

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 111–128	16 Abb., 5 Tab., 22 Lit.
------------------------------	---------	----------------	------------	--------------------------

Das Salzwatermonitoring im Land Brandenburg

The salt water monitoring in Brandenburg

ANGELA HERMSDORF & NORMAN PYRITZ

1 Veranlassung, Zielsetzung

Im Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU) wird seit 2007 ein Monitoring (HANNAPPEL et al. 2007) betrieben, dass die Entwicklung salinärer Tiefenwässer, speziell deren Einfluss auf die wasserwirtschaftlich relevanten Hauptgrundwasserleiter betrachtet. Neben diesem Monitoring liegen auch im Rahmen von Wasserwerksrecherchen Informationen über salinar beeinflusste Brunnen vor, deren hydraulische Einzugsgebiete auf hoch mineralisierte geogene Wässer untersucht und bewertet wurden (FUGRO 2013, HYDOR 2015). Des Weiteren beschäftigt sich das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) intensiv mit den Ursachen und Bedingungen der Migration bzw. Intrusion salinärer Wässer und deren Aufstiegsbahnen aus dem Untergrund in das Süßwasserstockwerk. Besonderes Augenmerk liegt hier bei der Früherkennung dieser Tiefenwässer.

Im Rahmen einer Masterarbeit (PYRITZ 2016) wurde eine Auswertung langjähriger Analysereihen von 2007–2015 zum Salzwatermessnetz Brandenburgs vorgenommen, in der hauptsächlich ein methodischer Vergleich zur hydrogeochemisch-genetischen Bewertung von Grundwässern in Brandenburg sowie statistische Betrachtungen im Fokus standen. Im Ergebnis dessen sollte die weitere Fortschreibung der Überwachung dieser salinären Wässer geprüft werden. Im vorliegenden Beitrag werden die Erkenntnisse dieser Masterarbeit dargestellt bzw. zusammengefasst.

2 Charakterisierung des landesweiten Untersuchungsgebietes

Der Aufbau des salinären Messnetzes begann im Jahr 2005 und die damit verbundene Verteilung der Grundwatermessstellen (GWM) im Land erfolgte nach den geologischen Hinweisen zum Auftreten von salinären Wässern aus der Literatur und deren Bedeutung auf wasserwirtschaftlich genutzte Grundwaterleiter (GWL). So hielt man sich bei der Auswahl der Gebiete für das Salzwatermonitoring nach

an die Verbreitung der oberflächennahen Versalzung aus der Rupelton-Karte des Atlases der Geologie von Brandenburg (STACKEBRANDT & MANHENKE 2002; Abb. 1) und an bereits bekannte Gebiete aus den hydrogeologischen Erkundungen. HANNAPPEL et al. (2007) haben in Verbindung mit der regionalen Verteilung der GWM und den hier auftretenden salinären Erscheinungen die Salzzonen entwickelt.

In diesem Artikel wird auf eine Betrachtung der geologischen Situation zur Versalzung im Land Brandenburg verzichtet, dazu siehe den Beitrag von BROSE & HERMSDORF in diesem Band. Dafür soll jedoch näher auf die klimatischen Gegebenheiten eingegangen werden.

Für den Beobachtungszeitraum von 1961 bis 1998 konnte nachgewiesen werden, dass die mittlere Tagestemperatur um ca. 1 °C gestiegen ist, wobei der Anstieg im Winterhalbjahr (+1,6 °C) deutlich höher ausfiel als im Sommerhalbjahr (+0,6 °C) (GERSTENGARBE 2003). Weiterhin ist eine Reduzierung der Sickerwassermenge auf etwa 75 % der Gesamtfläche Brandenburgs, besonders in Niederungsgebieten (-100 mm/a) beobachtet worden. Diese Erkenntnis beruhte auf der Auswertung von ca. 1 000 GWM des LfU. Hierbei zeigten die langjährig beobachteten Grundwaterstände einen überwiegend schwachen Abfall, der oft anthropogen bedingt war (z. B. durch die Einstellung der Rieselfeldbewirtschaftung). In bestimmten Regionen konnten anthropogene Einflüsse aber auch einen Anstieg der Grundwaterstände zur Folge haben (z. B. durch Einstellung der Entwässerung von Tagebauen). Des Weiteren wurden Absenkungen beobachtet, die keine direkte anthropogene Ursache hatten (GERSTENGARBE et al. 2003) und somit auf natürliche klimatische Veränderungen zurückzuführen sein könnten. Für den Zeitraum von 2001 bis 2055 wird mit einer Temperaturerhöhung von 1,4 °C gerechnet. Dies hätte zur Folge, dass die Sickerwassermenge im langjährigen Mittel um mehr als die Hälfte (57 %) gegenüber heute auf 46 mm/a abnimmt. Die weitere Verschiebung der Niederschläge bei gleichzeitig zunehmender Verdunstung wird sich vor allem in den Sommermonaten in einem weiteren Absinken der Grundwateroberfläche, rückläufigen Abflüssen in Fließgewässern,

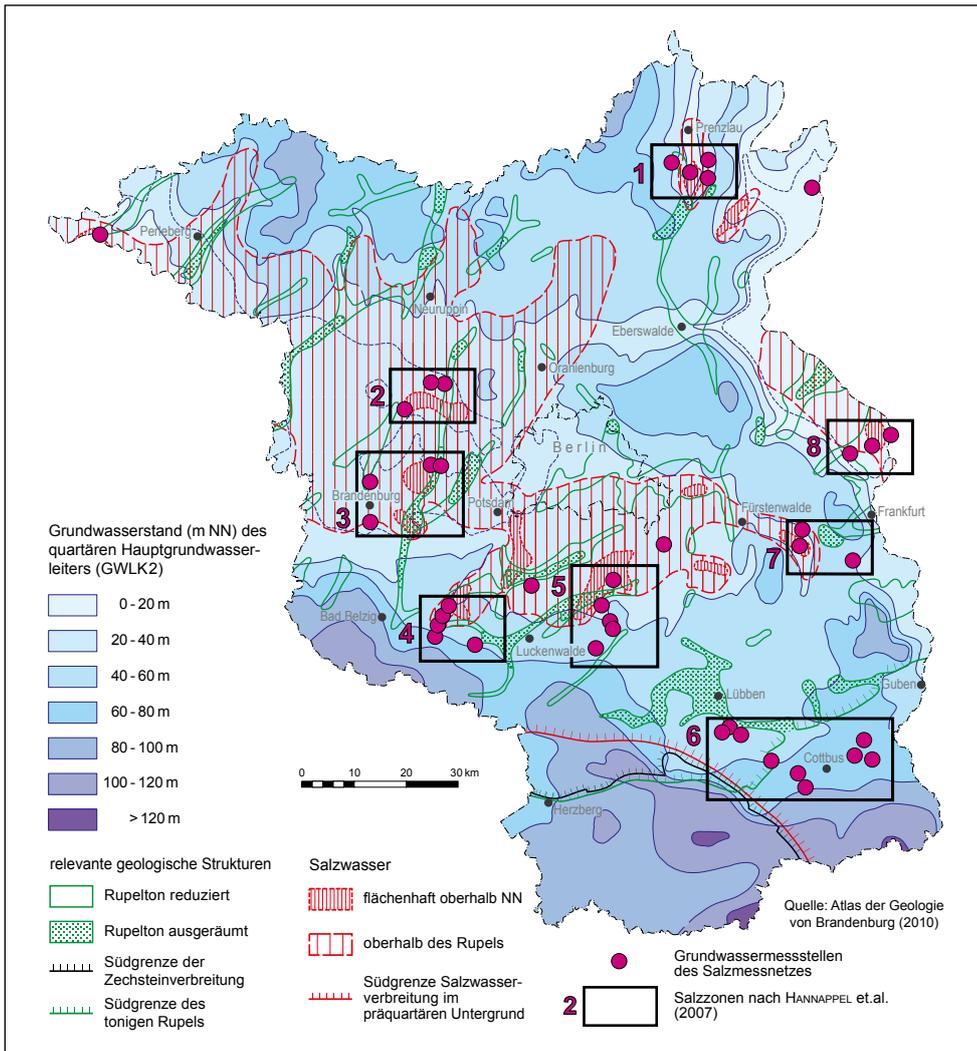


Abb. 1:
Rupelton-Fehlstellen mit den
untersuchten Standorten im
Land Brandenburg
(SCHIRMEISTER 1996,
verändert durch PYRITZ 2016)

Fig. 1:
Study areas in Brandenburg
without Rupelian
(SCHIRMEISTER 1996,
changed by PYRITZ 2016)

fallenden Seewasserpegeln sowie den damit verbundenen Problemen bei der Wasserverfügbarkeit und der Wasserqualität widerspiegeln.

Einen Überblick hinsichtlich der klimatischen Situation liefert der Bericht des LfU zur Grundwasserbeschaffenheit (LfU 2015, im Weiteren Gütebericht genannt). Im Zeitraum von 1991 bis 2012 wurde für Brandenburg eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe von 591 mm ermittelt. In 12 von 22 Jahren konnten mehr als 591 mm Niederschlag verzeichnet werden (Abb. 2).

Mit einer Niederschlagshöhe von 772 mm war das Jahr 2007 das niederschlagsreichste Jahr im Betrachtungszeitraum (Abb. 3). Jedoch entfielen 30 % der Jahressumme auf wenige Starkregenereignisse, die nur zu einem geringen Anteil zur Grundwasserneubildung beigetragen haben. Besonders niederschlagsreiche Gebiete im Land Brandenburg sind die Prignitz, die Niederlausitz und der Barnim (Abb. 2).

Mit Hilfe des Modellsystems ArcEgmo (PFÜTZNER 2012) wurden u. a. die Grundwasserneubildungsraten für den Zeitraum von 1991 bis 2010 berechnet. Etwa 8 % der Gesamtfläche Brandenburgs weisen negative Grundwasserneubildungsraten auf. Die langjährige durchschnittliche Zehrung aus dem

Grundwasser durch die Verdunstung und Exfiltration ist in diesen Gebieten also größer als die Sickerwasserrate. Außerhalb dieser „wasserhaushaltlichen Zehrflächen“ beträgt die mittlere Grundwasserneubildungsrate 82 mm/a. Bis zu 35 % der jährlichen Niederschlagssumme, hauptsächlich in den Wintermonaten, können zur Grundwasserneubildung führen, im Landesdurchschnitt werden aber nur 12 % erreicht. Hohe Grundwasserneubildungsraten sind vor allem in Bereichen mit Flurabständen größer 2 m und landwirtschaftlich genutzten Gebieten charakteristisch. In der Prignitz, der Niederlausitz und im Barnim werden so beispielsweise hohe Grundwasserneubildungsraten erreicht (Abb. 4).

Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, dass insbesondere Temperaturerhöhungen und Verschiebungen der Niederschlagsmengen zu beobachten sind. Diese Entwicklungen veränderter klimatischer Einflüsse können durch eine Verringerung des Grundwasserdruckpotenzials, also der „Auflast“ des Grundwassers möglicherweise eine Zunahme der Migration von hoch mineralisierten Tiefenwässern in die oberflächennahen Süßwasser führenden GWL bewirken. Daraus resultiert ein Gefährdungspotenzial für die wasserwirtschaftlich relevanten Grundwasserdargebote.

