untersuchungsgebietes ist die tagebaubedingte Grundwasserabsenkung durch die Dichtwand begrenzt (Bild 23).



4 Erkundungsarbeiten

4.1 Teilgebiete

Das Untersuchungsgebiet wurde vom Auftraggeber in acht Teilgebiete untergliedert (Bild 27 und Tabelle 15).

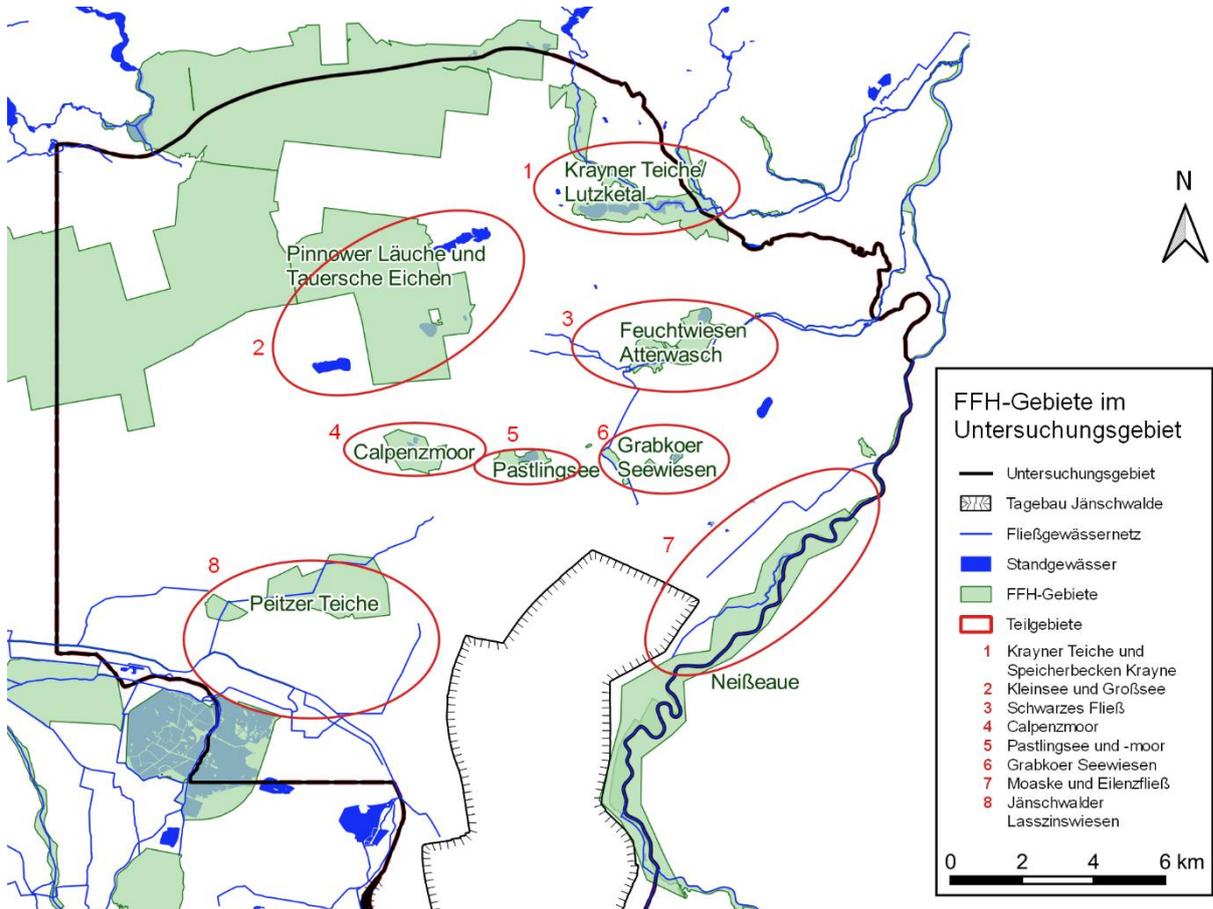


Bild 27: Teilgebiete für die geo- und hydrochemische Erkundung und zugehörige FFH-Gebiete.

Tabelle 15: Teilgebiete für die geo- und hydrochemische Erkundung.

Teilgebiet	Zugehörige FFH-Gebiet	EU-Nr.
(1) Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne	„Krayner Teiche/Lutzketal“	4053-303
(2) Kleinsee und Großsee	„Pinnower Läuche und Tauerse Eichen“	4052-301
(3) Schwarzes Fließ	„Feuchtwiesen Atterwasch“	4053-302
(4) Calpenzmoor	„Calpenzmoor“	4053-301
(5) Pastlingsee und -moor	„Pastlingsee“	4053-304
(6) Grabkoer Seewiesen	„Grabkoer Seewiesen“	4053-305
(7) Moaske und Eilenzfließ	„Neißeau“	4354-301
(8) Jänschwalder Laßzinswiesen	„Peitzer Teiche“	4152-302



4.2 Bohrungen und Grundwassermessstellen

In den acht Teilgebieten wurden 24 Kernbohrungen DN100 mit durchgängiger Linergewinnung niedergebracht (Bild 28). Die Bohrungen wurden von der Bohr- und Brunnenbau Panitz GmbH & Co. KG im Trockenbohrverfahren geteuft. An drei Standorten wurden die Bohrungen mit einem Bohrdurchmesser 219 mm aufgeweitet und zu Grundwassermessstellen DN100 ausgebaut, anschließend entsandet und klargespült. Die Bohrprofile und Ausbauten sind in der Anlage 2 zusammengestellt.

Für jeden Bohrstandort wurde eine repräsentative Grundwassermessstelle recherchiert und nach Möglichkeit beprobt. Einschließlich der drei neuen Messstellen konnte aus 14 Messstellen eine Grundwasserprobe gewonnen werden (Abschnitt 4.3.2).

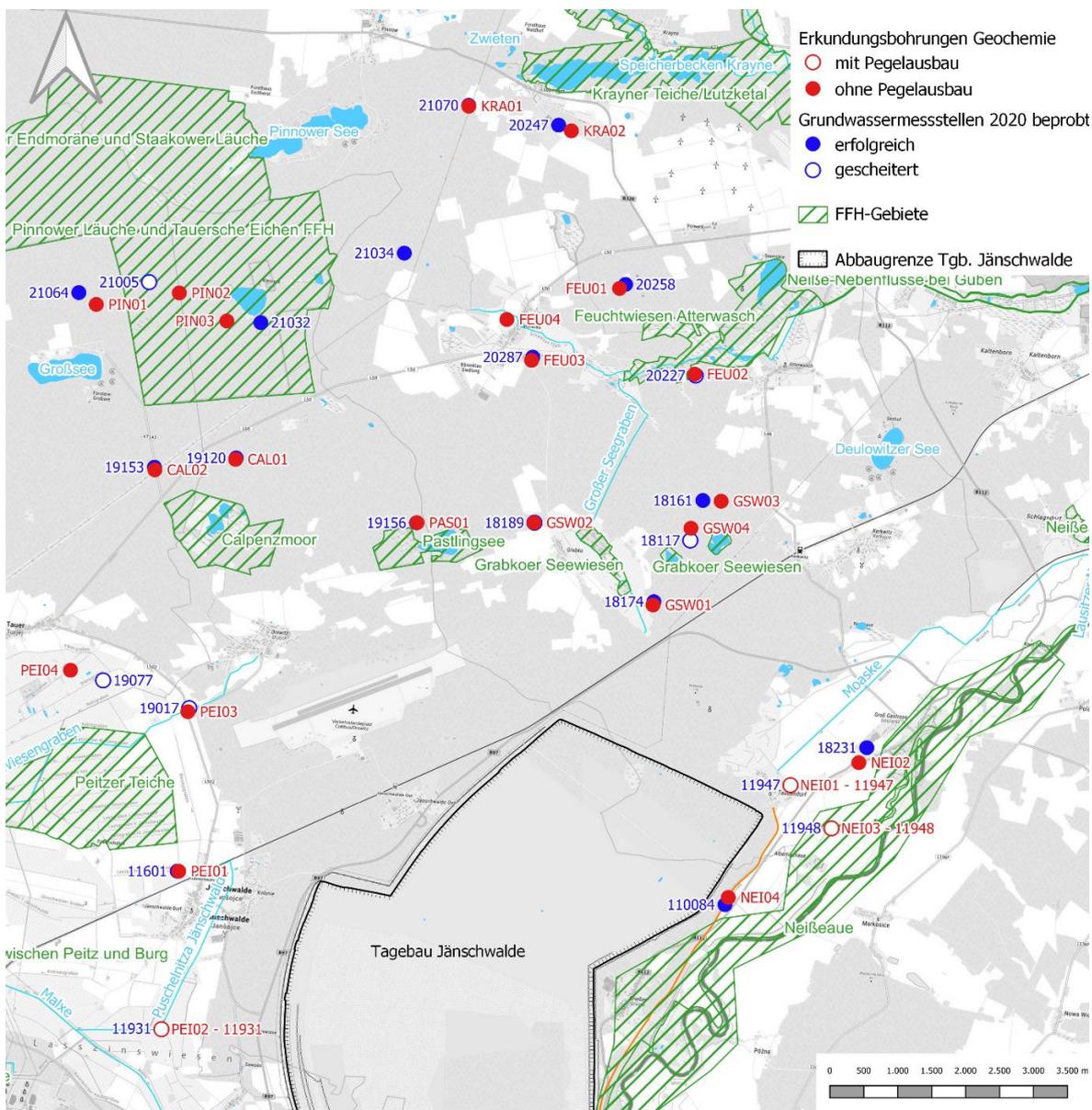


Bild 28: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und beprobten Grundwassermessstellen.



Die Stammdaten der Erkundungsbohrungen sind in der Tabelle 17 zusammengestellt. Die Endteufe der Bohrungen richtete sich nach dem tiefsten abgesenkten Grundwasserstand in der Vergangenheit oder danach, wie er durch die Grundwasserabsenkung in Zukunft noch zu erwarten steht. Die Festlegungen zur Ausbauteufe der Bohrungen erfolgten anhand der Bodenansprache vor Ort. Nach dem Erreichen der Endteufe, die mindestens durch den Anschnitt des Grundwassers definiert war, wurden die Bohrlöcher mit Tonpellets rückverfüllt, um unerwünschte Wechselwirkungen zwischen getrennten Grundwasserleitern auszuschließen.

Tabelle 16: Stammdaten der Bohrstellen.

Teilgebiet	Bohrung	Nr. der GWM	RW	HW	GOK	Grundwasserflurabstand			Bohrteufe
						2020	2033 *)	2100 *)	
						m NHN	m NHN	m NHN	
Krayner Teiche	KRA01	---	5469629	5759499	+70,4	+60,6	+60,5	+63,5	10
	KRA02	---	5471140	5759133	+70,1	+58,7	+55,1	+57,7	15
Kleinsee/ Großsee	PIN01	---	5464142	5756556	+71,0	+61,3	+62,3	+64,2	12
	PIN02	---	5465365	5756726	+70,0	+60,8	+60,8	+64,0	11
	PIN03	---	5466065	5756309	+70,0	+59,8	+60,1	+63,7	11
Schwarzes Fließ	FEU01	---	5471850	5756793	+67,4	+54,9	+53,0	+57,8	17
	FEU02	---	5472957	5755521	+63,6	+54,0	+45,5	+57,0	13
	FEU03	---	5470553	5755726	+61,5	+56,7	+54,5	+59,9	7
	FEU04	---	5470189	5756332	+62,7	+59,3	+54,7	+59,9	8
Calpenzmoor	CAL01	---	5466194	5754256	+72,3	+58,9	+57,5	+62,5	16
	CAL02	---	5465005	5754100	+71,0	+59,7	+58,7	+62,7	15
Pastling See	PAS01	---	5468866	5753315	+69,6	+55,6	+53,0	+61,5	20
Grabkoer Seewiesen	GSW01	---	5472342	5752093	+63,3	+53,0	+47,0	+60,7	17
	GSW02	---	5470592	5753316	+65,7	+55,2	+52,0	+61,1	15
	GSW03	---	5473346	5753634	+62,0	+54,3	+51,5	+59,9	11
	GSW04	---	5472901	5753233	+69,3	+55,2	+51,3	+60,0	18
Auenbereich Eilenzfließ/ Moakse	NEI01	11947	5474366	5749423	+57,0	+38,4	+38,0	+56,5	34
	NEI02	---	5475373	5749752	+55,0	+50,6	+50,2	+54,9	8
	NEI03	11948	5474967	5748781	+57,0	+49,6	+48,3	+54,0	16
	NEI04	---	5473451	5747751	+58,5	+55,9	+55,0	+56,0	16
Jänschwalder Laßzinswiesen	PEI01	---	5465355	5748141	+62,0	+54,5	+56,9	+60,8	8
	PEI02	11931	5465103	5745805	+61,0	+54,8	+56,0	+60,7	12
	PEI03	---	5465491	5750509	+63,4	+55,6	+57,5	+61,1	8
	PEI04	---	5463762	5751125	+61,5	+58,3	+59,7	+61,0	5

*) gemäß geohydraulischer Modellierung mit dem Modell „HGMJawa“

4.3 Probennahme und Analytik

4.3.1 Bohrkerne

Die Aufnahme der Bohrprofile und die Beprobung des Kernmaterials für die geochemische Untersuchung wurden vom Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann durchgeführt. Für die Beprobung wurden die Bereiche ausgewählt, die im Absenkungs- bzw. Wiederanstiegsbereich des Grundwassers liegen. Die Proben wurden im Schlitzverfahren als Mischproben über die jeweilige Schichtmächtigkeit hergestellt. Die Abgrenzung der Schichten erfolgte hauptsächlich nach lithologischen Gesichtspunkten. Der stratigraphiebezogene Probenumfang ist in der Tabelle 17 zusammengefasst.



Tabelle 17: Stratigraphiebezogener Probenumfang der Bohrerkundung.

Standort	Bohrung	Ansatz- höhe m NHN	Geologie / Stratigraphie	Mächtigkeit m	Anzahl Proben
Krayner Teiche	KRA01	+70,4	G124	9,9	4
	KRA02	+70,1	G124 G130	8,5 6,7	- 6
Kleinsee/Großsee	PIN01	+71,0	G124 fW G130	3,8 1,8 6,4	- - 10
	PIN02	+70,0	G124 fW G130	1,8 1,8 6,4	- - 9
	PIN03	+70,0	G124 fW G130	1,5 2,9 5,6	- - 6
Schwarzes Fließ	FEU01	+67,4	G124 G130	6,6 10,0	- 8
	FEU02	+63,6	G124 fW G130	0,8 3,5 13,5	- - 9
	FEU03	+61,5	G124	6,1	7
	FEU04	+62,7	fW G130	3,4 5,0	2 7
Calpenzmoor	CAL01	+72,3	G124 fW G130 G150	1,4 3,0 3,0 8,3	- - - 8
	CAL02	+71,0	G124 G130 G150	5,2 5,1 4,5	- 4 5
Pastling See	PAS01	+69,6	G124 G150	4,6 15,2	- 16
Grabkoer Seewiesen	GSW01		G130 glS1n G150	13,4 0,6 2,6	12 1 3
	GSW02		G130 glS1n	12,6 2,0	8 2
	GSW03		G130 S2-GM G150 glS1n	6,9 0,7 0,3 3,0	5 1 1 3
	GSW04	+69,3	G130	17,4	9
Auenbereich Eilenzfließ/Moakse	NEI01	+57,0	G150	33,7	28
	NEI02	+55,0	G150	7,5	8
	NEI03	+57,0	G150	15,2	17
	NEI04	+58,5	G140 glS1n G150	0,6 0,9 14,6	- - 26
Jänschwalder Laßzinswiesen	PEI01	+62,0	G122	6,9	8
	PEI02	+61,0	G122	11,6	11
	PEI03	+63,4	G122 G150	4,5 1,8	7 1
	PEI04	+61,5	G122	4,3	10



Die Proben wurden luftdicht verpackt, arbeitstäglich an die SYNLAB Umweltinstitut LAG GmbH in Schwarze Pumpe übergeben und dort bis zur analytischen Untersuchung tiefgekühlt aufbewahrt.

An den Proben wurden Feststoffuntersuchungen gemäß der Tabelle 18 durchgeführt. Die Bestimmung der Schwefelbindungsformen erfolgte nur an den Proben, die einen Gesamtschwefelgehalt ≥ 300 ppm bzw. $\geq 0,03$ M% aufwiesen.

Tabelle 18: Laboranalytische Untersuchungen der Bohrproben.

Kennwert	Kürzel	Verfahren	Einheit	Bestimmungsgrenze	Bedingung
Feststoff					
Trockenrückstand	TR	DIN ISO 11465 gravimetrisch	Masse-%	0,1	
Glühverlust	GV	DIN EN 18128 gravimetrisch	Masse-% TR	0,1	
Gesamtkohlenstoff	TC	DIN EN 13137 DIN ISO 10694 IR-Spektroskopie	Masse-% TR	0,1	
Organischer Kohlenstoff	TOC	DIN EN 13137 DIN ISO 10694 IR-Spektroskopie	Masse-% TR	0,1	
Anorganischer Kohlenstoff	TIC	DIN ISO 10694 Rechnerisch: TIC = TC - TOC	Masse-% TR	0,1	
Gesamtschwefel	S _{ges}	DIN EN ISO 11885 ICP-OES nach Königswasseraufschluss DIN 51724 T3	mg/kg TR	5,0	
			Masse-% TR	0,03	
Disulfidschwefel	S _{dis}	DIN 51724 T2 CRS, iodometrische Titration	Masse-% TR	0,01	S _{ges} > 0,03 M%
Sulfatschwefel	S _{sulf}	DIN 51724 T2 gravimetrisch	Masse-% TR	0,01	S _{ges} > 0,03 M%
organisch gebundener Schwefel	S _{org}	DIN 51724 T2 rechnerisch	Masse-% TR	0,01	S _{ges} > 0,03 M%
Calciumkarbonat	CaCO ₃	DIN ISO 10693 gasvolumetrisch	g/kg TR	0,1	
Effektive Kationenaustauschkapazität	KAK _{eff}	DIN EN ISO 11260	meq/kg		
Austauschlösung					
pH-Wert	pH	DIN 38404	---	---	
Natrium	Na	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,5	
Kalium	K	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,5	
Calcium	Ca	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,01	
Magnesium	Mg	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,01	
Strontium	Sr	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,01	
Ammonium-Stickstoff	NH ₄ -N	DIN EN 11732	mg/L	0,05	
Eisen	Fe	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,01	
Aluminium	Al	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,01	
Mangan	Mn	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,002	
Rücktauschlösung					
Barium	Ba	DIN EN ISO 11885	mg/L	0,5	



Der Vergleich zwischen den unabhängig bestimmten Werten der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) einmal anhand der Austauschlösung und einmal anhand der Rücktauschlösung sind als Gütekriterium dieser Untersuchungsmethode geeignet.

4.3.2 Grundwasser

Die Beprobung der Grundwassermessstellen erfolgte durch die Ingenieurbüro für Wasser und Boden GmbH Possendorf im Zeitraum vom 14.12. bis 17.12.2020. Die Grundwasserprobennahme erfolgte unter Beachtung der Regeln der Technik mit einem Steigrohrsystem und einer Unterwassermotorpumpe vom Typ Grundfos MP1. Diese Pumpentechnik ist geeignet, auch aus DN50-Grundwassermessstellen Wasserproben zu gewinnen. Vor dem Einbau der Pumpentechnik wurden die DN50-Grundwassermessstellen mit einem Dummy befahren, um die Gängigkeit der Messstelle zu prüfen. Der Dummy besitzt die Abmessungen der Probennahmepumpe.

In der Tabelle 20 sind die Stammdaten der für die Beprobung vorgesehenen Grundwassermessstellen aufgelistet. An 14 Messstellen konnte eine Grundwasserprobe entnommen werden. An sechs Messstellen scheiterte die Probennahme aus technischen Gründen. An den Messstellen 20287(150), 19156(150), 18231(100) und 11601(150) wurde keine Probennahme durchgeführt, da hier bereits aktuelle Daten aus dem Grundwassergütemonitoring der LE-B [IWB 2020] bzw. aus dem „Hydrologischen Monitoring im Bereich des Schwarzes Fließes“ [gIR 2020] vorlagen.

Tabelle 19: Stammdaten der Grundwassermessstellen.

Standort	Bohrung	Messstelle	GWL	RW	HW	ROK	FiOK	FiUK	Sohle	IDM	Probe
						m NHN	m NHN	m NHN	m NHN	mm	
Krayner Teiche	KRA01	21070	150	5469628	5759511	+71,3	+55,4	+52,4	+50,4	50	5
	KRA02	20247	130	5470952	5759218	+71,3	+55,5	+53,5	+53,4	50	4
Kleinsee/ Großsee	PIN01	21064	150	5463885	5756731	+72,4	+56,5	+53,5	+51,5	50	1
	PIN02	21005	120	5464920	5756887	+71,6	+63,2	+61,6	+60,6	50	gescheitert
	PIN03	21032	100	5466565	5756285	+70,1	+59,1	+56,1	+54,1	50	2
Schwarzes Fließ	FEU01	20258	150	5471938	5756853	+68,3	+39,4	+37,4	+36,4	50	6
	FEU02	20227	120	5472970	5755500	+64,1	+52,6	+45,6	+43,6	50	gescheitert
	FEU03	20287	150	5470571	5755773	+62,6	+49,5	+47,5	+46,5	50	[gIR 2020]
	FEU04	21034	100	5468679	5757317	+64,4	+54,6	+52,6	+52,6	50	3
Calpenzmoor	CAL01	19120	122	5466202	5754276	+73,4	+52,3	+50,3	+49,3	50	11
	CAL02	19153	100	5464998	5754139	+71,3	+55,2	+52,2	+50,2	50	10
Pastlingsee	PAS01	19156	150	5468859	5753314	+70,8	+56,6	+52,6	+50,6	100	[IWB 2020]
Grabkoer Seewiesen	GSW01	18147	150	5472355	5752142	+64,1	+47,3	+44,3	+43,3	50	14
	GSW02	18189	130	5470595	5753315	+66,7	+57,7	+55,7	+55,6	50	gescheitert
	GSW03	18161	100	5473077	5753645	+63,1	+47,0	+44,0	+42,0	50	12
	GSW04	18117	150	5472891	5753052	+70,0	+59,1	+56,1	+54,1	50	gescheitert
Aubereich Eilenzfließ/ Moakse	NEI01	11947	150	5474366	5749423	+57,5	+25,5	+23,5	+22,5	100	7
	NEI02	18231	100	5475491	5749974	+56,9	+50,4	+47,4	+45,4	50	[IWB 2020]
	NEI03	11948	150	5474967	5748781	+56,3	+42,2	+40,2	+39,2	100	8
	NEI04	110084	100	5473402	5747644	+59,7	+50,0	+48,0	+47,0	50	13
Jänschwalder Laßzinswiesen	PEI01	11601	150	5465334	5748142	+62,6	+42,7	+39,7	+39,7	100	[IWB 2020]
	PEI02	11931	122	5465103	5745805	+62,0	+52,1	+50,1	+49,1	100	9
	PEI03	19017	150	5465511	5750562	+63,4	+29,4	+26,4	+23,4	50	gescheitert
	PEI04	19077	100	5464243	5750974	+62,3	+60,3	+56,3	k.A.	50	gescheitert



Die methodischen Regelwerke, z. B. [DWA 2011], gehen davon aus, dass für die Gewinnung einer repräsentativen Grundwasserprobe mindestens einmal das gesamte Filtervolumen der Messstelle (Wasservolumen in der Messstelle + Ringraum des Filterbereiches) ausgetauscht werden muss, wobei als Bezugszeitpunkt die Einstellung quasistationärer Verhältnisse beim Abpumpvorgang in der Grundwassermessstelle gilt. Die Ermittlung des Filtervolumens erfolgt anhand der technischen Daten der Grundwassermessstellen (Bohrdurchmesser und Filterlänge).

Neben dem hydraulischen Abbruchkriterium als notwendige Bedingung wird ein hydrochemisches Abbruchkriterium als hinreichende Bedingung beachtet. Dazu werden während des Abpumpvorgangs in einer Durchflussmesszelle die Grundwassertemperatur, der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit sowie der Sauerstoffkonzentration mittels entsprechender Sensoren kontinuierlich gemessen und digital aufgezeichnet. In Messstellen mit $DN \geq 100$ wird zusätzlich der Wasserstand kontinuierlich gemessen. Die gleichen Milieukennwerte sowie zusätzlich das Redoxpotential werden abschließend vor Ort an der entnommenen Grundwasserprobe gemessen (Tabelle 19).

Tabelle 20: Analytikprogramm für die Grundwasseruntersuchung.

Kennwert	Einheit	Besonderheiten	Nachweisverfahren	Bestimmungsgrenze
Vor-Ort				
Temperatur	°C	WTW Multiline P4	DIN 38404-C4	
pH-Wert	-	WTW Multiline P4	DIN 38404-C5	
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	WTW Multiline P4	DIN EN ISO 27888 (C8)	
Sauerstoff	mg/L	WTW Oxi 196	DIN EN 25814 (G22)	
Redoxpotential	mV	WTW pH 323 - A	DIN 38404-C6	
Labor				
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm		DIN EN ISO 27888 (C8)	
pH-Wert	-		DIN 38404-C5	
Alkalinität	mmol/L	K _{S4,3} und/oder K _{S8,2}	DIN 38409-H7	0,01
Acidität	mmol/L	K _{B4,3} und/oder K _{B8,2}	DIN 38409-H7	0,01
TIC	mg/L		DIN EN 1484 (H3)	0,5
DOC	mg/L		DIN EN 1484 (H3)	0,5
Natrium	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	
Kalium	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	1
Calcium	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	
Magnesium	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	
Eisen-gesamt	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,1
Eisen-gelöst	mg/L	0,45 µm Feinfiltration	DIN EN ISO 11885 (E22)	0,1
Eisen(II)-gelöst	mg/L	0,45 µm Feinfiltration	DIN 38406-E1	0,1
Mangan	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,001
Aluminium	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,01
Silizium	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,02
Ammonium-N	mg/L		DIN EN 11732 (E23)	0,05
Nitrat-N	mg/L		DIN EN ISO 10304-1 (D19)	0,05
Nitrit-N	mg/L		DIN EN 26777	0,01
Phosphor-gesamt	mg/L		DIN EN ISO 6878 (D11)	0,01
Chlorid	mg/L		DIN EN ISO 10304-1 (D19)	
Sulfat	mg/L		DIN EN ISO 10304-1 (D19)	1
Arsen	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,01
Kobalt	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,001
Nickel	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,005
Zink	mg/L		DIN EN ISO 11885 (E22)	0,001

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne

5.1.1 Übersicht

Das Teilgebiet „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“ (Kürzel: KRA) umfasst das Grano-Buderoser Mühlenfließ, das im Talweg einer postglazial entstandenen Rinne verläuft, sowie dessen nördlichen Zufluss „Lutzke“, die Krayner Teiche und das Speicherbecken Krayne (Bild 29).

Um die genannten Gewässer erstreckt sich das FFH-Gebiet „Krayner Teiche/Lutzketal“. Es liegt ca. 10 Kilometer nördlich des Tagebaus Jänschwalde und hat eine Fläche von 545 Hektar. Im Süden reicht das FFH-Gebiet bis zur Ortslage Lübbinchen und im Osten bis zur Ortslage Grano, wo die Lutzke in das Grano-Buderoser Mühlenfließ mündet. Nahe der Ortslage Krayne, im Zentrum dieses FFH-Gebietes, mündet das Grano-Buderoser Mühlenfließ in das Speicherbecken Krayne.

In diesem Teilgebiet liegen die Grundwassermessstellen 21070(150) und 20247(130), die im Jahr 2020 beprobt wurden (Abschnitt 4.3.2). In der Nähe dieser Messstellen wurden die geochemischen Erkundungsbohrungen KRA01 westlich und KRA02 südlich der Ortslage Lübbinchen geteuft (Bild 29).

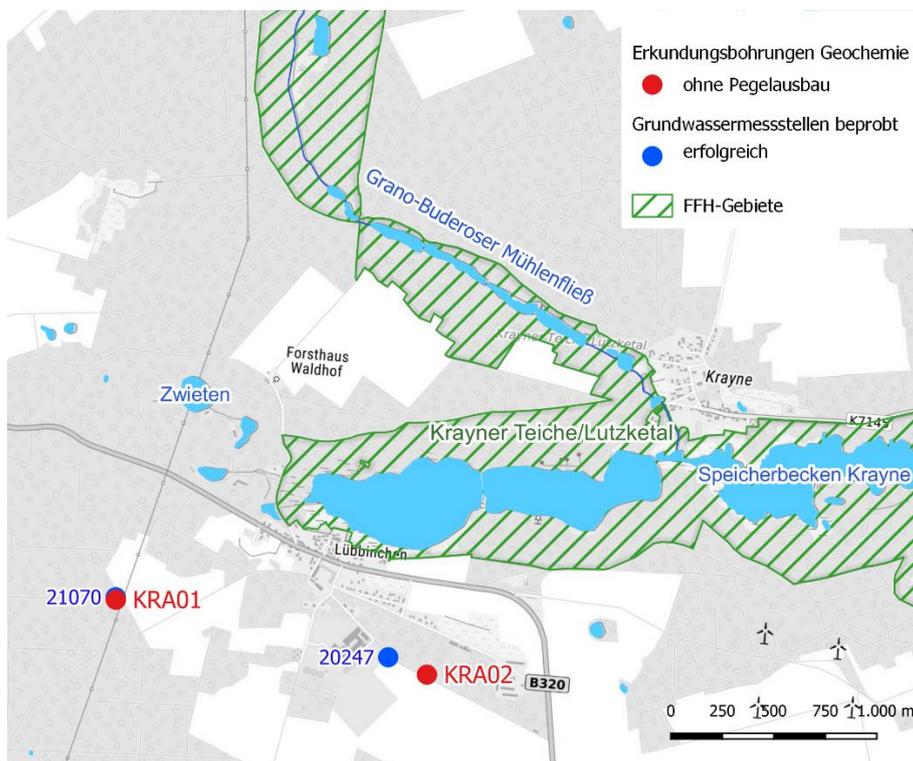


Bild 29: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen, der Grundwassermessstellen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.



5.1.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter

In den Bohrungen KRA01 und KRA02 wurden flurnah die Fein- bis Mittelsande des G124 aufgeschlossen. In der Bohrung KRA01 stand der G124 über die gesamte Teufe bis ca. 10 m u. GOK an. In der tieferen Bohrung KRA02 folgten ab 9,0 m u. GOK feinsandige bis schluffige Mittelsande des G130. Aus der Bohrung KRA01 wurden vier Proben des G124 und aus der Bohrung KRA02 sechs Proben des G130 zur geochemischen Untersuchung entnommen. Die Sande des G124 wurden in der Bohrung KRA02 nicht untersucht, da sie vor- und nachbergbaulich über dem Grundwasserspiegel liegen.

Die Sande des G124 und G130 sind schwefel- und karbonatarm. Der stratigraphiebezogene mittlere Gesamtschwefelgehalt beträgt <30 ppm. Unter der Annahme, dass davon 75 % sulfidisch gebunden sind, liegt der mittlere Pyritgehalt des G124 und G130 bei rund 0,004 M%. Der Calciumkarbonatgehalt (Calcit) lag in allen Proben unter der Bestimmungsgrenze von 100 ppm bzw. 0,01 M%. Für die weiterführenden Berechnungen wird die halbe Bestimmungsgrenze 0,005 M% verwendet (Tabelle 21).

