

Brandenburg. Geowiss. Beitr.	Cottbus	28 (2021), 1/2	S. 45–55	7 Abb., 5 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	----------------

# Untersuchung zur Ursache des Chloridanstiegs im WW Kleinmachnow – geogen salinar oder anthropogen?

## Investigations into the cause of rising chloride concentrations in the waterworks Kleinmachnow near Berlin – geogenic salinisation or anthropogenic sources?

FLORIAN JENN, SILVIA DINSE, ANETT BREMER, DIETMAR SCHÄFER

### 1 Einleitung /Aufgabenstellung

Das Wasserwerk Kleinmachnow des Wasser- und Abwasserzweckverbandes „Der Teltow“ (WAZV), welches von der Mittelmärkischen Wasser- und Abwasser GmbH (MWA) betrieben wird, ist von erheblicher Bedeutung für die Trinkwasserversorgung im prosperierenden südwestlichen Umland von Berlin. Der steigende Wasserbedarf erfordert perspektivisch ein höheres Wasserrecht und die Anpassung der Bewirtschaftung des Wasserwerkes (WW), dessen Brunnen aus pleistozänen Grundwasserleitern (GWL) fördern. In diesem Zusammenhang musste u. a. die Ursache steigender Chlorid-Konzentrationen im westlichen Anstrombereich der Brunnen geklärt und deren Entwicklung abgeschätzt werden. Dies erweist sich an diesem Standort als aufwändig, da auch mit dem Zutritt geogen salinaren Tiefenwassers zu rechnen ist. Im Artikel werden die durchgeführten Arbeiten und Auswertungsergebnisse zusammengefasst.

### 2 Überblick über Hydrogeologie und Wassergewinnung

Die im Verbund betriebenen WW Kleinmachnow und Teltow versorgen ca. 66 000 Einwohner. Die mittlere tägliche Förderung ( $Q_{365}$ ) des WW Kleinmachnow in den letzten fünf Jahren betrug im Durchschnitt 3 000 m<sup>3</sup>/d.

Das WW befindet sich im Bereich der frühpleistozänen Dreilinden-Tegeler Tiefenrinne. Dabei handelt es sich um eine in der Elsterkaltzeit angelegte Erosionsrinne im Bereich der Teltow-Hochfläche. In dieser sind die quartären Ablagerungen tief in tertiäre und teilweise auch mesozoi-sche Schichten eingeschnitten.

Dem WW stehen zur Förderung derzeit 7 Brunnen zur Verfügung, von denen Br. 2a aus technischen Gründen und Br. 4 aufgrund hoher DOC-Gehalte nicht genutzt werden. Die Brunnen 1b, 2a, 5 und 7 sind im GWL 2 (Saale-kaltzeitliche Vorschüttande; GWL 2.1 nach LBGR-Nomenklatur;

Hydrostratigraphie L 3.1) verfiltert, während die Brunnen 3 und 6 aus dem tiefer gelegenen GWL 3 (Elster-kaltzeitliche Nachschüttande; GWL 2.2 nach LBGR-Nomenklatur; Hydrostratigraphie L 3.2) fördern. Abb. 1 zeigt die Lage der Brunnen und der Grundwassermessstellen (GWMS) des WW Kleinmachnow sowie die Spur des in Abb. 2 gezeigten Schnitts durch die Wasserfassung und ihr südwestliches und nordwestliches Vorfeld.

Die Brunnen fassen das von der Teltow-Hochfläche aus SSE zuströmende Grundwasser (Hydroisohypsen in Abb. 1). Aus deren Anstrom fördert auch das ebenfalls dem WAZV zugehörige WW Teltow, das in ca. 5 km Entfernung südöstlich des WW Kleinmachnow liegt. Die Brunnen des WW Kleinmachnow liegen zudem eingebettet in das Einzugsgebiet der Brunnen des WW Beelitzhof der Berliner Wasserbetriebe.

### 3 Untersuchungskonzept Grundwasserbeschaffenheit

Die MWA betreibt ein Netz von GWMS in den GWL 1 – 3 zur Beobachtung von Grundwasserdynamik und Grundwasserbeschaffenheit (Abb. 1). Im Jahr 2018 wurden an vier Standorten im näheren Fassungs-umfeld GWMS-Gruppen mit je drei Filterstrecken in den drei GWL errichtet. Bei trockenem GWL 1 wurde der OP im GWL 2 ausgebaut. Zielstellung war u. a. die Klärung der Herkunft der sehr chloridhaltigen Wässer, die in der westlich der Fassung gelegenen Messstellengruppe K1m 1/95 und im Brunnen 5 beobachtet werden. Hierfür wurden die Messstellengruppen K1m 01/18 und K1m 02/18 konzipiert. Die tiefste Messstelle der Gruppe K1m 01/18 wurde so gebaut, dass zukünftig mittels Induktionslogmessungen Änderungen der Salinität im Grundwasserleiter (bezogen auf das nähere Bohrungs-umfeld) beobachtet werden können.