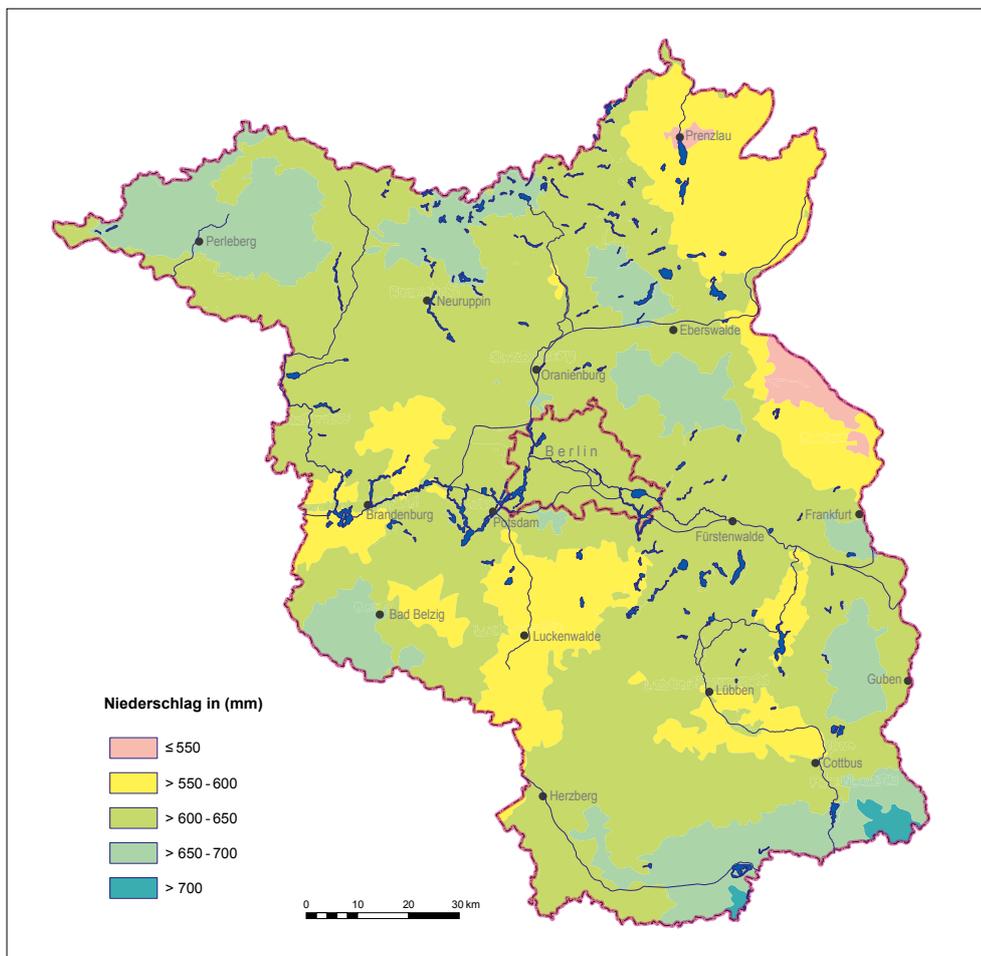


Abb. 2: Räumliche Verteilung des Niederschlags (mm/a), Mittelwerte der Zeitreihe 1991–2010 (aus LfU 2015)

Fig. 2: Spatial distribution of precipitation (mm/a), mean values of time series 1991–2010 (LfU 2015)

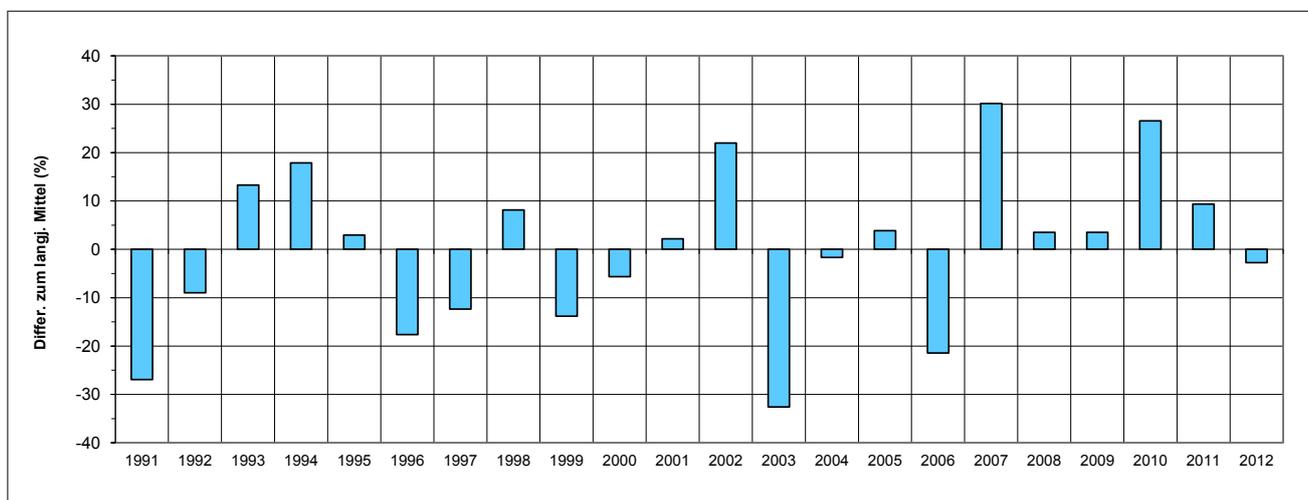


Abb. 3: Abweichungen der jährlichen Niederschlagshöhen vom langjährigen Mittel der Reihe 1991–2012 (%) nach LfU (2015)

Fig. 3: Deviations of precipitation heights from longtime average of 1991–2012 (%) after LfU (2015)

3 Methodische Ansätze zur hydrogeochemisch-genetischen Bewertung von Grundwässern

Durch PYRITZ (2016) wurden verschiedene hydrogeochemisch-genetische Auswertemethoden für das Grundwasser mit dem Ziel gegenübergestellt, die Praktikabilität und Zu-

verlässigkeit der Methoden zur Interpretation einer salinaren Beeinflussung zu analysieren.

Für eine Charakterisierung der Wassertypen wird in der Hydrogeologie häufig die Darstellung des PIPER-Diagramms (PIPER 1944) gewählt. Es handelt sich hierbei um eine Verhältnisdarstellung relativer Häufigkeiten (Abb. 5). FURTAK &

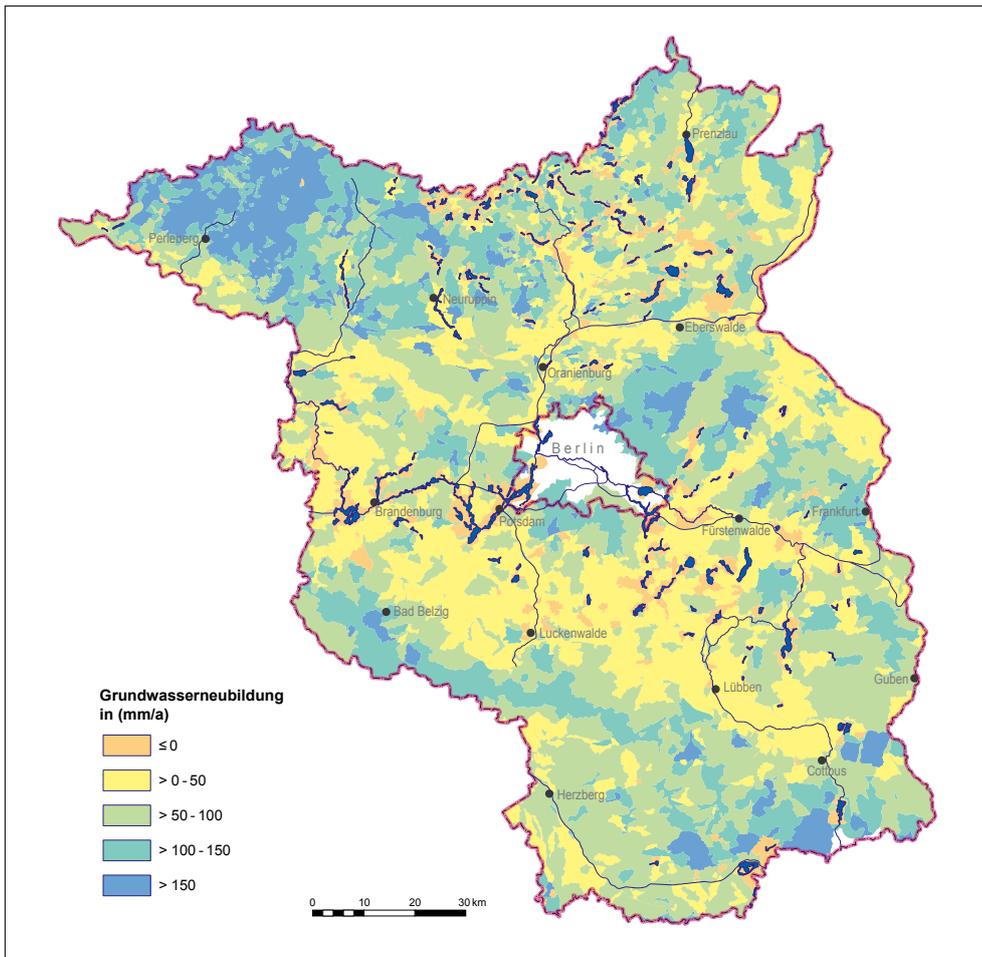


Abb. 4:
Räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung (mm/a), Mittelwerte der Zeitreihe 1991–2010 aus LfU (2015)

Fig. 4:
Spatial distribution of groundwater recharge (mm/a), mean values of time series 1991–2010 after LfU (2015)

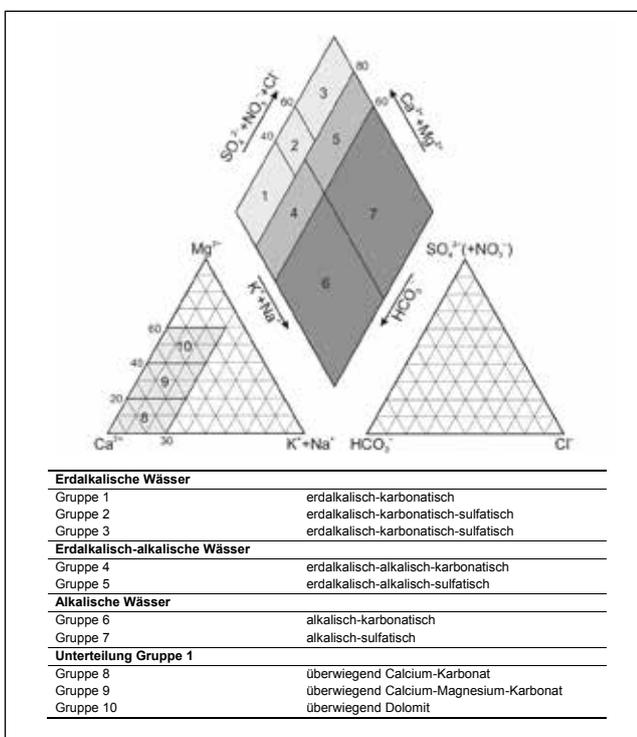


Abb. 5: PIPER-Diagramm nach PIPER (1944) und FURTAK & LANGGUTH (1967)

Fig. 5: Piper diagram according to PIPER (1944) and FURTAK & LANGGUTH (1967)

LANGGUTH (1967) haben eine Klassifizierung innerhalb des PIPER-Diagramms nach den Gehalten an Erdalkalien (Ca^{2+} , Mg^{2+}), Alkalien (K^+ , Na^+), Chlorid (Cl^-), Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) in insgesamt zehn Gruppen erarbeitet, wobei sich die Plausibilität der Ergebnisse nach dem Ionenbilanzfehler ($\leq 5\%$) richtet.

Im Ergebnis dieser Methodik bekommt man eine Einschätzung zur Zusammensetzung des Grundwassers am Standort.

Eine weitere Methode ist das Genesemodell des LBGR (RECHLIN 1997, 2008), welches durch das Programm GEBAH (RECHLIN et al. 2010; siehe Beitrag BROSE in diesem Band) berechnet und visualisiert wird. Weitere Informationen für eine genetische Bewertung erhält man aus den hypothetischen Karbonat-, Sulfat- und Chlorid-Salzen. Entsprechend der prozentualen Anteile in der Lösung können vor allem Aussagen zu den Entwicklungen in der Zusammensetzung des Grundwassers getroffen werden.

Die Zuordnung und Bewertung der hypothetischen Berechnungssalze wird in besonderem Maße u. a. durch das Genetische Grundverhältnis (GGV; RECHLIN 2008) erweitert. Dieses wichtige Salzverhältnis wird in allen hydrogeochemisch-genetischen Grundtypen berechnet und ermöglicht selbst bei einer hohen Verdünnung eine relativ zuverlässige Aussage zur Anwesenheit salinärer Wässer im betrachteten GWL.