Tabelle 21: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit	Gesamt-schwefel	Disulfid-schwefel	Sulfat-schwefel	Pyrit	Calcit
			beprob/gesamt	ppm	ppm	ppm	M%	M%
			m					
KRA01	G124	4	3,0 / 9,9	26,4	19,8	6,6	0,004	0,005
KRA02	G124	---	--- / 8,5	---	---	---	---	---
	G130	6	6,7 / 6,7	27,6	20,7	6,9	0,004	0,005

5.1.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Aus den mächtigkeitsgewichteten Mittelwerten von Pyrit und Calcit berechnet sich das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) etwa zu 2:1 (Tabelle 22). Die oberen Grundwasserleiter G124 und G130 am Standort der Krayner Teiche werden damit gemäß der Tabelle 2 in Abschnitt 2.1.3 als potentiell versauerungsdisponiert eingeschätzt. Da die Einschätzung jeweils auf der Grundlage der Bestimmungsgrenzen beider Komponenten getroffen wurde, ist sie als unsicher zu bewerten.

Tabelle 22: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.

Bohrung	Grundwasserleiter (Stratigraphie-Schlüssel)	Calcit	Pyrit	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		CaCO ₃	FeS ₂	
		mmol/kg	mmol/kg	
KRA01	G124 (1951)	0,5	0,31	2 : 1
KRA02	G130 (1990)	0,5	0,33	2 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).

5.1.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

In den von der Grundwasserabsenkung betroffenen quartären Grundwasserleitern ist der Kationenaustauscher neben dem Calciumkarbonat der wesentliche Puffer. In den Bohrungen KRA01 und KRA02 wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) an jeweils vier Proben bestimmt (Tabelle 23).

Tabelle 23: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen KRA01 und KRA02 im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK_{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK	---	meq/kg	---	---	meq/kg
KRA01	G124	1	7,0 - 8,0	SM"SF	6,3	96 %	4 %	≤1,0
		2	8,0 - 9,0	SM"SF	7,2	93 %	7 %	≤1,0
		3	9,0 - 9,4	SM"SF	7,1	91 %	9 %	≤1,0
		4	9,4 - 10,0	SM"U	7,9	87 %	13 %	≤1,0
KRA02	G130	1	9,0 - 10,0	SM"SF	11,8	85 %	15 %	≤1,0
		2/3	10,0 - 12,0	SM"SF	14,5	95 %	5 %	≤1,0
		4	12,0 - 13,4	SM"SF	15,1	96 %	4 %	≤1,0
		5/6	13,4 - 15,0	SM"SF	6,3	94 %	6 %	≤1,0

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in der Bohrung **KRA01** an den Sanden des G124 mit 6 bis 8 meq/kg bestimmt (Bild 32 links und Tabelle 23). Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 30 rechts und Tabelle 24). Die Alkalimetalle belegen mit ca. 40 % einen ungewöhnlich hohen Anteil des Austauschers. Die hydrolytischen Kationen belegen < 15 % des Austauschers, wobei die hydrolytische Acidität zur Tiefe leicht zunimmt. Die hydrolytische Acidität wird von Aluminium dominiert.

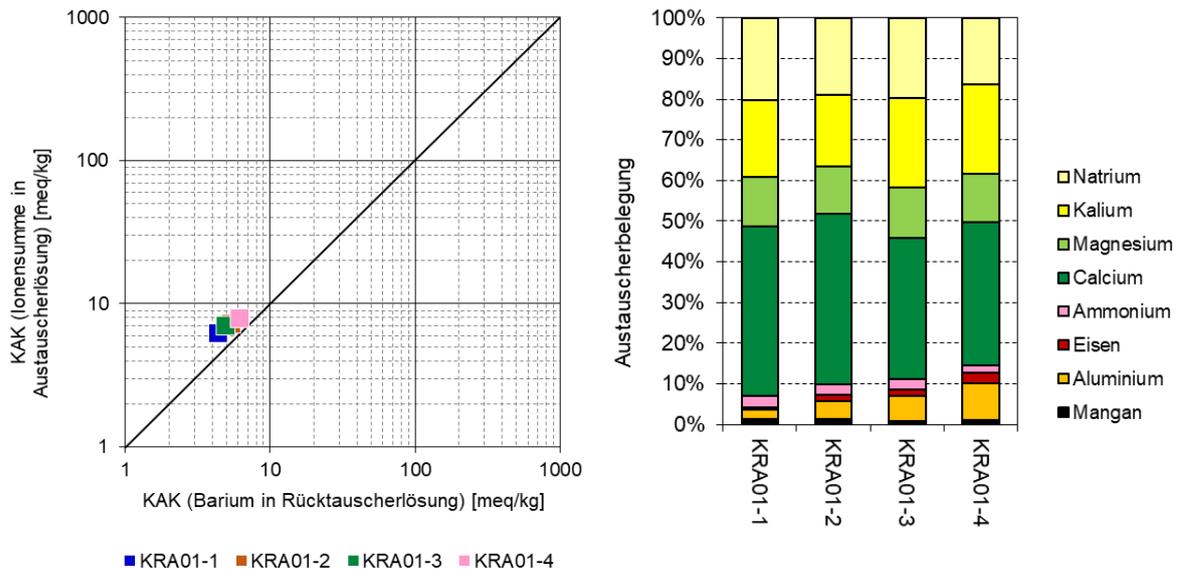


Bild 30: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G124 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G124 in der Bohrung KRA01 (rechts).

In der Bohrung **KRA02** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) an den Sanden des G130 zwischen 6 und 15 meq/kg bestimmt (Bild 31 links und Tabelle 23). Die Austauscherplätze sind dominant mit Alkalien und Endalkalien belegt (Bild 31 rechts und Tabelle 23). Die Austauscherplätze sind in drei von vier Proben vornehmlich mit Erdalkalien und in einer Probe dominant mit Alkalien belegt. Der Anteil der Alkalimetalle ist ungewöhnlich hoch. Die hydrolytischen Kationen Eisen, Aluminium und Mangan belegen 4 % bis 15 % der Austauscherplätze.

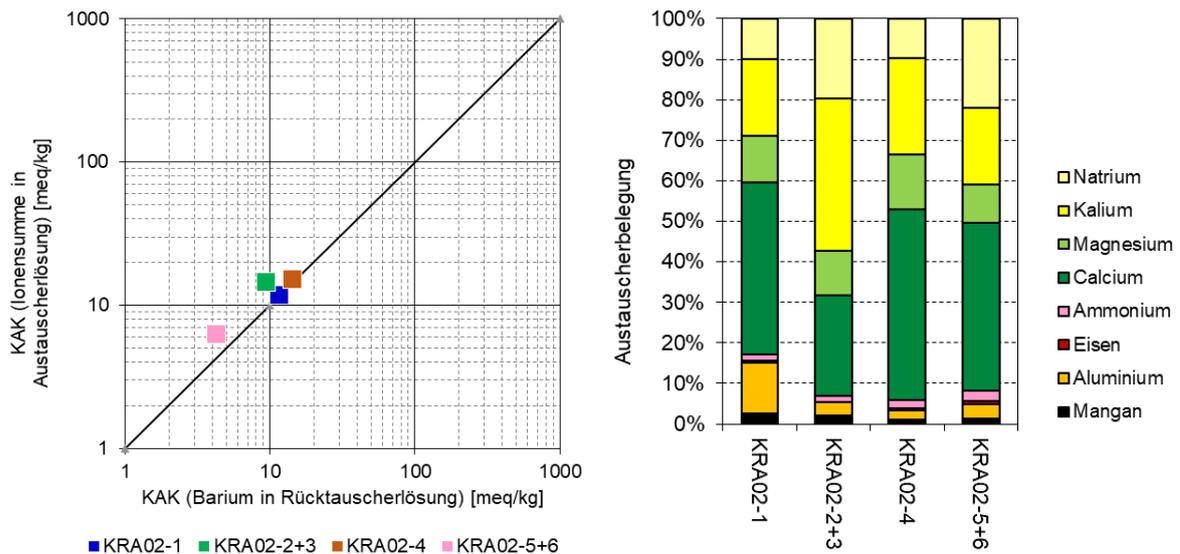


Bild 31: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung KRA02 (rechts).

5.1.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

In den zwei beprobten Grundwassermessstellen südlich der Krayner Teiche wurden Sulfatkonzentrationen um 100 mg/L gemessen (Tabelle 24), was etwa der bergbaulich unbeeinflussten Hintergrundkonzentration entspricht. Das Grundwasser ist neutral und weist eine Säurekapazität $K_{S4,3}$ zwischen 1,5 und 3,0 mmol/L auf. Das Grundwasser ist eisenfrei (20247) bzw. eisenarm (21070), in beiden Messstellen moderat gepuffert und im derzeitigen Zustand nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 25).

Tabelle 24: Ausgewählte Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“ (Dezember 2020).

Messstelle (GWL)	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	$K_{S4,3}$	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium-Stickstoff
			mmol/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L
21070(150)	KRA01	7,4	2,7	630	126	1,8	0,14
20247(130)	KRA02	6,5	1,5	535	95	0,02	1,0

Tabelle 25: Aktuelle Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“ (Dezember 2020).

Messstelle (GWL)	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH _{ox}	$K_{S4,3}^{\text{ox}}$
			mmol/L
21070(150)	KRA01	8,5	2,2
20247(130)	KRA02	8,2	1,2



5.1.6 Grundwasserbeschaffenheit nach Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGMJaWa [IBGW 2019] findet am Standort der Bohrung KRA01 keine nennenswerte Grundwasserabsenkung mehr statt. Der Grundwasserstand im oberen G124 stagniert bei ca. +60,5 m NHN und steigt nach der Beendigung des Bergbaus um etwa 3 Meter auf +63,5 m NHN (6,9 m u GOK) an.

Weiter östlich, am Standort der Bohrung KRA02, prognostiziert das HGM bis 2033 eine Absenkung des Grundwasserspiegels im G130 um 3,6 Meter auf +55,1 m NHN. Nach bergbaulich steigt der Grundwasserspiegel im G130 auf +57,7 m NHN. Er liegt mit 12,4 m unter Gelände flurfern. Der etwa 9 Meter mächtige G124 im Hangenden des G130 führt auch nach bergbaulich kein Grundwasser (Tabelle 26).

Tabelle 26: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen KRA01 und KRA02 im Teilbereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.

Bohrstandort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachbergbaulich)	Maximale Grundwasserabsenkung	Grundwasserwiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
KRA01	+60,6 (G124)	+60,5 (G124)	+63,5 (G124)	-0,1	+3,0
KRA02	+58,7 (G130)	+55,1 (G130)	+57,7 (G130)	-3,6	+2,6

*) gemäß HGMJawa [IBGW 2019]

Die Prognose der Grundwasserbeschaffenheit nach dem Grundwasserwiederanstieg erfolgt nach der Methodik im Abschnitt 2.2 unter Verwendung der standortspezifisch erkundeten Pyrit- und Calcitgehalte (Tabelle 21, Abschnitt 5.1.2) sowie Kationenaustauschkapazitäten (Tabelle 23, Abschnitt 5.1.4). Die Prognose ergab, dass im Beeinflussungsbereich südlich der Krayner Teiche nur eine geringe Erhöhung der Sulfatkonzentration bis etwa 150 mg/L zu erwarten ist. In den karbonatarmen G124 und G130 kann es jedoch zu einer Erhöhung der Eisenkonzentration auf 2 bis 7 mg/L als gelöstes Eisen(II) kommen. Eine Versauerungsdisposition leitet sich daraus jedoch nicht ab. Das Grundwasser bleibt auch bei Belüftung, z. B. beim Eintritt in ein Fließgewässer, neutral und gepuffert (Tabelle 27). In Grundwasseraustrittsbereichen können jedoch lokal Verockerungserscheinungen auftreten.

Tabelle 27: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Krayner Teiche und Speicherbecken Krayne“.

Kennwert	Einheit	KRA01		KRA02	
		2020	nach GWWA	2020	nach GWWA
		21070(150)		20247(130)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+60,6	+63,5	+58,7	+57,7
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	6,2	9,1	15,6	14,6
pH-Wert	---	7,4	6,7	6,5	6,5
Sulfat	mg/L	126	120	95	150
Eisen-gelöst	mg/L	1,8	2,1	<0,1	6,7
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,14	0,1	1,0	0,1
Säurekapazität $K_{S4,3}^{OX}$	mmol/L	2,6	1,3	1,5	2,0

5.2 Kleinsee und Großsee

5.2.1 Übersicht

Das Teilgebiet „Kleinsee und Großsee“ bei Pinnow umfasst den Kleinsee mit seinen westlichen Verlandungsbereichen und den Großsee in der Nähe der Ortslage Teerofen (Bild 32). Das Gebiet ist durch postglazial entstandene flache bis kesselartige Rinnenstrukturen gekennzeichnet: die sogenannten Pinnower Läuche¹. Diese sind Teil des FFH-Gebiets „Pinnower Läuche und Tauersehe Eichen“, das sich bis zu den weiter nordöstlich liegenden Pinnower Seen erstreckt. Das FFH-Gebiet hat eine Fläche von 1.528 Hektar und liegt ca. 6 Kilometer nordwestlich vom Tagebau Jänschwalde.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden die Erkundungsbohrungen PIN01 nördlich vom Großsee sowie PIN02 westlich und PIN03 südlich vom Kleinsee geteuft (Bild 32) und geochemisch untersucht. In diesem Teilgebiet liegen die Grundwassermessstellen 21064 und 21032, die 2020 beprobt wurden (Abschnitt 4.3.2).

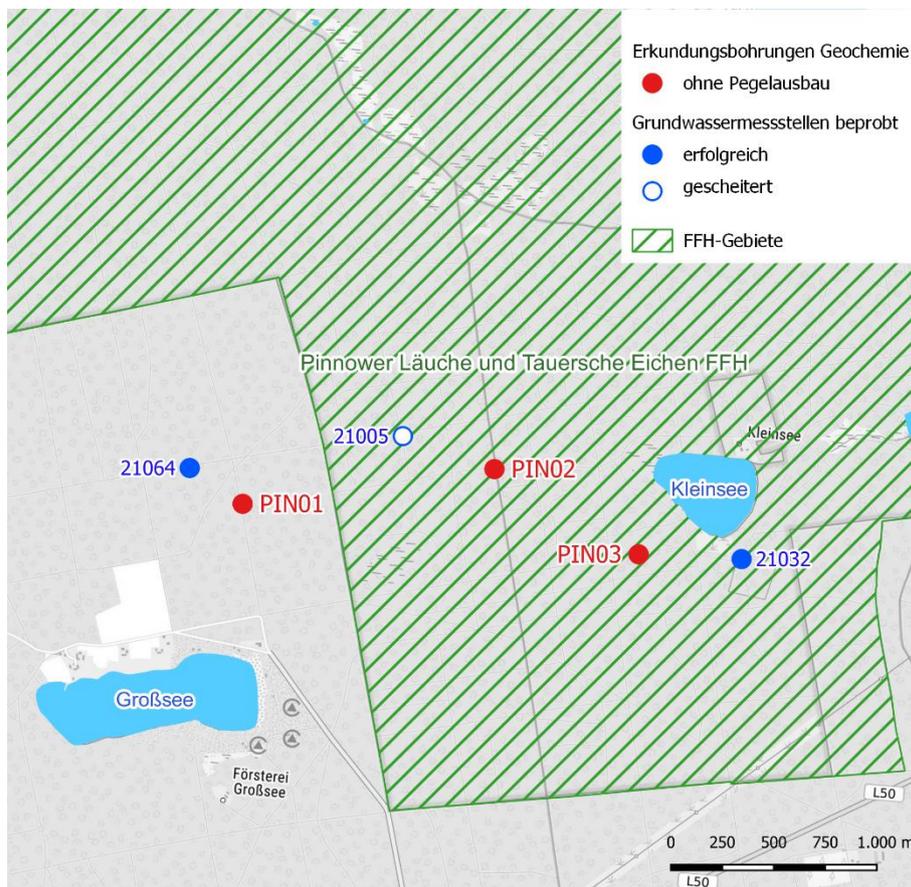


Bild 32: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen, der Grundwassermessstellen im Bereich des Kleinsees und Großsees.

5.2.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter

Am Standort der drei Bohrungen PIN01, PIN02 und PIN03 stand flurnah der teilweise stark mittelsandige Feinsand des weichselkaltzeitlichen G124 an. An allen drei Stand-

¹ Lauch: grasig sumpfige Niederung, [IBGW 2019]



orten führte der etwa 2 bis 4 Meter mächtige G124 kein Grundwasser. Im Liegenden des G124 folgten bis etwa 3 Meter mächtige fluviatile weichselkaltzeitliche Wechselagerungen aus feinsandigen Schluffen und Mittelsanden und anschließend die Fein- und Mittelsande des G130 mit einer Mächtigkeit von rund 8 Meter.

Der aktuell grundwasserführende und später vom Wiederanstieg betroffene G130 wurde in allen drei Bohrungen über die gesamte erbohrte Mächtigkeit beprobt. Sein mächtigkeitsgemittelter Gesamtschwefelgehalt lag bei rund 150...200 ppm. Mit der Bedingung $S_{ges} \geq 300$ ppm (Abschnitt 4.3.1) wurden die Schwefelbindungsformen nur an sechs Einzelproben bestimmt. Der analytisch bestimmte oder bei $S_{ges} < 300$ ppm geschätzte Pyritgehalt liegt profiligewichtet zwischen 0,008 und 0,016 M%.

Der Calcitgehalt lag in der Bohrung PIN03 meist unter der Bestimmungsgrenze von 0,1 g/kg TR bzw. 0,01 M%. Der profiligemittelte Calcitgehalt ist dementsprechend mit rund 0,03 M% gering. Am Standort der Bohrungen PIN01 und PIN02 lag der Calcitgehalt des G130 mit im Mittel 0,11...0,21 M% deutlich höher (Tabelle 28).

Tabelle 28: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Kleinsee und Großsee“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit beprobt/gesamt	Gesamtschwefel	Disulfidschwefel	Sulfatschwefel	Pyrit	Calcit
			m	ppm	ppm	ppm	M%	M%
PIN01	G130	10	6,4 / 6,4	150,5	56,0	18,1	0,010	0,205
PIN02	fW	1	0,3 / 1,8	60,4	45,3	15,1	0,008	0,170
	G130	8	6,4 / 6,4	186,6	86,2	30,7	0,016	0,108
PIN03	G130	6	5,6 / 5,6	154,8	63,9	26,4	0,012	0,023

5.2.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Unter Verwendung der mächtigkeitsgewichteten Mittelwerte von Pyrit und Calcit liegt das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) am Standort der Bohrungen PIN01 und PIN02 zwischen etwa 8:1 und 24:1 und am Standort der Bohrung PIN03 bei etwa 2:1 (Tabelle 29). Am Standort der Bohrungen PIN01 und PIN02 sind die von der Absenkung und vom Wiederanstieg des Grundwassers betroffenen Sedimente des G130 damit nicht versauerungsdisponiert. Der Standort der Bohrung PIN03 ist dagegen potenziell versauerungsdisponiert.

Tabelle 29: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Kleinsee und Großsee“.

Bohrung	Grundwasserleiter (Stratigraphie-Schlüssel)	Calcit $CaCO_3$	Pyrit FeS_2	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		mmol/kg	mmol/kg	
PIN01	G150 (2370)	20,5	0,87	24 : 1
PIN02	fW (1960)	17,0	0,71	24 : 1
	G130 (1990)	10,8	1,35	8 : 1
PIN03	G130 (1990)	2,3	1,00	2 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).



5.2.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

In den von der Grundwasserabsenkung betroffenen quartären Grundwasserleitern ist der Kationenaustauscher neben dem Calciumkarbonat der wesentliche Puffer. In den Bohrungen PIN01, PIN02 und PIN03 wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) an sieben, sechs bzw. vier Proben bestimmt (Tabelle 30).

Tabelle 30: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen PIN01, PIN02 und PIN03 im Bereich „Kleinsee und Großsee“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK_{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK	---	meq/kg	---	---	meq/kg
PIN01	G130	1	5,6 - 6,7	SM ⁺ SF	11,5	89 %	11 %	40,0
		2	6,7 - 7,6	SM	11,1	82 %	18 %	34,0
		3	7,6 - 8,0	SF	10,3	91 %	9 %	48,0
		4/5	8,0 - 9,7	SF ⁺ SM	12,4	90 %	10 %	47,4
		6/7	9,7 - 10,5	SF	16,6	97 %	3 %	37,0
		8/9	10,5 - 11,6	SF ⁺ SM	9,3	95 %	5 %	36,5
		10	11,6 - 12,0	SM	8,0	95 %	5 %	48,0
PIN02	fW	2	3,6 - 4,4	SF ⁺ U	15,7	93 %	7 %	34,0
	G130	3	4,4 - 5,7	SF	8,1	95 %	5 %	38,0
		4/5	5,7 - 7,8	SF	6,6	97 %	3 %	32,4
		6	7,8 - 8,4	SF	15,5	93 %	7 %	20,0
		7	8,4 - 9,0	SF	5,3	73 %	27 %	4,0
		8/9	9,0 - 11,0	SF ⁺ SM	7,0	87 %	13 %	≤1,0
PIN03	G130	1	4,4 - 5,6	SF ⁺ SM	10,7	90 %	10 %	≤1,0
		2	5,6 - 7,0	SM ⁺ SG	10,3	93 %	7 %	10,0
		3/4	7,0 - 9,0	SM ⁺ SG	9,4	87 %	13 %	6,5
		5/6	9,0 - 11,0	SM	17,6	89 %	11 %	≤1,0

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in den Bohrungen im Bereich des Kleinsees und Großsees an den Sanden des weichselkaltzeitlichen G130 bestimmt. Die KAK_{eff} der untersuchten sieben Proben in der Bohrung **PIN01** liegt zwischen 8 und 17 meq/kg (Bild 33 links und Tabelle 30). Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 33 rechts und Tabelle 30). Die hydrolytischen Kationen belegen 3 % bis 18 % der Austauscherplätze mit abnehmender Tendenz zur Tiefe. Die hydrolytische Acidität wird von Aluminium dominiert.

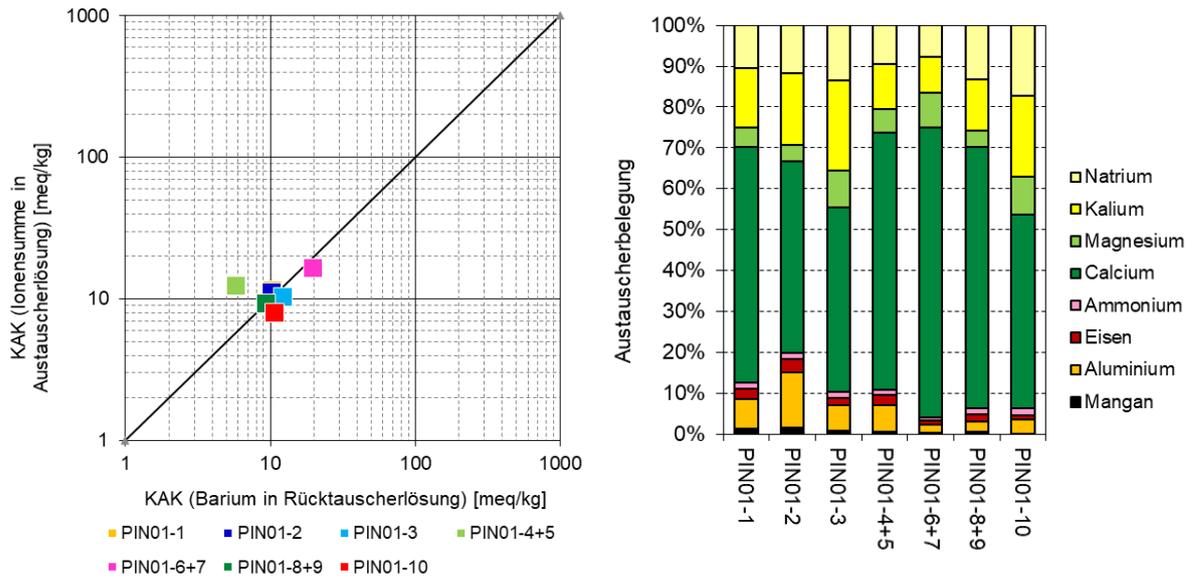


Bild 33: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung PIN01 (rechts).

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in der Bohrung **PIN02** in sechs Proben an den Sanden des G130 in einer Spanne zwischen 5 und 16 meq/kg bestimmt. Die Austauscherplätze sind vorwiegend mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 34 rechts und Tabelle 30). In der Probe PIN02-7 ist mit 24 % ein hoher Anteil an Aluminiumionen auffällig. In den übrigen fünf Proben belegen die hydrolytischen Kationen in Summe 2 % bis 13 % der Austauscherplätze. Aluminium hat einen dominanten Anteil an der hydrolytischen Acidität.

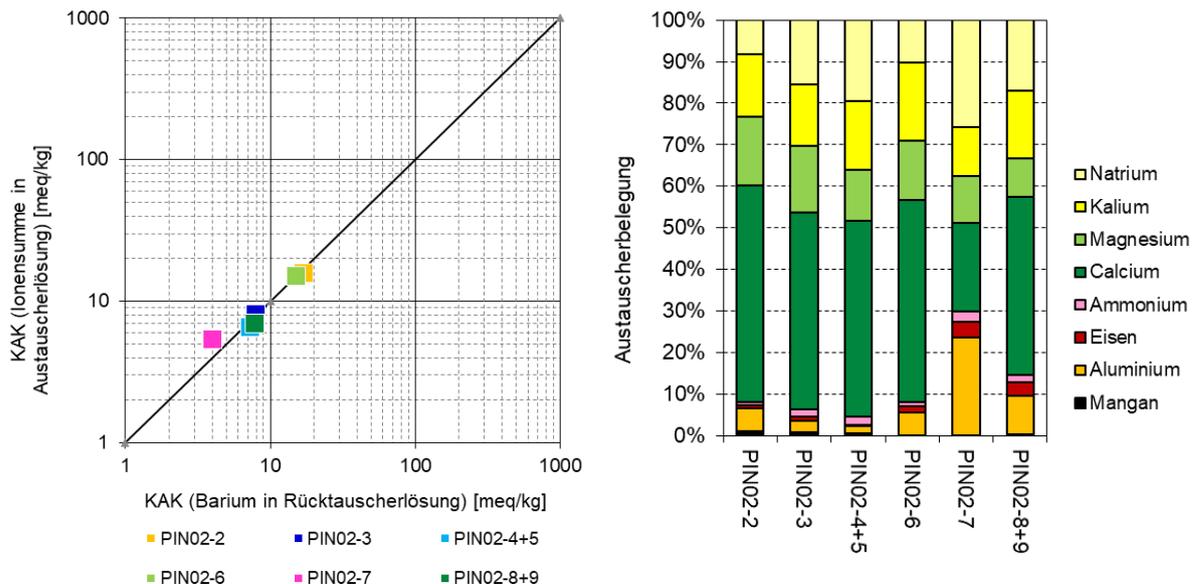


Bild 34: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung PIN02 (rechts).



Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in der Bohrung **PIN03** an vier Proben zwischen 9 und 18 meq/kg bestimmt (Bild 35 links und Tabelle 30). Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 35 rechts und Tabelle 30). Eisen, Aluminium und Mangan belegen als hydrolytische Kationen 7 % bis 13 % der Austauscherplätze.

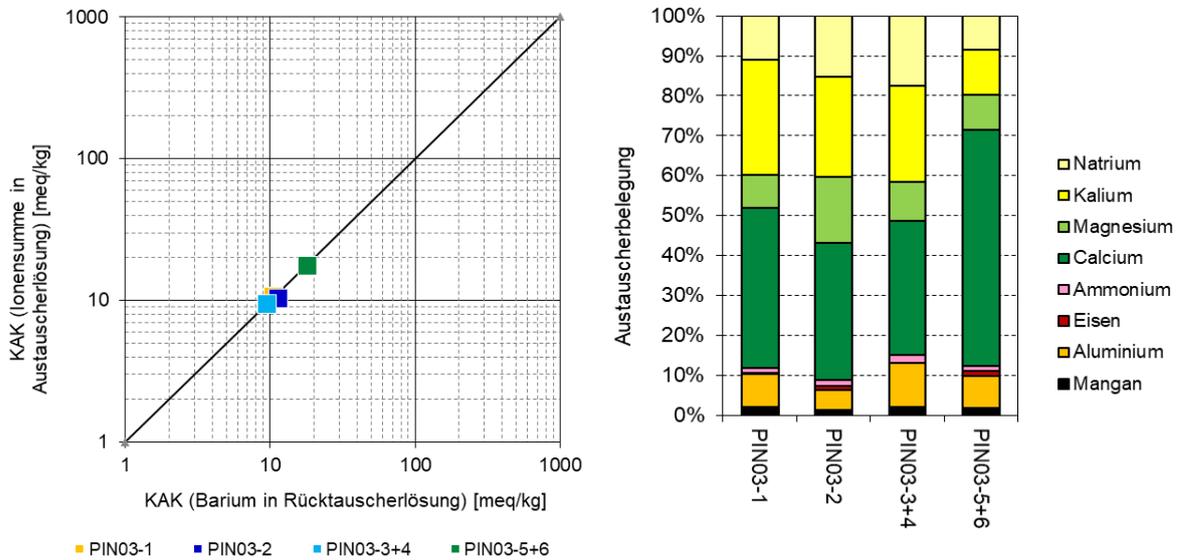


Bild 35: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung PIN03 (rechts).

5.2.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

Im Bereich des Kleinsees und Großsees war die Beprobung von drei Grundwasser-messstellen vorgesehen (Tabelle 31). Die Messstelle 21005(120) lag trocken.

Die Grundwasserbeschaffenheit im G150 und G100 unterschied sich deutlich. In der Messstelle 21064(150) war das Grundwasser mit 50 mg/L bzw. <0,1 mg/L sulfat- und eisenarm. In der Messstelle 21032(100) wurden dagegen leicht erhöhte Konzentrationen von rund 170 mg/L Sulfat und 2,8 mg/L Eisen gemessen. Gleichzeitig ist das Grundwasser des G100 calcitgesättigt und durch eine hohe Säurekapazität $K_{S4,3}$ von rund 5 mmol/L gekennzeichnet. Die Befunde zur Messstelle 21032 sprechen für einen geringen Einfluss der Pyritverwitterung in einem karbonatgepufferten Milieu. In beiden Messstellen ist das Grundwasser nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 32).

Tabelle 31: Ergebnisse der aktuellen Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Kleinsee und Großsee“ (Dezember 2020).

Messstelle (GWL)	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	$K_{S4,3}$	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium-Stickstoff	
			mmol/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L	
21064(150)	PIN01	7,7	1,3	285	50	0,09	0,07	
21005(120)	PIN02	gescheitert						
21032(100)	PIN03	7,4	5,2	800	168	2,8	0,13	



Tabelle 32: Aktuelle Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Kleinsee und Großsee“ (Dezember 2020).