Zusammen mit den langjährig vorliegenden Beschaffenheitsdaten der Überwachungsmessstellen im Umfeld des WW Kleinmachnow wurden die Untersuchungsergebnisse der neu errichteten Messstellen im Hinblick auf die salinare

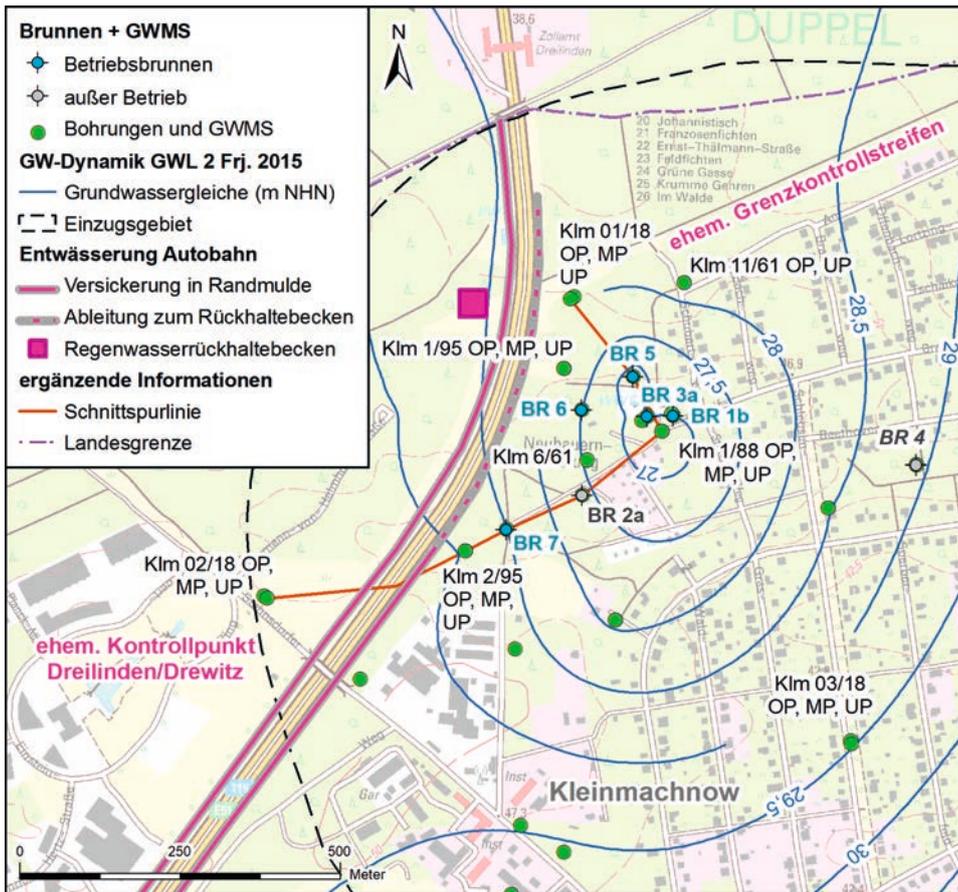
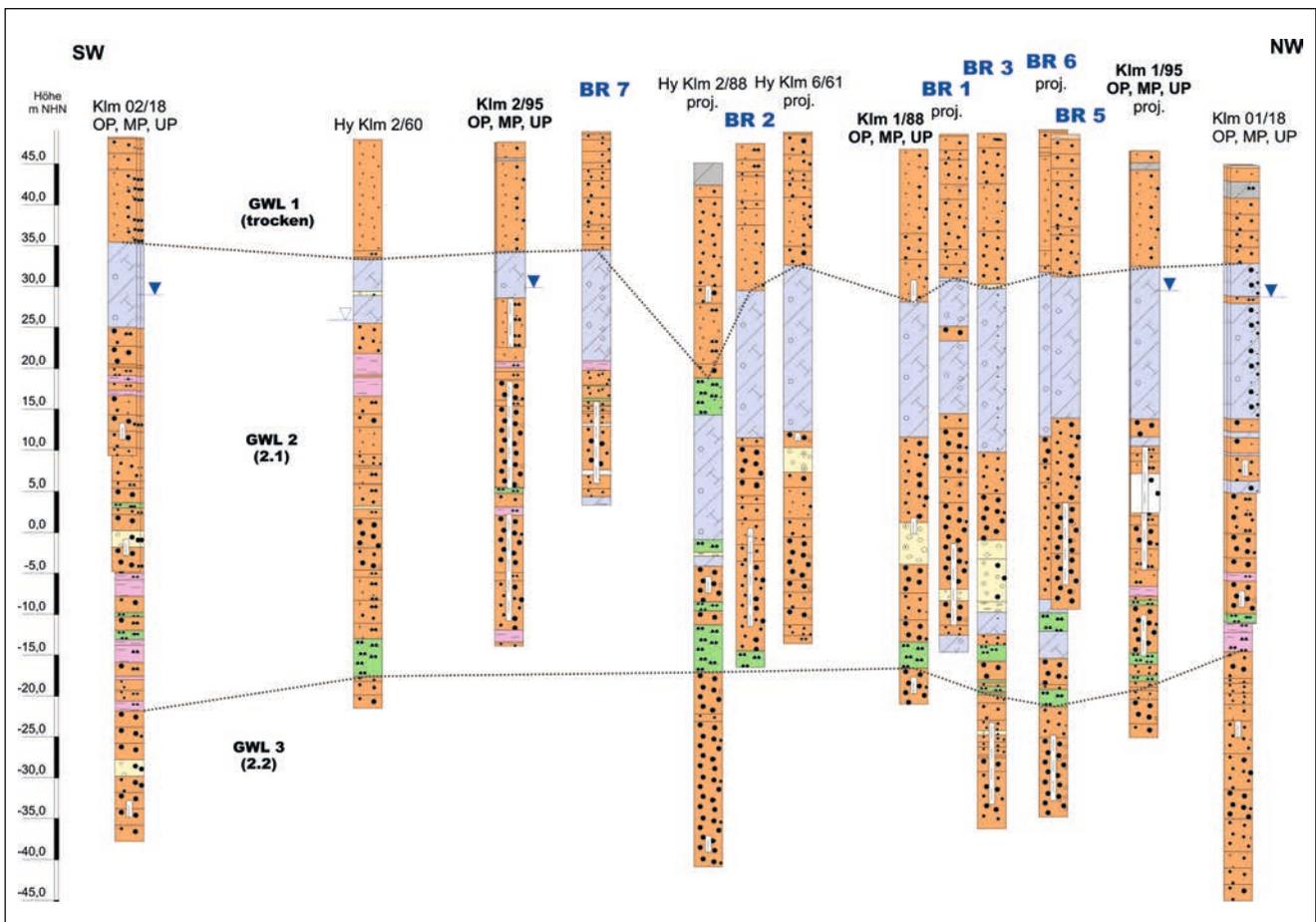