Aus Bewertungen wie Häufigkeitsverteilungen, statistischen Kennwerten, Spannweitendiagrammen und Trendentwicklungen ergeben sich weitere Informationen zum hydrogeochemischen Hintergrund des Grundwassers. Die Ergebnisse aus dem Salzwassermonitoring wurden denen des Güteberichts (LfU 2015) gegenübergestellt. Es sollte geklärt werden, in wie weit sich die statistischen Kennwerte aus den Betrachtungen des Güteberichtes von denen des Salinarmonitorings unterscheiden lassen.

4 Parameterbezogene Auswertung, Trendbetrachtung

In PYRITZ (2016) selbst sind die Hauptparameter (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_x^- -Verbindungen, PO_x^- -Verbindungen, Bromid (Br^-), Eisen (Fe^{2+}), Mangan (Mn^{2+}) und die vor Ort-Parameter Leitfähigkeit, Sauerstoff, Redoxpotenzial und pH-Wert einer statistischen Betrachtung unterzogen worden. An dieser Stelle soll nur auf ausgewählte Parameter der salinar beeinflussten Grundwässer eingegangen werden sowie eine Gegenüberstellung zu den Ergebnissen des Güteberichts (LfU 2015) erfolgen.

Es wurden aus ca. 550 Analysen des Salzwassermessnetzes die einzelnen Parameter statistisch auf die GWL bezogen ausgewertet (z. B. Medianwert, Spannweiten). Entsprechende Informationen sind der Tabelle 1 zu entnehmen, wobei aber nur die Tiefenwässer prägende Parameter aufgeführt wurden. Es ist erkennbar, dass bei allen Parametern die Konzentrationen mit der Tiefe zunehmen. Insbesondere trifft das natürlich auf die Parameter Na^+ , Ammonium (NH_4^+), Cl^- , Br^- und die Leitfähigkeit zu. Nur die Konzentration von SO_4^{2-} nimmt vom GWL 1 bis GWL 3 ab. Abbildung 6 und 7 geben in Übersichtskarten die gemessenen Leitfähigkeits- und Chlorid-Werte wieder. Aufgrund der chemischen Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Chlorid treten folgerichtig gleiche Verhaltensmuster in der Verteilung der jeweiligen Konzentrationen auf. Höhere Chlorid-Konzentrationen können auch anthropogene Ursachen haben, so dass eine detaillierte Auswertung hinsichtlich der Unterscheidung von geogenen Einflüssen und anthropogenen Stoffeinträgen erforderlich ist. Ein Lösungsansatz hierzu wird im Gütebericht 2015 zwischen der JAHNKE-Methode (2011) und dem Genesemodell (RECHLIN 2008) diskutiert.

Parameter	Einheiten	Median GWL 1	Median GWL 2	Median GWL 3	Spannweiten GWL 3	Grenzwert TrinkwV (2013)	Gütebericht Median Wald
elektrische Leitfähigkeit	$\mu S/cm$ bei 25 °C	784,5	689,5	1518	347–19 402	2 790	350–550
Redoxpotential	mV	106	103	104	44–202		400 bis -200
Kalium	mg/l	1,99	2,415	5,2	1,6–37	12	2
Natrium	mg/l	36,05	34,15	115	21–3592	200	20
Magnesium	mg/l	10,15	10,85	11,75	6,4–191,2	50	7,5
Chlorid	mg/l	64,65	49,5	133	5,5–6726	250	25
Sulfat	mg/l	105	72,5	12,3	5–697	250	100
Ammonium	mg/l	0,37	0,49	0,81	0,3–4,5	0,5	0,1
Bromid	mg/l	0,14	0,22	0,28	0,1–6,3	0,01	kein Wert

Tab 1: Übersicht zu den Medianwerten und Spannweiten ausgewählter Parameter

Tab.1: Overview of mean values and range of parameters

Prozesse	Reaktion	Eh-Wert Prozessbeginn
Nitrat-Reduktion	$2 NO_3^- + 12 H^+ + 10 e^- \rightarrow N_2 + 6 H_2O$	600 bis 300 mV
Mangan-Reduktion	$MnO_2(s) + 4 H^+ + 2 e^- \rightarrow Mn^{2+} + H_2O$	500 bis 220 mV
Eisen-Reduktion	$Fe(OH)_3(s) + 3 H^+ + e^- \rightarrow Fe^{2+} + 3 H_2O$	400 bis 180 mV
Sulfat-Reduktion	$SO_4^{2-} + 10 H^+ + 8 e^- \rightarrow H_2S + 4 H_2O$	100 bis -200 mV
Methan-Reduktion	$CO_2 + 8 H^+ + 8 e^- \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$	-150 bis -280 mV

Tab. 2: Abfolge der Redoxreaktionen in Abhängigkeit vom Redoxpotential nach OTTOW (1981)

Tab. 2: Sequence of redox reactions depending of the redox potential, according to OTTOW (1981)

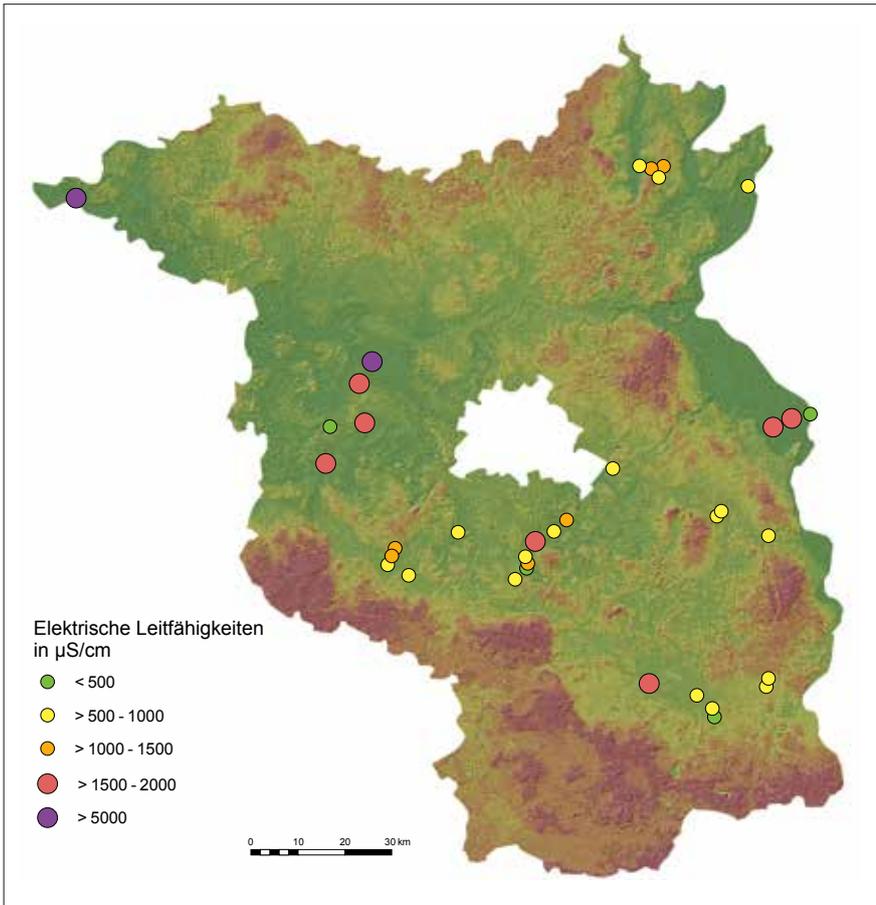


Abb. 6:
Konzentrationen der spezifischen
elektrischen Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
an den untersuchten
Grundwassermessstellen im
Land Brandenburg

Fig. 6:
Measured specific electric
conductivity at the monitoring
wells in Brandenburg

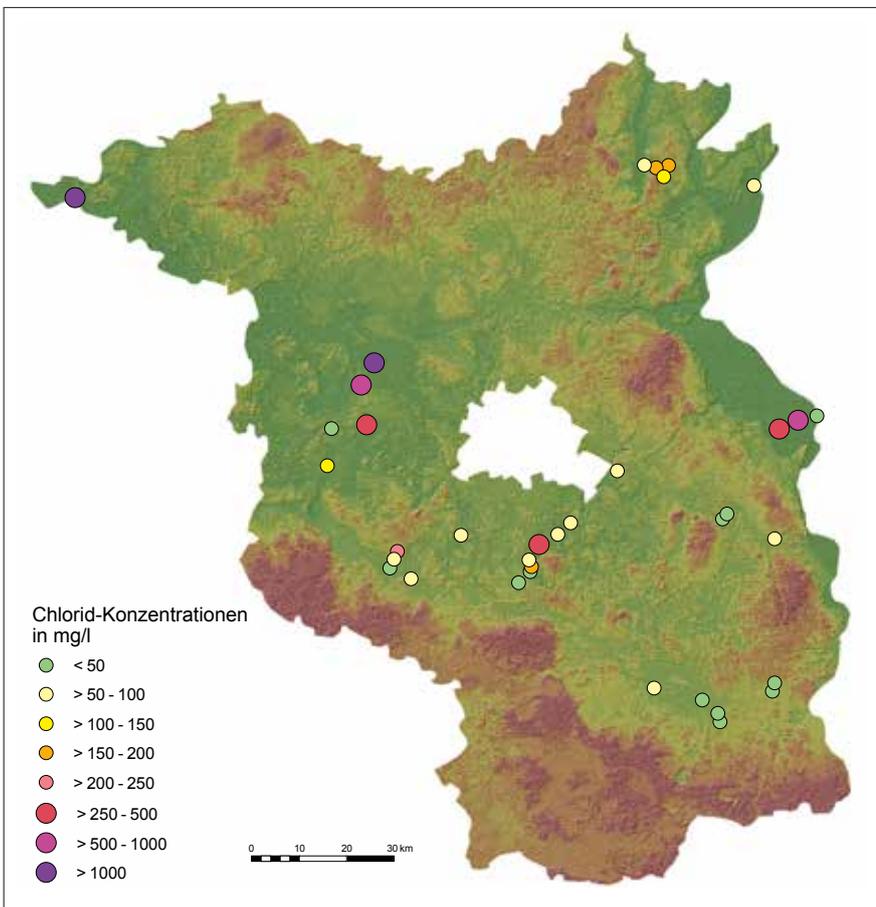


Abb. 7:
Chlorid-Konzentrationen (mg/l)
der untersuchten
Grundwassermessstellen
in Brandenburg

Fig. 7:
Chloride concentration (mg/l)
at the monitoring
wells in Brandenburg

Zur Beschreibung der Milieubedingungen im Grundwasser ist das Redoxpotential (Eh-Wert) ein wichtiger Parameter. Auf Grund der organischen Verbindungen im Boden und im Grundwasser wird der Sauerstoff (O₂)-Gehalt häufig „aufgezehrt“, was mit einer Verringerung des Redoxpotenzials einhergeht (LfU 2015). Die Untersuchungen zeigen, dass selbst bei oberflächennahen GWM die Konzentrationen an O₂ überwiegend gering sind. Bei mehr als 90 % aller Analysen liegen die O₂-Gehalte im Bereich 0,1 bzw. < 0,1 mg/l. Nach dem Verbrauch von O₂ bilden sich im Laufe verschiedener Redoxprozesse Nitrat (NO₃⁻), Mn²⁺, Fe²⁺- und SO₄²⁻-reduzierende Wässer (Tab. 2), wobei für Wässer in Brandenburg nur die Prozesse innerhalb 400 bis -200 mV maßgebend sind.

NH₄⁺ spielt für die brandenburgischen Grundwasserhältnisse auf Grund der o. g. Milieubedingungen eine besondere Rolle. Sind die Medianwerte (Tab. 1) der Messdaten aus GWL 1 und 2 meist unterhalb des Grenzwertes von 0,5 mg/l [TRINKWASSERVERORDNUNG (TRINKWV) 2013], treten bis zu 4,5 mg/l im GWL 3 auf. Grund hierfür sind die geogenen Gehalte, die im Zusammenhang mit einer Liegendspeisung auftretenden organischen Bestandteilen einhergehen. Ähnliche Verhaltensweisen sind bei den Parametern K⁺ und Br⁻ zu beobachten.