Mess- stelle	Zugeordnete Erkundungs- bohrung	pH _{ox}	K _{S4,3} ^{ox}
			mmol/L
21064(150)	PIN01	8,2	1,2
21005(120)	PIN02	---	---
21032(100)	PIN03	8,8	4,6

5.2.6 Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGMJaWa [IBGW 2019] findet im Bereich des Kleinsees und Großsees keine nennenswerte Grundwasserabsenkung mehr statt. Bis zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserbeeinflussung im Jahr 2033 sinkt der Grundwasserstand im G130 am Standort der Bohrung PIN02 lediglich um ca. 0,4 Meter. An den Standorten PIN01 und PIN03 steigt das Grundwasser bis 2033 um 0,3 bis 1,0 Meter an. Der stationäre nachbergbauliche Grundwasserstand wird zwischen +63,7 und +64,2 m NHN erwartet. Die vom Wiederanstieg betroffene Lamelle des G130 beträgt entsprechend ca. 3 bis 4 Meter (Tabelle 33).

Tabelle 33: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen PIN01, PIN02 und PIN03 im Bereich „Kleinsee und Großsee“.

Bohr- standort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachberg- baulich)	Maximale Grundwasser- absenkung	Grundwasser- wiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
PIN01	+61,3 (G130)	+62,3 (G130)	+64,2 (G130)	---	+2,9
PIN02	+61,2 (G130)	+60,8 (G130)	+64,0 (G130)	-0,4	+3,2
PIN03	+59,8 (G130)	+60,1 (G130)	+63,7 (G130)	---	+3,9

*) aus dem HGMJawa [IBGW 2019]

Als Ausgangszustand des G130 für die Prognose wurde an allen drei Standorten die Analyse vom G100 aus der Messstelle 21032 herangezogen, da die Probe aus der Messstelle 21064 das Grundwasser im tieferen G150 kennzeichnet, der nicht von der Absenkung bzw. vom Wiederanstieg betroffen ist.

Die Prognose nach der Methodik im Abschnitt 2.2 ergab, dass in der Umgebung des Klein- und Großsees mit einer Erhöhung der Sulfatkonzentration im G130 auf etwa 350 bis 400 mg/L zu rechnen ist. Unter karbonatgepufferten Bedingungen (PIN01) steigt die Eisenkonzentration dabei nicht an. Bei Mangel an Calciumkarbonat, teilweise am Standort der Bohrung PIN02 sowie überwiegend am Standort der Bohrung PIN03, ist auch mit einem Anstieg der Eisenkonzentration bis auf 20 mg/L zu rechnen. Eine Versauerungsdisposition leitet sich daraus jedoch nicht ab, da das Grundwasser örtlich eine hohe Säurekapazität aufweist (Tabelle 34). An Grundwasseraustrittsbereichen können aber Verockerungserscheinungen auftreten.

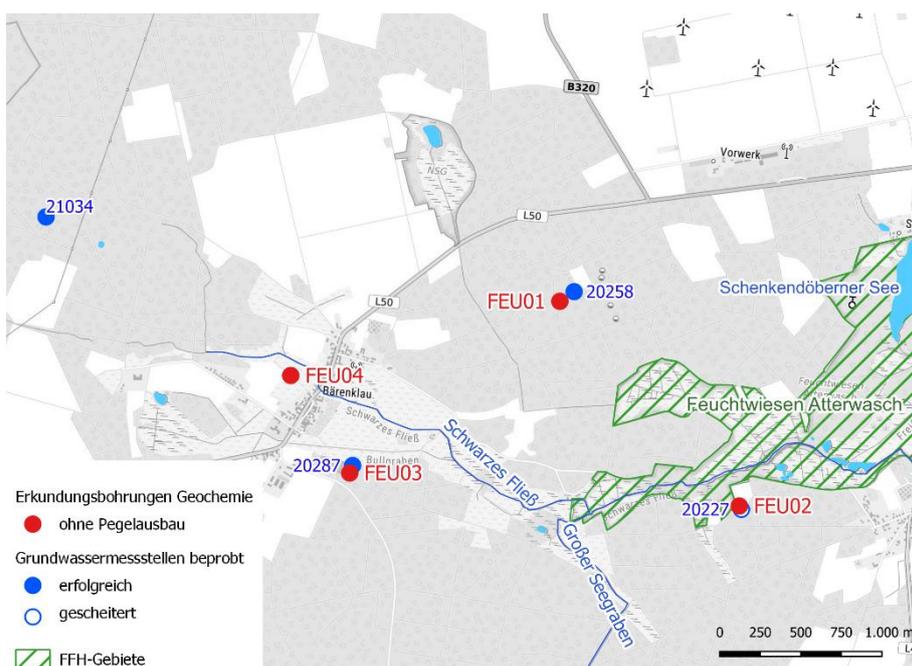
Tabelle 34: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Kleinsee und Großsee“.

Kennwert	Einheit	PIN01		PIN02		PIN03	
		2020	nach GWWA	2020	nach GWWA	2020	nach GWWA
		21032 (100)		21032 (100)		21032 (100)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+61,3	+64,2	+61,2	+60,8	+59,8	+63,7
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	3,8	6,7	1,8	4,6	1,6	5,6
pH-Wert	---	7,4	7,3	7,4	6,7	7,4	6,1
Sulfat	mg/L	168	350	168	410	168	400
Eisen-gelöst	mg/L	2,8	2,4	2,8	12,4	2,8	20,6
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,13	0,4	0,13	0,4	0,13	0,4
Säurekapazität $K_{S4,3}^{OX}$	mmol/L	4,6	4,7	4,6	2,9	4,6	0,2

5.3 Schwarzes Fließ

5.3.1 Übersicht

Das Teilgebiet „Schwarzes Fließ“ umfasst das Grabensystem des Schwarzen Fließes (Bild 36). Dieses besteht aus den zwei Quellarmen Schäfergraben und Bullgraben, dem Großen Seegraben im Süden sowie den parallel verlaufenden Gräben Freifließ und Altes Mutterfließ. Über einen Ablaufgraben ist auch der Schenkendöberner See an das Grabensystem angebunden. Im zentralen Bereich dieses Teilgebietes befindet sich das FFH-Gebiet „Feuchtwiesen Atterwasch“, das sich zwischen den Ortslagen Schenkendöbern, Deulowitz, Atterwasch und Bärenklau erstreckt. Es hat eine Fläche von 193 Hektar und liegt ca. 5 Kilometer nördlich vom Tagebau Jänschwalde. Dominierend sind in diesem Teilgebiet Laubmisch- und Nadelwälder sowie die Wiesen der Niederungsbereiche des Schwarzen Fließes.


Bild 36: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen, der Grundwassermessstellen im Bereich des Schwarzen Fließes.



In diesem Gebiet liegen die Grundwassermessstellen 20258 und 20287, die im Dezember 2020 beprobt wurden (Abschnitt 4.3.2). Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden die Erkundungsbohrungen FEU01 nordwestlich und FEU02 südlich des FFH-Gebietes sowie die Erkundungsbohrungen FEU03 im Süden und FEU04 im Nordwesten der Ortslage Bärenklau geteuft und geochemisch beprobt.

5.3.2 Pyrit- und Calcitgehalte der Grundwasserleiter

An den Standorten FEU01, FEU02 und FEU03 standen flurnah die Fein- bis Mittelsande des G124 in stark unterschiedlicher Mächtigkeit zwischen <1 und rund 7 Meter an. Im Liegenden des G124 folgten mit einer Mächtigkeit bis 3,5 Meter teils bindige, weichselkaltzeitlich Feinsand-Schluff-Wechselagerungen (fW) und anschließend die Fein- bis Mittelsande des G130 (Taubendorfer Sande) (Tabelle 35).

Die Sande des G130 und G124 sind schwefelarm. Der mächtigkeitsgewichtete mittlere Pyritgehalt wurde zu 0,004 bis 0,027 M% berechnet. Demgegenüber stehen teils hohe Calcitgehalte bis 0,9 M% (Bohrungen FEU02 und FEU04). Am Standort der Bohrungen FEU01 und FEU03 lag der Calciumkarbonatgehalt dagegen fast ausschließlich unter der Bestimmungsgrenze von 0,1 g/kg. Mit der Annahme der halben Bestimmungsgrenze kann der Calcitgehalt hier mit 0,005...0,008 M% im Profilmittel geschätzt werden.

Tabelle 35: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Schwarzes Fließ“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit	Gesamt-schwefel	Disulfid-schwefel	Sulfat-schwefel	Pyrit	Calcit
			beprob/gesamt	ppm	ppm	ppm	M%	M%
			m					
FEU01	G124	---	--- / 6,6	---	---	---	---	---
	G130	8	8,0 / 10,0	26,7	20,0	6,7	0,004	0,008
FEU02	G124	---	--- / 0,8	---	---	---	---	---
	fW	---	--- / 3,5	---	---	---	---	---
	G130	9	11,8 / 13,5	43,2	32,4	10,8	0,006	0,747
FEU03	G124	7	6,1 / 6,1	68,2	48,0	16,0	0,009	0,005
FEU04	fW	2	1,7 / 3,4	111,4	83,5	27,8	0,016	0,898
	G130	5	5,0 / 5,0	259,9	144,0	60,3	0,027	0,906

5.3.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Unter Verwendung der mächtigkeitsgewichteten Mittelwerte von Pyrit und Calcit liegt das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) am Standort der Bohrungen FEU02 und FEU04 zwischen etwa 40:1 und 150:1 und am Standort der Bohrungen FEU01 und FEU03 bei maximal 3:1 (Tabelle 36).

Am Standort der Bohrungen FEU02 und FEU04 sind die von der Absenkung und vom Wiederanstieg des Grundwassers betroffenen Sedimente des G130 damit nicht versauerungsdisponiert. Die Sedimente des G124 am Standort der Bohrung FEU03 sind dagegen potenziell versauerungsdisponiert.



Tabelle 36: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Schwarzes Fließ“.

Bohrung	Grundwasserleiter (Stratigraphie-Schlüssel)	Calcit CaCO ₃	Pyrit FeS ₂	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		mmol/kg	mmol/kg	
FEU01	G130 (1990)	0,8	0,31	3 : 1
FEU02	G130 (1990)	74,6	0,51	148 : 1
FEU03	G124 (1951)	0,5	0,75	<1 : 1
FEU04	fW (1960)	89,7	1,30	69 : 1
	G130(1990)	90,5	2,25	40 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).

5.3.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in den Bohrungen im Bereich des Schwarzen Fließes an den Sanden des weichselkaltzeitlichen G130 bestimmt (Tabelle 37).

Tabelle 37: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen FEU01, FEU02, FEU03 und FEU04 im Bereich „Schwarzes Fließ“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK _{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK	---	meq/kg	---	---	meq/kg
FEU01	G130	1	10,0 - 11,0	SM"SG	18,7	90 %	10 %	≤1,0
		2/3/4	11,0 - 14,3	SM!SF	18,7	95 %	5 %	≤1,0
		5/6	14,3 - 16,1	SFISM	20,9	90 %	10 %	≤1,0
		7	16,1 - 16,8	SM"SG	17,6	92 %	8 %	8,0
		8	16,8 - 17,0	SF"SM	23,7	95 %	5 %	≤1,0
FEU02	G130	1	6,3 - 6,7	SF"SM	228	100 %	<1 %	404
		2	6,7 - 7,1	SF"SM	307	100 %	<1 %	484
		3	7,1 - 8,0	SF	80,5	98 %	2 %	56,0
		4	8,0 - 8,9	SM!SF	249	99 %	<1 %	376
		5	8,9 - 9,6	SM!SF	46,1	97 %	3 %	54,0
		6	9,6 - 10,0	SM"SF	77,0	97 %	3 %	40,0
		7/8	10,0 - 12,0	SF!SM	23,0	93 %	7 %	33,0
FEU03	G124	1	1,1 - 1,8	SF	9,7	78 %	22 %	≤1,0
		2/3	1,8 - 3,8	SF	8,2	95 %	5 %	≤1,0
		4/5	3,8 - 5,7	SF	8,0	91 %	9 %	≤1,0
		6/7	5,7 - 7,0	SF!U	26,7	98 %	2 %	≤1,0
FEU04	G130	3/4	3,7 - 5,3	SM	76,3	98 %	2 %	61,0
		5	5,3 - 6,0	SM"SG	337	99 %	1 %	286
		6/7	6,0 - 8,0	SM!SG	241	99 %	1 %	229

In der Bohrung **FEU01** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität an fünf Proben des G130 in einer engen Spanne zwischen 17 und 24 meq/kg bestimmt (Bild 37 links

und Tabelle 37). Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 37 rechts und Tabelle 37). Die Anteile der Natrium- und Kaliumionen sind ungewöhnlich hoch. Die hydrolytischen Kationen belegen zwischen 5 % und 10 % der Austauscherplätze, wobei Aluminium dominiert.

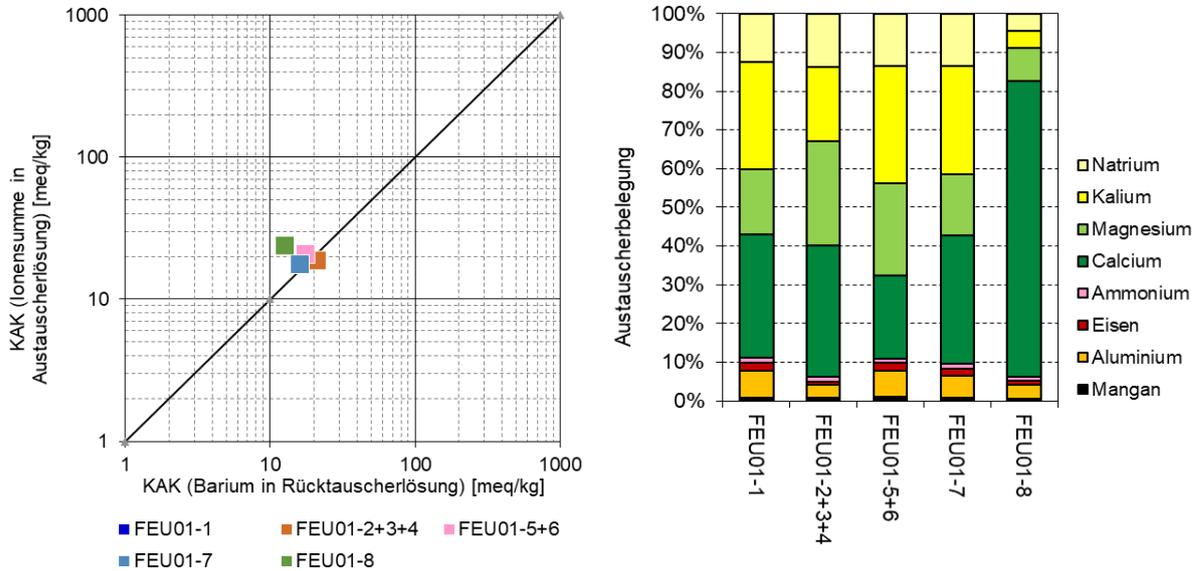


Bild 37: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU01 (rechts).

In der Bohrung **FEU02** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität an acht Proben des G130 in einer breiten Spanne zwischen 23 und 307 meq/kg bestimmt (Bild 38 links und Tabelle 37). Die hohen Werte für die effektive Kationenaustauschkapazität wurden für die kalkhaltigen Substrate bestimmt. Sie sind methodisch mit einem Artefakt belegt.

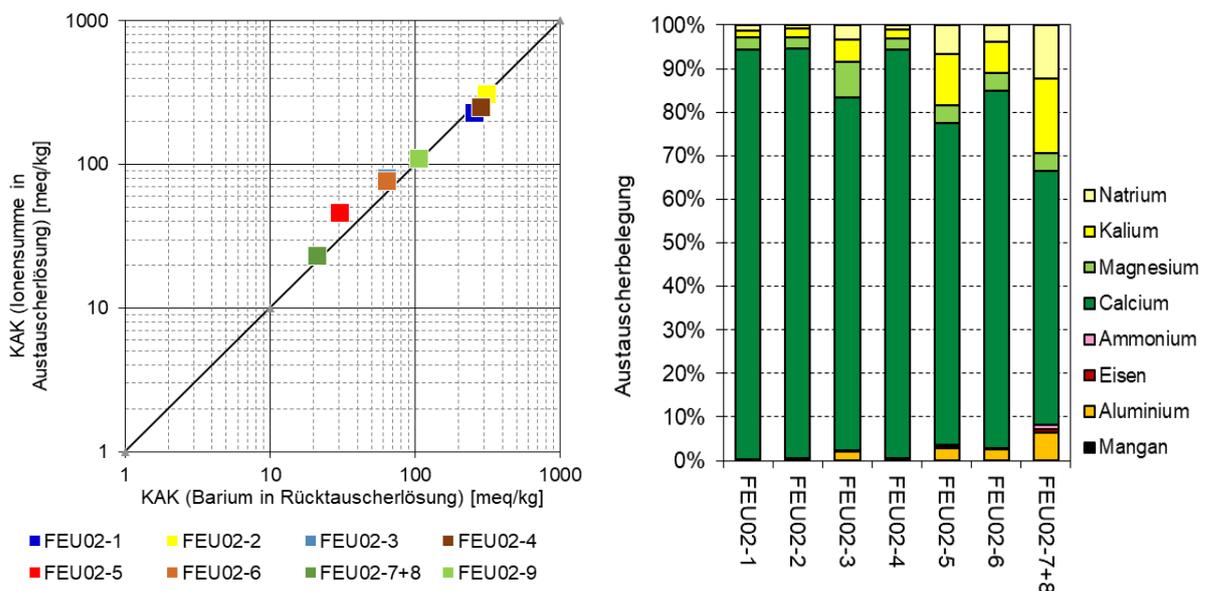


Bild 38: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU02 (rechts).

Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien belegt (Bild 38 rechts und Tabelle 37). Der Anteil der Alkalien an der Austauscherbelegung nimmt in der Tiefe zu, erreicht jedoch keine Dominanz. Die hydrolytischen Kationen belegen mit $\leq 2\%$ sehr niedrige Anteile der Austauscherplätze. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung des Bohrprofils FEU02 (Abschnitt 5.3.2).

In der Bohrung **FEU03** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität an vier Proben des G130 zwischen 8 und 27 meq/kg bestimmt (Bild 39 links und Tabelle 37), wobei der hohe Wert für den tiefsten Horizont 6/7 gilt. Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 39 rechts und Tabelle 37), wobei ihr Anteil im Liegenden größer wird. Die hydrolytischen Kationen belegen zwischen 2 % und 22 % der Austauscherplätze, wobei die hydrolytische Acidität im Hangenden am höchsten ist.

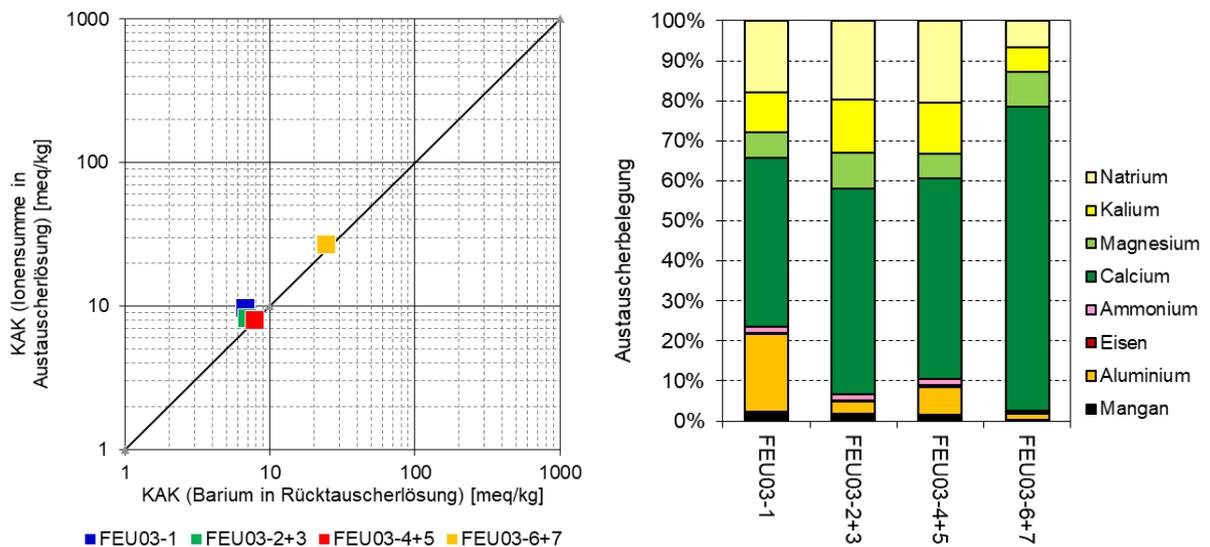


Bild 39: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU03 (rechts).

In der Bohrung **FEU04** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität an drei Proben des G130 mit großen Werten zwischen 76 und 337 meq/kg bestimmt (Bild 40 links und Tabelle 37). Die hohen Werte für die effektive Kationenaustauschkapazität wurden in den kalkhaltigen Substraten bestimmt. Sie sind methodisch mit einem Artefakt belegt. Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien belegt (Bild 40 rechts und Tabelle 37). Die Alkalien erlangen lediglich in der oberen Schicht eine gewisse Relevanz. Die hydrolytischen Kationen belegen maximal 2 % der Austauscherplätze. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung des Bohrprofils FEU04 wider (Abschnitt 5.3.2).

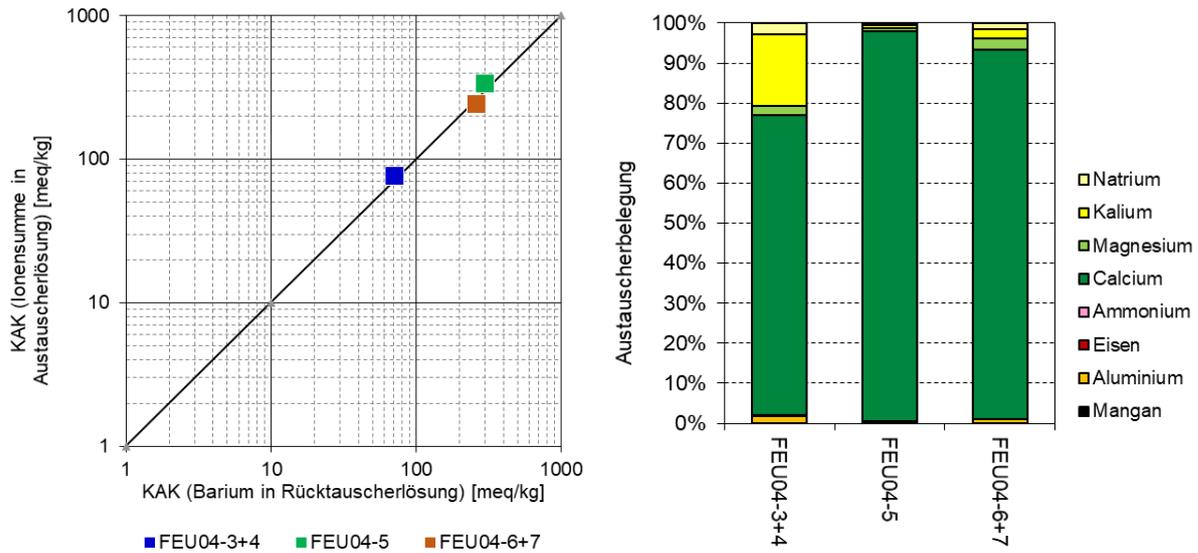


Bild 40: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung FEU03 (rechts).

5.3.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

Im Bereich des Schwarzen Fließes war die Beprobung von vier Grundwassermessstellen vorgesehen (Tabelle 38). An der Grundwassermessstelle 20227 scheiterte die Probennahme. Der Dummytest war negativ.

Das am Standort untersuchte Grundwasser des G150 (20258 und 20287) und G100 (21034) ist pH-neutral. Im Sättigungsgleichgewicht mit Calcit weist das Grundwasser eine Säurekapazität $K_{S4,3}$ zwischen 2,5 und 3,5 mmol/L auf. Die Sulfatkonzentration ist mit rund 80 bis 170 mg/L nur geringfügig erhöht. Eisen ist in Konzentrationen bis rund 3 mg/L und Ammoniumstickstoff bis 0,3 mg/L enthalten (Tabelle 38). Das Grundwasser weist keine Versauerungsdisposition auf (Tabelle 39).

Tabelle 38: Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Schwarzes Fließ“.

Messstelle (GWL)	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	$K_{S4,3}$	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium-Stickstoff
			mmol/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L
20258(150)	FEU01	7,5	3,5	500	81	1,3	0,30
20227(120)	FEU02	gescheitert					
20287(150)	FEU03	7,5	3,4	720	165	2,8	0,28
21034(100)	FEU04	7,6	2,5	460	116	0,6	0,08

Tabelle 39: Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Schwarzes Fließ“.

Mess-stelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH _{ox}	$K_{S4,3}^{ox}$
			mmol/L
20258(150)	FEU01	8,6	2,8
20227(120)	FEU02	---	---
20287(150)	FEU03	8,6	2,7
21034(100)	FEU04	8,5	2,0



5.3.6 Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGM JaWa [IBGW 2019] wird das Grundwasser im Bereich des Schwarzen Fließes bis zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserbeeinflussung im Jahr 2033 noch etwa 2 bis 8 Meter abgesenkt. Nachbergbaulich steigt das Grundwasser um 5 bis 12 Meter auf rund +57 bis +60 m NHN an (Tabelle 40).

Tabelle 40: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen FEU01 bis FEU04 im Bereich „Schwarzes Fließ“.

Bohrstandort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachbergbaulich)	Maximale Grundwasserabsenkung	Grundwasserwiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
FEU01	+54,9 (G130)	+53,0 (G130)	+ 57,8 (G130)	-1,9	+4,8
FEU02	+54,0 (G130)	+45,5 (G130)	+ 57,0 (G130)	-8,5	+11,5
FEU03	+56,7 (G124)	+54,5 (G124)	+ 59,9 (G124)	-2,2	+5,4
FEU04	+59,3 (G130)	+54,7 (G130)	+ 59,9 (fW)	-4,6	+5,2

*) aus dem HGMJawa [IBGW 2019]

Als Ausgangszustand des G130 für die Prognose wurde an allen drei Standorten die Analyse des G100 aus der Messstelle 21034 herangezogen, da die Proben aus den Messstellen 20258 und 20287 das Grundwasser des G150 kennzeichnen, der von der Grundwasserabsenkung bzw. dem Grundwasserwiederanstieg nicht betroffen ist.

Die Prognose nach der Methodik im Abschnitt 2.2 ergab, dass im Bereich des Schwarzen Fließes mit einer Erhöhung der Sulfatkonzentration im G130 und G124 auf etwa 140 bis 310 mg/L zu rechnen ist. Die Eisenkonzentration des G130 steigt auf maximal 2 mg/L an. Im G124 ist bei Mangel an Calciumkarbonat eine geringfügig höhere Eisenkonzentration bis etwa 4 mg/L zu erwarten. Eine Versauerungsdisposition ist an allen Bohrstandorten ausgeschlossen, da das Grundwasser im gegenwärtigen Zustand eine hohe Säurekapazität aufweist. An Grundwasseraustrittsbereichen können aber lokal Verockerungserscheinungen auftreten.

Tabelle 41: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Schwarzes Fließ“.

Kennwert	Einheit	FEU01		FEU02		FEU03		FEU04	
		2020	nach GWWA						
		21034 (100)		21034 (100)		21034 (100)		21034 (100)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+54,9	+64,2	+54,0	+57,0	+56,7	+59,9	+59,3	+59,9
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	12,4	15,4	14,3	17,3	10,4	13,6	12,8	13,4
pH-Wert	---	7,6	6,4	7,6	7,9	7,6	5,9	7,6	7,6
Sulfat	mg/L	116	140	116	190	116	200	116	310
Eisen-gelöst	mg/L	0,6	2,4	0,6	1,1	0,6	4,3	0,6	1,6
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,08	0,1	0,08	0,2	0,08	0,2	0,08	0,3
Säurekapazität $K_{S4,3}^{ox}$	mmol/L	2,1	0,6	2,1	2,6	2,1	0,2	2,1	3,3

5.4 Calpenzmoor

5.4.1 Übersicht

Das Teilgebiet „Calpenzmoor“ schließt das Calpenzmoor nördlich der Ortslage Drewitz sowie die umliegenden Nadelwälder ein (Bild 41). Die Hohlform des Moores entstand durch das Abschmelzen eines weichseleiszeitlichen Toteisblocks. Durch gewerbliche Torfentnahmen wurde das Moor verändert. Auf diesem Weg entstanden der Große Torfstich und der Kleine Torfstich. Der Calpenzsee, die dritte offene Wasserfläche im Calpenzmoor, ist ein natürlicher See [IBGW 2019]. Das FFH-Gebiet „Calpenzmoor“ umschließt dieses Gebiet. Es hat eine Fläche von 134 Hektar und liegt ca. 5 Kilometer nordwestlich vom Tagebau Jänschwalde.

Im Bereich Calpenzmoor liegen die Grundwassermessstellen 19153 und 19120, die im Dezember 2020 beprobt wurden (Abschnitt 4.3.2). Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden die Erkundungsbohrungen CAL01 und CAL02 nördlich des Calpenzmoores geteuft und geochemisch beprobt.

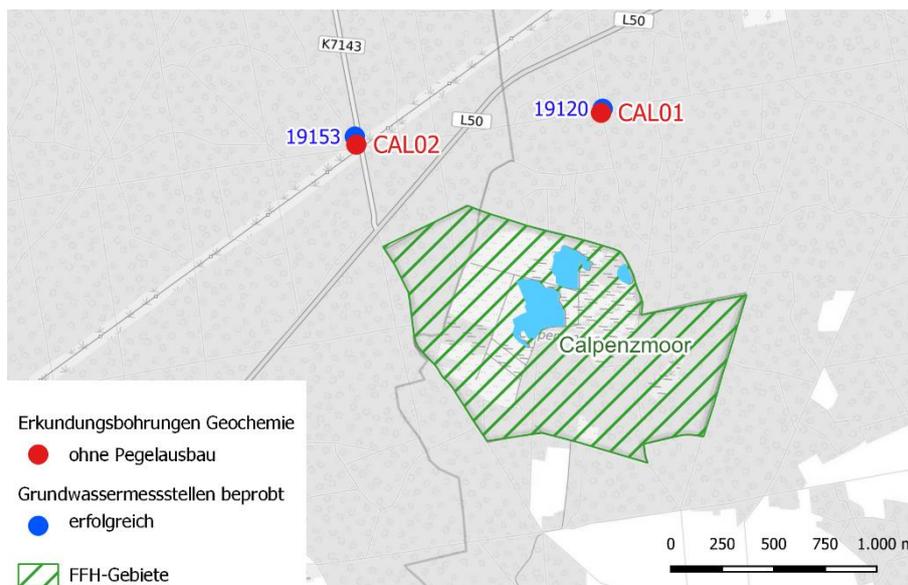


Bild 41: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Calpenzmoor“.

5.4.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter

An den Standorten CAL01 und CAL02 stehen flurnah die Fein- bis Mittelsande des G124 an. Im Liegenden des G124 folgen die Fein- bis Mittelsande des G130 und anschließend die grundwasserführenden Fein- bis Mittelsande des G150 aus dem Saale-Komplex. In der Bohrung CAL01 sind zwischen dem G124 und dem G130 teils bindige Feinsand-Schluff-Wechselagerungen (fW) eingeschaltet. In der Bohrung CAL02 sind diese Schichten weniger gut abgrenzbar und wurden deshalb dem G124 zugeordnet, der demzufolge mit einer höheren Mächtigkeit von rund 5 Meter ausgewiesen ist (Tabelle 42).