Abb. 1:  
Übersichtskarte WW  
Kleinmachnow

Fig. 1:  
Overview map  
of Kleinmachnow  
waterworks

Abb. 2  
Geologischer Schnitt  
durch die Wasserfassung  
und das Vorfeld  
(Verlauf der Schnittlinie  
in Abb. 1)

Fig. 2  
Geological cross-section  
through the wellfield  
and its surroundings  
(section line shown  
in Fig. 1)



Beeinflussung, u. a. auch mit der Software GEBAH (LBGR 2021) ausgewertet und mit dem LBGR diskutiert. Da im Umfeld des WW Kleinmachnow Rupelfehlstellen kartiert sind und im nördlich von Kleinmachnow gelegenen WW Beelitzhof seit Jahrzehnten ein Zutritt hoch mineralisierter Grundwässer beobachtet wird, wurde eine Altersbestimmung der Wässer in Klm 01/18 OP und im Br. 5 mittels Isotopenanalytik (Kohlenstoff-14/Kohlenstoff-13 am DIC, Sauerstoff-18, Deuterium, Tritium und tritiogenes Helium-3) durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, durch die Kombination der verschiedenen, für die Altersbestimmung relevanten Isotope die Mischungsanteile von Jungwasser (< 70 Jahre seit Infiltration) und älteren Komponenten zu quantifizieren und zu datieren, um Rückschlüsse auf mögliche Fließpfade und Eintragsquellen (Jungwasserkomponente) bzw. Hinweise auf eine Beeinflussung durch aufsteigendes Tiefenwasser (ältere Komponente) ziehen zu können.

#### 4 Recherche zu möglichen Chlorid-Quellen

Die Untere Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde des Landkreises Potsdam-Mittelmark (UAB) führte eine **historische Recherche** zu potenziellen anthropogenen Eintragsstellen durch (BUSCHALSKY & WALTHER 2018). Im Fokus standen dabei vor allem bekannte Altlastenverdachtsflächen, insbesondere die ehemalige Grenzübergangsstelle Dreilinden/Drewitz, die im direkten Grundwasseranstrom auf das WW lag. Die Recherchen beinhalteten auch Zeugenbefragungen. Die relevanten Ergebnisse sind zusammenfassend:

- Die Grenzübergangsstelle Dreilinden wurde von 1969 bis 1990 betrieben.
- Fast die gesamte 36 ha umfassende Fläche war durch Betonbeläge versiegelt.
- Auf dieser Fläche sei nach Recherchen im Zuge einer orientierenden Altlastenvoruntersuchung Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ ) als Auftaumittel und zur Unkrautbekämpfung neben Chlorphenoxylalkansäure (MCPA – schwer abbaubares Herbizid) auch Natriumchlorat ( $NaClO_3$ ) verwendet worden.
- Im Jahr 1994 wurden alle Gebäude, versiegelten Flächen und die Leitungssysteme der Grenzübergangsstelle zurückgebaut.
- An zwei Bohrpunkten wurden 1992 in einer Tiefe bis 1 m unter Betondecke erhöhte Chlorid-Gehalte im Boden (bis 355 mg Cl/kg TS) analysiert, deren Herkunft vermutlich durch Auftausalze bedingt ist; an einem dieser Punkte konnten in einer Tiefe von 8–10 m noch Chlorid-Gehalte von 188 mg Cl/kg TS nachgewiesen werden.
- Die 1994 durchgeführten Altlastenuntersuchungen erfassten im Grundwasser nicht den Parameter Chlorid.
- Die Zeugenbefragungen ergaben keine verwertbaren Hinweise auf Art und Umfang der während des Betriebs des Grenzübergangs stattgefundenen Anwendung und Lagerung von Auftaumitteln.
- Der unteren Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde sind keine Lagerplätze von Salz im Einzugsgebiet der Wasserfassung bekannt.