Die durchgeführte Betrachtung einzelner Parameter (Abb. 8) lässt keine steigenden Trends im Sinne einer Zunahme der salzwasserprägenden Parameter wie Cl⁻, Na⁺, der Leitfähigkeit oder SO₄²⁻ erkennen. Lediglich bei der Leitfähigkeit treten mehr steigende als fallende Trends in den jeweiligen GWM auf. Generell dominieren jedoch die trendfreien Entwicklungen der einzelnen Parameter.

Vergleicht man die hier betrachteten Trends mit denen aus dem Gütebericht 2015, ergeben sich ähnliche Entwicklungen.

5 Hydrogeochemisch-genetische Auswertung

Für eine bessere Übersicht der standortspezifischen hydrogeochemischen und genetischen Ergebnisse wurde die Zusammenführung von acht Gebieten in sogenannte „Salzzonen“ aus HANNAPPEL et al. (2009) übernommen (Abb. 9). Hierzu zählen:

Der Oberuckersee, das Havelluch, die Nauener Platte, Salzbrunn, der Nottekanal, die Krausnick-Burg-Peitzer-Rinne, der Oder-Spree-Kanal und das Oderbruch.

Exemplarisch werden hier die Gebiete Oberuckersee, Salzbrunn und Oder-Havel-Kanal näher beschrieben, jeweils verbunden mit einer Auswertung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) mittels PIPER-Diagramm und mittels GEBAH. Die anderen fünf Gebiete sowie einzelne GWM sind in PYRITZ (2016) intensiv betrachtet worden.

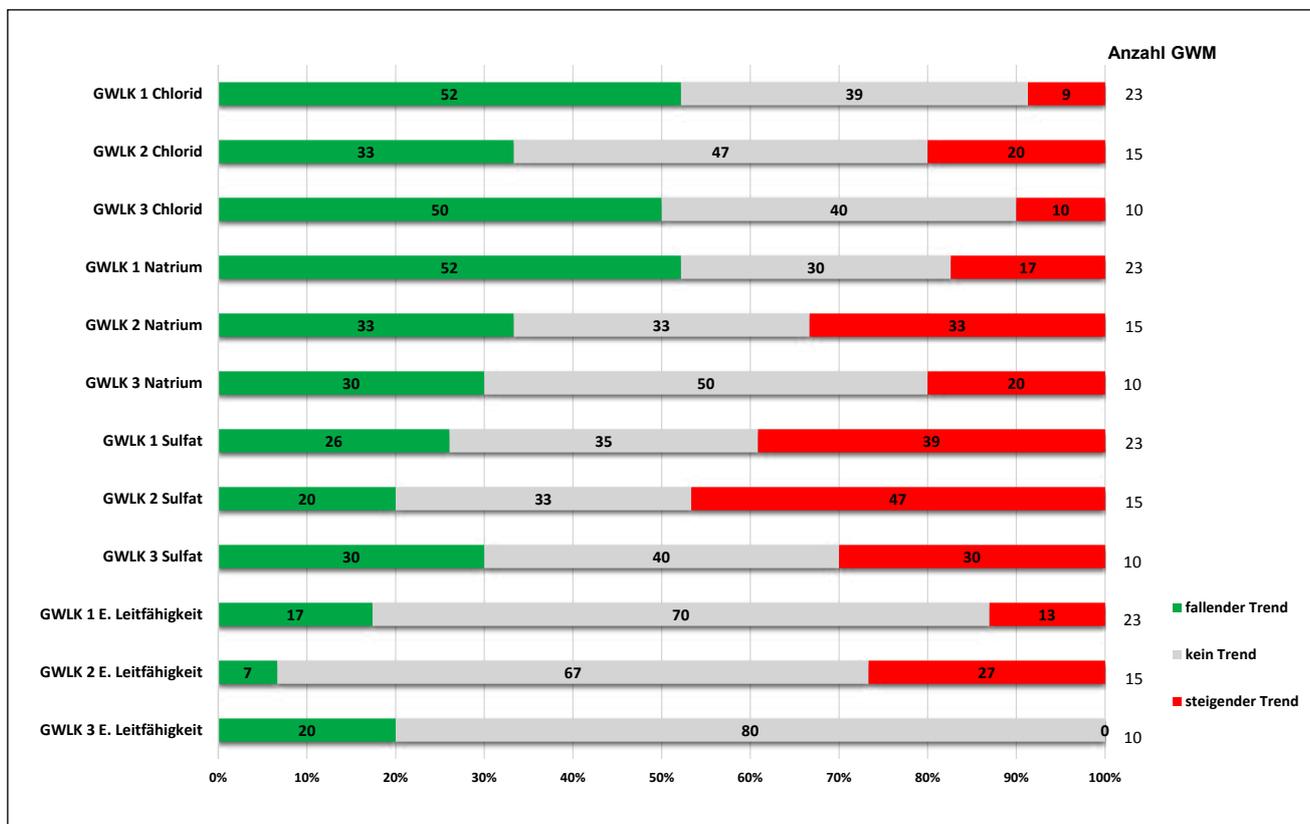


Abb. 8: Trendentwicklung der Konzentrationsganglinien ausgewählter Parameter (%)

Fig. 8: Trend development of the concentration hydrographs of selected parameters (%)

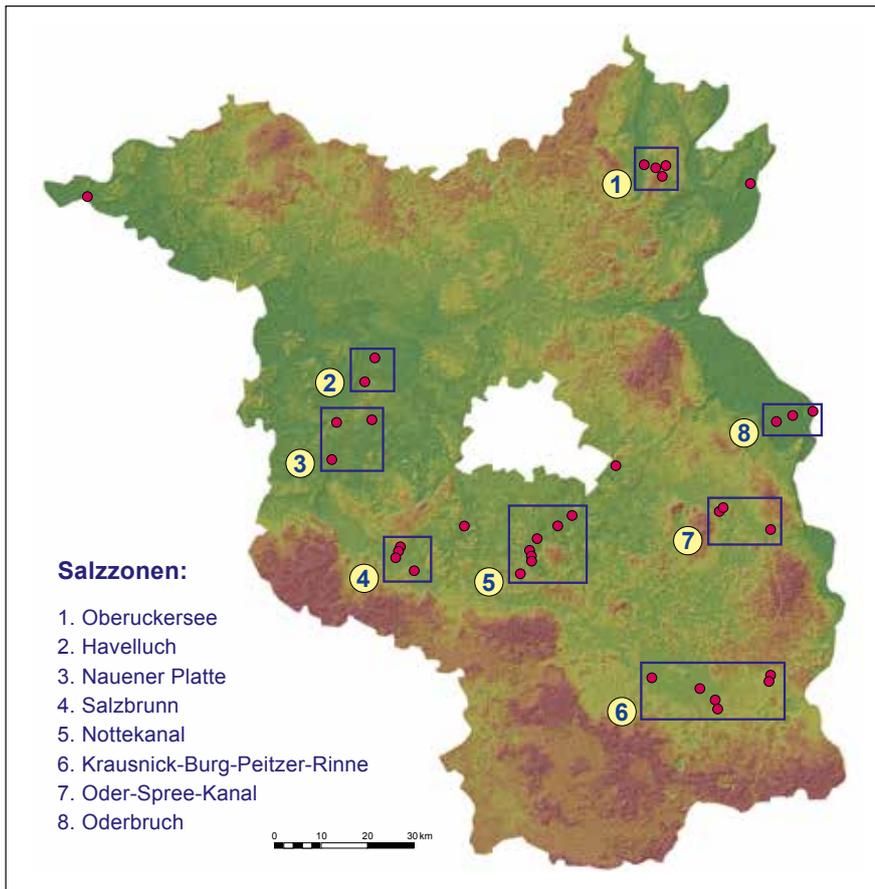


Abb. 9:
Salzzonen nach
HANNAPPEL et al. (2007) und
Grundwassermessstellen
(BRÜNING 2016, verändert
durch PYRITZ 2016)

Fig. 9:
Areas of saline intrusion with
monitoring wells from
HANNAPPEL et al. (2007) and
monitoring wells
(BRÜNING 2016,
changed by PYRITZ 2016)

5.1 Oberuckersee

Die Salzzone Oberuckersee (Abb. 9) liegt im Nordosten Brandenburgs im Landkreis Uckermark an der östlichen Uferseite des Oberuckersees bis zum großen Kuhsee. Mögliche Strukturen für Salzwasseraufstiegsbahnen ergeben sich aus einer tiefliegenden quartären Ausräumungszone (QAZ), die auf ca. -100 bis -200 m NHN abtaucht und aus der östlich gelegenen „Struktur Gramzow“. Insgesamt werden der Salzzone Oberuckersee vier tief ausgebaute Messstellen mit Filteroberkante (FOK) > 69 m unter Geländeoberkante (GOK) zugewiesen, welche in maximal 6 km Entfernung zueinander liegen. Hier ist die Möglichkeit des Aufstiegs salinärer Tiefenwässer in die Süßwasser führenden quartären GWL gegeben. Eine wasserwirtschaftliche Nutzung findet in Neuhof durch das gleichnamige Wasserwerk (WW) statt, wobei die GWM z. T. im gleichen GWL ausgebaut sind wie die Brunnen.

Die Auswertung der hydrogeochemischen Parameter zeigte insbesondere bei den Standorten GWM Gramzow Unterpegel (UP) und WW Neuhof hohe Konzentrationen an Cl^- und Na^+ (Tab. 3). Diese hohen Konzentrationen allein sind schon ein Beleg für das Vorhandensein salinärer Wässer aus dem tieferen Untergrund. Zudem zeigten die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit an allen Standorten Werte um bzw. über 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Trotz der bei den hypothetischen Salzen (Tab. 3) anteiligen Dominanz der für pleistozäne GWL prägenden Karbonat-Salze, erkennt man in GEBAH im Zusammenhang mit steigenden Anteilen der Chlorid-

Salze eine Zunahme des Intrusionspotentials von migrierend bis hin zu intrusiv. In tieferen GWL liegt die Verteilung in unbeeinflussten Grundwässern zwischen Karbonat-, Sulfat- und Chlorid-Salzen bei etwa > 85 : < 5 : < 10. Im Konsens mit dem GGV liefern die hypothetischen Salze standortbezogen bei der hydrogeochemisch-genetischen Bewertung des Grundwassers zusätzliche Informationen.

Die analysierten Grundwässer werden nach PIPER (1944) grundsätzlich in $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ und Na-Ca-HCO_3 -Wässer, also in Tiefenwässer bzw. Austauschwässer unterschieden (Abb. 10). Nach der Klassifizierung von FURTAK & LANGGUTH (1967) werden die Wässer zudem in erdalkalisch-alkalisch und in alkalische Wässer (GWM Meichow UP) differenziert.

Nach GEBAH (Abb. 11) sind alle GWM geogen salinar geprägt, wobei in den GWM Gramzow UP und WW Neuhof bereits intrusive Tiefenwässer auftreten. Das deutet daraufhin, dass hier eine unmittelbare Aufstiegsbahn salinärer Tiefenwässer existiert. In der GWM Seehausen werden hingegen „migrierende“ Wässer diagnostiziert. Verschiedene Ursachen wie eine geringere hydraulische Anbindung der GWM an die salinären Aufstiegsbahnen, eine größere Entfernung von diesen oder auftretende abdichtende Schichten im Untergrund könnten dafür verantwortlich sein. Die Wässer der GWM Meichow UP und Seehausen zeigen migrierende Salzwässer an. Insbesondere GWM Meichow UP mit Chlorid-Gehalten um 70 mg/l verhält sich als Austauschwasser wenig auffällig.