Der Grundwasserleiter G130 ist schwefelarm und praktisch karbonatfrei. Der mittlere Gesamtschwefelgehalt beträgt rund 60 ppm. Unter der Annahme, dass 75% des Schwefels sulfidisch gebunden vorliegen, beträgt der mittlere Pyritgehalt 0,008 M%. Der Gehalt an Calciumkarbonat lag in allen Proben des G130 unter der Bestimmungsgrenze von 0,1 g/kg TR bzw. 0,01 M%. Der mittlere Gehalt wird deshalb mit 0,005 M% angenommen.

Vergleichbar geringe Schwefelgehalte weist auch der G150 am Standort der Bohrung CAL01 auf. Im G150 war jedoch Calciumkarbonat in Gehalten bis 1,7 g/kg bzw. 0,17 M% nachweisbar. Im Mittel beträgt der Calcitgehalt 0,077 M% (Tabelle 42). Am Standort der Bohrung CAL02 weisen die Mittelsande des G150 höhere Schwefelgehalte von mächtigkeitsgewichtet rund 370 ppm als Gesamtschwefel und rund 230 ppm als Disulfidschwefel auf. Der mittlere Pyritgehalt beträgt entsprechend 0,043 M%. Calciumkarbonat war nicht nachweisbar.

Tabelle 42: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Calpenzmoor“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit	Gesamt-schwefel	Disulfid-schwefel	Sulfat-schwefel	Pyrit	Calcit
			beprob/gesamt	ppm	ppm	ppm	M%	M%
			m					
CAL01	G124	---	--- / 1,4	---	---	---	---	---
	fW	---	--- / 3,0	---	---	---	---	---
	G130	---	--- / 3,0	---	---	---	---	---
	G150	8	5,9 / 8,3	76,1	57,1	19,0	0,011	0,077
CAL02	G124	---	--- / 5,2	---	---	---	---	---
	G130	4	3,0 / 5,1	59,3	44,5	14,8	0,008	0,005
	G150	5	4,5 / 4,5	366,4	228,1	46,8	0,043	0,005

5.4.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Unter Verwendung der mächtigkeitsgewichteten Mittelwerte von Pyrit und Calcit liegt das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) am Standort der Bohrungen CAL01 bei 9:1 und am Standort der Bohrung CAL02 bei deutlich kleiner als 1:1. Am Standort CAL01 sind die von der Absenkung und vom Wiederanstieg des Grundwassers betroffenen Sedimente des G150 damit nicht versauerungsdisponiert. Am Standort der Bohrung CAL02 sind sowohl die Sedimente des aktuell grundwasserführenden G150 als auch der hangende G130, der nachbergbaulich vom wiederansteigenden Grundwasser erreicht wird, potenziell versauerungsdisponiert (Tabelle 36).

Tabelle 43: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Calpenzmoor“.

Bohrung	Grundwasserleiter (Stratigraphie-Schlüssel)	Calcit	Pyrit	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		CaCO ₃	FeS ₂	
		mmol/kg	mmol/kg	
CAL01	G150 (2370)	7,72	0,89	9 : 1
CAL02	G130 (1990)	0,50	0,69	<1 : 1
	G150 (2370)	0,50	3,56	<<1 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).

5.4.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in den Bohrungen im Bereich des Calpenzmoores für die Sande des weichselkaltzeitlichen G130 und des saalekaltzeitlichen G150 an fünf bzw. sechs Proben bestimmt.

Tabelle 44: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen CAL01, CAL02, CAL03 und CAL04 im Bereich „Calpenzmoor“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK_{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK	---	meq/kg	---	---	meq/kg
CAL01	G150	1/2	10,0 - 11,8	SF	8,2	93 %	7 %	12,7
		3	11,8 - 12,3	SF	4,7	98 %	2 %	6,0
		4	12,3 - 12,7	SF“SM	9,4	91 %	9 %	26,0
		5	12,7 - 13,3	SF	16,2	92 %	8 %	14,0
		6/7/8	13,3 - 16,0	SF	9,0	98 %	2 %	21,3
CAL02	G130	1	8,0 - 8,8	SM“SG	11,1	84 %	16 %	≤1,0
		2	8,8 - 9,0	SG“SM	9,6	87 %	13 %	≤1,0
		3/4	9,0 - 10,5	SM“SG	11,5	98 %	2 %	≤1,0
	G150	5	10,5 - 11,1	SF	24,7	56 %	44 %	≤1,0
		6/7/8	11,1 - 13,7	SM	8,9	99 %	1 %	≤1,0
		9	13,7 - 15,0	SM	8,4	99 %	1 %	≤1,0

Die effektive Kationenaustauschkapazität wurde in der Bohrung **CAL01** an fünf Proben des G150 zwischen 5 und 16 meq/kg bestimmt (Bild 42 links und Tabelle 44). Die Austauscherplätze sind überwiegend mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 42 rechts und Tabelle 44), wobei die Alkalien mitunter sogar dominieren. Die hydrolytischen Kationen belegen zwischen 2 % und 9 % der Austauscherplätze.

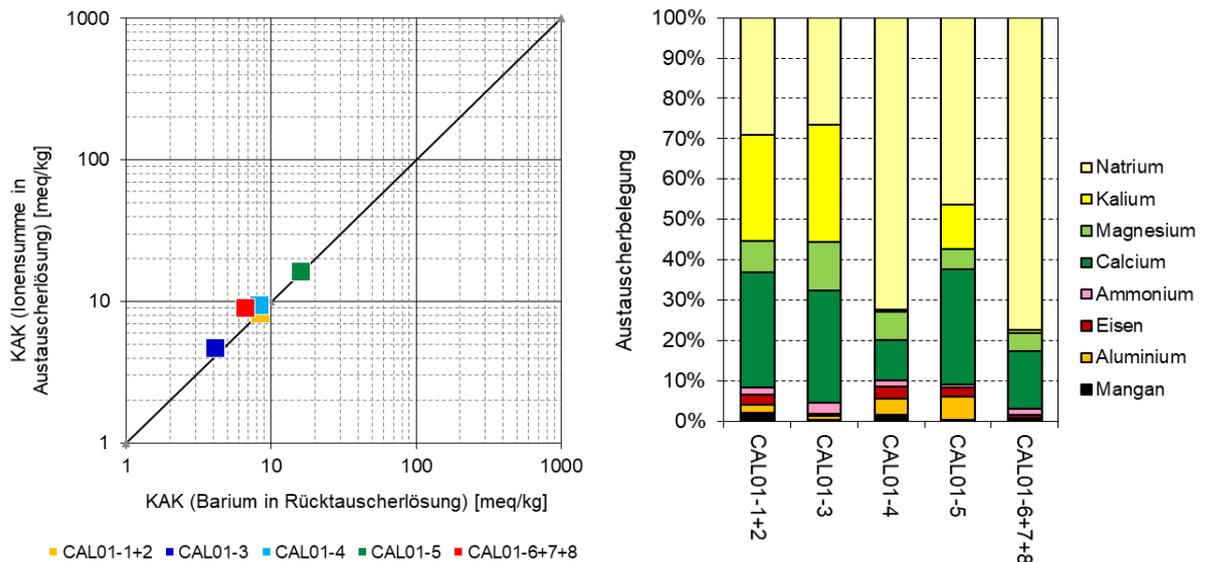


Bild 42: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung CAL01 (rechts).

In der Bohrung **CAL02** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität an sechs Proben zwischen 8 und 25 meq/kg bestimmt (Bild 43 links und Tabelle 44). Die Austauscherplätze sind dominant mit Alkalien belegt (Bild 43 rechts und Tabelle 44), davon vornehmlich mit Natrium (zwischen 28 % und 83 %). Dieser Befund ist geochemisch unplausibel. Die hydrolytischen Kationen sind im Wesentlichen mit 1 % bis 16 % an der Belegung der Austauscherplätze beteiligt. Im Topbereich des G150 wurde ein hoher Wert von 44 % in der Probe CAL02-5 erfasst.

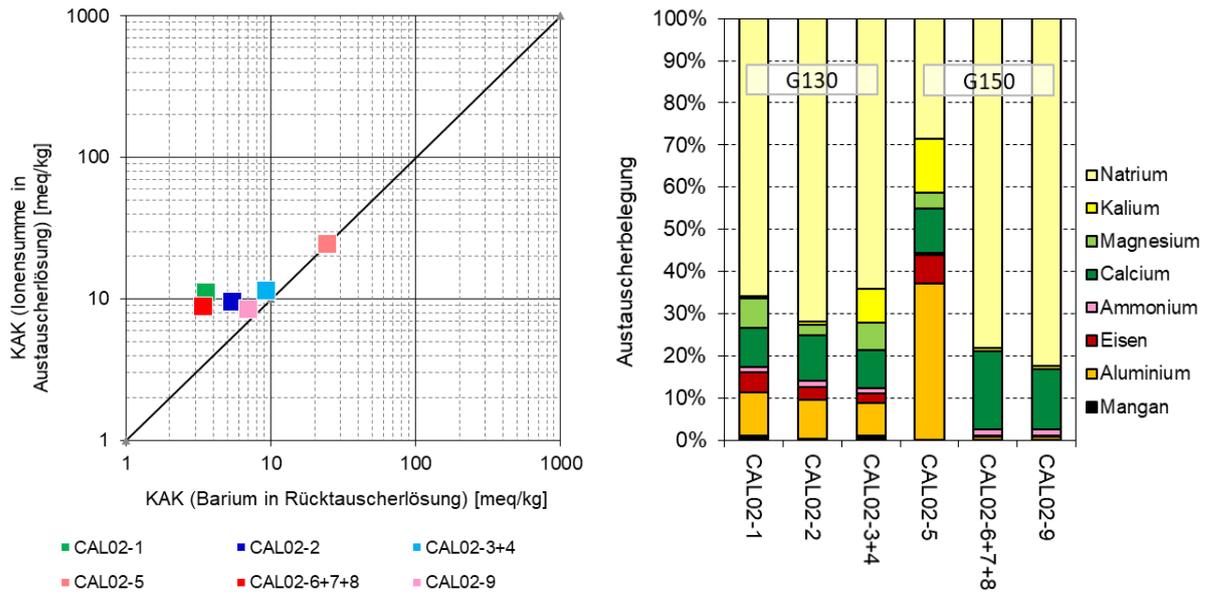


Bild 43: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben der G130 und G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze in den G130 und G150 in der Bohrung CAL02 (rechts).

5.4.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

Das am Standort untersuchte Grundwasser des G122 (19120) und G100 (19153) ist neutral und mit einer Säurekapazität $K_{S4,3}$ von ca. 2 bis 3 mmol/L gepuffert. Die Sulfatkonzentration liegt mit 80 bis 120 mg/L im Bereich des natürlichen Hintergrunds. Eisen ist in Konzentrationen um rund 5 mg/L leicht erhöht (Tabelle 45). Das Grundwasser ist nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 46).

Tabelle 45: Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Calpenzmoor“.

Messstelle (GWL)	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	$K_{S4,3}$	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium-Stickstoff
			mmol/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L
19120(122)	CAL01	7,4	2,4	530	115	5,2	0,14
19153(100)	CAL02	7,4	2,7	470	84	4,7	0,12

Tabelle 46: Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Calpenzmoor“.

Mess-stelle	Zugeordnete Erkundungs-bohrung	pH _{ox}	$K_{S4,3}^{\text{ox}}$
			mmol/L
19120(122)	CAL01	8,4	1,8
19153(100)	CAL02	8,5	2,0



5.4.6 Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGMJaWa [IBGW 2019] wird das Grundwasser im Bereich des Calpenzmoors bis zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserbeeinflussung im Jahr 2033 noch etwa 1,0 bis 1,5 Meter abgesenkt. Nachbergbaulich steigt das Grundwasser dann um 4 bis 5 Meter auf rund +62,5 m NHN an. Am Bohrstandort CAL02 wird dabei auch der G130 wiederaufgefüllt (Tabelle 40).

Tabelle 47: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen CAL01 und CAL02 im Teilbereich „Calpenzmoor“.

Bohrstandort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachbergbaulich)	Maximale Grundwasserabsenkung	Grundwasserwiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
CAL01	+58,9 (G150)	+57,5 (G150)	+62,5 (G150)	-1,4	+5,0
CAL02	+59,7 (G150)	+58,7 (G150)	+62,7 (G130)	-1,0	+4,0

*) aus dem HGMJawa [IBGW 2019]

Als Ausgangszustand des G150 für die Prognose wurde an beiden Standorten die Analyse des G100 aus der Messstelle 19153 herangezogen, da die Probe aus der Messstelle 19120 das Grundwasser im G122 kennzeichnet, der jedoch laut HGMJäWa und der Bohrerkundung vom Grundwasserwiederanstieg nicht erfasst wird.

Die Prognose nach der Methodik im Abschnitt 2.2 ergab, dass im Bereich des Calpenzmoores mit einer leichten Erhöhung der Sulfatkonzentration im G150 auf etwa 110 mg/L zu rechnen ist. Im karbonatgepufferten Milieu im Grundwasserleiter stabilisiert sich die Eisenkonzentration bei ca. 1 mg/L. Im nicht karbonatgepufferten Milieu, wie am Standort CAL02, sind weiterhin leicht erhöhte Eisenkonzentrationen um 5 mg/L zu erwarten (Tabelle 48). Eine Versauerungsdisposition des Grundwassers besteht nicht. Aufgrund der leicht erhöhten Eisenkonzentration kann an Grundwasseraustrittsbereichen lokal mit Verockerung gerechnet werden.

Tabelle 48: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Calpenzmoor“.

Kennwert	Einheit	CAL01		CAL02	
		2020	nach GWWA	2020	nach GWWA
		19153 (100)		19153 (100)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+58,9	+62,5	+59,7	+62,7
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	48,6	52,2	49,7	52,7
pH-Wert	---	7,4	8,0	7,4	6,6
Sulfat	mg/L	84	105	84	114
Eisen-gelöst	mg/L	4,7	0,8	4,7	3,9
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,12	0,1	0,12	0,1
Säurekapazität $K_{S4,3}^{ox}$	mmol/L	2,0	2,2	2,0	0,9

5.5 Pastlingsee und -moor

5.5.1 Übersicht

Das Teilgebiet „Pastlingsee und -moor“ schließt den westlich der Ortslage Grabko liegenden Pastlingsee und das angrenzende Pastlingmoor ein (Bild 44). See und Moor stellen zwei Hohlformen dar, die durch das Abschmelzen von Toteisblöcken des Weichseleises entstanden sind. Durch Sedimenteintrag kam es zur Einschnürung und Bildung von zwei Teilkesseln, in denen sich Pastlingsee und -moor gebildet haben [IBGW 2019]. Umschlossen wird das Gebiet vom 61 ha großen FFH-Gebiet „Pastlingsee“. Das Gebiet liegt ca. 3 Kilometer nordwestlich vom Tagebau Jänschwalde.

Die geochemische Erkundungsbohrung PAS01 und die im Dezember 2020 beprobte Grundwassermessstelle 19156(150) liegen ca. 300 Meter nordwestlich vom Pastlingsee (Bild 44).

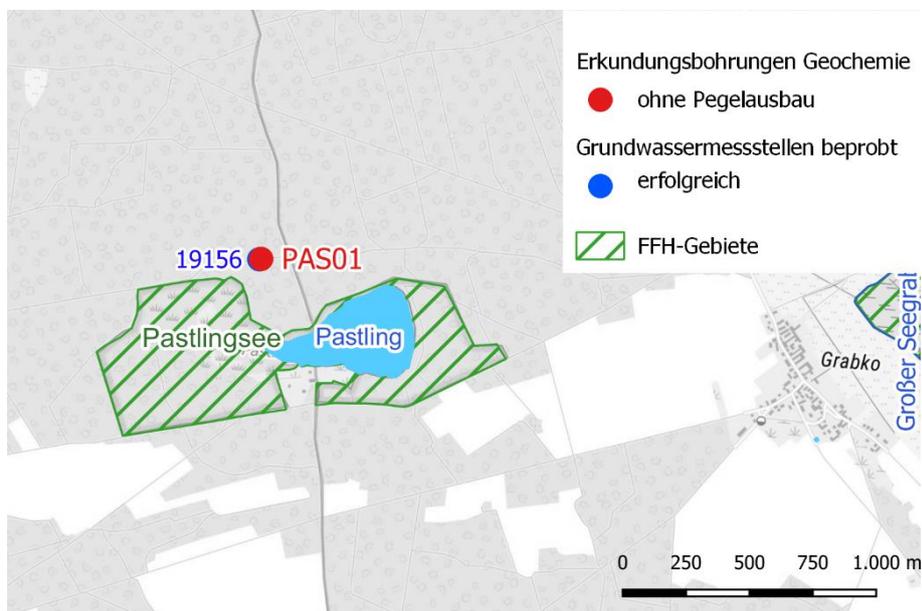


Bild 44: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Pastlingsee- und -moor“.

5.5.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter

Nördlich vom Pastlingsee stehen flurnah mit einer Mächtigkeit von rund 5 Meter die Fein- bis Mittelsande des G124 an. Im Liegenden des G124 folgt der G150 aus dem Saale-Komplex, der sich als Wechsellagerung von Fein-, Mittel- und Grobsanden darstellt. Die Mächtigkeit des G150 beträgt rund 25 Meter (Tabelle 42).

Der mittlere Gesamtschwefelgehalt des G150 beträgt rund 190 ppm. Der mittlere Pyritgehalt wurde daraus zu 0,024 M% bestimmt. Bis ca. 13 m u GOK bzw. oberhalb des gegenwärtigen Grundwasserstandes ist der G150 praktisch karbonatfrei. Im unteren Teil des Bohrprofils bis 20 m u. GOK enthält der G150 teilweise hohe Karbonatgehalte bis 4,0 M%. Im mächtigkeitsgewichteten Mittel beträgt der Calcitgehalt 0,35 M%.



Tabelle 49: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Pastlingsee und -moor“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit	Gesamtschwefel	Disulfid-schwefel	Sulfat-schwefel	Pyrit	Calcit
			beprob/gesamt	ppm	ppm	ppm	M%	M%
			m	ppm	ppm	ppm	M%	M%
CAL01	G124	---	--- / 4,6	---	---	---	---	---
	G150	16	13,6 / 15,2	188,0	128,4	33,1	0,024	0,350

5.5.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Unter Verwendung der mächtigkeitsgewichteten Mittelwerte von Pyrit und Calcit liegt das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) am Standort der Bohrung PAS01 bei 18:1. Die von der Grundwasserabsenkung und vom Grundwasserwiederanstieg betroffenen Sedimente des G150 sind damit nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 50).

Tabelle 50: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrung PAS01 im Bereich „Pastlingsee und -moor“.

Bohrung	Grundwasserleiter (Stratigraphie-Schlüssel)	Calcit	Pyrit	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		CaCO ₃	FeS ₂	
		mmol/kg	mmol/kg	
PAS01	G150 (2370)	34,94	2,0	18 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).

5.5.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

In den von der Grundwasserabsenkung betroffenen quartären Grundwasserleitern ist der Kationenaustauscher neben dem Calciumkarbonat der wesentliche Puffer. In der Bohrung PAS01 wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) an elf Proben bestimmt (Tabelle 51).

Tabelle 51: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in der Bohrung PAS01 im Bereich „Pastlingsee und -moor“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK_{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK	---	meq/kg	---	---	meq/kg
PAS01	G150	1	8,0 - 8,4	SM"SG	7,6	93 %	7 %	≤1,0
		2/3	8,4 - 8,9	SF"SM	8,8	78 %	22 %	≤1,0
		4	8,9 - 9,8	SM"SF	7,9	70 %	30 %	≤1,0
		5	9,8 - 10,9	SF"SM	8,4	72 %	28 %	≤1,0
		6/7	10,9 - 13,0	SF	11,5	70 %	30 %	≤1,0
		8	13,0 - 14,4	SM!SF	82,4	99 %	1 %	142
		9/10	14,4 - 16,0	SF	57,8	99 %	1 %	100
		11/12	16,0 - 17,3	SG"SM	82,8	99 %	1 %	119
		13/14	17,3 - 19,5	SM"SF	63,6	99 %	1 %	86,8
		15	19,5 - 19,8	SM"SG	129	99 %	1 %	264
		16	19,8 - 20,0	SM"OK	185	99 %	1 %	787

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) in der Bohrung **PAS01** im Bereich des Pastlingsees wurde für die Sande des weichselkaltzeitlichen G150 an elf Proben der Fein- und Mittelsande des G150 in einer sehr breiten Spanne zwischen 7 und 185 meq/kg bestimmt (Bild 45 links und Tabelle 51).

Bezüglich der Größe der KAK_{eff} und der Belegung der Austauscherplätze gibt es eine deutliche Zweiteilung des Bohrprofils (Bild 45 rechts und Tabelle 51). Die niedrigeren Werte der KAK_{eff} von 7 bis 12 meq/kg gelten für den oberen Profilabschnitt bis 13 m u. GOK. In diesem Profilabschnitt sind die Austauscherplätze dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt. Die hydrolytischen Kationen belegen 7 % bis 30 % der Austauscherplätze, wobei die hydrolytische Acidität zur Tiefe zunimmt. Die hydrolytische Acidität wird von Aluminium dominiert.

Für den unteren Profilabschnitt ab 13 m u. GOK gelten hohe Werte der KAK_{eff} von 58 bis 185 meq/kg. Hier dominieren mit 92 % bis 96 % Calciumionen die Austauscherbelegung. Dabei handelt es sich wie in den Bohrungen FEU02 und FEU04 (Abschnitt 5.3.3) um ein methodisches Artefakt. Die hohen Werte für die effektive Kationenaustauschkapazität wurden an den kalkhaltigen Substraten bestimmt. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung des unteren Profilabschnitts der PAS01 wider (Abschnitt 5.5.2).

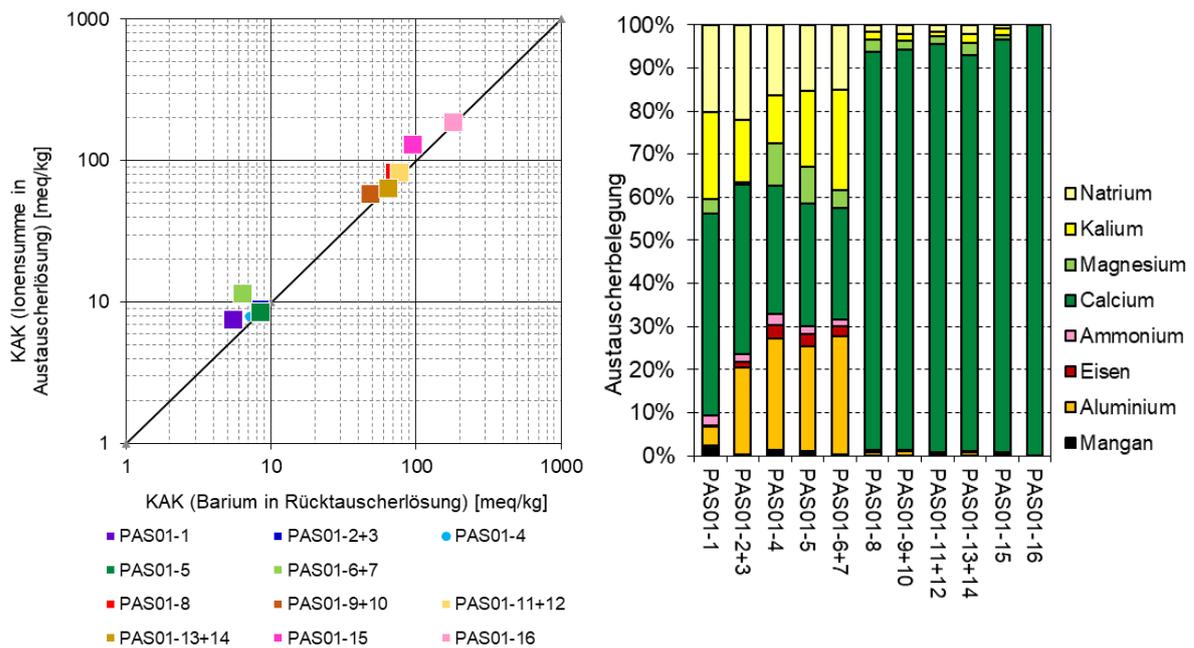


Bild 45: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung PAS01 (rechts).

5.5.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

Das nördlich des Pastlingsees untersuchte Grundwasser im G150 (19156) ist neutral und mit einer Säurekapazität $K_{S4,3}$ von 2,6 mmol/L gepuffert. Die Sulfatkonzentration ist mit 370 mg/L erhöht. Gleiches gilt für eine Eisenkonzentration von 9,0 mg/L (Tabelle 52). Das Grundwasser ist dennoch nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 53).



Tabelle 52: Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Pastlingsee und -moor“.

Messstelle (GWL)	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	K _{S4,3}	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium-Stickstoff
			mmol/L	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L
19156(150)	PAS0102	7,3	2,6	900	370	9,0	0,1

Tabelle 53: Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Pastlingsee und -moor“.

Mess-stelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH _{ox}	K _{S4,3} ^{ox}
			mmol/L
19156(150)	PAS01	8,4	1,6

5.5.6 Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGMJaWa [IBGW 2019] wird das Grundwasser im Bereich des Pastlingsees bis zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserbeeinflussung im Jahr 2033 noch ca. 2,6 Meter abgesenkt. Nachbergbaulich steigt das Grundwasser um über 8 Meter auf rund +61,5 m NHN (Tabelle 54).

Tabelle 54: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrung PAS01 im Bereich „Pastlingsee und -moor“.

Bohr-standort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachbergbaulich)	Maximale Grundwasserabsenkung	Grundwasserwiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
PAS01	+55,6 (G150)	+53,0 (G150)	+61,5 (G150)	-2,6	+8,5

*) aus dem HGMJawa [IBGW 2019]

Im Absenkungsbereich des G150 wird die Pyritverwitterung durch Karbonate gepuffert. Die Pyritverwitterung wird durch steigende Sulfatkonzentrationen, jedoch niedrige Eisenkonzentrationen begleitet. Der Grundwasserwiederanstieg erfolgt schließlich in den oberen, schwefel- und karbonatarmen Horizonten des G150, sodass sich dort niedrige Stoffkonzentrationen einstellen. Im Profilmittel wird die gegenwärtig erfasste Grundwasserbeschaffenheit bestehen bleiben. Der G150 wird nachbergbaulich ein neutrales und mit 400 mg/L sulfatangereichertes Grundwasser führen. Durch den Kalkgehalt wird das Grundwasser niedrige Eisenkonzentrationen <3 mg/L und keine Versauerungsdisposition aufweisen (Tabelle 55).

Tabelle 55: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Pastlingsee und -moor“.

Kennwert	Einheit	PAS01	
		2020	nach GWWA
		19156 (150)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+55,6	+61,5
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	31,0	36,9
pH-Wert	---	7,3	7,3

Kennwert	Einheit	PAS01	
		2020	nach GWWA
		19156 (150)	
Sulfat	mg/L	370	410
Eisen-gelöst	mg/L	9,0	2,5
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,1	1,4
Säurekapazität $K_{S4,3}^{OX}$	mmol/L	1,6	4,6

5.6 Grabkoer Seewiesen

5.6.1 Übersicht

Das Teilgebiet der „Grabkoer Seewiesen“ umfasst die Grabkoer Seewiesen nordöstlich der Ortslage Grabko sowie die zwei Moorflächen des Maschnetzenlauchs und des Torfteichs weiter östlich der Seewiesen (Bild 46). Die Hohlformen dieser drei Teilbereiche sind durch das Abschmelzen von Toteisblöcken des Weichseleises entstanden. Die Grabkoer Seewiesen waren früher ein abflussloser See, der jedoch zur Gewinnung von Grünland und Ackerflächen im Jahr 1867 durch einen Graben abgelassen wurde, [gIR 2019] und [IBGW 2019]. Auch das zugehörige FFH-Gebiet „Grabkoer Seewiesen“ gliedert sich in diese drei Teilbereiche. Es hat eine Fläche von 39 Hektar und liegt ca. 2 Kilometer nördlich vom Tagebau Jänschwalde.

In dem Gebiet wurden vier geochemische Erkundungsbohrungen geteuft und zwei Grundwassermessstellen beprobt (Bild 46). An den Messstellen 18117 und 18189 scheiterte die Grundwasserprobennahme.

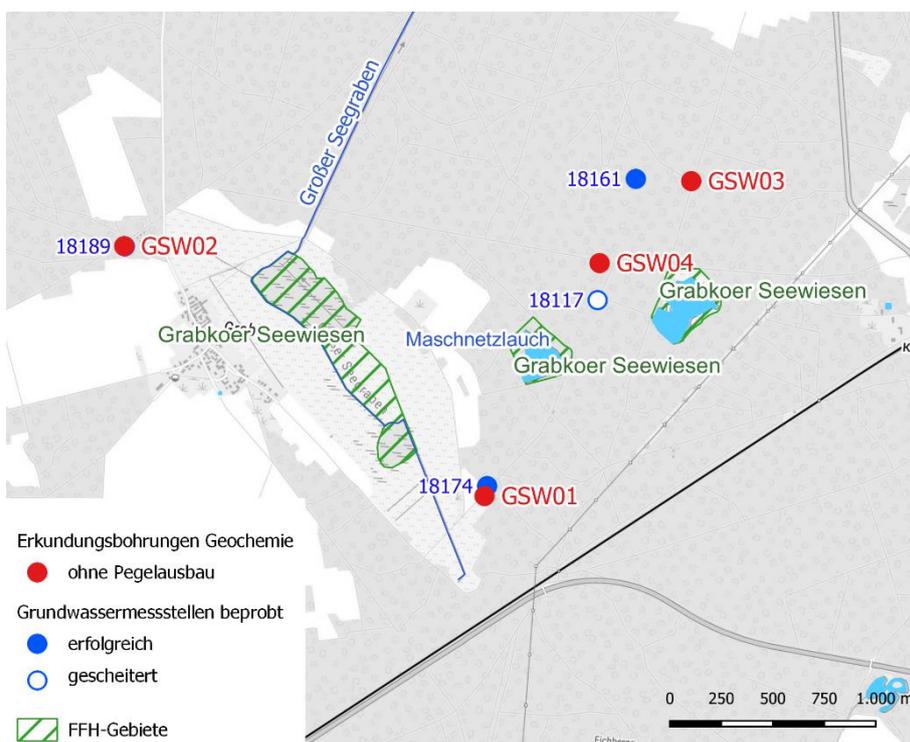


Bild 46: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.



5.6.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter

Im Bereich des FFH-Gebietes „Grabkoer Seewiesen“ stehen flurnah über eine Mächtigkeit bis 20 Meter die weichselkaltzeitlichen Taubendorfer Sande des G130 an. Die mittelsandigen Feinsande sind teilweise von Grobsanden durchsetzt. Im Liegenden des G130 schließen sich glazilimnische Beckenbildungen (gl S1n) und der G150 aus dem Saale-Komplex an. In der Bohrung GSW03 wurden Schluffe der Saale-2-Grundmoräne (Geschiebemergel) mit einer Mächtigkeit von etwa 1 Meter erbohrt. Aus den vier Bohrungen wurden 46 Proben aus verschiedenen Stratigraphien entnommen und geochemisch untersucht (Tabelle 56).