Zur Abschätzung des von der **Straßenlaugung** auf der BAB 115 ausgehenden Gefährdungspotenzials wurden bei den für die Straßenlaugung in diesem Bereich zuständigen Behörden der Länder Berlin und Brandenburg Recherchen durchgeführt, die folgende Ergebnisse erbrachten.

Brandenburger Gebiet:

- Als Laugungsmittel wird seit 1990 ausschließlich Natriumchlorid verwendet.
- Eine auf einzelne Autobahnabschnitte bezogene jährliche oder zeitlich höher auflösende Bilanzierung der aufgeführten Salzmengen ist nicht möglich, es wurde aber eine Zusammenstellung der jährlich auf dem gesamten von der Autobahnmeisterei Rangsdorf betriebenen Autobahnnetz (196 Streckenkilometer) ausgebrachten Salzmengen für den Zeitraum 2010–2017 bereitgestellt (pro Winter im Mittel 770 g/m<sup>2</sup>).
- Das nördlich des Europarcs und westlich der BAB gelegene Regenrückhaltebecken (Abb. 1) fasst das Niederschlagswassers eines 600 m langen Abschnitts der östlichen Fahrbahn in Richtung Berlin und bringt dieses Wasser vollständig zur Versickerung. Auf den übrigen im Einzugsgebiet des WW gelegenen Streckenverläufen der BAB erfolgt eine Versickerung des Niederschlagswassers über die Randgräben bzw. -mulden (Abb. 1).
- Das Versickerungsbecken ging im Jahre 2000 als Neubau in Betrieb.

Berliner Gebiet:

- Als Laugungsmittel werden in Berlin standardmäßig NaCl in fester Form und eine 20%ige  $CaCl_2$ -Lösung (Sole) im Mischungsverhältnis Salz : Sole von 70 : 30 verwendet (Feuchtsalz FS30).
- Die Straßenlaugung durch die Berliner Stadtreinigung erfolgt ausschließlich auf den Flächen der BAB einschließlich des Zehlendorfer Kreuzes sowie im Bereich der östlichen Tankstelle im Kreuz Zehlendorf. Weitere Flächen des ehem. Areal Dreilinden (jetzt Europarc) werden nicht berücksichtigt.
- Das im gesamten Bereich anfallende Niederschlagswasser wird gefasst und über ein Regenwasserkanalnetz dem Regenwasserpumpwerk im Autobahnkreuz Zehlendorf zugeleitet. Demnach kommt auf Berliner Gebiet kein von der Autobahn stammendes und potenziell mit Auftaumitteln versetztes Niederschlagswasser zu Versickerung.

Die in den frühen 1960er Jahren **eingerrichteten Grenzanlagen der DDR** beinhalteten zwei sogenannte Kontrollstreifen („K2“ und „K6“) mit 2 m und 6 m Breite, die zur Sichtbarmachung von Fußabdrücken bewuchsfrei gehalten wurden. Dazu wurden nach Recherche von GCI vorrangig die anorganischen Herbizide Natriumchlorat und/oder Kaliumchlorat („Agrosan“, „UnkrautEx“ und/oder „Wegerein K“) sowie die organischen Herbizide Simazin und Amitrol („Azaplant“, „Azaplant Kombi“) sowie nach Recherche der unteren Abfallbehörde Potsdam-Mittelmark Chlorphenoxylalkansäure (MCPA) eingesetzt. Die Kontrollstreifen begleiteten auch den im Jahr 1968 in Betrieb

genommenen Autobahnabschnitt, der im Einzugsgebiet der Wasserfassung liegt. Die Kontrollstreifen nördlich und westlich der Wasserfassung sind heute noch als Schneisen im Wald zu erkennen. Die Messstellengruppe Klm 01/18 ist ca. 15 m südlich des ehemaligen Kontrollstreifens „K2“ errichtet worden. Die Messstellengruppe Klm 1/95 liegt ca. 45 m östlich des Kontrollstreifens, der die Autobahn begleitete.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Entwicklung Chlorid-Konzentrationen

In den GWMS Klm 1/95 OP, MP und UP (Filter alle in GWL 2) werden etwa seit dem Jahr 2011 deutlich steigende Chlorid-Konzentrationen registriert (Abb. 3). Die hohen Konzentrationen von 200–260 mg/l Chlorid werden durch die Analysen der im Jahr 2018 errichteten GWMS Klm 01/18 OP und MP sowie Klm 02/18 OP bestätigt. Die benannten GWMS sind im GWL 2 ausgebaut und befinden sich zeitlich mehrheitlich im Anstrom auf die Br. 1/91 (Br. 1a) bzw. dessen Nachfolgebrunnen Br. 1/14 (Br. 1b) sowie im Anstrom von Br. 5/11, sofern dieser betrieben wird.