GWM	Typisiert nach:			Chemische Parameter				Hypothetische Salze in %		
	GEBAH/salinar (RECHLIN et al. 2010)	GGV	PIPER (1944)	Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]	Natrium [mg/l]	Karbonate	Chloride	Sulfate
Gramzow UP	Natrium-Typ/ intrusiv migrierend	0,041	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	1 107	157	39	132	63,00	32,00	5,00
WW Neuhof	Natrium-Typ/ intrusiv migrierend	0,023	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	1 295	194	18	136	60,00	37,00	3,00
Seehausen	Natrium-Typ/ migrierend	0,062	Na-Ca-HCO ₃	946	85	15	79	75,00	22,00	3,00
Meichow UP	Natrium-Typ/ migrierend	0,060	Na-Ca-HCO ₃	940	72	5	120	80,00	19,00	1,00

Tab. 3: Hydrogeochemisch-genetische Auswertung Salzzone Oberuckersee

Tab. 3: Hydrogeochemical-genetic evaluation of the saline area Oberuckersee

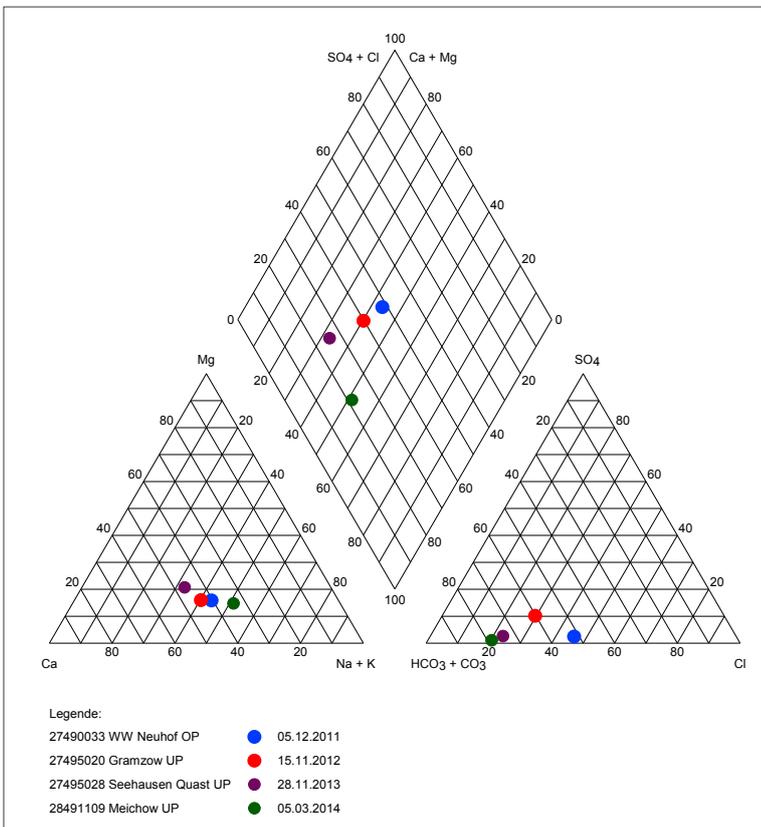


Abb. 10: Analysen der Grundwassermessstellen im PIPER-Diagramm der Salzzone Oberuckersee

Fig. 10: Analyzes of monitoring wells in the PIPER diagram of the area Oberuckersee

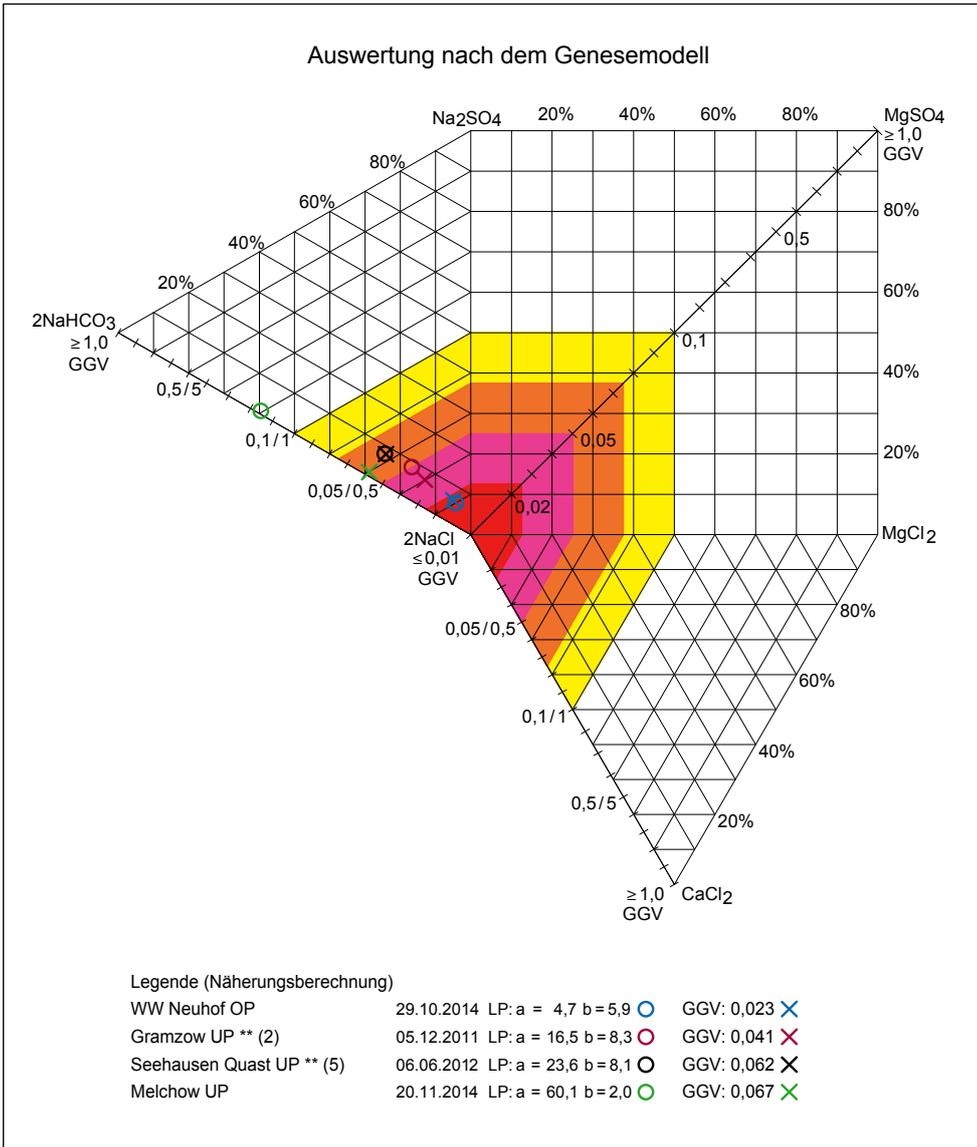


Abb. 11: Lagepunkte (LP) der Analysen und des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) mit dem geringsten Ionenbilanzfehler der Salzzone Oberuckersee im Genesemodell GEBAH

Fig. 11: Position of analyzes (LP) and GGV with low ion balance error of the monitoring area Oberuckersee in GEBAH

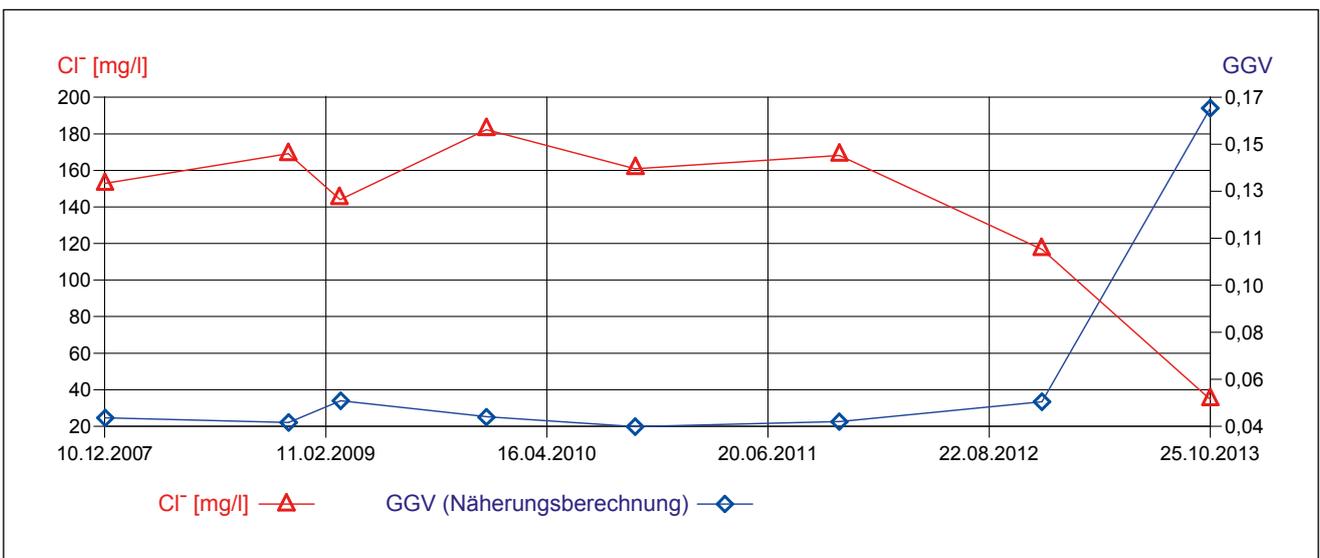


Abb. 12: Entwicklungen des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) und Chlorid-Konzentrationen (mg/l) am Standort Gramzow

Fig. 12: Development of GGV and chloride concentration (mg/l) at the monitoring area Gramzow

In GEBAH ist im Natrium-Typ (Abb. 11) eindeutig der Einfluss migrierender bis hin zu intrusiven Tiefenwässern erkennbar. Wie bereits in KABOTH et al. (2008) beschrieben, kann mit der Gegenüberstellung des GGV zu Chlorid die Variabilität salinärer Wässer beschrieben werden. Kommt es zur Aussüßung im GWL, z. B. durch erhöhte Niederschläge bzw. Aktivierung von Neubildungsanteilen, reagiert das GGV relativ schnell mit einem höheren Verhältniswert. In Abbildung 12 zeigt sich, dass die Chlorid-Konzentrationen ab dem Jahr 2011 bei gleichzeitigem Anstieg des GGV stark abnehmen. Mit dem Anstieg des GGV geht eine Verschiebung aus dem „intrusiv migrierenden“ zum „diffus migrierenden“ Bereich der Grundwässer einher. Es kommt also zu einer Verdünnung der aufsteigenden Tiefenwässer. An der GWM konnte ein Anstieg des Grundwasserspiegels um fast 1 m seit dem Jahr 2009 beobachtet werden.

Beim Vergleich der Aussagen aus den beiden hydrogeochemischen Modellen kann festgestellt werden, dass die Auswertung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) im PIPER-Diagramm „sehr träge“ ist und erst bei Konzentrationen > 150 mg/l auf chloridische Einflüsse reagiert. Hingegen machen sich Veränderungen durch erhöhte Grundwasserstände und damit einhergehenden abnehmenden Konzen-

trationen durch Verdünnung relativ schnell im genetischen Verhalten des Grundwassers in GEBAH bemerkbar.