Der weichselkaltzeitliche G130 ist in allen Bohrungen pyritarm. Der Pyritgehalt nimmt in den Bohrprofilen zur Tiefe zu. Das gewichtete Profilmittel des Pyritgehaltes beträgt 0,005...0,027 M%. Der saalekaltzeitliche G150 und die Beckenbildungen enthalten dagegen verhältnismäßig hohe Pyritgehalte. Im G150 (GSW01) beträgt der Pyritgehalt profilgewichtet 1,0 M%. Die Beckenbildungen enthalten bis zu 0,2 M% Pyrit.

Der Calcitgehalt nimmt in allen Bohrungen mit der Tiefe zu. Der weichselkaltzeitliche G130 ist nur in der Bohrung GSW02 als kalkarm zu deklarieren, ansonsten enthält er relevante Calcitgehalte bis etwa 0,5 M%. Die saalekaltzeitlichen Sedimente (G150, Beckenbildungen, Saale-2-Geschiebemergel) sind dagegen kalkreich. Der mittlere Calcitgehalt dieser Sedimente liegt überwiegend zwischen 2 und 5 M%.

Tabelle 56: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich der Grabkoer Seewiesen.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit	Gesamt-	Disulfid-	Sulfat-	Pyrit	Calcit
			beprob/gesamt	schwefel	schwefel	schwefel		
			m	ppm	ppm	ppm	M%	M%
GSW01	G130	12	11,5 / 13,4	276,5	145,2	36,5	0,027	0,234
	gl S1n	1	0,6 / 0,6	1.260	800	50,0	0,150	4,820
	G150	4	2,6 / 2,6	6.569	5.427	50,0	1,015	2,848
GSW02	G130	8	8,7 / 12,6	174,5	88,5	21,9	0,017	0,028
	gl S1n	2	2,0 / 2,0	1.805	1.100	80,0	0,206	0,310
GSW03	G130	5	5,0 / 6,9	36,8	27,6	9,2	0,005	1,442
	gS2-GM	1	0,7 / 0,7	79,6	59,7	19,9	0,011	2,440
	G150	1	0,3 / 0,3	38,6	29,0	9,7	0,005	2,900
	gl S1n	3	3,0 / 3,0	441,3	154,2	45,8	0,029	3,120
GSW04	G130	9	8,7 / 17,4	42,5	31,9	10,6	0,006	0,472

5.6.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Unter Verwendung der mächtigkeitsgewichteten Mittelwerte von Pyrit und Calcit liegt das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) am Standort der Bohrungen GSW03 und GSW04 bei $\geq 100:1$. Die von der Grundwasserabsenkung und vom Grundwasserwiederanstieg in diesem Bereich betroffenen Sedimente des G130 und G150 sind folglich nicht versauerungsdisponiert. Ein mit 10:1 nicht so hoher Calcitüberschuss liegt im oberen G130 am Standort der Bohrung GSW01 vor (Tabelle 57). Eine Versauerungsdisposition liegt am Standort GSW02 und ggf. auch für den G150 am Standort GSW01 vor, wo vergleichsweise hohe Schwefelgehalte gemessen wurden.



Tabelle 57: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.

Bohrung	Stratigraphie bzw. GWL (Schlüssel)	Calcit CaCO ₃	Pyrit FeS ₂	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		mmol/kg TR	mmol/kg TR	
GSW01	G130 (2051)	23,4	2,26	10 : 1
	G150 (2370)	284,6	84,6	3 : 1
GSW02	G130 (2051)	2,81	1,38	2 : 1
	gl S1n (2360)	31,0	17,2	2 : 1
GSW03	G130 (2051)	144	0,43	335 : 1
	gS2-GM (2170)	244	0,94	260 : 1
	G150 (2211)	290	0,45	644 : 1
	gl S1n (2360)	312	2,41	130 : 1
GSW04	G130 (2051)	47,2	0,50	95 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).

5.6.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in den Bohrungen im Bereich Grabkoer Seewiesen für die Sande des weichselkaltzeitlichen G130 und des saalekaltzeitlichen G150 bestimmt.

Tabelle 58: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen GSW01, GSW02, GSW03 und GSW04 im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK _{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK					---
GSW01	G130	1	2,2 - 3,0	SF	19,5	78 %	22 %	6,0
		2	3,0 - 3,6	SF	35,1	79 %	21 %	6,0
		3	3,6 - 4,2	SF“SM	14,5	89 %	11 %	≤1,0
		4/5	4,2 - 6,6	SF“OK	25,8	78 %	22 %	≤1,0
		6	6,6 - 8,0	SF	16,3	93 %	7 %	6,0
		7/8	8,0 - 10,4	SF	24,8	96 %	4 %	61,6
		9/10	10,4 - 12,0	SF“SM	34,0	97 %	3 %	83,7
		11/12	12,0 - 13,8	SF“SM	73,2	99 %	1 %	132
	G150	14	13,8 - 15,3	SG“SM	248	99 %	1 %	536
	15/16	15,3 - 17,0	KF“KM	206	99 %	1 %	592	
GSW02	G130	1	4,3 - 5,3	SM	13,2	91 %	9 %	≤1,0
		2	5,3 - 6,6	SM!SF	9,5	99 %	1 %	≤1,0
		3/4	6,6 - 9,0	SM	9,9	97 %	3 %	17,8
		5	9,0 - 10,0	SM	10,3	99 %	1 %	≤1,0
		6/7	10,0 - 12,0	SM	23,0	99 %	1 %	≤1,0
		8	12,0 - 13,0	SM	19,9	99 %	1 %	≤1,0



Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK _{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
					m u. GOK			
GSW03	G130	1	2,0 - 2,8	SF"SM	17,0	90 %	10 %	99,9
		2/3	2,8 - 4,8	SM"SF	31,4	94 %	6 %	313
		4	4,8 - 5,7	SF"SM	47,9	97 %	3 %	188
		5	5,7 - 7,0	SF	149	99 %	1 %	436
GSW04	G130	1	9,0 - 10,2	SM!SF	5,2	76 %	24 %	122
		2/3	10,2 - 12,1	SM"SF	4,8	94 %	6 %	120
		4/5	12,1 - 14,0	SG"KF	12,5	95 %	5 %	129
		6	14,0 - 15,2	SM!SG	9,6	94 %	6 %	124
		7	15,2 - 16,4	SG!SM	10,0	93 %	7 %	24,0
		8/9	16,4 - 18,0	SG"SM	9,8	94 %	6 %	27,5

In der Bohrung **GSW01** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität in zehn Proben in einer sehr breiten Spanne von 14 bis 248 meq/kg bestimmt (Bild 47 links und Tabelle 58). Die hohen Werte der KAK_{eff} > 70 meq/kg werden in den unteren drei Horizonten unter 12 m u. GOK gemessen. Das betrifft die karbonatreichen Fazies und wird wie im Falle der Bohrungen FEU02 und FEU04 (Abschnitt 0) sowie PAS01 (Abschnitt 0) als methodisches Artefakt bewertet. Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 47 rechts und Tabelle 58), wobei der nahezu hälftige Anteil der Alkalien an der Austauscherbelegung in den oberen Horizonten bis 12 m u. GOK nicht plausibel ist.

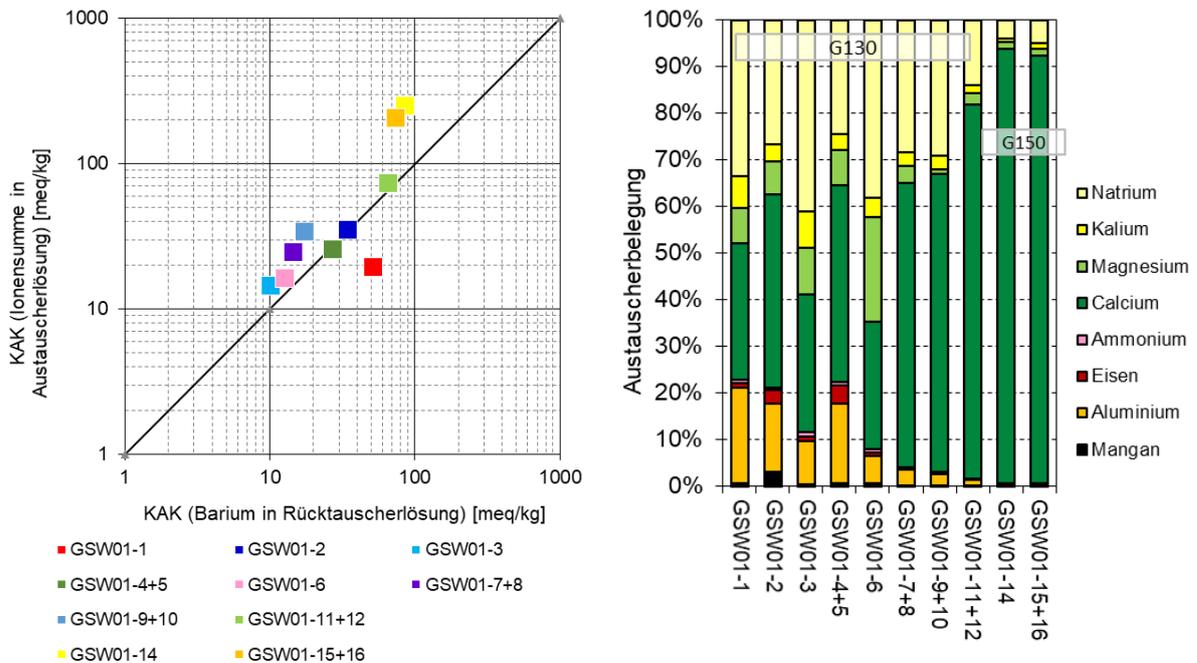


Bild 47: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben der G130 und G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze in den G130 und G150 in der Bohrung GSW01 (rechts).

Die hydrolytischen Kationen belegen zwischen 1 % und 22 % der Austauscherplätze, wobei die hydrolytische Acidität des Kationenaustauschers oberflächennah am höchsten ist und zur Tiefe abnimmt. In den tieferen Horizonten >12 m u. GOK ist keine hydrolytische Acidität nachweisbar. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung im unteren Profilabschnitt der GSW01 wider (Abschnitt 5.6.2).

In der Bohrung **GSW02** wurde die KAK_{eff} an sechs Proben in einer Spanne zwischen 9 und 23 meq/kg bestimmt (Bild 48 links und Tabelle 58). Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 48 rechts und Tabelle 58). Die hohe Belegung der Austauscherplätze von 30 % bis 76 % mit Natriumionen ist unplausibel (Bild 48 rechts). Die hydrolytischen Kationen sind mit 1 % bis 9 % an der Belegung der Austauscherplätze beteiligt. Die hydrolytische Acidität nimmt in der Tiefe des Bohrprofils ab.

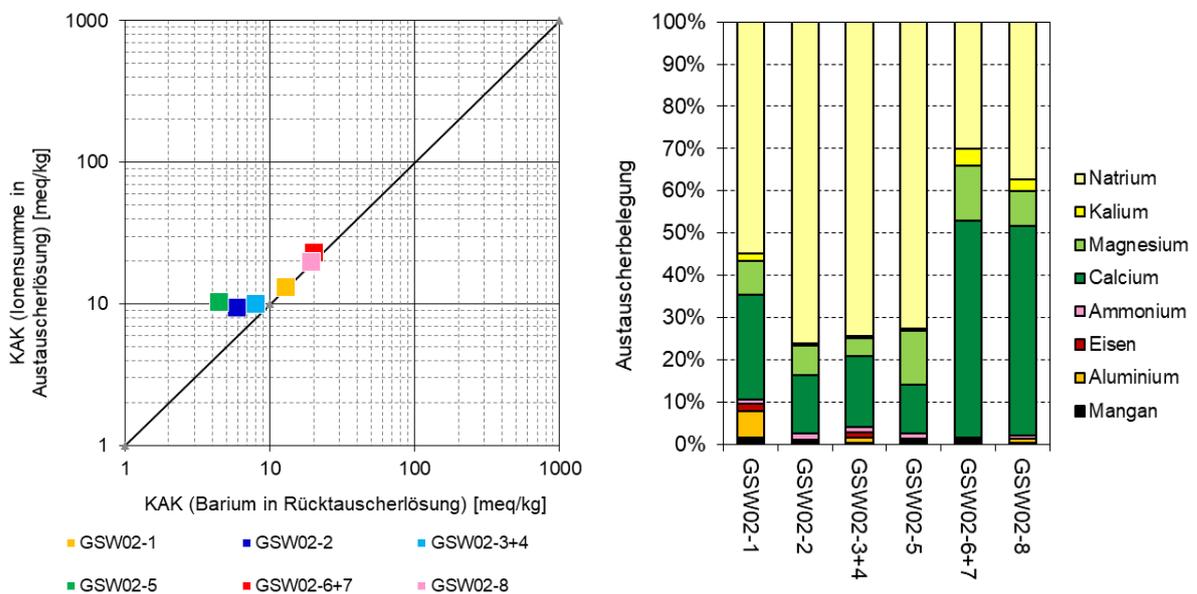


Bild 48: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung GSW02 (rechts).

In der Bohrung **GSW03** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität an vier Proben in einer großen Spanne zwischen 17 und 149 meq/kg bestimmt (Bild 49 links und Tabelle 58). Die hohen Werte zumindest im unteren kalkreichen Horizont werden wie in der GWS01 (siehe oben) als Artefakt bewertet. Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 49 rechts und Tabelle 58). Mit 79 % bis 96 % sind die Austauscherplätze vornehmlich mit Calciumionen belegt, wobei der Anteil in der Tiefe zunimmt. Die hydrolytischen Kationen sind mit 1 % bis 10 % am Austauscher vertreten. Die hydrolytische Acidität nimmt zur Tiefe ab. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung im Profil der GSW03 wider (Abschnitt 5.6.2).

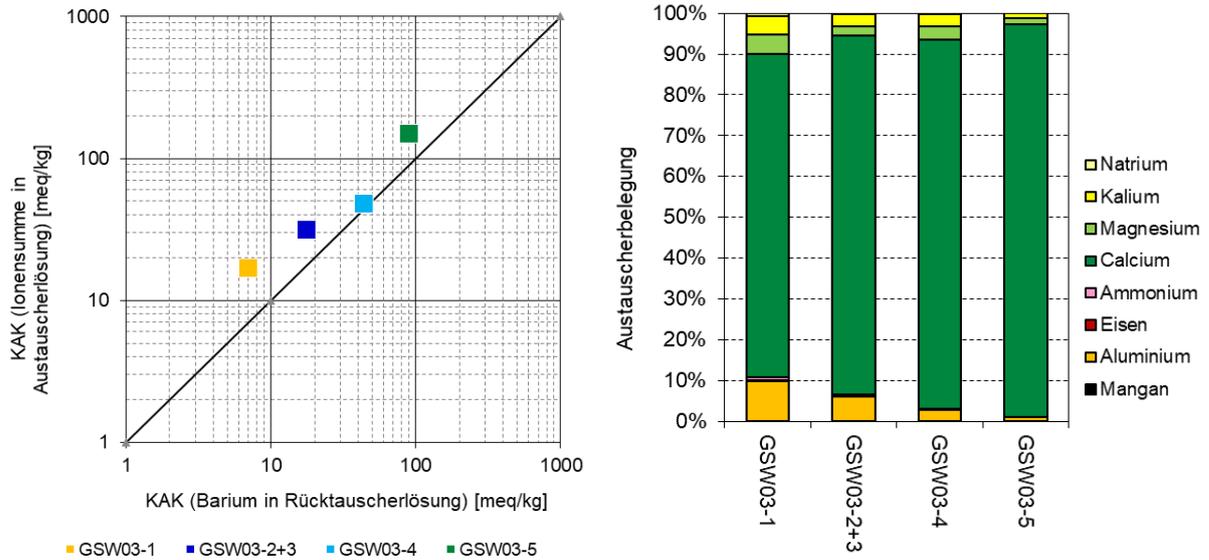


Bild 49: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung GSW03 (rechts).

In der Bohrung **GSW04** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) in sechs Proben in einer Spanne von 5 bis 12 meq/kg bestimmt (Bild 50 links und Tabelle 58). Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 50 rechts und Tabelle 58). Die hydrolytischen Kationen belegen zwischen 5 % und 24 % der Austauscherplätze. Ihr Anteil nimmt zur Tiefe ab.

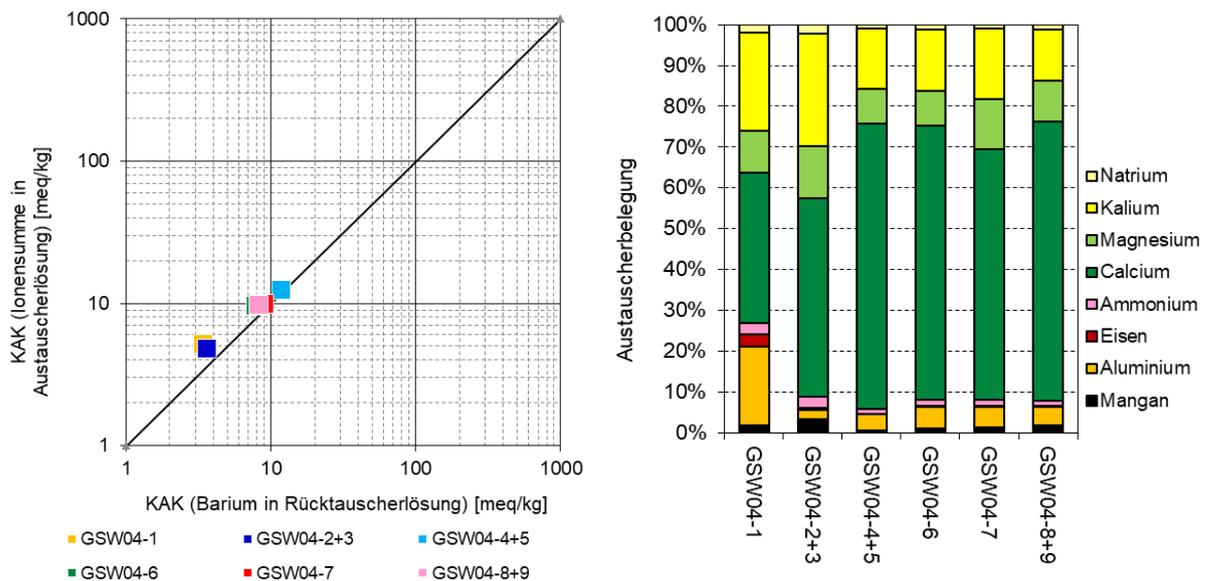


Bild 50: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G130 in der Bohrung GSW04 (rechts).



5.6.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

Das am Standort untersuchte Grundwasser des G150 (18174) und G100 (18161) ist neutral. Im Sättigungsgleichgewicht mit Calcit weist das Grundwasser eine Säurekapazität $K_{S4,3}$ zwischen 2 und 3 mmol/L auf. Die Sulfatkonzentration ist mit rund 100 mg/L nicht erhöht. Eisen ist in Konzentrationen bis rund 2 mg/L und Ammoniumstickstoff bis 0,3 mg/L enthalten (Tabelle 59). Das Grundwasser weist keine Versauerungsdisposition auf (Tabelle 60).

Tabelle 59: Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.

Messstelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	$K_{S4,3}$	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium
			mmol/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L
18174(150)	GSW01	7,9	3,0	520	92	0,3	0,15
18189(130)	GSW02	gescheitert					
18161(100)	GSW03	7,6	2,0	430	107	1,6	0,26
18117(150)	GSW04	gescheitert					

Tabelle 60: Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.

Mess-stelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH _{ox}	$K_{S4,3}^{\text{ox}}$
			mmol/L
18174(100)	GSW01	8,5	2,5
18189(150)	GSW02	---	---
18161(130)	GSW03	8,4	1,5
18117(150)	GSW04	---	---

5.6.6 Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGMJaWa [IBGW 2019] wird das Grundwasser im Bereich der Grabkoer Seewiesen bis zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserbeeinflussung im Jahr 2033 noch rund 3 bis 6 Meter abgesenkt. Nachbergbaulich steigt das Grundwasser um 8 bis 14 Meter auf +59,5...61,1 m NHN an (Tabelle 61).

Tabelle 61: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen GSW01 bis GSW04 im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.

Bohr-standort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachbergbaulich)	Maximale Grundwasserabsenkung	Grundwasserwiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
GSW01	+53,0 (G130)	+47,0 (G130)	+60,7 (G130)	-6,0	+13,7
GSW02	+55,2 (G130)	+52,0 (G130)	+61,1 (G130)	-3,2	+9,1
GSW03	+54,3 (G150)	+51,5 (G150)	+59,5 (G150)	-2,8	+8,0
GSW04	+55,2 (G130)	+51,3 (G130)	+60,0 (G130)	-3,9	+8,7

*) aus dem HGMJawa [IBGW 2019]



Als Ausgangszustand des G130 wurde an den Standorten GSW01, GSW02 und GSW04 die Analyse vom G100 aus der Messstelle 181611 herangezogen. Für den am Standort der Bohrung GSW03 maßgeblichen G150 wurde die Analyse der Messstelle 18174 verwendet.

Die Prognose nach der Methodik im Abschnitt 2.2 ergab, dass im Bereich des Grabkoer Seewiesen mit einer Erhöhung der Sulfatkonzentration im G130 bzw. G150 auf 200 bis 400 mg/L zu rechnen ist. Unter karbonatgepufferten Verhältnissen im Grundwasserleiter steigt die Eisenkonzentration maximal auf 3 mg/L. Bei Mangel an Calciumkarbonat, wie am Standort GSW02, ist mit höheren Eisenkonzentrationen von etwa 25 mg/L zu rechnen (Tabelle 62). Eine Versauerungsdisposition des Grundwassers besteht nicht. Bei erhöhter Eisenkonzentration kann an den Grundwasseraustrittsbereichen eine Verockerung auftreten.

Tabelle 62: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Grabkoer Seewiesen“.

Kennwert	Einheit	GSW01		GSW02		GSW03		GSW04	
		2020	nach GWWA						
		18161 (100)		18161 (100)		18174 (150)		18161 (100)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+53,0	+60,7	+55,2	+61,1	+54,3	+59,5	+55,2	+60,0
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	18,7	26,4	2,5	8,9	3,3	8,5	5,1	9,7
pH-Wert	---	7,6	7,4	7,6	6,4	7,9	7,8	7,6	7,7
Sulfat	mg/L	110	400	110	400	92	190	110	280
Eisen-gelöst	mg/L	1,7	2,7	1,7	25	0,3	1,3	1,7	1,5
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,26	0,5	0,26	0,6	0,15	0,2	0,26	0,5
Säurekapazität $K_{S4,3}^{ox}$	mmol/L	1,5	4,1	1,5	0,8	2,5	2,7	1,5	3,0

5.7 Moaske und Auenbereich Eilenzfließ

5.7.1 Übersicht

Das Teilgebiet „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“ umfasst Bereiche unmittelbar östlich bzw. nordöstlich vom Tagebau Jänschwalde, einschließlich des Grenzbereichs zur Republik Polen entlang der Lausitzer Neiße (Bild 51). Zu diesem Teilgebiet gehören auch die Moaske und das Eilenzfließ, die jeweils in die Lausitzer Neiße münden.

Am Ostrand des Tagebaus Jänschwalde verläuft eine Dichtwand, die auf der Höhe der Ortslage Taubendorf endet und die bergbaubedingte Grundwasserabsenkung in der Neißeau begrenzt. Das FFH-Gebiet „Neißeau“, das sich unmittelbar östlich an den Tagebau Jänschwalde anschließt, deckt das Neißetal des Teilgebietes ab. In dem Teilgebiet dominieren als Landnutzungsformen Äcker, Wiesen und Weiden.

In dem Teilgebiet wurden vier geochemische Erkundungsbohrungen (NEI01-04) geteuft sowie vier Grundwassermessstellen untersucht (Bild 51).

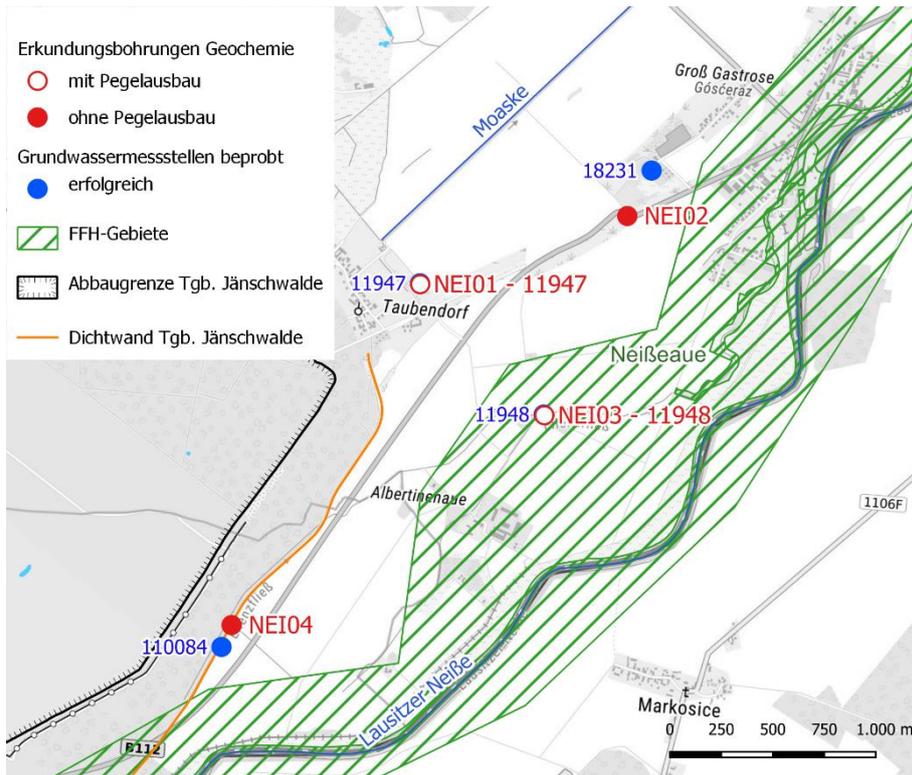


Bild 51: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

5.7.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter

An den vier Bohrstandorten wurden über die kompletten Profile die Mittelsande des saalekaltzeitlichen G150 aufgeschlossen. In der Bohrung NEI01 sind im Hangenden Schluff- und Tonschichten eingeschaltet. Im Liegenden gehen die feinsandigen Mittelsande in grobsandige Mittelsande bis mittelsandige Grobsande über. Der G150 besteht überwiegend aus grobsandigen Mittelsanden, die zur Basis hin feiner werden. Am Standort der Bohrung NEI04 standen im Hangenden des G150 noch 1,5 Meter mächtige mittel- bis grobsandige Ablagerungen des G140 und teils bindige glazilimnische Schluffe (gl S1n) an.

Der mittlere, mächtigkeitsgewichtete Schwefelgehalt des G150 liegt zwischen 60 ppm in der Bohrung NEI02 und 300 bis 800 ppm in den Bohrungen NEI01, NEI03 und NEI04. Pyrit ist in mittleren Gehalten von 0,008 bis 0,12 M% vertreten. Am Standort der Bohrungen NEI02 und NEI04 ist der G150 mit 0,044 M% bzw. 0,026 M% vergleichsweise karbonatarm. An den Standorten NEI01 und NEI03 liegt der mittlere Calciumkarbonatgehalt mit rund 0,7...0,8 M% deutlich höher (Tabelle 63).



Tabelle 63: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit	Gesamtschwefel	Disulfid-schwefel	Sulfat-schwefel	Pyrit	Calcit
			beprob/gesamt					
NEI01	G150	28	33,0 / 33,7	817,2	624,6	99,4	0,117	0,713
NEI02	G150	8	7,5 / 7,5	60,0	45,0	15,0	0,008	0,044
NEI03	G150	17	13,9 / 15,2	586,0	389,2	87,7	0,073	0,775
NEI04	G140	---	--- / 0,6	---	---	---	---	---
	gl S1n	---	--- / 0,9	---	---	---	---	---
	G150	26	13,4 / 14,6	310,5	105,4	190,3	0,020	0,026

5.7.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Unter Verwendung der mächtigkeitsgewichteten Mittelwerte von Pyrit und Calcit liegt das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) am Standort der Bohrungen NEI01 bis NEI03 zwischen 6:1 und 13:1. Die in diesem Bereich von der Grundwasserabsenkung und vom Grundwasserwiederanstieg betroffenen Sedimente des G150 sind damit nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 64). Eine Versauerungsdisposition ergibt sich für den Standort der Bohrung NEI04, wo Calciumkarbonat in den Sanden des G150 nur in einzelnen Proben und geringen Gehalten gefunden wurde.

Tabelle 64: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Bohrung	Stratigraphie bzw. GWL (Schlüssel)	Calcit	Pyrit	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		CaCO ₃	FeS ₂	
		mmol/kg TR	mmol/kg TR	
NEI01	G150 (2370)	71,2	9,7	7 : 1
NEI02	G150 (2370)	4,4	0,7	6 : 1
NEI03	G150 (2370)	77,4	6,1	13 : 1
NEI04	G150 (2370)	2,6	1,6	2 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).

5.7.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in den Bohrungen im Bereich Moaske und Auenbereich Eilenzfließ an den Sanden des weichselkaltzeitlichen G150 bestimmt.

Tabelle 65: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen NEI01, NEI02, NEI03 und NEI04 im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK _{eff} (Austausch-lösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK	---	meq/kg	---	---	meq/kg
NEI01	G150	11-13	9,0 - 12,0	SM!SF	17,0	97 %	3 %	4,0
		14/15	12,0 - 16,1	SF"SM	44,0	97 %	3 %	6,4
		16-18	16,1 - 21,3	SM"SF	61,2	98 %	2 %	90,5
		19	21,3 - 21,7	SM!U	64,7	99 %	1 %	106
		20/21	21,7 - 25,7	SM!SG	52,9	99 %	1 %	43,5
		23/24	25,7 - 29,0	SM"SG	164	99 %	1 %	1.230
		25	29,0 - 31,0	SG!T	96,2	99 %	1 %	32,0
		26	31,0 - 32,5	SM	42,6	92 %	8 %	12,0
		27	32,5 - 33,3	SG!KF	18,7	98 %	2 %	10,0
		28	33,3 - 34,0	SM	17,7	96 %	4 %	36,0
NEI02	G150	1/2	0,5 - 2,0	SF	19,9	87 %	13 %	12,0
		4/5	2,0 - 5,0	SF	15,1	98 %	2 %	14,9
		6/7/8	5,0 - 8,0	SM"SF	14,4	97 %	3 %	≤1,0
NEI03	G150	2	2,6 - 4,0	SM"SG	11,8	94 %	6 %	≤1,0
		3/4	4,0 - 5,1	SM"SG	10,6	94 %	6 %	8,1
		8/9	8,2 - 10,1	SF"U	151	100 %	<1 %	472
		18	10,1 - 13,0	SM"SF	33,8	98 %	2 %	247
		19	13,0 - 16,0	SF	16,0	97 %	3 %	16,3
NEI04	G150	3	3,0 - 4,0	SG"SM	6,4	50 %	50 %	6,0
		4/5/6	4,0 - 4,9	SM"SG	6,7	57 %	43 %	6,0
		8/9	5,4 - 6,0	SG"SM	6,7	51 %	49 %	≤1,0
		10/11	6,0 - 7,7	SG"SM	7,1	39 %	61 %	2,2
		12-14	7,7 - 10,0	SM"SF	22,0	24 %	76 %	≤1,0
		17	11,0 - 11,8	SM"SF	17,9	50 %	50 %	≤1,0
		20/21	12,7 - 13,0	SG"KF	5,2	94 %	6 %	6,0
		22	13,0 - 13,7	SF!U	7,5	96 %	4 %	10,0
		23	13,7 - 14,3	SM!SF	7,4	97 %	3 %	24,0
		24	14,3 - 15,0	SF"SM	4,7	91 %	9 %	48,0
25	15,0 - 15,8	SG!SF	4,2	98 %	2 %	≤1,0		

Die effektive Kationenaustauschkapazität wurde in der Bohrung **NEI01** an zehn Proben des Grundwasserleiters G150 in einer Spanne zwischen 17 und 164 meq/kg bestimmt (Bild 52 links und Tabelle 65). Die hohen Werte der Kationenaustauschkapazität werden in kalkreichen Horizonten bestimmt. Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt, wobei Calcium dominiert (Bild 52 rechts und Tabelle 65). Die hydrolytische Acidität beträgt lediglich 1 % bis 8 % der Austauscherbelegung. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung im mittleren Profilabschnitt (Horizonte 19-24) der NEI01 wider (Abschnitt 5.7.2).