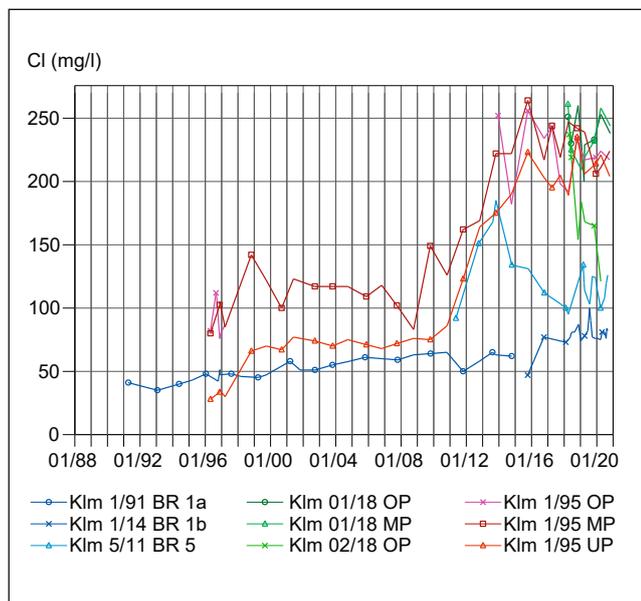


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung Chlorid in GWL 2 – Br. 1a/b und Br. 5/11 sowie Messstellen im westlichen bis nordwestlichen Anstrom Klm 1/95 OP, MP und UP, Klm 1/18 OP MP und Klm 2/18 OP

Fig. 3: Development of chloride concentration in aquifer 2 – production wells 1a/b and 5/11, and monitoring wells Klm 1/95 OP, MP, UP, Klm 1/18 OP, MP, Klm 2/18 OP located west to northwest of the wellfield

In den GWMS, die sich im südlichen bis nordöstlichen Anstrom auf die Förderbrunnen des GWL 2 befinden, werden deutlich geringere Chlorid-Konzentrationen als in den in Abb. 3 aufgeführten nördlichen und nordwestlichen GWMS detektiert (vgl. Abb. 4, < 60 mg/l Cl). Sie zeigen außerdem keine zunehmende Konzentrationsentwicklung an. Br. 2/91 (2a) wurde bis zum Jahr 2015 betrieben und von Br. 7/14 abgelöst, der deutlich näher an der BAB 115 sowie dem ehem. Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz liegt. Br. 7 (Abb. 4) zeigt mit 70–90 mg/l ähnlich hohe Chlorid-Konzentrationen wie Br. 1 (Abb. 3).

Die vorliegenden langjährigen Zeitreihen der im GWL 3 ausgebauten Brunnen (Br. 3 und 6) und GWMS (Klm 1/96 BR 4 ist außer Betrieb und wird als GWMS genutzt; Klm 2/96 UP und Klm 2/88 UP) belegen geringe Chlorid-Konzentrationen und keine auffälligen Änderungen (Chlorid < 50 mg/l).

Die Analysen der neu im GWL 3 errichteten GWMS Klm 01/18 UP bis Klm 04/18 UP zeigen bis auf Klm 02/18 UP ebenfalls keine erhöhten Chlorid-Konzentrationen (Abb. 5). In Klm 02/18 UP werden höhere Chlorid- und Sulfat-Konzentrationen angetroffen als im MP, der im GWL 2 ausgebaut ist. Es wird davon ausgegangen, dass er einen Zustrom aus dem Bereich der ehemaligen Dreilindener Maschinen-

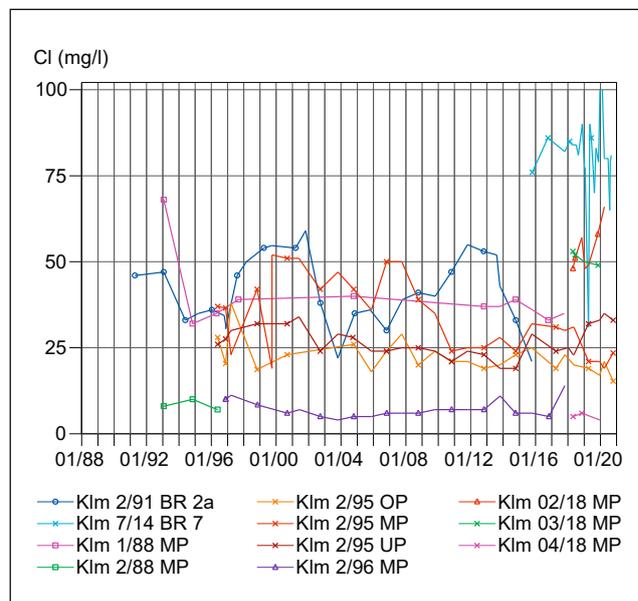


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung Chlorid in GWL 2 – Br. 2a und Br. 7 sowie Messstellen im südlichen bis nordöstlichen Anstrom Klm 1/88 MP, Klm 2/88 MP, Klm 2/95 OP, MP, UP, Klm 2/96 MP, Klm 02/18 MP, Klm 03/18 MP und Klm 04/18 MP

Fig. 4: Development of chloride concentration in aquifer 2 – production wells 2a and 7, and monitoring wells Klm 1/88 MP, Klm 2/88 MP, Klm 2/95 OP, MP, UP, Klm 2/96 MP, Klm 02/18 MP, Klm 03/18 MP, Klm 04/18 MP located south to northeast of the wellfield