5.2 Salzbrunn

Der Name Salzbrunn ist historisch auf eine im 17. Jahrhundert betriebene Saline zurückzuführen. Auch wenn wasserwirtschaftlich nicht so interessant, wurde dieses Gebiet in das Salzwassermonitoring aufgenommen, um Transportwege und allgemeine Entwicklungen in Binnensalzstellen besser verstehen zu können. Die in der grundwasserentlastenden Nieplitz-Niederung innerhalb des Havel-Einzugsgebietes gelegene Salzzone (Abb. 9) umfasst fünf oberflächennah ausgebaute Messstellen im GWLK 1. In unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes befindet sich die Doppelstruktur Treuenbrietzen-Buchholz, die mit einer QAZ bis -200 m NHN in Verbindung steht. Im Bereich Alt Bork sind reduzierte Mächtigkeiten des Rupeltons bekannt, somit sind hydraulische Voraussetzungen für den Aufstieg geogen salinärer Tiefenwässer über geologische Fenster gegeben. In diesem Untersuchungsgebiet sind erhöhte Chlorid- und Sulfat-Konzentrationen sowie hohe Leitfähigkeiten prägend

GWM	Typisiert nach:			Chemische Parameter				Hypothetische Salze in %		
	GEBAH/salinar (RECHLIN et al. 2010)	GGV	PIPER (1944)	Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]	Natrium [mg/l]	Karbonate	Chloride	Sulfate
Alt Bork	Sulfat-Typ/ intrusiv	0,004	Na-Cl	1 120	207	37	127	15,00	70,00	15,00
Deutsch Bork Nord	Magnesium-Typ/ intrusiv	0,017	Ca-HCO ₃ -SO ₄	1 058	55	199	28	55,00	10,00	35,00
Deutsch Bork Süd	Magnesium-Typ/ intrusiv migrierend	0,040	Ca-HCO ₃ -SO ₄	954	49	223	29	45,00	10,00	45,00
Niebel	Sulfat-Typ/ intrusiv	0,018	Na-Ca-HCO ₃ -Cl-SO ₄	822	94	101	68	40,00	35,00	25,00
Schlalach OP	Magnesium-Typ/ migrierend	0,053	Ca-HCO ₃ -SO ₄ -Cl	1 131	112	211	54	40,00	25,00	35,00

Tab. 4: Hydrogeochemisch-genetische Auswertung Salzzone Salzbrunn

Tab. 4: Hydrogeochemical-genetic evaluation of the saline area Salzbrunn

(Tab. 4). Nach PIPER (1944) und FURTAK & LANGGUTH (1967) werden die analysierten Grundwässer z. T. sogar als Auslaugungswässer (Alt Bork) bzw. erdalkalisch und erdalkalisch-alkalisch klassifiziert (Abb. 13).

In GEBAH befinden sich alle Lagepunkte der Grundwässer dicht um den NaCl-Pol und werden durch das relativ niedrige GGV hauptsächlich als „intrusiv“ bis „intrusiv migrierend“ eingestuft (Abb. 14, Tab. 4).

Trotz eines oberflächennahen Ausbaus aller GWM sind die Neubildungsgeprägten Grundwässer an der GWM Alt Bork genetisch nicht mehr nachweisbar. Es kann bei einem GGV von 0,004 und der Summe der Chlorid-Salze von 70 % von tiefgreifenden Entlastungen hoch mineralisierter Tiefenwässer ausgegangen werden. Im Untersuchungszeitraum ist an allen GWM dieser Salzzone eine Zunahme des salinaren Gefährdungspotentials im Grundwasser beobachtet worden.

Die in Abbildung 15 dargestellte Gegenüberstellung der Chlorid-Konzentrationen mit dem GGV an der GWM Alt Bork zeigen ähnlich wie an der GWM Gramzow den disproportionalen Zusammenhang dieser Kennwerte. Nach

zunächst abnehmenden Chlorid-Gehalten kam es ab 2009 zu einer Zunahme, verbunden mit einem geringeren GGV bis in den intrusiven Bereich. Nach den niederschlagsreichen Jahren 2012/2013, die sich auch in den beobachteten Grundwasserständen widerspiegeln, erfolgte eine Umkehr der Entwicklung.

Stellt man hier die beiden methodischen Ansätze von PIPER (1944) und GEBAH gegenüber wird in diesem Gebiet klar, das nach PIPER erst bei über 200 mg/l Chlorid eine Zuordnung als Ablaugungswasser erfolgt. Im GEBAH werden diese Wässer bereits bei geringeren Konzentrationen dem intrusiven Salinar zugeordnet. Jegliche wasserwirtschaftlichen Nutzungen in diesem Gebiet erübrigen sich somit. Schließlich ist das Ziel, eine großflächige Verteilung des versalzene Grundwassers zu verhindern und damit ökologischen Veränderungen entgegen zu wirken.

5.3 Oder-Spree-Kanal

Die Salzzone 7 (Abb. 9) Oder-Spree-Kanal umfasst die beiden Standorte Briesen und Müllrose entlang des Kanals. Insgesamt werden sechs Messstellen aus dem Salinarmess-

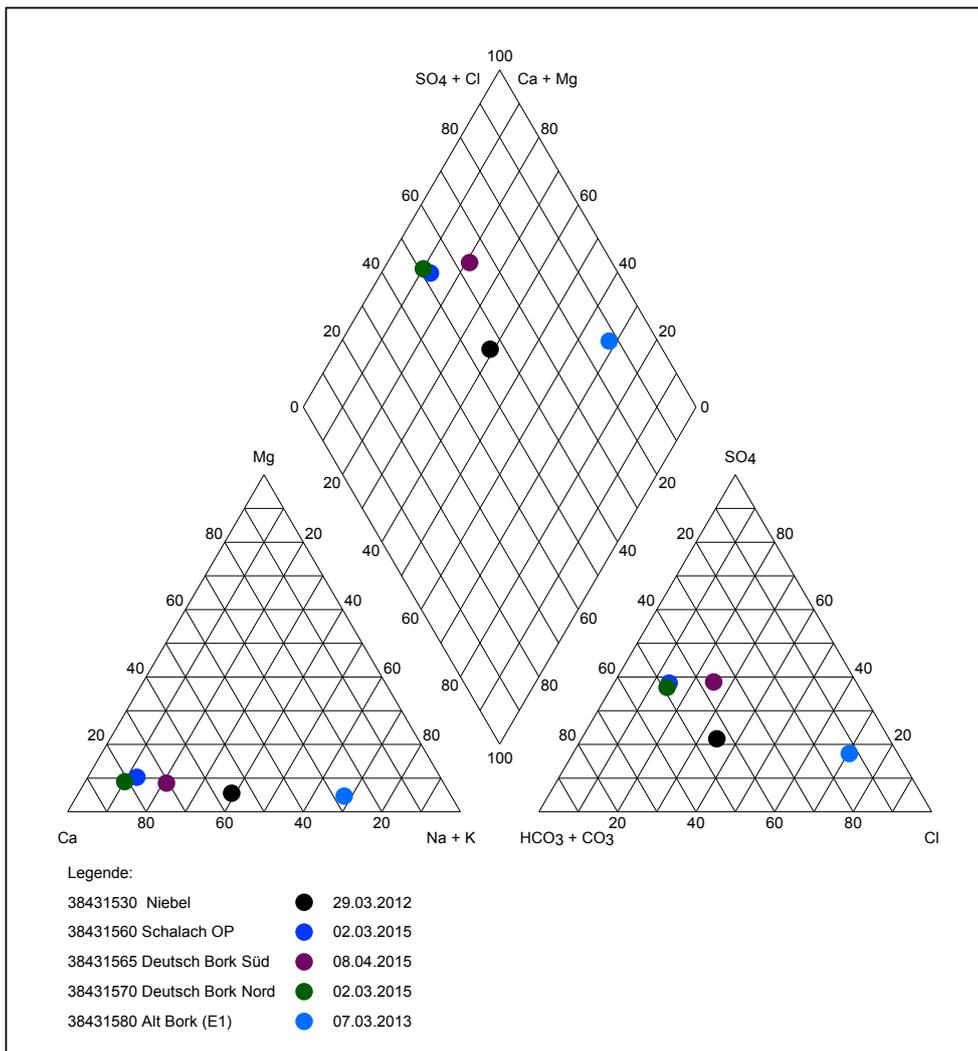


Abb. 13: Analysen der Grundwassermessstellen im PIPER-Diagramm der Salzzone Salzbrunn

Fig. 13: Analyzes of monitoring wells in the PIPER diagram of the area Salzbrunn

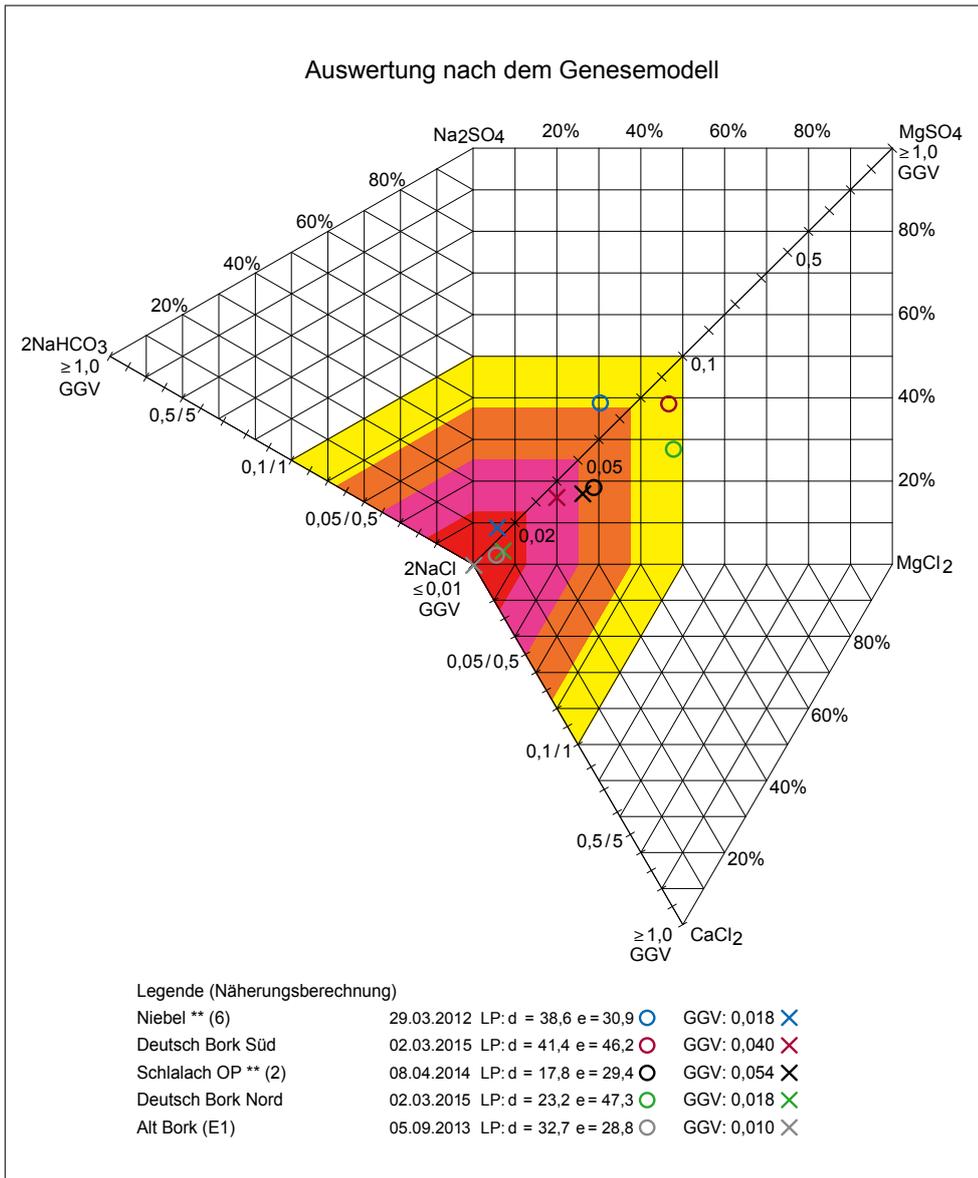


Abb. 14: Lagepunkte (LP) der Analysen und des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) mit dem geringsten Ionenbilanzfehler der Salzzone Salzbrunn im Genesemodell GEBAH

Fig. 14: Position of analyzes (LP) and GGV with low ion balance error of the monitoring area Salzbrunn in GEBAH