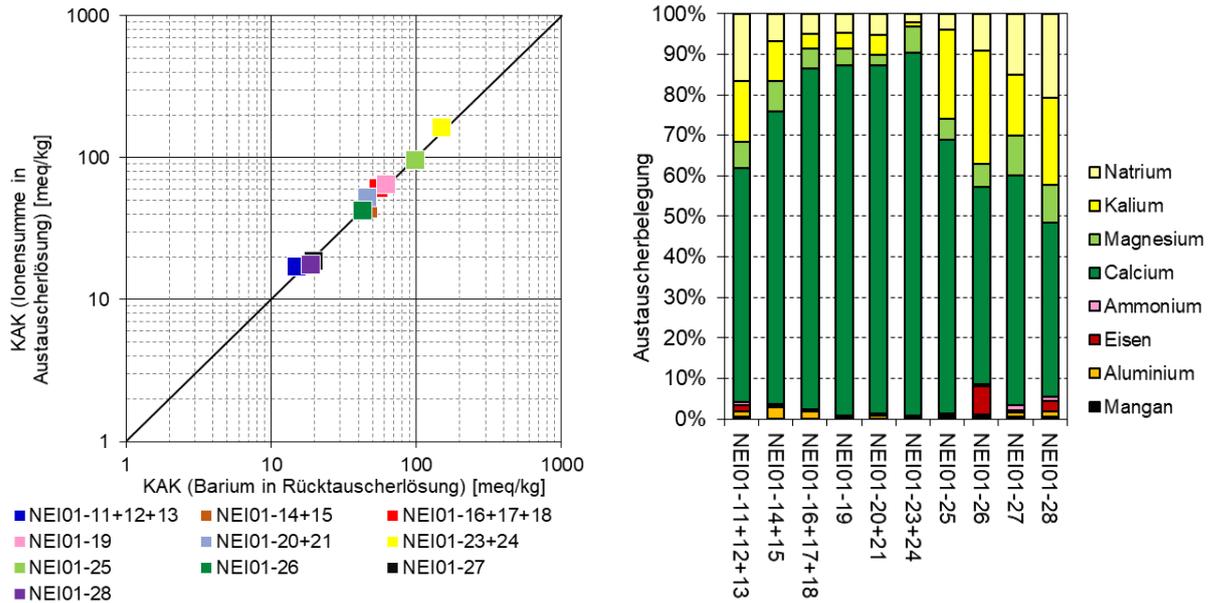


Bild 52: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI01 (rechts).

In der Bohrung **NEI02** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität in drei Proben zwischen 14 und 20 meq/kg bestimmt (Bild 53 links und Tabelle 65). Die Austauscher sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 53 rechts und Tabelle 65). Die hydrolytische Acidität nimmt lediglich 2 % bis 13 % der Austauscherbelegung ein. Die höheren Werte der hydrolytischen Acidität werden oberflächennah erfasst.

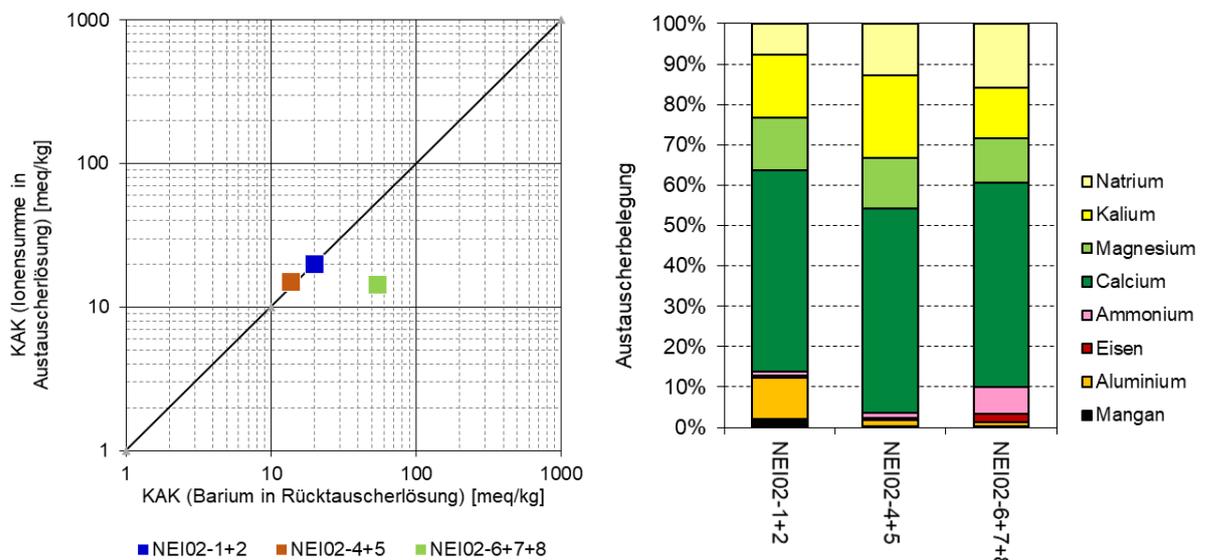


Bild 53: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI02 (rechts).

In der Bohrung **NEI03** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) in fünf Proben in einer Spanne zwischen 11 und 151 meq/kg bestimmt (Bild 54 links und Tabelle 65). Der einzelne hohe Wert von 151 meq/kg gehört zum kalkreichen Horizont



8/9. Die Austauscher sind vorwiegend mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 54 rechts und Tabelle 65). Die hydrolytische Acidität ist mit <1 % im kalkhaltigen Horizont 8/9 und bis zu 6 % in den kalkarmen Horizonten an der Austauscherbelegung beteiligt. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung im mittleren Profilabschnitt (Horizonte 8/9 und 18) der NEI03 wider (Abschnitt 5.7.2).

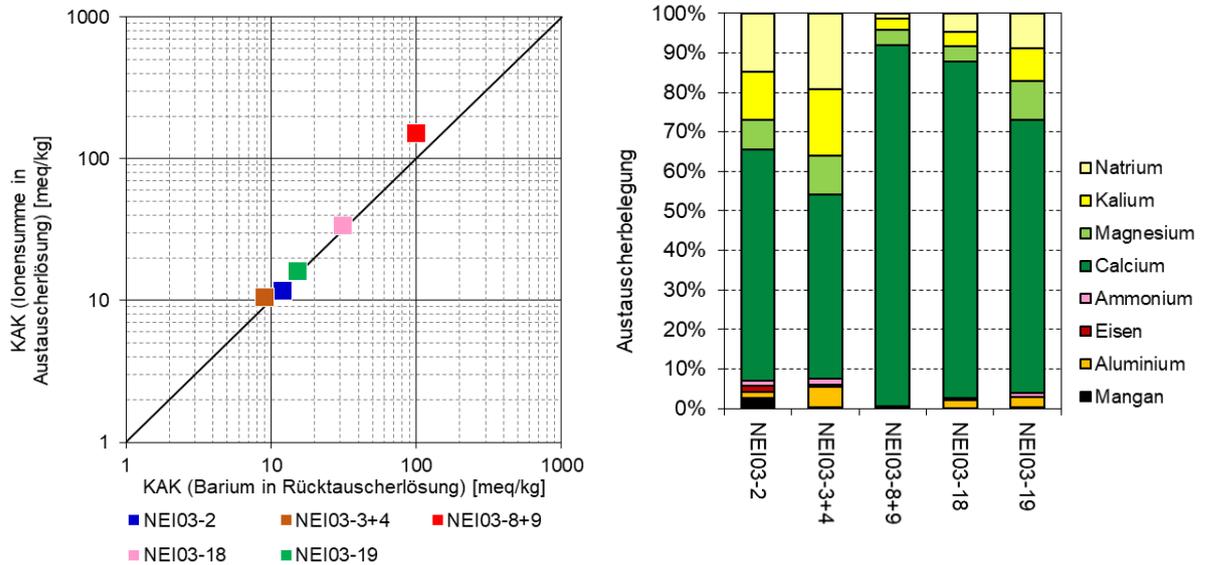


Bild 54: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI03 (rechts).

In der Bohrung **NEI04** wurde an elf Proben der Sande des G150 die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) zwischen 4 und 22 meq/kg bestimmt (Bild 55 links und Tabelle 65).

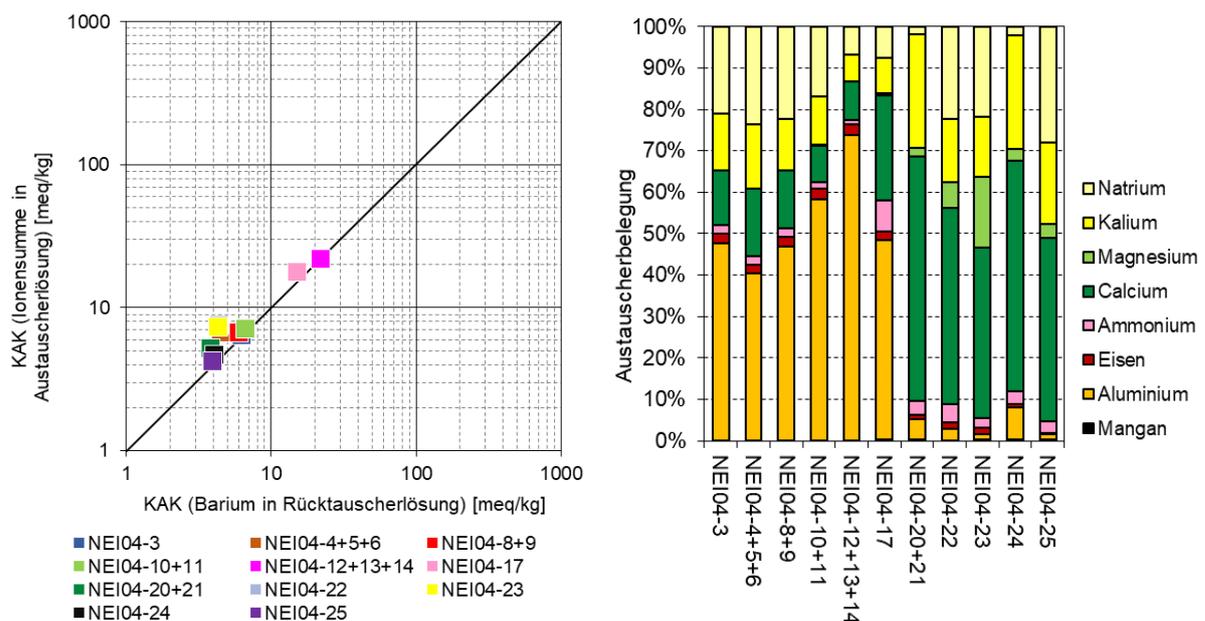


Bild 55: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G150 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G150 in der Bohrung NEI04 (rechts).



Die Austauscherplätze sind im Hangenden der Bohrung NEI04 bis 11,8 m u GOK dominant mit hydrolytischen Kationen, vornehmlich mit Aluminium, belegt (Bild 55 rechts und Tabelle 65). Unter dem stark schluffigen Horizont 18/19 verändert sich die Austauscherbelegung. Im Liegenden dominieren Erdalkalien und Alkalien am Austauscher. Die hydrolytische Acidität nimmt nurmehr 2 % bis 9 % der Austauscherplätze ein. Die aluminiumdominierte Austauscherbelegung im oberen Profilabschnitt (Horizonte 3-14 und 17) der NEI04 spiegelt aktuelle Versauerungsprozesse wider (Abschnitt 5.7.2).

5.7.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

Im Bereich der Moaske und im Auenbereich des Eilenzfließes wurden im Dezember 2020 die Grundwassermessstellen 11947, 11948, 18321 und 110084 beprobt (Tabelle 66). Die GWM 110084 liegt neben der Dichtwand auf der tagebauabgewandten Seite. Sie hatte dadurch eine stärkere Grundwasserabsenkung und einen stärkeren Grundwasserwiederanstieg erfahren. Die anderen drei Messstellen sind bislang nur von der Grundwasserabsenkung erfasst.

Das am Standort untersuchte Grundwasser des G100 (GWM 18231 und 110084) und G150 (GWM 11947 und 11948) ist neutral und mit einer Säurekapazität $K_{S4,3}$ von 1,0 bis 2,5 mmol/L gepuffert. Die Sulfatkonzentration ist an den Standorten NEI01 und NEI03 mit 60 bis 70 mg/L standorttypisch niedrig und in der NEI02 mit 170 mg/L leicht erhöht. Eisen ist in natürlichen Konzentrationen bis 3 mg/L enthalten.

In der Messstelle 110084(100) neben der Dichtwand werden höhere Konzentrationen von rund 300 mg/L Sulfat sowie 31 mg/L Eisen gemessen. Das ist auf die am Tagebaurand größere Grundwasserabsenkung und den im Zusammenhang mit dem Dichtwandbau erfolgten Grundwasserwiederanstieg zurückzuführen. An allen Standorten ist das Grundwasser nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 67).

Tabelle 66: Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Messstelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	$K_{S4,3}$	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium-Stickstoff
			mmol/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L
11947(150)	NEI01	7,2	2,2	460	58	3,4	0,07
18231(100)	NEI02	6,4	1,1	720	172	3,3	0,45
11948(150)	NEI03	7,6	2,5	520	74	1,6	0,43
110084(100)	NEI04	6,4	1,9	980	304	31,3	0,70

Tabelle 67: Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Messstelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH_{ox}	$K_{S4,3}^{\text{ox}}$
			mmol/L
11947(150)	NEI01	8,4	1,6
18231(100)	NEI02	8,0	0,7
11948(150)	NEI03	8,5	2,2
110084(100)	NEI04	8,0	0,6



5.7.6 Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGMJaWa [IBGW 2019] wird das Grundwasser im Bereich der Moaske und des Eilenzfließes bis zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserbeeinflussung im Jahr 2033 weitere 0,4 bis 1,3 Meter abgesenkt. Nachbergbaulich steigt das Grundwasser rund 18 Meter an auf ein Niveau von +54,0 bis +56,5 m NHN (Tabelle 68).

Tabelle 68: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen GSW01 bis GSW04 im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Bohrstandort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachbergbaulich)	Maximale Grundwasserabsenkung	Grundwasserwiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
NEI01	+38,4 (G150)	+38,0 (G150)	+56,5 (G150)	-0,4	+18,5
NEI02	+50,6 (G150)	+50,2 (G150)	+54,9 (G150)	-0,4	+4,7
NEI03	+49,6 (G150)	+48,3 (G150)	+54,0 (G150)	-1,3	+5,7
NEI04	+55,9 (G150)	+55,0 (G150)	+56,0 (G150)	-0,9	+1,0

*) aus dem HGMJawa [IBGW 2019]

Die Prognose nach der Methodik im Abschnitt 2.2 ergab, dass im Bereich der Moaske und im Auenbereich des Eilenzfließes mit einer Erhöhung der Sulfatkonzentration im G150 auf etwa 130 bis 660 mg/L sowie der Eisenkonzentration auf 2 bis 8 mg/L zu rechnen ist. Eine Versauerungsdisposition des Grundwassers besteht unter diesen Bedingungen nicht. An Grundwasseraustrittsbereichen können lokal Verockerungserscheinungen auftreten.

Bei örtlichem Mangel an Calciumkarbonat im Grundwasserleiter, wie am Standort NEI04, ist mit höheren Eisenkonzentrationen im Grundwasser bis etwa 30 mg/L zu rechnen, wie sie bereits aktuell vorliegt (Tabelle 69). In diesem Fall weist das Grundwasser eine Versauerungsdisposition auf.

Tabelle 69: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Kennwert	Einheit	NEI01		NEI02		NEI03		NEI04	
		2020	nach GWWA	2020	nach GWWA	2020	nach GWWA	2020	nach GWWA
		11947 (150)		18231 (100)		11948 (150)		110084 (100)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+38,4	+56,5	+50,6	+54,9	+49,6	+54,0	+55,9	+56,0
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	16,9	35,0	9,1	13,4	19,4	23,8	30,9	31,0
pH-Wert	---	7,2	7,2	6,4	6,9	7,6	7,6	6,5	5,7
Sulfat	mg/L	58	660	172	200	74	125	300	320
Eisen-gelöst	mg/L	3,4	3,7	3,3	7,6	1,7	1,7	31,3	25
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,07	0,7	0,45	0,5	0,4	0,4	0,7	0,6
Säurekapazität $K_{S4,3}^{ox}$	mmol/L	1,6	5,3	0,7	1,4	2,2	2,5	0,6	-0,6



5.8 Jänschwalder Laßzinswiesen

5.8.1 Übersicht

Das Teilgebiet „Jänschwalder Laßzinswiesen“ umfasst die namensgebenden Laßzinswiesen, eine Wiesenlandschaft nordöstlich der Ortslage Peitz (Bild 56). Die Jänschwalder Laßzinswiesen stellen ein annähernd kreisförmiges Gebiet von 5 bis 6 Kilometer Durchmesser mit einem sehr flachen Geländeniveau dar, das von zahlreichen Gräben durchzogen ist [IBGW 2019]. Der Laßzinsgraben ist die Hauptvorflut und durchquert das Gebiet von Nordosten nach Südwesten und mündet nahe der Ortslage Peitz in die Malxe. Außerhalb der Laßzinswiesen steigt das Gelände zu den Ortslagen Preilack und Trauer im Nordwesten, Drewitz im Nordosten sowie Jänschwalde Dorf im Osten terrassenartig an.

Das FFH-Gebiet „Peitzer Teiche - Teilgebiet Laßzinswiesen“ hat eine Fläche von 429 ha und liegt im nördlichen Bereich der Wiesenlandschaft und ca. 2 Kilometer westlich vom Tagebau Jänschwalde [glR 2019] (Bild 56).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden die Erkundungsbohrungen PEI01 südlich der Laßzinswiesen, PEI02 an der Puschelnitza Jänschwalde, PEI03 am Laßzinsgraben südwestlich von Drewitz und PEI04 nördlich der Laßzinswiesen geteuft. Die Grundwasserbeschaffenheit wurde im Süden des Gebietes an der neu errichteten Messstelle 11931 untersucht. Die Beprobung der nördlichen Messstellen 19077 und 19017 scheiterte. Am Südrand der Laßzinswiesen liegt die Messstelle 11601, die im Rahmen des LEAG-Grundwassergütemonitorings regelmäßig beprobt wird (Bild 56).

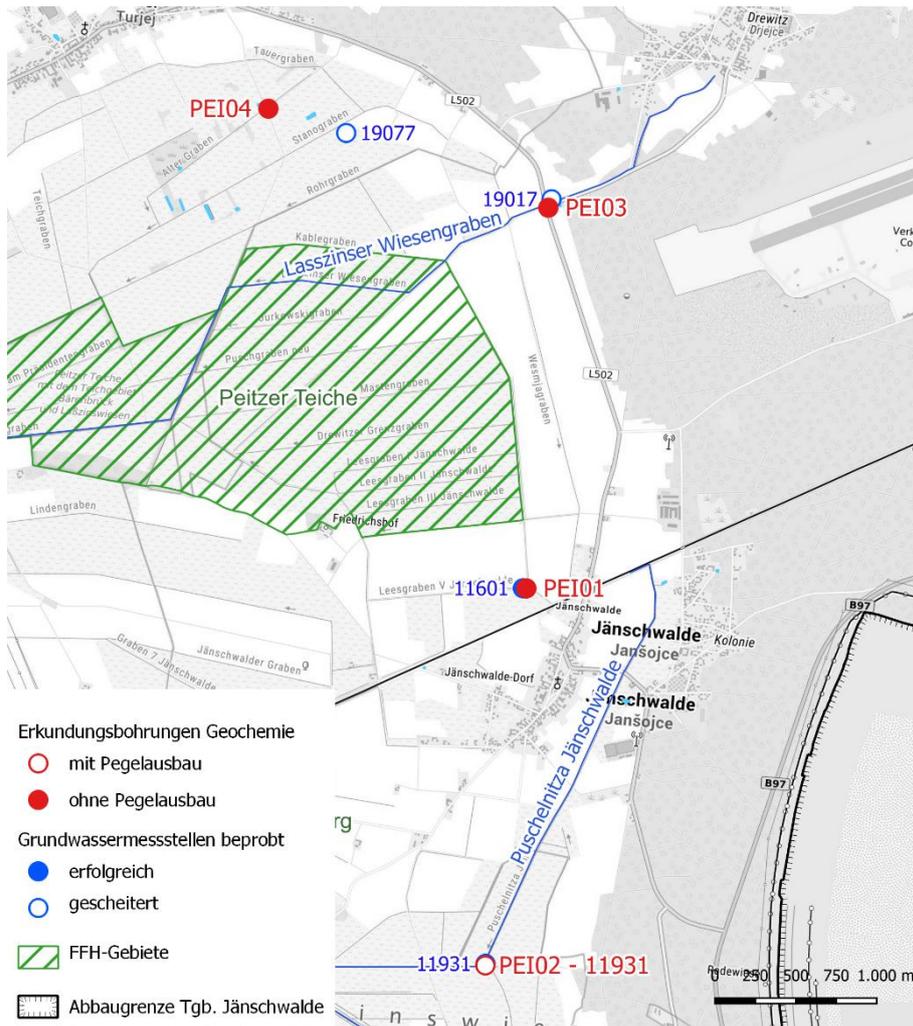


Bild 56: Lage der geochemischen Erkundungsbohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich „Jänschwalder Laßzinswiesen“.

5.8.2 Pyrit- und Calcitgehalt der Grundwasserleiter

Im Bereich der Laßzinswiesen stehen flurnah die elsterkaltzeitlichen Feinsande des G122 an. Die Mächtigkeit des G122 beträgt örtlich bis etwa 20 Meter. In den Erkundungsbohrungen wurden die oberen 4 bis 12 Meter des G122 aufgeschlossen. Am Bohrstandort PEI03 wurden im Liegenden des G122 saalekaltzeitliche Mittelsande des G150 stratifiziert (Tabelle 70).

Die Sande des G122 weisen vergleichsweise geringe Schwefelgehalte von meist deutlich weniger als 300 ppm auf. Nur in zwei Proben in den Bohrungen PEI02 und PEI04 wurden Gesamtschwefelgehalte von 806 bzw. 924 ppm gefunden. Der bewertungsrelevante Pyritgehalt liegt im gewichteten Mittel zwischen 0,007 und 0,024 M%.

Calciumkarbonat war in den meisten Proben des G122 nachweisbar. Der mittlere profilgewichtete Calcitgehalt des G122 liegt in den vier Bohrungen zwischen 0,21 und 0,44 M%. Die Sande des G150 (PEI03) waren dagegen karbonatfrei.



Tabelle 70: Mächtigkeitsgewichtete Pyrit- und Karbonatgehalte in den Stratigraphien der Bohrungen im Bereich „Jänschwalder Laßzinswiesen“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probenanzahl	Mächtigkeit	Gesamtschwefel	Disulfid-schwefel	Sulfat-schwefel	Pyrit	Calcit
			beprob/gesamt					
PEI01	G122	8	6,3 / 6,9	129,1	96,8	32,3	0,018	0,444
PEI02	G122	11	11,6 / 11,6	150,8	113,4	28,3	0,021	0,424
PEI03	G122	7	4,0 / 4,5	53,9	39,6	13,2	0,007	0,168
	G150	1	1,0 / 1,8	33,4	25,1	8,4	0,005	0,005
PEI04	G122	10	4,3 / 4,3	342,0	126,7	73,5	0,024	0,207

5.8.3 Versauerungsdisposition der Grundwasserleiter

Unter Verwendung der mächtigkeitsgewichteten Mittelwerte von Pyrit und Calcit liegt das mittlere molare Verhältnis zwischen dem maßgeblichen Puffer (Calcit) und dem Säurebildner (Pyrit) im G122 zwischen 10:1 und 30:1. Die von der Grundwasserabsenkung und vom Grundwasserwiederanstieg betroffenen Sedimente des G122 sind damit nicht versauerungsdisponiert (Tabelle 64). Eine Versauerungsdisposition ergibt sich für die karbonatfreien Sande des G150 am Standort PEI03 (Tabelle 71).

Tabelle 71: Mächtigkeitsgewichtete Mittelwerte der molaren Pyrit- und Calcitgehalte sowie molares Verhältnis zwischen Calcit und Pyrit in den Sedimenten der Bohrungen im Bereich „Jänschwalder Laßzinswiesen“.

Bohrung	Stratigraphie bzw. GWL (Schlüssel)	Calcit	Pyrit	Molares Verhältnis Calcit : Pyrit
		CaCO ₃	FeS ₂	
		mmol/kg TR	mmol/kg TR	
PEI01	G122 (1950)	44,3	1,51	29 : 1
PEI02	G122 (1950)	42,4	1,77	24 : 1
PEI03	G122 (1950)	16,7	0,62	27 : 1
	G150 (2370)	0,5	0,39	1 : 1
PEI04	G122 (1950)	20,7	1,98	10 : 1

Hintergrundfarbe: gepuffert; partiell gepuffert; versauerungsdisponiert (Abschnitt 2.1.3, Tabelle 2).

5.8.4 Kationenaustauscher der Grundwasserleiter

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde in den Bohrungen im Bereich Jänschwalder Laßzinswiesen für die Sande der weichselkaltzeitlichen G122 und G130 bestimmt.

Tabelle 72: Charakterisierung des Kationenaustauschers der Substrate in den Bohrungen NEI01, NEI02, NEI03 und NEI04 im Bereich „Moaske und Auenbereich Eilenzfließ“.

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK _{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK					
PEI01	G122	1/2	1,0 - 2,7	SF"SM	16,3	91 %	9 %	25,7
		3	2,7 - 4,0	SM!SF	13,4	98 %	2 %	26,0
		4/5	4,0 - 5,4	SF!SM	31,1	93 %	7 %	106
		6/7/8	5,4 - 7,0	SM"SF	101	99 %	1 %	186

Bohrung	Grundwasserleiter	Probe	Tiefenlage	Hauptsubstrat	KAK _{eff} (Austauschlösung)	Alkalischer Anteil	Hydrolytischer Anteil	Calcit
			m u. GOK					
PEI02	G122	1	0,5 - 2,0	SF	13,4	96 %	4 %	≤1,0
		2/3	2,0 - 4,0	SF	14,1	95 %	5 %	≤1,0
		4/5	4,0 - 5,7	SF	28,0	97 %	3 %	83,1
		8/9	7,8 - 10,0	SF"SM	36,2	98 %	2 %	83,2
		10/11	10,0 - 12,0	SM"SF	46,4	99 %	1 %	93,9
PEI03	G122	1	2,0 - 2,6	SF"U	22,9	97 %	3 %	32,0
		2	2,6 - 3,8	SF"SM	10,7	96 %	4 %	32,0
		3-6	3,8 - 5,3	SF"SM	11,8	94 %	6 %	36,1
		7	5,3 - 6,0	SF!SM	9,2	97 %	3 %	32,0
	G150	8	6,0 - 7,0	SM!SF	12,3	91 %	9 %	≤1,0
PEI04	G122	1-5	0,7 - 3,3	SM"SG	54,8	99 %	1 %	5,3
		6/7	3,3 - 3,7	SF"SM	30,6	99 %	1 %	67,9
		8-10	3,7 - 5,0	SM"SF	20,5	98 %	2 %	104

In der Bohrung **PEI01** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität in vier Proben in einer Spanne von 13 und 101 meq/kg bestimmt (Bild 57 links und Tabelle 72). Auch hier fällt der hohe Werte auf einen kalkhaltigen Horizont 6/7/8. Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 57 rechts und Tabelle 72). Die hydrolytischen Kationen Eisen, Aluminium und Mangan belegen weniger als 10 % des Austauschers. Die calciumdominierte Austauscherbelegung in zahlreichen Horizonten spiegelt die Karbonatpufferung im Bohrprofil wider (Abschnitt 5.8.2).

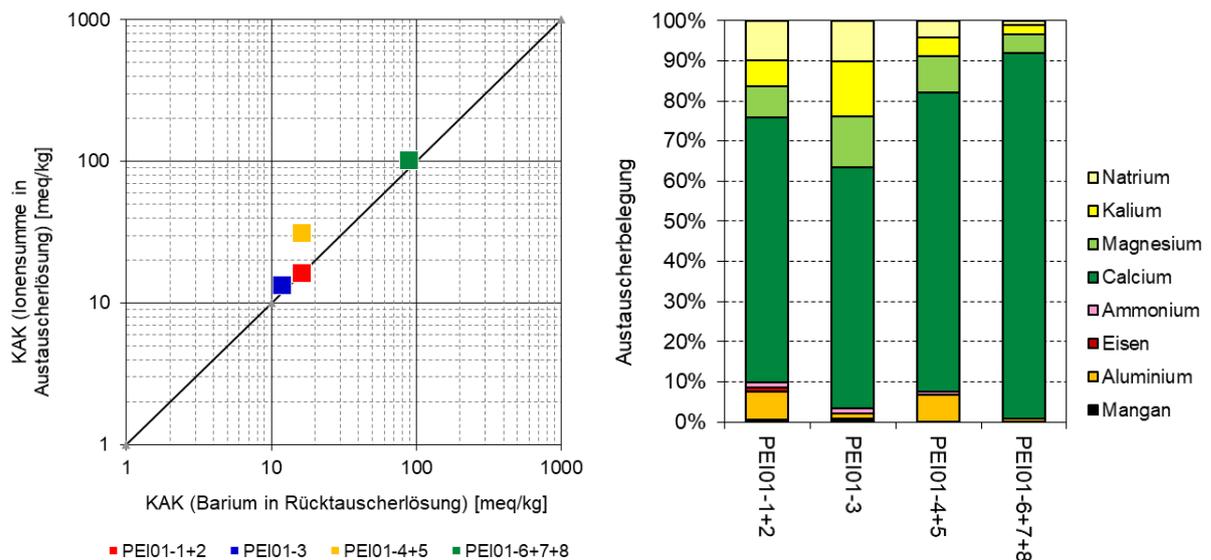


Bild 57: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauschlösung ausgewählter Bodenproben des G122 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G122 in der Bohrung PEI01 (rechts).

In der Bohrung **PEI02** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität in fünf Proben zwischen 13 und 46 meq/kg bestimmt (Bild 58 links und Tabelle 72). Die Austauscher-



plätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 58 rechts und Tabelle 72). Zur Tiefe nimmt der Anteil alkalischer Ionen zu, wobei die Alkalien gegenüber den Erdalkalien relativ an Bedeutung verlieren, und die hydrolytische Acidität nimmt ab. Das vertikale Profil der Austauscherbelegung in der Bohrung PEI02 ist nahezu idealtypisch. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung im Bohrprofil wider (Abschnitt 5.8.2).