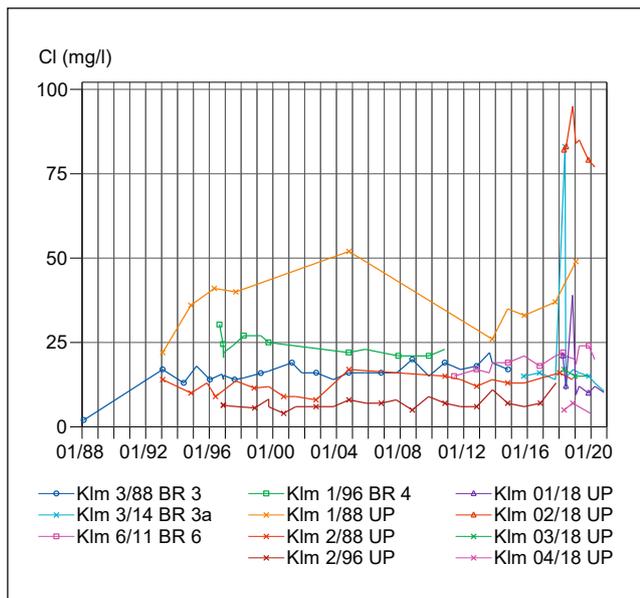


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung Chlorid in GWL 3 – Br. 3/3a und Br. 6/11 sowie Anstrommessstellen Klm 1/96 BR 4 (nicht betriebener Br. 4), Klm 1/88 UP, Klm 2/88 UP, Klm 2/96 UP, Klm 01/18 UP bis Klm 04/18 UP

Fig. 5: Development of chloride concentration in aquifer 3 – production wells 3/3a and 6/11, and monitoring wells Klm 1/96 BR 4 (unused production well 4), Klm 1/88 UP, Klm 2/88 UP, Klm 2/96 UP, Klm 01/18 UP through Klm 04/18 UP

baufabrik bzw. der südöstlich gelegenen Deponie erhält. Die Chlorid-Konzentrationen von 80–95 mg/l bei einem gleichzeitigen Nachweis von 240–260 mg/l Sulfat deuten nicht auf eine geogen salinare Beeinflussung in Klm 02/18 UP hin. Bei derart hohen Sulfat-Gehalten wären Chlorid-Konzentrationen in dreistelliger oder noch höherer Größenordnung zu erwarten, wenn sie geogener Herkunft wären.

## 5.2 Hydrochemische Berechnung mit GEBAH

Alle Analysen der GWMS und Brunnen mit einem Ionenbilanzfehler besser als 5 % wurden mit der Software GEBAH 1.3 (LBGR 2021) ausgewertet. In den Zeitreihen sind z. T. deutliche Veränderungen der Gesamtmineralisation, der Anteile der Berechnungssalze und der Lagepunkte erkennbar, wie das Beispiel der GWMS Klm 1/95 UP zeigt. Zu Beginn der Zeitreihe (1996, Abb. 6) liegt der Lagepunkt im Sulfattyp, nahe des Salinarfelds, der Anteil des Berechnungssalzes NaCl ist 8 %, CaCl<sub>2</sub> ist nicht vorhanden. Mit einem ersten Anstieg von Chlorid 1998 tritt CaCl<sub>2</sub> mit 12 % auf, während NaCl unverändert bleibt. Dieser Zustand besteht bis 2010, danach steigen Chlorid und CaCl<sub>2</sub> deutlich an. Ab 2013 steigt auch NaCl leicht an. Bis 2020 (Abb. 7, redaktionelles Ende der Datenreihe) hat sich die Gesamtmineralisation nahezu verdoppelt und der Lagepunkt befindet sich im Chloridtyp.

## 5.3 Isotopenuntersuchung

Die Auswertung der Isotopenanalysen der GWMS Klm 01/18 OP und des Br. 5 erbrachte folgende Ergebnisse (HEIDINGER 2019):

- die Alterszusammensetzung der beiden Proben ist sehr ähnlich und es dominieren jüngere Grundwasserkomponenten (Anteil ca. 75 %) mit Verweilzeiten im Bereich von 35 bis 45 Jahren
- höhere Anteile von alten (deutlich älter als 60 Jahre) Grundwasserkomponenten sind wenig wahrscheinlich und für Anteile > 30 % auszuschließen
- auf anthropogene Ursachen des erhöhten CaCl<sub>2</sub>-geprägten Chlorid-Niveaus deuten:
  - Cl/Br-Verhältnisse (667 bezogen auf Masse), die deutlich abweichend zu typischen Salz/Evaporit- oder Meerwasser-Cl/Br-Verhältnissen liegen
  - ein untypisch hoher <sup>14</sup>C-Gehalt in Br. 5/11 in Verbindung mit untypisch hohen <sup>δ</sup><sup>13</sup>C-DIC-Werten in beiden Proben

## 6 Diskussion

Die gegenüber Hintergrundwerten in Brandenburg erhöhten Chlorid-Konzentrationen der Brunnen des GWL 2 und die anhand langjähriger Untersuchungen des Br. 1 und seiner Vorfeldmessstelle Klm 1/95 nachgewiesenen steigenden Chlorid-Konzentrationen deuten in Verbindung mit den auffällig hohen Anteilen des GEBAH-Berechnungssalzes CaCl<sub>2</sub> auf einen Eintrag von Salzwässern hin. Das Berechnungssalz CaCl<sub>2</sub> kann aus direktem Eintrag von CaCl<sub>2</sub> stammen (z. B. aus CaCl<sub>2</sub>-haltigen Auftausalz-Mischungen). Vor allem aber kann es aus NaCl-bürtigen Einträgen (geogen oder anthropogen) und Kationenaustausch Na<sup>+</sup> gegen Ca<sup>2+</sup> während des Fließweges (Erdalkalisierung) resultieren. Deshalb führen NaCl-Einträge zunächst nicht zu einem Anstieg des Berechnungssalzes NaCl. Erst wenn die Kationenaustauscherplätze im Untergrund mit Na<sup>+</sup> voll belegt sind, geht CaCl<sub>2</sub> zurück und NaCl steigt an.