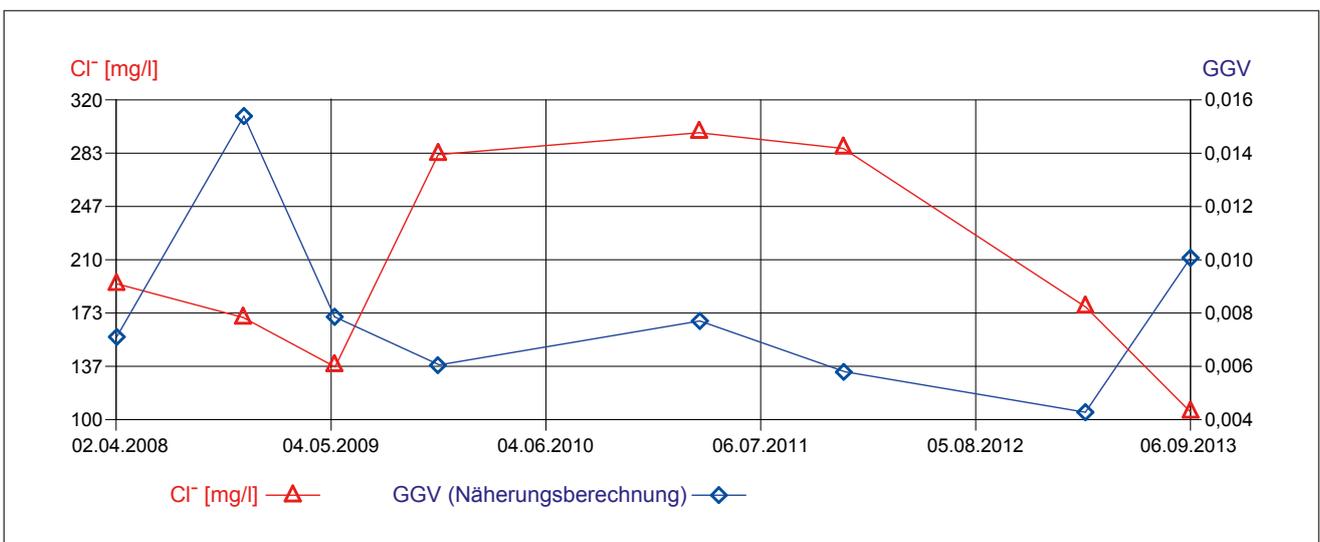


Abb. 15: Entwicklungen des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) und der Chlorid-Konzentrationen (mg/l) am Standort Alt Bork

Fig. 15: Development of GGV and chloride concentration (mg/l) at the monitoring area Alt Bork

netz dieser Salzzone zugeordnet. Hier sollen die Entwicklungen der GWM Müllrose näher betrachtet werden, da diese einen vertikalen Blick in den GWL erlauben. Alle drei Filterlagen der GWM Müllrose sind in einem unbedeckten GWL mit relativ geringen vertikalen Versätzen (FOK 17 bis 28 m unter GOK) ausgebaut.

Als Ursache der Aufstiegsbahnen hoch mineralisierter Wasser fungieren die Rupelton-Fehlstellen, welche sich südlich von Müllrose bis nach Briesen erstrecken sowie die westlich von Müllrose verlaufende QAZ, die Neubrück-Merz-Rinne.

Die Auswertung der Beschaffenheitsparameter zeigt, dass die Grundwasserproben aller GWM durch elektrische Leitfähigkeiten im Bereich zwischen ca. 600 bis 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ charakterisiert sind (Tab. 5). Die Konzentrationen an Cl^- , SO_4^{2-} und Na^+ im Grundwasser sind nahezu unauffällig im Vergleich zu den vorher beschriebenen Gebieten. Lediglich die Chlorid-Konzentration an der GWM Müllrose Mittelpegel (MP) 2 überschreitet den für Brandenburg üblichen geogenen Hintergrundwert von 50 mg/l (LfU, 2015). Die analysierten Grundwässer lassen sich nach PIPER (1944) den Austauschwässern ($\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ - bzw. Ca-HCO_3) und nach FURTAK & LANGGUTH (1967) den alkalischen Wässern zuordnen (Abb. 16).

Sieht man sich hingegen die Bewertung im GEBAH an, belegt die Zunahme der Chlorid-Salze vom Hangenden zum Liegenden auch eine Veränderung im hydrogeochemischen Typ und zwar vom Magnesium-/Sulfat- zum Natrium-Typ. Diese Entwicklung kann mit einer zunehmenden Liegendenspeisung begründet werden. Betrachtet man die tieferen GWM von Müllrose, die jedoch nicht im LfU-Salzwassermessnetz integriert sind, trifft man intrusive Wässer an (HOTZAN 2010).

Am Standort Müllrose erfolgt die salinare Klassifizierung in GEBAH hauptsächlich in den „intrusiven“ bzw. „intrusiv migrierenden Typ“ (Tab. 5). Generell kann hier eine Abnahme des Einflusses salinärer Wässer vom Liegenden zum Hangenden festgestellt werden. Kennzeichnend sind zudem die Einflüsse der Grundwasserneubildung und die Lagepunkte der Analysen im Grenzbereich zwischen Sulfat- und Magnesium-Typ (Abb. 16; siehe auch HOTZAN 2010 und in diesem Band).

Bei der Gegenüberstellung der genannten Methoden wird deutlich, dass am Standort Müllrose salinare Tiefenwässer eine wasserwirtschaftliche Relevanz haben und dringend zu berücksichtigen sind. Diese relativ sichere Identifizierung der Wässer wird durch die Charakterisierung der genetischen Entwicklung in GEBAH ermöglicht.

6 Bewertung der Ergebnisse

In PYRITZ (2016) wurden die vorhandenen Analysen mittels der genannten hydrogeochemisch-genetischen Methoden, der Ionenbilanzen, Trendentwicklungen sowie Ionenverhältnisse allgemein wie standortbezogen bewertet und gegenübergestellt.

6.1 Hydrogeochemische Methoden

Bewusst wurde die allgemein in Deutschland verwendete hydrochemische Typisierung nach PIPER (1944) und FURTAK & LANGGUTH (1967) mit dem am LBGR entwickelten

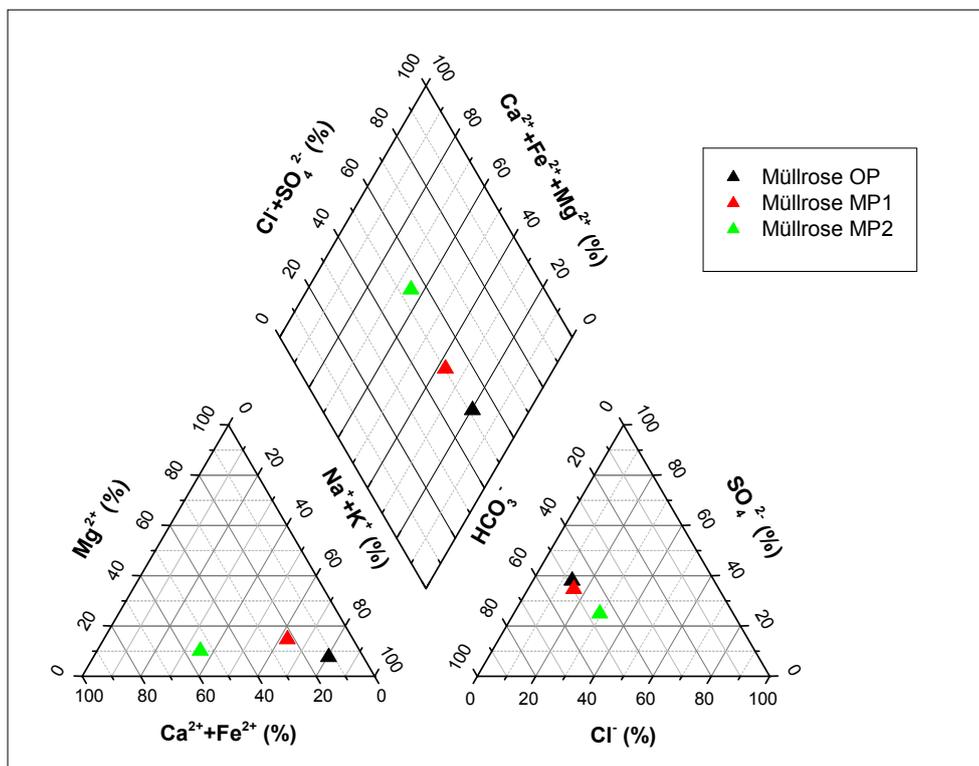


Abb.16:
Mittelwerte der
Grundwassermessstellen im
PIPER-Diagramm der
Salzzone Oder-Spree-Kanal
und deren Lage im
Land Brandenburg

Fig. 16:
Mean values of monitoring
wells in the PIPER diagram
of the area Oder-Spree-Kanal

GWM	Typisiert nach:			Chemische Parameter				Hypothetische Salze in %		
	GEBAH/salinar (RECHLIN et al. 2010)	GGV	PIPER (1944)	Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]	Natrium [mg/l]	Karbonate	Chloride	Sulfate
Müllrose OP	Magnesium- Typ/ intrusiv migrierend	0,046	Ca-HCO ₃ -SO ₄	621	31	118	17	50,00	12,00	38,00
Müllrose MP 1	Sulfat-Typ/ intrusiv migrierend	0,039	Ca-HCO ₃ -SO ₄	608	34	104	29	53,00	20,00	27,00
Müllrose MP 2	Sulfat-Typ / intrusiv	0,020	Ca-HCO ₃ -SO ₄	753	79	113	61	47,00	33,00	20,00

Tab. 5: Hydrogeochemisch-genetische Auswertung Salzzone Oder-Spree-Kanal

Tab. 5: Hydrogeochemical-genetic evaluation of the saline area Oder-Spree-Kanal

Genesemodell (RECHLIN 1997, 2008) mittels der Software GEBAH (RECHLIN et al. 2010) verglichen (PYRITZ 2016).

Beschäftigt sich PIPER (1944) u. a. mit der Verhältnisdarstellung und Charakterisierung der Grundwässer, geht GEBAH einen Schritt weiter und befasst sich mit der genetischen Herkunft der Wässer. Gegenüber dem konzentrationsabhängigen PIPER-Diagramm liegt der Vorteil von GEBAH in der konzentrationsunabhängigen Betrachtung der genetischen Entwicklung des Grundwassers. Letzteres erlangt insbesondere bei der Früherkennung salinärer Stoffeinträge aus dem tieferen Untergrund große Bedeutung, da in Brandenburg aufgrund der geologischen Strukturen und auch der relativ geringen Grundwasserneubildung die Nutzung der wasserwirtschaftlichen Ressourcen nur in einem sehr begrenzten Umfang möglich ist. Der regionale Vergleich in den Salzzonen verdeutlicht, dass das Modell relativer Ionen-Häufigkeitsverteilungen von PIPER (1944) gegenüber GEBAH wesentlich unempfindlicher reagiert. So verschieben sich die Lagepunkte der Wässer beispielsweise in der GWM Gramzow UP im PIPER-Diagramm erst ab über 150 mg/l Cl⁻ zu Wässern mit chloridischen Anteilen, hier als Na-Ca-HCO₃-Cl-Wässer bezeichnet. GEBAH charakterisiert die Wässer der GWM Gramzow UP dagegen bereits als „intrusiv migrierend“ bei geringerer Konzentration.

Das sensiblere Reagieren zeigt sich auch in dem Gebiet der Salzzone Oder-Spree-Kanal. Hier wurden Chlorid-Gehalte von ca. 30–80 mg/l vom OP bis zum unteren MP festgestellt. Nach FURTAK & LANGGUTH (1967) werden diese Wässer aufgrund der Ca-HCO₃-SO₄-Dominanz als alkalische Wässer eingestuft. In GEBAH werden trotz der Neubildungsanteile bereits „diffus migrierende“ bis „migrierende“ Salzwässer identifiziert.

6.2 Ionenverhältnisse

Die untersuchten Verhältnisse einzelner Ionen zueinander bringen keine bzw. nur bedingt Aussagen zu einer salinaren Beeinflussung. VENGOSH & ROSENTHAL (1993) wiesen Meerwasserintrusion mit dem Na⁺/Cl⁻-Verhältnis oder auch dem Cl⁻/Br⁻-Verhältnis nach. Insbesondere das Cl⁻/Br⁻-Verhältnis weist bei einer Verhältniszahl > 500 auf Salzlösungsprozesse im Untergrund hin.