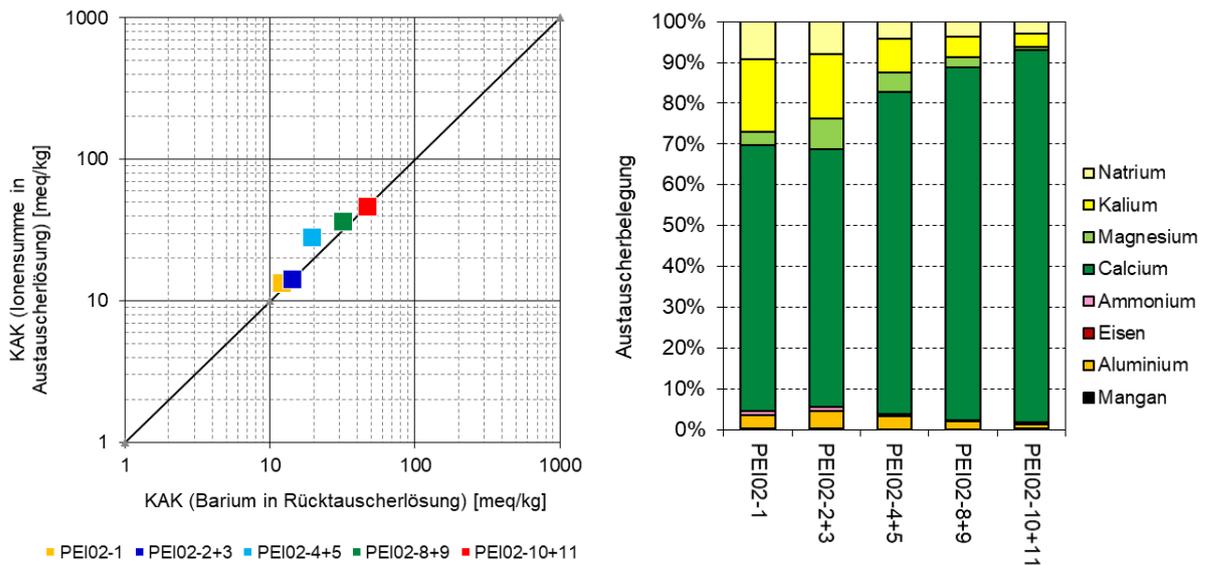


Bild 58: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G122 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G122 in der Bohrung PEI02 (rechts).

In der Bohrung **PEI03** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) an fünf Proben der Sande der G122 und G130 zwischen 9 und 23 meq/kg bestimmt (Bild 59 links und Tabelle 72).

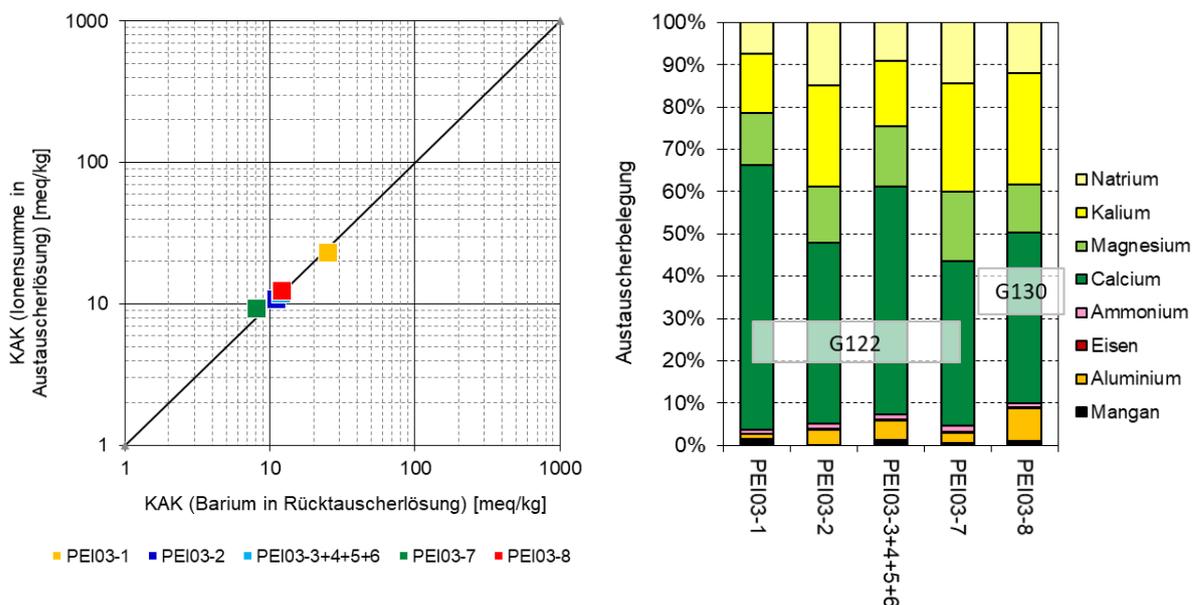


Bild 59: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben der G122 und G130 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze in den G122 und G130 in der Bohrung PEI03 (rechts).

Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 59 rechts und Tabelle 72). Die Belegung des Austauschers mit bis zu 40 % Alkalimetalle ist unplausibel. Die hydrolytische Acidität belegt weniger als 10 % der Austauscherplätze, wobei in der Bohrung PEI03 die hydrolytische Acidität zur Tiefe zunimmt.

In der Bohrung **PEI04** wurde die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) an drei Proben zwischen 20 und 55 meq/kg bestimmt (Bild 60 links und Tabelle 72). Die Austauscherplätze sind dominant mit Erdalkalien und Alkalien belegt (Bild 60 rechts und Tabelle 72). Der Anteil der Erdalkalien nimmt zum Liegenden leicht ab und entsprechend nimmt der Anteil der Alkalien leicht zu. Die hydrolytischen Kationen sind nur marginal vertreten. Die calciumdominierte Austauscherbelegung spiegelt die Karbonatpufferung im Bohrprofil wider (Abschnitt 5.8.2).

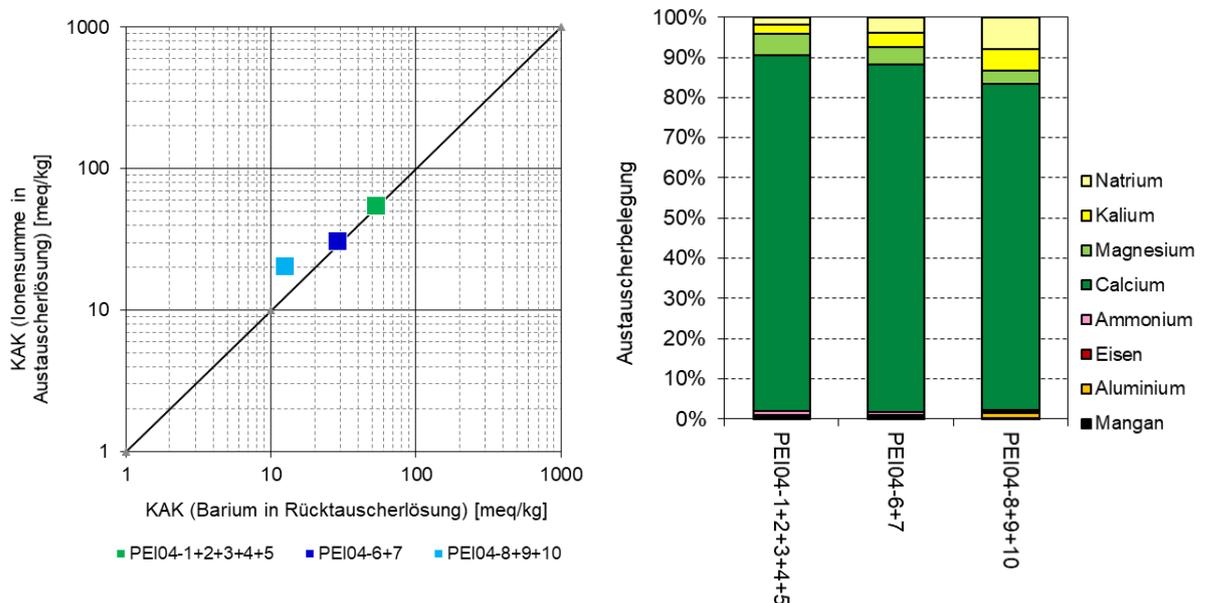


Bild 60: Effektive Kationenaustauschkapazität in der Austausch- und Rücktauscherlösung ausgewählter Bodenproben des G122 (links) und Ionenbelegung der Austauscherplätze im G122 in der Bohrung PEI04 (rechts).

5.8.5 Aktuelle Grundwasserbeschaffenheit

Im Bereich der Jänschwalder Laßzinswiesen war die Beprobung von vier Grundwassermessstellen vorgesehen. Die zwei nördlich gelegenen Messstellen 19017 und 19077 konnten nicht beprobt werden. In der Messstelle GWM 19017 war der Dummytest nicht erfolgreich. Die GWM 19077 war trocken.

Das Grundwasser in den Messstellen 11601 und 11931 zeigte eine hydrochemische Beeinflussung infolge der bergbaulichen Grundwasserabsenkung. Im G150 (11601) beträgt die Sulfatkonzentration rund 370 mg/L. Das Grundwasser ist neutral und weist im calcitgesättigten Zustand eine Säurekapazität $K_{S4,3}$ von 3 mmol/L auf. Die Genese des Grundwassers fand demzufolge in einem karbonatgepufferten Milieu statt. Die Eisenkonzentration ist mit 2 mg/L entsprechend niedrig (Tabelle 73). Das Grundwasser des G150 ist nicht versauerungsdisponiert.



Am südlichsten Bohrstandort PEI02 wurde in der neu errichteten Messstelle 11931 eine sehr hohe bergbauliche Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit im G122 festgestellt. Bei rund 1.000 mg/L Sulfat enthält das Grundwasser 125 mg/L Eisen und rund 2 mg/L Ammoniumstickstoff. Die Genese des Grundwassers fand bei limitiertem Karbonatgehalt im Grundwasserleiter statt. Das widerspricht den Ergebnissen der Bohrerkundung (Abschnitt 5.8.3). Trotz der hohen Säurekapazität $K_{S4,3}$ von rund 4 mmol/L im originalen anoxischen Zustand ist das Grundwasser schwach versauerungsdisponiert (Tabelle 74).

Tabelle 73: Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen aus 2020 im Bereich der Jänschwalder Laßzinswiesen.

Messstelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH-Wert	$K_{S4,3}$	Elektrische Leitfähigkeit	Sulfat	Eisen-gelöst	Ammonium-Stickstoff
			mmol/L	$\mu\text{S/cm}$	mg/L	mg/L	mg/L
11601(150)	PEI01	7,4	3,0	1.250	366	2,25	0,09
11931(122)	PEI02	6,6	4,2	2.200	980	125	1,9
19017(150)	PEI03	gescheitert	---	---	---	---	---
19077(100)	PEI04	gescheitert	---	---	---	---	---

Tabelle 74: Versauerungsdisposition des Grundwassers im Bereich der Jänschwalder Laßzinswiesen.

Mess-stelle	Zugeordnete Erkundungsbohrung	pH _{ox}	$K_{S4,3}^{ox}$
			mmol/L
11601(150)	PEI01	8,5	2,3
11931(122)	PEI02	3,6	-0,4
19017(150)	PEI03	---	---
19077(100)	PEI04	---	---

5.8.6 Grundwasserbeschaffenheit bei Wiederanstieg

Gemäß den Ergebnissen des HGMJaWa [IBGW 2019] wird der Grundwasserspiegel im Bereich der Laßzinswiesen nicht weiter abgesenkt bzw. durch Einleitungen im Gebiet gestützt. Nachbergbaulich steigt das Grundwasser um 2 bis 6 Meter auf ein Niveau von +60,7 bis +61,1 m NHN an (Tabelle 75).

Tabelle 75: Grundwasserabsenkung und Wiederanstieg am Standort der Bohrungen PEI01 bis PEI04 im Bereich „Laßzinswiesen“.

Bohr-standort	Grundwasserstand (GWL)			Änderung des Grundwasserstandes	
	2020	2033 *)	2100 *) (nachbergbaulich)	Maximale Grundwasserabsenkung	Grundwasserwiederanstieg
	m NHN	m NHN	m NHN	m	m
PEI01	+54,5 (G122)	+54,5 (G122)	+60,8 (G122)	±0	+6,3
PEI02	+54,8 (G122)	+54,8 (G122)	+60,7 (G122)	±0	+5,9
PEI03	+55,6 (G150)	+55,6 (G150)	+61,1 (G122)	±0	+5,5
PEI04	+58,3 (G122)	+58,3 (G122)	+60,9 (G122)	±0	+2,6

*) aus dem HGMJawa [IBGW 2019]



Als Ausgangszustand der Grundwasserbeschaffenheit für die Prognose wurde am Standort PEI02 die Analyse aus der neuen Messstelle 11931(122) herangezogen. Für den Standort PEI01 wurde die Analyse der Messstelle 11601(150) des Grundwassermonitorings der LE-B [IWB 2020] gewählt. In gleicher Weise gilt für die Standorte PEI03 und PEI04, an denen die Grundwasserprobennahme scheiterte: Messstellen 11607(150) und 500182(100).

Tabelle 76: Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Bereich „Laßzinswiesen“.

Kennwert	Einheit	PEI01		PEI02		PEI03		PEI04	
		2020	nach GWWA	2020	nach GWWA	2020	nach GWWA	2020	nach GWWA
		11601 (150)		11931 (122)		11607 (150)		500182 (100)	
Grundwasserspiegel	m NHN	+54,5	+60,8	+54,8	+60,7	+55,6	+61,1	+58,3	+60,9
Grundwassergefüllte Mächtigkeit	m	0,3	6,6	13,7	19,6	20,2	25,7	4,3	6,9
pH-Wert	---	7,4	7,3	6,6	7,1	7,5	8,0	7,4	6,5
Sulfat	mg/L	366	460	980	780	123	130	125	660
Eisen-gelöst	mg/L	2,3	2,9	125	4,4	1,0	0,8	4,1	33
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,09	0,6	1,9	1,8	0,58	0,4	0,34	0,9
Säurekapazität $K_{S_{4,3}}^{ox}$	mmol/L	2,3	4,7	-0,4	4,9	2,0	2,2	1,9	1,1

Die Prognose nach der Methodik im Abschnitt 2.2 ergab, dass im Zuge des Grundwasserwiederanstieges im Bereich der Laßzinswiesen mit einer örtlichen Erhöhung der Sulfat- und Eisenkonzentration im oberen G122 zu rechnen ist (Tabelle 76). An den Standorten PEI01, PEI02 und PEI03 steigt das Grundwasser in calcithaltigen Schichten des G122 an. Hier wird Eisen als Siderit und am Austauscher festgelegt und kommt deshalb im Grundwasser nur in niedrigen Konzentrationen bis 4 mg/L vor. Eine Versauerungsdisposition wird das Grundwasser östlich und südlich der Laßzinswiesen voraussichtlich nicht aufweisen.

Am Standort PEI04 nördlich des FFH-Gebietes steigt das Grundwasser in karbonatfreien Schichten des G122 an. Da der G122 im Profilmittel einen Calcitüberschuss aufweist (Abschnitt 5.8.3), ergibt die Prognose mit 660 mg/L bzw. 33 mg/L erhöhte Sulfat- und Eisenkonzentrationen, aber keine Versauerungsdisposition (Tabelle 76). An allen Standorten können jedoch an Grundwasseraustrittsbereichen lokale Verockerungserscheinungen auftreten.



5.9 Integration der Ergebnisse

5.9.1 Vorbemerkungen

An den Standorten der Bohrerkundung im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde wurde die Grundwasserbeschaffenheit für den Zustand beim Erreichen des nachbergbaulichen Grundwasserstandes berechnet. Den Berechnungen lag eine speziell für diese Fragestellungen neu entwickelte Methodik zugrunde, siehe Abschnitt 2.2 und hier insbesondere Abschnitt 2.2.2. Auf die fachlichen Einschränkungen und Grenzen der Methodik wurde in den genannten Abschnitten hingewiesen. Unabhängig davon liefern die Berechnungen plausible Ergebnisse, wie sie durch Beobachtungen in anderen Wiederanstiegsgebieten des Braunkohlenbergbaus, sowohl im Verantwortungsbereich der LE-B als auch im Verantwortungsbereich der LMBV, zumindest qualitativ beobachtet werden.

Die Berechnungen beziehen ein und verknüpfen zahlreiche ortskonkrete Daten, wie die aktuelle Grundwasserabsenkung, die künftig erwartete Absenkung, den nachbergbaulichen Grundwasserspiegel, die Geochemie der Sedimente in der Absenkungslamelle und die aktuelle Grundwasserbeschaffenheit. Bei den Berechnungen werden horizontbezogen zahlreiche bodenphysikalische und geochemische Parameter und Kennwerte berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse sind deshalb immer standortspezifisch.

Nachfolgend werden die in den Unterabschnitten des Abschnittes 5 zu den einzelnen Teilgebieten ermittelten Prognoseergebnisse zusammengefasst und im Vergleich zu den Ausgangsgrößen gestellt. Der Vergleich erfolgt in Tabellenform (Tabelle 80, Tabelle 81, Tabelle 83 und Tabelle 82). Des Weiteren werden die Prognoseergebnisse auf Gebietsübersichten dargestellt, die eine räumliche Zuordnung ermöglichen sollen (Bild 61, Bild 62, Bild 64 und Bild 63). Unter der Annahme, dass die geologischen und geochemischen Verhältnisse in den Absenkungsbereichen im nördlichen Umfeld des Tagebaus Jänschwalde wenig differenziert sind und dass die Standorte der Bohrerkundung eine ausreichend repräsentative Stichprobe darstellen, werden die zu erwartenden Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit bis zum vollständigen Grundwasserwiederanstieg in Form von Dauerlinien relevanter hydrochemischer Kennwerte im Vergleich zur aktuellen Grundwasserbeschaffenheit bewertet (Bild 65).

5.9.2 Bewertungsmaßstäbe

Die Konzentrationen von Sulfat, Eisen und Ammonium-Stickstoff werden in den folgenden Abschnitten jeweils in fünf unverbindlichen Kategorien sowie das Versauerungspotential in sechs unverbindlichen Kategorien dargestellt (Tabelle 77 bzw. Tabelle 78). Diese Kategorien dienen der Visualisierung der Konzentrationsverhältnisse in Kartendarstellungen.

Für Sulfat und Ammonium gelten Schwellenwerte nach Anlage 2 der Grundwasserverordnung [GrwV 2010]. Die Schwellenwerte betragen für Sulfat 250 mg/L und für Ammonium 0,5 mg/L (für Ammonium-Stickstoff 0,39 mg/L). Diese Schwellenwerte werden zur Abgrenzung der Konzentration zwischen der Kategorie 2 und der Kategorie 3 genutzt (Tabelle 77). Im Fall von Sulfat beruhen die Grenzen der höheren Kategorien auf technischen und naturwissenschaftlichen Sachverhalten. So entspricht die



Konzentration von 600 mg/L Sulfat dem Grenzwert der Betonaggressivität XA2 (stark angreifend) nach [DIN 4030-1 2008]. Der Wert von 1.400 mg/L Sulfat ergibt sich aus der Gipssättigung für ein mineralarmes Wasser in karbonatischen Grundwasserleitern. Die Kategorisierung der Eisenkonzentration und der Versauerungsdisposition hat keinen regulatorischen, naturwissenschaftlichen oder technischen Hintergrund.

Tabelle 77: Kategorisierung der Kennwerte Grundwasserbeschaffenheit.

Kennwert	Maßeinheit	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 5
Sulfat	mg/L	< 100	100...250	250...600	600...1.400	> 1.400
Eisen-gelöst	mg/L	< 3	3...10	10...30	30...100	> 100
Ammonium-Stickstoff	mg/L	< 0,1	0,1...0,39	0,39...1	1...3	> 3

Tabelle 78: Kategorisierung des Versauerungspotentials des Grundwassers.

Kennwert	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 5	Kategorie 6
Versauerungspotential $K_{S4,3ox}$ [mmol/L]	> 2	1 ... 2	1 ... 0	-1 ... 0	-2 ... -1	< -2

Zur Einordnung der Grundwasserbeschaffenheit wird zudem die Hydrogeologische Karte von Deutschland 1:200.000 - Hintergrundwerte (HÜK200 HGW) herangezogen [BGR & SGD 2014]. Sie enthält Angaben zum 50. und 90. Perzentil verschiedener Kennwerte innerhalb sogenannter hydrogeochemischer Einheiten. Gemäß Anlage 4a GrwV ist zur Ableitung des Hintergrundwertes das 90. Perzentil maßgeblich.

Die gewachsenen Grundwasserleiter des Untersuchungsgebietes gehören zur hydrogeochemischen Einheit des Berlin-Brandenburger Jungpleistozäns (HGC-ID 01R14c). Soweit für die hier betrachteten Kennwerte Hintergrundwerte ausgewiesen wurden, sind diese in der Tabelle 79 aufgeführt. Werte, die das 50. Perzentil nach HÜK200 HGW unterschreiten, sind natürlicherweise als niedrig einzustufen. Werte zwischen dem 50. und 90. Perzentil werden im Folgenden als moderat bezeichnet und Werte über dem 90. Perzentil werden als erhöht bezeichnet. Ein relevanter bergbaulicher Einfluss auf die hydrochemischen Kennwerte kann erst bei Überschreitung des 90. Perzentils vermutet werden.

Tabelle 79: Hintergrundwerte für ausgewählte Kennwerte in der hydrogeochemischen Einheit Berlin-Brandenburger Jungpleistozän nach HÜK200 HGW [BGR & SGD 2014], Werte auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Kennwert	Maßeinheit	Hintergrundwerte nach HÜK200		Schwellenwerte nach GrwV Anlage 2
		50. Perzentil	90. Perzentil	
Sulfat	mg/L	55	170	250
Eisen-gelöst	mg/L	0,69	3,4	---
Ammonium-Stickstoff	mg/L	0,087	0,54	0,39

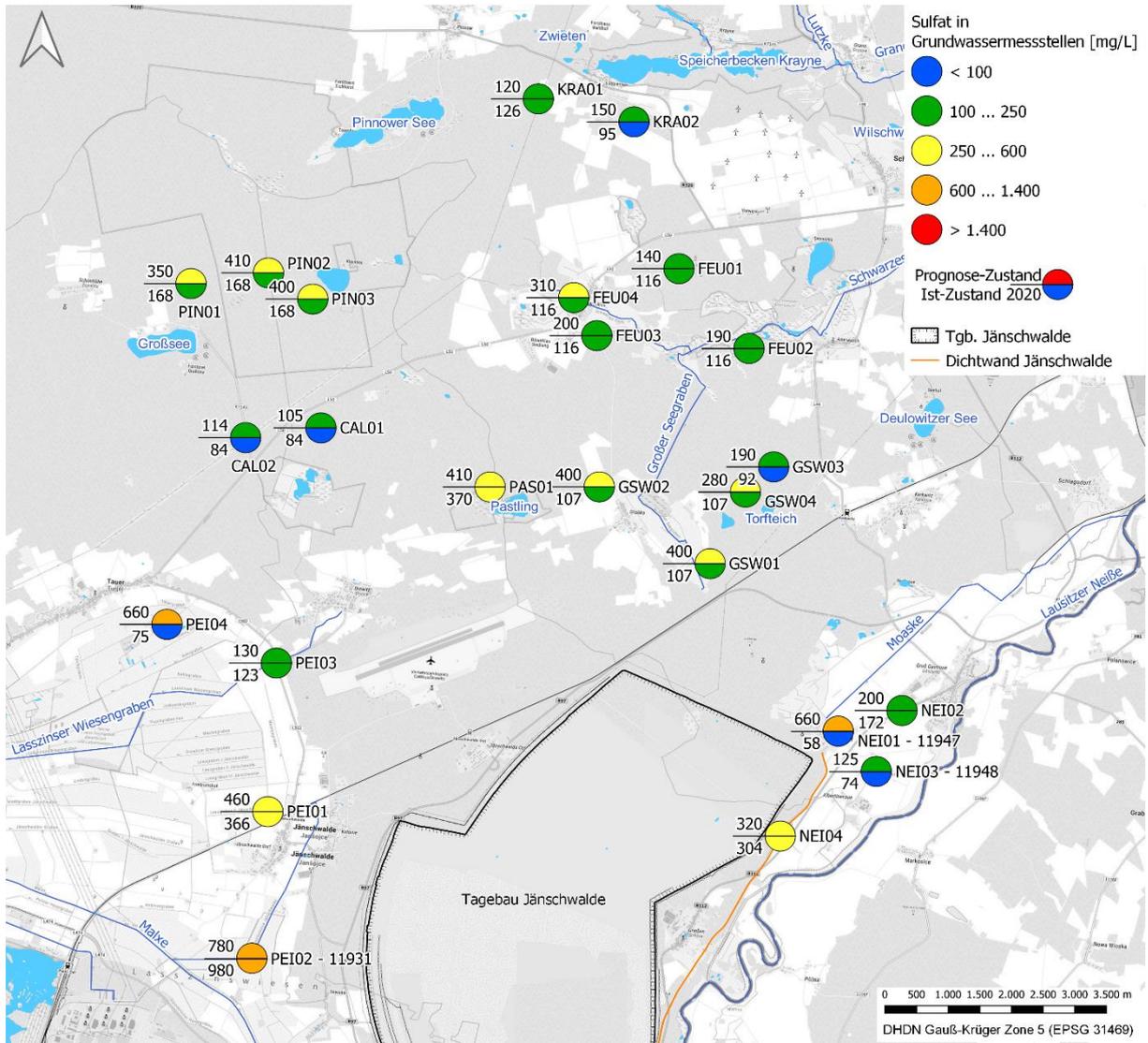
5.9.3 Sulfat

Aufgrund der bereits vorhandenen Grundwasserabsenkung und der an ausgewählten Standorten weiterhin zu erwartenden Grundwasserabsenkung wird der Untergrund belüftet. Das führt in Abhängigkeit vom Sauerstoffeintrag und vom Pyritgehalt der Sedimente zu einer Verwitterung und zur Freisetzung von Sulfat. In nahezu allen Erkundungsprofilen ist deshalb ein Anstieg der Sulfatkonzentration im Grundwasser zu erwarten (Tabelle 80).

Tabelle 80: Vergleich der aktuellen mit der prognostischen Sulfatkonzentration im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.

Erkundungs- bohrung	Sulfat im Grundwasser 2020	Sulfat nach GWWA im Profilmittel	Bezugs- messstelle 2020
	mg/L	mg/L	
CAL01	84	105	19153(100)
CAL02	84	114	19153(100)
FEU01	116	140	21034(100)
FEU02	116	190	21034(100)
FEU03	116	200	21034(100)
FEU04	116	310	21034(100)
GSW01	107	400	18174(150)
GSW02	107	400	18161(100)
GSW03	92	190	18174(150)
GSW04	107	280	18161(100)
KRA01	126	120	21045(100)
KRA02	95	150	21074(130)
NEI01	58	660	11947(150)
NEI02	172	200	18231(100)
NEI03	74	125	11948(150)
NEI04	304	320	110084(100)
PAS01	370	410	19157(150)
PEI01	366	460	11784(100)
PEI02	980	780	11931(122)
PEI03	123	130	11607(150)
PEI04	75	660	500182(100)
PIN01	168	350	21032(100)
PIN02	168	410	21032(100)
PIN03	168	400	21032(100)

Die Veränderungen der Sulfatkonzentration im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde folgen keinem einheitlichen räumlichen Muster (Bild 61). Tendenziell fallen die Sulfatkonzentrationen an den tagebaunahen Standorten höher aus, weil die bereits vorhandene Grundwasserabsenkung und die weiterhin zu erwartende Grundwasserabsenkung betragsmäßig am höchsten sind. In tagebaufernen Bereichen ist die Entwicklung sehr uneinheitlich. Bei eher geringen Beträgen der bereits eingetretenen und der noch zu erwartenden Grundwasserabsenkung prägen die Geochemie der Sedimente und die Mächtigkeit des Grundwasserleiters stärker die örtliche Belastung.





G130 liegt und das Grundwasser deshalb sogar schwach versauerungsdisponiert ist, der Grundwasserwiederanstieg jedoch den karbonatreichen G122 überstreichen wird.

Tabelle 81: Vergleich der aktuellen mit der prognostischen Eisenkonzentration im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.

Erkundungs- bohrung	Eisen im Grundwasser 2020	Eisen nach GWWA als Profilmittel	Bezugs- messstelle 2020
	mg/L	mg/L	
CAL01	4,7	0,8	19153(100)
CAL02	4,7	3,9	19153(100)
FEU01	0,6	2,4	21034(100)
FEU02	0,6	1,1	21034(100)
FEU03	0,6	4,3	21034(100)
FEU04	0,6	1,6	21034(100)
GSW01	1,7	2,7	18174(150)
GSW02	1,7	25,0	18161(100)
GSW03	0,3	1,3	18174(150)
GSW04	1,7	1,5	18161(100)
KRA01	1,8	2,1	21045(100)
KRA02	0,0	6,7	21074(130)
NEI01	3,4	3,7	11947(150)
NEI02	3,3	7,6	18231(100)
NEI03	1,7	1,7	11948(150)
NEI04	31,3	25,0	110084(100)
PAS01	9,0	2,5	19157(150)
PEI01	2,3	2,9	11784(100)
PEI02	125	4,4	11931(122)
PEI03	1,0	0,8	11607(150)
PEI04	2,9	33,0	500182(100)
PIN01	2,8	2,4	21032(100)
PIN02	2,8	12,4	21032(100)
PIN03	2,8	20,6	21032(100)

Die prognostizierten Eisenkonzentrationen im Grundwasser nach dem Grundwasserwiederanstieg ergeben kein räumliches Muster (Bild 62). Eine erhöhte Eisenkonzentration wurde für die Bohrstelle NEI04 in der Neißeaue unmittelbar neben der Dichtwand erfasst. In der zugehörigen Grundwassermessstelle 110084(100) ist die Eisenkonzentration bereits im abgesenkten Zustand erhöht.

Eine erhöhte Eisenkonzentrationen wurde außerdem für die Bohrstelle PEI04 mit der zugeordneten Grundwassermessstelle 500182(100) am nördlichen Rand der Laßzinswiesen prognostiziert. Von den untersuchten Bohrstellen an der östlichen und nördlichen Tangente der Laßzinswiesen liegt diese Messstellen am weitesten von der Tagbaukante entfernt. Hier sind auch der Absenkungs- und Wiederanstiegsbetrag am geringsten. Der Grundwasserwiederanstieg erfolgt jedoch in kalkarmen Substraten des G122.



Eine erhöhte Eisenkonzentration wird auch für die Bohrstelle GSW02 mit der zugeordneten Grundwassermessstelle 18161(100) im Bereich der Grabkower Seewiesen prognostiziert. Hier werden aufgrund der Tagebaunähe sowohl für die Grundwasserabsenkung als auch für den Grundwasserwiederanstieg noch große Beträge erwartet. Außerdem erfolgt der Grundwasserwiederanstieg überwiegend in versauerungsdisponierten Sedimenten des G130.