Prinzipiell kommen am Standort der Wasserfassung Kleinmachnow folgende Eintragsquellen in Betracht:

- Zutritt von geogen salinaren Tiefenwässern
- Eintrag von Kaliumchlorat (Unkrautvernichtungsmittel „Wegerein-K“) und/oder Natriumchlorat („Agrosan“, „UnkrautEx“) mit Abbau des Chlorats zu Chlorid in den ehemaligen Kontrollstreifen der zwischen 1961 und 1990 betriebenen DDR-Grenzanlage, ggf. auch auf der Fläche des Kontrollpunktes Dreilinden/Drewitz
- Eintrag von Auftausalzen entlang der Autobahn, die in ihrer jetzigen Lage innerhalb des Einzugsgebietes des Wasserwerkes im Jahr 1968 in Betrieb genommen wurde
- Eintrag von Auftausalzen am ehemaligen Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz (heute Europarc), der im Zeitraum 1969–1990 betrieben und ca. 1995–1997 zurückgebaut wurde



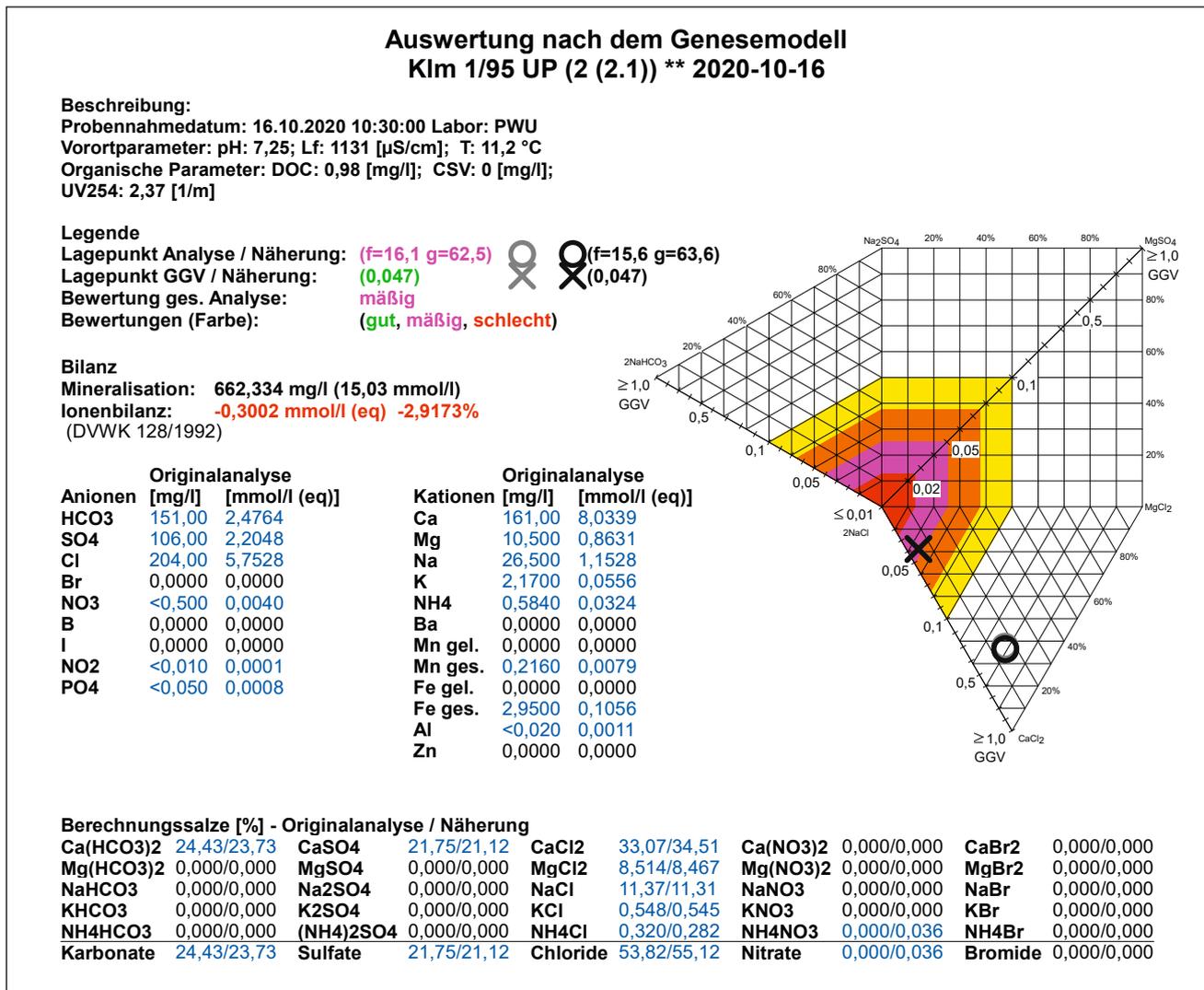


Abb. 7: Genesediagramm GEBAH Klm 1/95 UP, Analyse 2020 mit starker Aufsalzung

Fig. 7: GEBAH genetic diagram and time series for monitoring well Klm 1/95 UP, analysis from 2018 with strong salinisation