Für Brandenburgische Verhältnisse könnte diese Untersuchung bei intrusiven Wässern mit hohen Chlorid-Gehalten hilfreich sein, um die Salzwassereinflüsse nach mesozoischer und paläozoischer Herkunft zu differenzieren. Vorher ist jedoch eine anthropogene Herkunft salinärer Stoffeinträge (z. B. durch Straßenlaugen) auszuschließen. In Auswertung von PYRITZ (2016) konnte an 18 GWM eine Verhältniszahl > 700 mg/l errechnet werden. Vorzugsweise treten in den betreffenden UP an den Standorten Lenzen, Paulinenaue und Wachow Verhältniszahlen > 2 000 auf.

6.3 Trendbetrachtungen

In Auswertung der Trendbetrachtung der Parameter Leitfähigkeit, Cl⁻ und Na⁺ im Grundwasser lässt sich derzeit noch keine Zunahme von salinaren Beeinflussungen in den süßwasserführenden GWL erkennen. Der Beobachtungszeitraum sollte sich über einen längeren Zeitraum von mindestens 20 Jahren erstrecken, um auch die hydrologischen Zeiträume der Entwicklungen des Grundwasserstands mit zu erfassen. Die ausgewerteten Ganglinien der GWM des

Salinarmessnetzes weisen derzeit zu kurze Zeiträume und dazu meistens zu wenige Messungen im Jahr auf.

7 Ausblick

In Auswertung der statistischen und hydrogeochemischen Ergebnisse von PYRITZ (2016) sowie der weiterführenden Arbeiten ist das saline Grundwassermonitoring des LfU den neuen Ergebnissen anzupassen.

Die Auswertung (PYRITZ 2016) hat gezeigt, dass derzeit ein latentes Gefährdungspotential bezüglich der Grundwasserversalzung in exponierten Gebieten Brandenburgs besteht. An 10 Standorten, wie u. a. Lenzen oder Paulinen-*aue*, konnte mit Hilfe der durchgeführten Verfahren ein besonders hohes Gefährdungspotential bezüglich der Intrusion salinärer Tiefenwässer nachgewiesen werden. Vier der aktuell beobachteten 48 GWM wurden nach jetzigem Kenntnisstand als nicht salinar eingestuft, welche nach einer weiteren Überprüfung durch das LfU vermutlich aus dem Salinarmessnetz ausgegliedert werden können. Grundsätzlich empfiehlt sich aber eine fortschreibende Überwachung der Entwicklung salinärer Wässer im wasserwirtschaftlich genutzten GWL für die nächsten Jahrzehnte. An den Standorten mit diffus migrierenden und migrierenden Wässern salinärer Herkunft sollten weiterhin die Grundwasseruntersuchungen mindestens zweimal jährlich durchgeführt werden, um frühzeitig signifikante negative geogene Veränderungen zu erkennen und darauf reagieren zu können.

In den klassifizierten Salzzonen insbesondere im Oderbruch, Havelluch, im Abschnitt Lübbenau bis Burg der Krausnick-Burg-Peitzer-Rinne sowie am Oberuckersee, empfiehlt sich ein Ausbau bzw. Verdichtung des Salinarmessnetzes, um großflächige Versalzungstendenzen besser erkennen bzw. eingrenzen zu können.

Die methodische Auswertung erfolgt dabei vorrangig mit der Software GEBAH des LBGR (RECHLIN et al. 2010).

Um die vorliegenden Ergebnisse in den jeweiligen Gebieten besser verifizieren zu können, sollten sowohl stabile als auch radiogene Isotopenuntersuchungen ergänzend zur bisherigen Analytik hinzugezogen werden. Hierzu zählen vor allem Sauerstoff-, Wasserstoff-, Kohlenstoff- und Schwefel-Isotope. Diese eignen sich besonders, um den Ursprung, die Verteilung und das Alter salinärer Wässer zu bestimmen (siehe Beitrag von BEDNORZ & BROSE in diesem Band).

Zusammenfassung

Im Ergebnis der Untersuchungen an 48 GWM liegt eine erste Bewertung des Salzwassermessnetzes Brandenburgs vor. In der statistischen Auswertung konnte eine Differenzierung der Medianwerte gegenüber den Ergebnissen des

Güteberichtes (LfU 2015) insbesondere bei den Parametern Leitfähigkeit, Cl^- und Na^+ festgestellt werden. Diese Unterschiede in den Konzentrationen zeigen sich vor allem im GWL 3.

Der methodische Vergleich zwischen dem weit verbreitet genutzten PIPER-Diagramm (PIPER 1944) und dem Genesemodell des LBGR (GEBAH) stellt mit der Früherkennung der Anteile salinärer Tiefenwässer die Vorteile des konzentrationsunabhängigen Genesemodells heraus. Schon bei geringer Gesamtmineralisation ($< 300 \text{ mg/l}$) ist es somit möglich, Aussagen zu salinaren Einflüssen vorzunehmen. Hingegen ist die Anwendung nach PIPER (1944) für eine Identifizierung von salinaren Stoffeinträgen für zu betrachtende Gebiete im Lockergesteinsbereich erst ab einer Chlorid-Konzentration von 150 mg/l möglich. Diese liegt zwar unterhalb des Grenzwertes nach TrinkwV (2013) von 250 mg/l , jedoch weit über dem geogenen Hintergrundwert von 50 mg/l in Brandenburg.

Für die langfristige wasserwirtschaftliche Nutzung der Grundwasservorkommen auch im Hinblick auf die Daseinsvorsorge für die Trinkwasserversorgung ist es notwendig, die Prozesse und Beeinflussung der nicht nur in Brandenburg auftretenden Binnenversalzung weiterhin zu untersuchen und ein entsprechendes Grundwassermonitoring im Land vorzuhalten.

Summary

As a result of the investigations of 48 groundwater observation wells, an initial assessment of the salt water measurement network in Brandenburg is available. In the statistical evaluation a differentiation of the median values compared to the results of the quality report (LfU 2015) could be determined, especially for the parameters conductivity, chloride and sodium. These differences in concentrations mainly appear in lower aquifer GWL 3.

The methodical comparison between the widely used PIPER diagram (PIPER 1944) and the genesis model of Brandenburg (GEBAH; RECHLIN et al. 2010) emphasizes the advantages of the concentration-independent genesis model with the early detection of migrating saline water. Even at low total mineralization ($< 300 \text{ mg/l}$), it is possible to make statements on saline influences. On the other hand, the application according to PIPER (1944) for the identification of salinary influences is only possible from a minimum concentration of 150 mg/l chloride. Although this is below the limit value according to TrinkwV (2013) of 250 mg/l , it is but far above the geogenic background value of 50 mg/l in Brandenburg.

In order to ensure the long-term use of groundwater resources for water management purposes, also with regard to the provision of services of general interest for the supply of drinking water, it is necessary to continue to investigate

the processes and effects of inland salting, which does not only occur in Brandenburg, and to maintain a appropriate groundwater monitoring in the country.

Literatur

- BRÜNING, T. (2017): Entwicklung eines hydrogeologischen 3D-Geodatenbankmodells am Beispiel von Quillow und Strom“. – Masterarbeit FU Berlin, 120 S. (unveröff.)
- FUGRO (2013): Erfassung belastungsrelevanter Parameter in Rohwasserproben von Wasserwerken im Land Brandenburg für die Jahre 2009–2010. – Bericht zum Teilprojekt 7a, Zeitraum 2009–2010, 73 S., Berlin (unveröff.)
- FURTAK, H. & H. R. LANGGUTH (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. – IAH-Congress, Hannover, S. 89–96
- GERSTENGABE, F.-W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F. & P. C. WERNER (2003): PIK-Report Nr. 83 – Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft, sowie die Ableitung erster Perspektiven. – 78 S., PIK, Potsdam
- HANNAPPEL, S., HERMSDORF, A., POHL, S., RIETZ, C. & R. KOSECK (2007): Aufbau von Sondermessnetzen zur Überwachung der geogenen Grundwasserversalzung in Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **14**, 1, S. 5–14
- HANNAPPEL, S., DUSCHER, K., REJMANN-RASINSKA, E., REINHARDT, S. & A. HERMSDORF (2009): Auswertung und Fortschreibung der Konzeption des Messnetzes „Geogene Grundwassersalzung“ in Brandenburg. – 80 S., Berlin, Potsdam (unveröff.)
- HOTZAN, G. (2010): Genetische Grundwassertypen der Binnenversalzung, ihre Klassifikation und Erscheinungsformen. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **17**, 1/2, S.39–53
- HYDOR (2015): Erfassung belastungsrelevanter Parameter in Rohwasserproben von Wasserwerken im Land Brandenburg. – Bericht zum Teilprojekt 8a, Zeitraum 2011–2013, 87 S., Berlin (unveröff.)
- JAHNKE, C. (2011): Genetische Interpretation erhöhter Ammonium-Konzentrationen zur Überprüfung der Grundwassergüte und der Analyse anthropogener und geogener Einflüsse in den Grundwasserkörpern Oderbruch, Prenzlau, Schwedt und Schlepzig – Teil A. – Abschlussbericht Brandenburgische Technische Universität Cottbus, AG Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, 123 S. (unveröff.)
- KABOTH, U., RECHLIN, B. & G. GINZEL (2008): Besteht für unsere Seen eine geogene Versalzungsgefahr? Hydrochemisch-genetische Untersuchungen von Speisungsgebieten an Seen im Naturpark Stechlin. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 69–79
- LfU (2015): Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit im Land Brandenburg 2006–2012. – Veröffentlichung basierend auf internem Bericht der GCI GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, 122 S., Potsdam
- OTTOW, J. C. G. (1981): Mechanism of bacterial iron-reduction in flooded soils. – Proceedings of Symposium on Paddy Soils, Institute of Soil Science, Academia Sinica, Science Press, S. 331–343, Beijing, Berlin (Springer)
- RECHLIN, B. (1997): Zur Anwendung des Hydrogeochemischen Genesemodells der Wässer in den GWLK des Landes Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **4**, 1, S. 67–71
- RECHLIN, B. (2008): Eine Methode zur konzentrationsunabhängigen Früherkennung von Salzwasserintrusionen in süßwasserführenden Grundwasserleitern und Oberflächengewässern. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 57–68
- RECHLIN, B., HOFFKNECHT, A., SCHOLZ, H. & A. HELMS (2010): Genetische Bewertung von Analysen der Hydrosphäre. – Software GEBAH Vers. 1.1 LBGR/GCI, Cottbus, Königs Wusterhausen
- PIPER, A. M. (1944): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. – Trans. Amer. Geophys. Union **25**, 6, S. 914–928
- PFÜTZNER, B. (2012): Aktualisierung der Abflussspendenkarte der mittleren Abflüsse im Land Brandenburg bis zum Jahr 2010. – Digitale Karte AG des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Abteilung Ökologie, Naturschutz und Wasser
- PYRITZ, N. (2016): Gefährdung des oberflächennahen Grundwasserstockwerkes durch Salzwasserintrusion – Das Salzmessnetz des Landes Brandenburg. – Masterarbeit FU Berlin, 130. S. (unveröff.)
- SCHIRRMEISTER, W. (1996): Aus der Literatur überlieferte Angaben über natürliche Salzwasseraustritte an der Grundwasseroberfläche/Geländeoberfläche in Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **3**, 1, S. 94–96
- STACKEBRANDT, W. & V. MANHENKE (Hrsg.) (2002): Grundwasserversalzung. – Atlas zur Geologie von Brandenburg 1 : 1 000 000. – Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, 142 S.

STACKEBRANDT, W. (Hrsg.) (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1 : 1 000 000. – 4. aktualis. Aufl., Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, 157 S.

TRINKWV (2013): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Trinkwasserverordnung (TrinkwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), geändert durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154)

VENGOSH, A. & E. ROSENTHAL (1993): Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country. – *Journal of Hydrology* **156**, S. 389–430

Anschriften der Autoren:

Angela Hermsdorf
Landesamt für Umwelt Brandenburg
Ref. W15 Altlasten, Bodenschutz, Grundwassergüte
Postfach 60 10 61
14410 Potsdam
angela.hermsdorf@lfu.brandenburg.de

Norman Pyritz
Pestalozzistraße 10
16278 Angermünde
norman16278@yahoo.de