Eine leicht erhöhte Eisenkonzentration wird weiterhin in den beiden Bohrstellen PIN02 und PIN03 mit der zugeordneten Grundwassermessstelle 21032(100) im Bereich des Kleinsees prognostiziert. Hier erfolgt der Grundwasserwiederanstieg in karbonatarmen Substraten des G122 mit schwachem Kationenaustauscher.

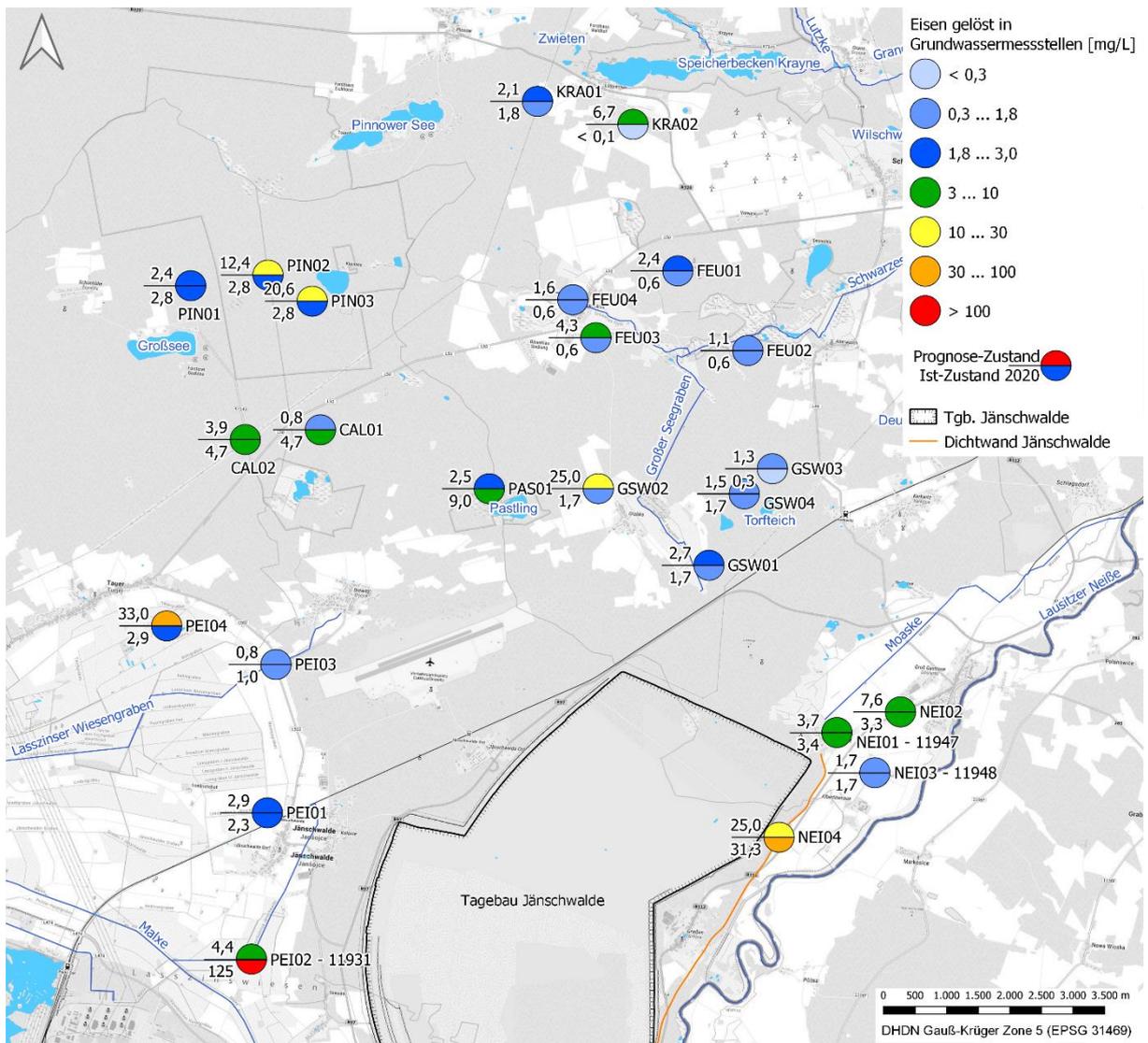


Bild 62: Prognose der Eisenkonzentration im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg.

5.9.5 Versauerungsdisposition

Eine dritte wesentliche hydrochemische Größe, die die Wirkungen der Pyritverwitterung auf die Grundwasserbeschaffenheit beschreibt, ist die Versauerungsdisposition, siehe Abschnitt 2.1.2. Die Versauerungsdisposition ist der pH-Wert, der



sich im Falle einer Belüftung des typischerweise anoxischen Grundwassers nach vollständiger Oxidation einstellt. Er wird als pH_{ox} bezeichnet. Die dazugehörige extensive Größe ist das Neutralisations- $K_{S4,3}^{ox}$ bzw. das Versauerungspotenzial $K_{B4,3}^{ox}$.

An den erkundeten Bohrstellen wurde das Neutralisationspotenzial $K_{S4,3}^{ox}$ des Grundwassers nach dem Grundwasserwiederanstieg prognostiziert (Tabelle 82). Das mit $K_{S4,3}^{ox}$ zwischen 1,5 und 2,5 mmol/L natürlicherweise moderat gepufferte Grundwasser in den pleistozänen Grundwasserleitern erfährt beim Grundwasserwiederanstieg unterschiedliche Veränderungen. In karbonatreichen Horizonten erhöht sich infolge der Pyritverwitterung und ihrer Folgereaktionen das Neutralisationspotenzial $K_{S4,3}^{ox}$ bis auf Werte um 5 mmol/L.

Tabelle 82: Vergleich des aktuellen mit dem prognostischen Neutralisationspotenzial (Säurekapazität $K_{S4,3}^{ox}$) im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.

Erkundungs- bohrung	NP		Bezugs- messstelle 2020
	im Grundwasser 2020 mmol/L	nach GWWA als Profilmittel mmol/L	
CAL01			19153(100)
CAL02			19153(100)
FEU01			21034(100)
FEU02			21034(100)
FEU03			21034(100)
FEU04			21034(100)
GSW01			18174(150)
GSW02			18161(100)
GSW03			18174(150)
GSW04			18161(100)
KRA01			21045(100)
KRA02			21074(130)
NEI01			11947(150)
NEI02			18231(100)
NEI03			11948(150)
NEI04			110084(100)
PAS01			19157(150)
PEI01			11784(100)
PEI02			11931(122)
PEI03			11607(150)
PEI04			500182(100)
PIN01			21032(100)
PIN02			21032(100)
PIN03			21032(100)



In karbonatarmen Horizonten wird im Zuge der Pyritverwitterung wegen schwacher geochemischer Puffer (Karbonate, Austauschler) die Säurekapazität des Grundwassers gezehrt. In Einzelfällen, an den Erkundungsstandorten PIN03, FEU03 und FEU06 werden mit $K_{S4,3}^{ox} = 0,2 \dots 0,6 \text{ mmol/L}$ sehr niedrige Werte erreicht. Lediglich in einem Fall an der Bohrstelle NEI04 ist nachbergbaulich mit einer Versauerungsdisposition mit einem schwachen Versauerungspotenzial $K_{B4,3}^{ox} = 0,6 \text{ mmol/L}$ zu rechnen.

Ein räumliches Muster für das Neutralisations- bzw. Versauerungspotenzial nach Grundwasserwiederanstieg lässt sich nicht ableiten (Bild 63). Das Neutralisations- bzw. Versauerungspotenzial des Grundwassers wird dominant von den standortkonkreten geochemischen Bedingungen geprägt.

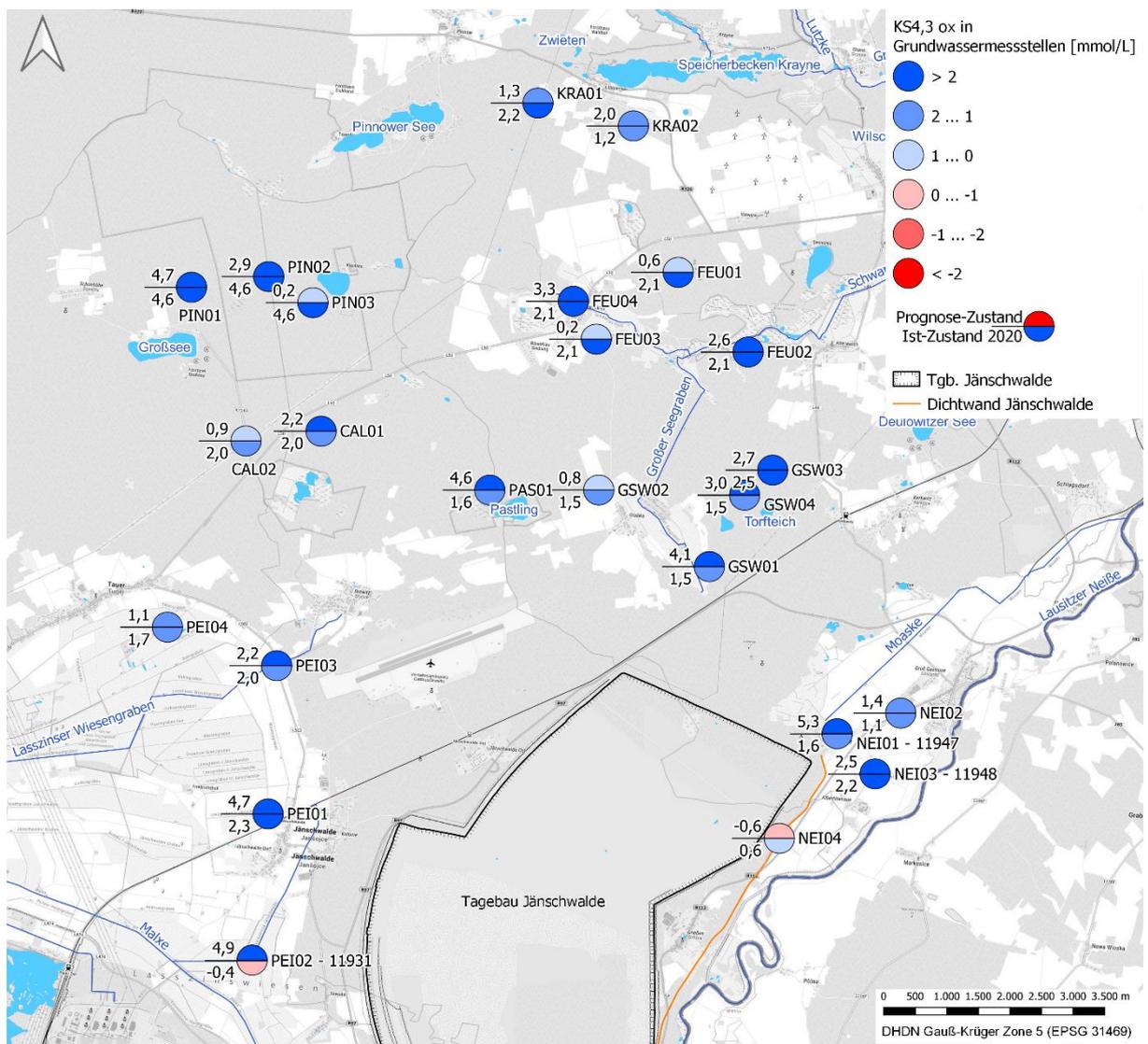


Bild 63: Prognose des Neutralisationspotenzials (Säurekapazität $K_{S4,3}^{ox}$) im Grundwasser im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde nach dem Grundwasserwiederanstieg.



5.9.6 Ammonium

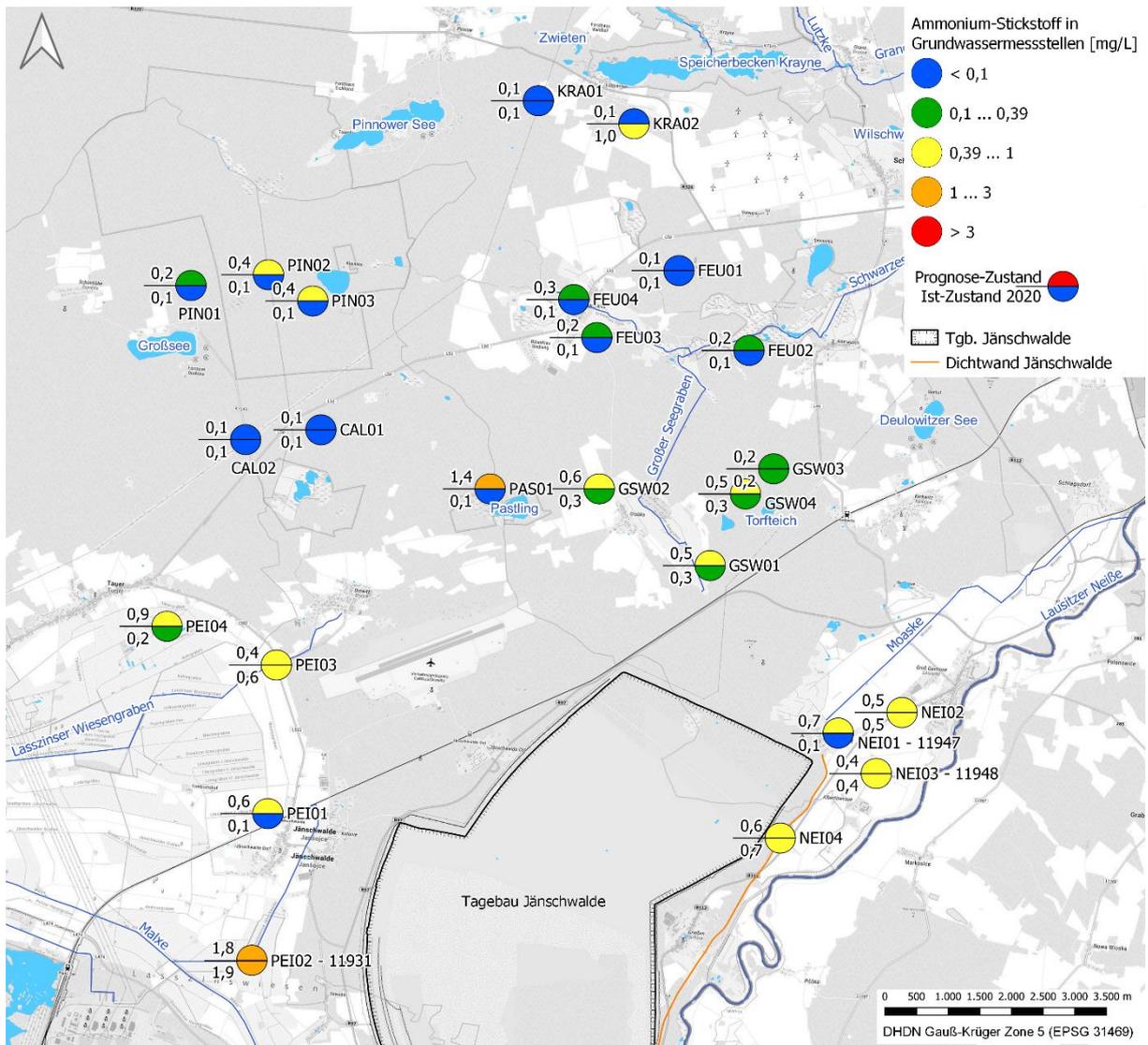
Die Belüftung des Untergrundes infolge der Grundwasserabsenkung führt auch zu einer aeroben Verwitterung bodenorganischer Substanz, wobei neben Kohlensäure vor allem auch Ammonium freigesetzt wird (Abschnitt 2.1.1).

Das führt überwiegend zu einer Erhöhung der Ammoniumkonzentrationen im ansteigenden Grundwasser (Tabelle 83). Als gegenläufiger Prozess wirkt ggf. die Verdünnung durch die Grundwasserneubildung. An stark abgesenkten Standorten, die keine weitere Grundwasserabsenkung erfahren werden, kann die Ammoniumkonzentration im Einzelfall deshalb auch verdünnt werden.

Tabelle 83: Vergleich der aktuellen mit der prognostischen Ammoniumstickstoffkonzentration im Grundwasser an den Standorten der Bohrerkundung.

Erkundungsbohrung	Ammonium-N im Grundwasser 2020	Ammonium-N nach GWWA als Profilmittel	Bezugs-messstelle 2020
	mg/L	mg/L	
CAL01	0,1	0,1	19153(100)
CAL02	0,1	0,1	19153(100)
FEU01	0,1	0,1	21034(100)
FEU02	0,1	0,2	21034(100)
FEU03	0,1	0,2	21034(100)
FEU04	0,1	0,3	21034(100)
GSW01	0,3	0,5	18174(150)
GSW02	0,3	0,6	18161(100)
GSW03	0,2	0,2	18174(150)
GSW04	0,3	0,5	18161(100)
KRA01	0,1	0,1	21045(100)
KRA02	1,0	0,1	21074(130)
NEI01	0,1	0,7	11947(150)
NEI02	0,5	0,5	18231(100)
NEI03	0,4	0,4	11948(150)
NEI04	0,7	0,6	110084(100)
PAS01	0,1	1,4	19157(150)
PEI01	0,1	0,6	11784(100)
PEI02	1,9	1,8	11931(122)
PEI03	0,6	0,4	11607(150)
PEI04	0,2	0,9	500182(100)
PIN01	0,1	0,2	21032(100)
PIN02	0,1	0,4	21032(100)
PIN03	0,1	0,4	21032(100)

Da für die Ammoniumkonzentration der Zusammenhang zur Grundwasserabsenkung stärker gilt als für die Prozesse der Pyritverwitterung und der geochemischen Pufferung, lässt ein Belastungsmuster dergestalt erkennen (Bild 64), das nach dem Grundwasserwiederanstieg in Tagebaunähe die höheren Ammoniumkonzentrationen erwartet werden.





prognostiziert. Der Hintergrundwert der Sulfatkonzentration nach der HÜK200 [BGR & SGD 2014] liegt niedriger als der Schwellenwert nach der GrwV (Abschnitt 5.9.2) und findet deshalb als Maßstab keine Anwendung.

Für **Eisen** ist in nahezu allen Profilen ein Anstieg der Konzentration anzunehmen (Bild 65 rechts oben). Die Erhöhung liegt in zwei Drittel der Fälle jedoch niedriger als 1 mg/L. Lediglich in fünf Fällen werden signifikant erhöhte Eisenkonzentrationen > 10 mg/L prognostiziert. Legt man die 90. Perzentile des Hintergrundwertes der HÜK200 [BGR & SGD 2014] als Maßstab an, dann betragen die Überschreitungen 2020 fünf von 24 Fällen und werden nach der Prognose elf von 24 Fällen betragen.

Die Entwicklung des **Neutralisationspotentials** als $K_{S4.3ox}$ verhält sich im Unterschied zu den vorgenannten Kennwerten ambivalent (Bild 65 rechts unten). An einem reichlichen Drittel der Standortprofile ist mit einem Versauerungsschub zu rechnen, der aber nur in einem Fall zu einem versauerungsdisponierten Grundwasser führt. An knapp zwei Drittel der Standorte ist mit einem Zuwachs des Neutralisationspotentials zu rechnen.

Für **Ammoniumstickstoff** ist an den meisten Bohrprofilen ein Anstieg anzunehmen (Bild 65 links unten), der in etwa 50 % zu einer Überschreitung des Schwellenwertes der GrwV führt. Lagen zum aktuellen Zustand etwa 25 % der Werte über dem Schwellenwert der Grundwasserverordnung, sind es nach dem Grundwasserwiederanstieg etwa 50 %. Legt man die 90. Perzentile des Hintergrundwertes der HÜK200 [BGR & SGD 2014] als Maßstab an, dann betragen die Überschreitungen 2020 vier von 24 Fällen und werden nach der Prognose sechs von 24 Fällen betragen. Betragsmäßig sind die Überschreitungen der Ammoniumstickstoffbelastung nach beiden Bewertungsmaßstäben gering (Bild 65). Sie liegen in 90 % der Fälle unter 1 mg/L.

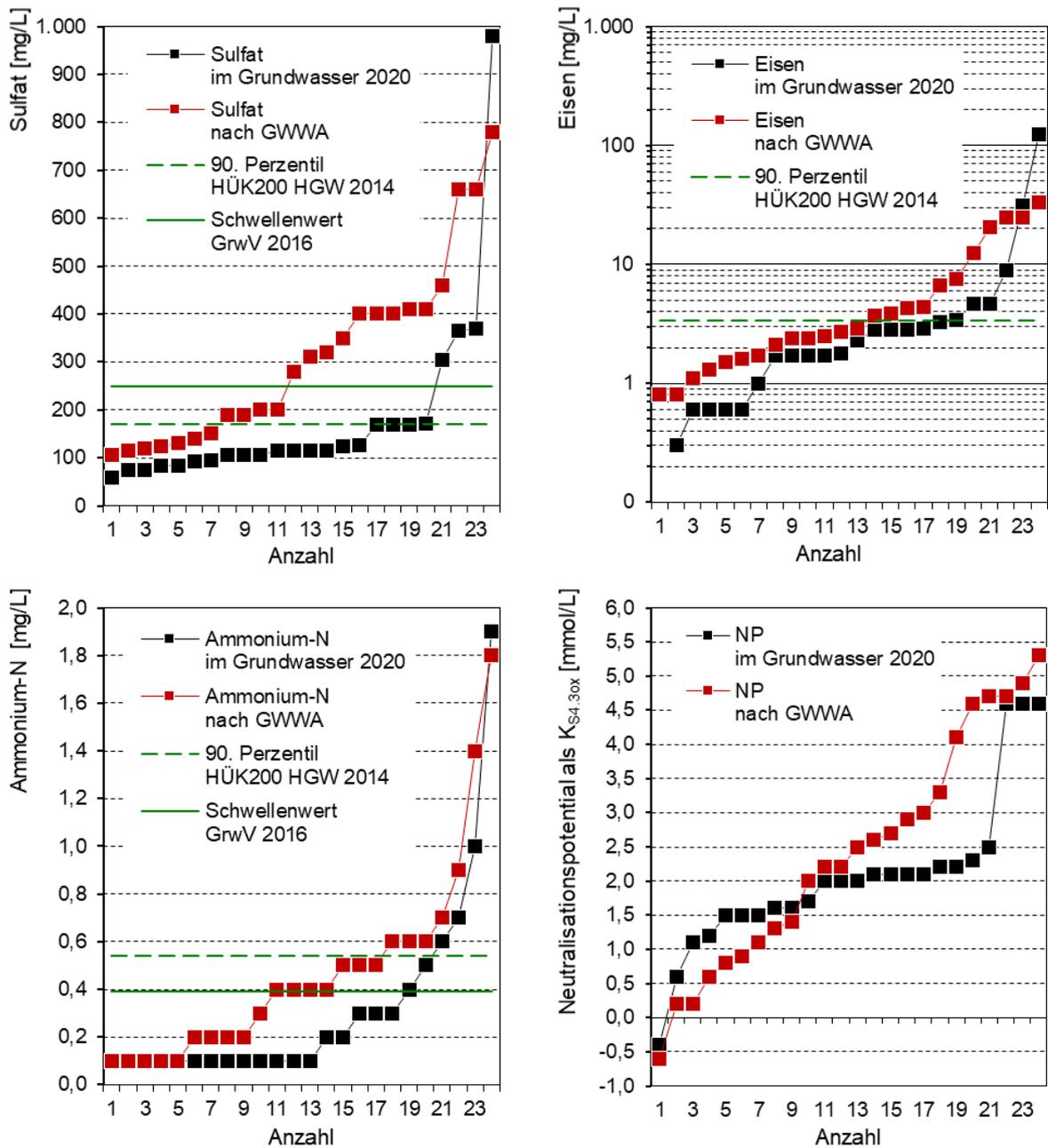


Bild 65: Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit im Umfeld des Tagebaus Jänschwalde im Zuge des Grundwasserwiederanstiegs in Form von Dauerlinien relevanter hydrochemischer Kennwerte.



6 Schlussfolgerungen

Durch die bereits vorhandene Grundwasserabsenkung im nördlichen Umfeld des Tagebaus Jänschwalde sind Veränderungen der künftigen Grundwasserbeschaffenheit durch die Pyritverwitterung in der Absenkungslamelle bereits vorgelegt. Sofern der Grundwasserspiegel weiter abgesenkt wird, werden zusätzliche Bereiche von der Pyritverwitterung erfasst. In jedem Fall ist nach dem Grundwasserwiederanstieg mit einer veränderten Grundwasserbeschaffenheit zu rechnen. Die Veränderungen betreffen hauptsächlich die Sulfatkonzentration, die Eisenkonzentration, die Versauerungsdisposition und die Ammoniumkonzentration.

Hinsichtlich ihrer gewässerökologischen Relevanz sind die untersuchten hydrochemischen Kennwerte in der Reihen- und Rangfolge: 1. Versauerungsdisposition, 2. Eisenbelastung, 3. Sulfatbelastung und 4. Ammoniumbelastung, zu gewichten.

Aufgrund verbreiteter karbonathaltiger Substrate in den oberflächennahen, von der Grundwasserabsenkung und vom Grundwasserwiederanstieg erfassten pleistozänen Horizonten sind die meisten Grundwässer nach dem Grundwasserwiederanstieg gut gepuffert. Eine **Versauerungsdisposition** stellt eine lokale Ausnahme dar. Damit ist die wichtigste hydrochemische Voraussetzung für die Formierung einer gewässerökologisch verträglichen nachbergbaulichen Wasserbeschaffenheit in den mit dem Grundwasser wechselwirkenden Fließgewässern, Standgewässern und grundwasserabhängigen Landökosystemen im nördlichen Umfeld des Tagebaus Jänschwalde gegeben.

Die Gefahr des **Eiseneintrags** aus dem Grundwasser in die Oberflächengewässer ist lokal begrenzt. Die Beeinträchtigung der Oberflächengewässer hängt in diesem Fall von der konkreten Lokalität und vom Volumenstrom der Grundwasserzutritte ab. Diese Bewertung war nicht Teil der vorliegenden Untersuchungen. Aufgrund des überwiegend niedrigen Konzentrationsniveaus von Eisen im Grundwasser² kann eine Gewässerverockerung, die ganze Fließgewässerverläufe erfasst, weitgehend ausgeschlossen werden.

In den Fließgewässern wird durch die Verdünnung mit dem unbeeinflussten Gebietsdargebot eine **Sulfatbelastung** erwartet, die die Orientierungswerte nach Anlage 7 der Oberflächengewässerverordnung nicht wesentlich überschreitet.

Die leicht erhöhten **Ammoniumeinträge** aus dem Grundwasser in die Fließgewässer, Standgewässer und grundwasserabhängigen Landökosysteme sind für deren trophischen Zustand nicht relevant, da der Minimumfaktor beim Phosphor liegt. Die erwarteten geringfügig erhöhten Eisenkonzentrationen vermögen dessen Eutrophierungspotenzial sogar zu dämpfen.

² In den Bereichen des Sanierungsbergbaus der LMBV und des Gewinnungsbergbaus der LE-B mit ausgeprägten Erscheinungen der Gewässerverockerung werden im Grundwasser flächendeckend dreistellige Konzentrationswerte für Eisen gemessen.



7 Quellenverzeichnis

- [ATV-DVWK 2002] Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. ATV-DVWK-Merkblatt M 504, 144 S., Hennef.
- [BGR & SGD 2014] Hydrogeologische Karte von Deutschland 1:200.000, Hintergrundwerte (HÜK200 HGW). Digitale Kartendaten v2.9. Hannover, 2014.
- [DBG 2008] Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (DBG), 03. Oktober 2008.
- [DIN 4030-1 2008] DIN 4030-1: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Juni 2008.
- [DWA 2011] DWA-Regelwerk Arbeitsblatt DWA-A 909 (2011): Grundsätze der Grundwasserprobennahme aus Grundwassermessstellen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Dezember 2011.
- [DWA 2018] DWA-Regelwerk Merkblatt DWA_M 504-1 (2018): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen – Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Juli 2018.
- [Evangelou 1996] Evangelou, V.P.: Pyrite Oxidation and its control: Solution chemistry, surface chemistry, acid mine drainage, molecular oxidation mechanisms, microbial role, kinetics, control, ameliorates and limitations. CRC Press Boca Raton, New York, London, Tokyo, 1995. ISBN 0-8493-4732-7.
- [gIR 2019] Fachbeitrag Wasserhaushalt: Bilanzierung des Wasserhaushaltes für wasserabhängige Landschaftsteile im hydrologischen Wirkungsbereich des Tagebaus Jänschwald, Gerstgraser Ingenieurbüro für Renaturierung, Cottbus, 26.11.2019.
- [gIR 2020] Hydrologisches Monitoring im Bereich des Schwarzes Fließes - Berichtsjahr 2019, Gerstgraser Ingenieurbüro für Renaturierung, Cottbus, 31.03.2020.
- [GMB 2020a] Betreuung Wasserversorgung Eilenzfließ und Ziegeleigraben Kontroll- und Messprogramm 2007 bis 2019 – Jahresbericht 2019, GMB GmbH Ingenieurbüro Bau/ Umwelt/ Wasserwirtschaft, Senftenberg, 30.03.2020.
- [GMB 2020b] Betreuung Grabkoer Seewiesen Kontroll- und Messprogramm – Jahresbericht 2019, GMB GmbH Ingenieurbüro Bau/ Umwelt/ Wasserwirtschaft, Senftenberg, 18.03.2020.
- [GMB 2020c] Betreuung Wasserversorgung Moaske und Nordgraben Kontroll- und Messprogramm 2001 bis 2019 – Jahresbericht 2019, GMB GmbH Ingenieurbüro Bau/ Umwelt/ Wasserwirtschaft, Senftenberg, 30.03.2020.
- [GrwV 2010] Verordnung zum Schutz des Grundwassers, „Grundwasserverordnung-GrwV vom 9. November 2010“ (BGBl. I S. 1513), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist.



- [IBGW 2019] Hydrologisches Großraummodell Jänschwalde HGMJaWa-2019; Steckbriefe zur Bewertung der Wasserstandsentwicklung für wasserabhängige Landschaftsteile im hydrologischen Wirkungsbereich des Tagebaues Jänschwalde, Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, Leipzig, 25.07.2019.
- [IWB 2019] Abschlussbetriebsplan Tagebau Jänschwalde. Kurzeinschätzung zur Beschaffenheit des Grund- und Kippenwassers und zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den entstehenden Restseen. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 31.10.2019.
- [IWB 2020] Grundwassermonitoring im Bereich der Braunkohletagebaue der Lausitz Energie Bergbau AG. Grundwassergütebericht 2020 – Förderraum Jänschwalde. Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, 27.07.2020.
- [IWB 2021] Fachbeitrag zur Wasserrahmenrichtlinie für den UVP-Bericht zum Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis 2023-2044 im Zusammenhang mit dem Tagebau Jänschwalde, Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Dresden, in Bearbeitung.
- [LAWA 3/1993] Grundwasser. Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. Teil 3 – Grundwasserbeschaffenheit. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1993.
- [LEAG 2017] Beschreibung der geologischen Verhältnisse im Raum Schönhöhe - Pinnow, Lausitz Energie Bergbau AG, 2017.
- [Nowel 1995] Geologische Übersichtskarte des Niederlausitzer Braunkohlereviere, Maßstab 1:200.000, Herausgegeben durch die Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, 1995.
- [Parkhurst & Appelo 1999] Parkhurst, D.L and C.A.J. Appelo: Users guide to PHREEQC (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. U.S.G.S. Water Resources Investigations Report 99-4259, USA, Denver, Colorado 1999.