Die nachgewiesenen zeitlichen und räumlichen Muster der analysierten Konzentrationen und GEBAH-Berechnungssalze sprechen, unterstützt von den 2019 durchgeführten Altersbestimmungen des Wassers von Br. 5 und Klm 01/18 OP, für einen Eintrag des Salzes von der Oberfläche, also gegen einen Zutritt geogen salinärer Tiefenwässer. In den im März 2019 gewonnenen beiden Proben dominiert in der Isotopenauswertung weitaus die jüngere Grundwasserkomponente mit mittleren Verweilzeiten im Bereich von 35 bis 45 Jahren (Anteil ca. 75 % der Probe). Die Anteile von alten, insgesamt vor deutlich mehr als 60 Jahren neugebildeten Grundwasserkomponenten, nehmen in den Proben maximal 30 % ein.

### 6.1 Einsatz von Chlorat als Herbizid im Zeitraum 1961 – 1990 im ehemaligen Grenzstreifen

Kaliumchlorat (KClO<sub>3</sub>) und Natriumchlorat (NaClO<sub>3</sub>) dissoziieren leicht. Dementsprechend gehen die Kationen ähnlich wie bei Chlorid-Salzen sofort in Lösung und können transportiert und sorbiert werden. Hinsichtlich des Kationen-Verhaltens unterscheidet sich ein Chlorat-Eintrag nicht von einem Chlorid-Eintrag vergleichbarer Menge. Im Unterschied zu Chloriden ist das Chlorat-Anion (ClO<sub>3</sub><sup>-</sup>) jedoch reaktiv. Durch Disproportionierung kann das Chlorat-Anion in Chlorid und Perchlorat zerfallen. Vor allem aber wirkt es als starkes Oxidationsmittel, das organische Substanz zersetzen oder mit oxidierbaren Mineralen (z. B. Pyrit) reagieren kann. Die Oxidationsvorgänge verlaufen jedoch deutlich langsamer als die Dissoziation, sodass ein Chlorat-Eintrag zu einer geringeren Konzentration von Chlorid, dies jedoch über einen längeren Zeitraum verteilt, führt als ein vergleichbarer direkter Eintrag von Chlorid.

Das  $\text{ClO}^{3-}$ -Ion ist mobil, sodass die o. g. Reaktionen nicht nur am Ort des Eintrags, sondern auch entlang der Fließstrecke stattfinden können, z. B. in tieferen GWL mit reduzierendem Milieu.

Im Folgenden wird betrachtet, ob ein Chlorat-Eintrag auf den Kontrollstreifen „K2“ und „K6“ der ehemaligen Grenzanlage nördlich und westlich der Wasserfassung eine plausible Erklärung für die beobachteten Beschaffenheitsentwicklungen in den Br. 1 und 5 sowie den GWMS Klm 01/18 und Klm 1/95 sein kann. Bei Annahme einer erhöhten Grundwasserneubildung (geringe Verdunstung und sehr gute Infiltration im Sand) von 250 mm/a und Verwendung der Mächtigkeitsangaben und hydraulischen Parameter des bei den Untersuchungen begleitend genutzten numerischen Strömungsmodells kann für einen an der Oberfläche eintretenden Wassertropfen im ehemaligen Kontrollstreifen eine Fließzeit von ca. 30–40 Jahren abgeschätzt werden. Die abgeschätzte Gesamtfließzeit harmoniert sehr gut mit den Ergebnissen der  $^3\text{H}/^3\text{He}$ -Isotopenuntersuchungen, wonach bei den untersuchten Grundwässern weitaus die jüngeren Grundwasserkomponenten mit mittleren Verweilzeiten im Bereich von 35 bis 45 Jahren dominieren.

Die aufgetragenen Herbizid-Mengen sind nicht bekannt. In VVB AZ (1973) wurde für die Freihaltung von Wegen und Plätzen die zweimalige Anwendung von je 30 g/m<sup>2</sup> Wegelein-K empfohlen. Es ist anzunehmen, dass für die Sicherstellung der Bewuchsfreiheit der Kontrollstreifen eine größere Menge aufgebracht wurde. Es wurde deshalb mit der doppelten Menge (120 g/m<sup>2</sup>/a) gerechnet. Werden typische Kationenaustauschkapazitäten für Sand bzw. Lehm aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) zugrunde gelegt, reicht die angenommene Eintragsmenge aus, um in ca. 10–20 Jahren die Austauscherplätze mit Kalium/Natrium zu belegen und eine äquivalente Menge Calcium freizusetzen.

Die ersten Analysen der Klm 1/95 datieren aus dem Jahr 1996, sodass keine Vergleichswerte aus dem Zeitraum vor Beginn der angenommenen Beeinflussung infolge des Chlorat-Eintrages vorliegen. Mit der Erstanalyse im Jahr 1996 wurden mit ca. 80 mg/l in Klm 1/95 OP und MP bereits erhöhte Chlorid-Konzentrationen nachgewiesen, was darauf hinweist, dass die Verweilzeit im GWL 1 und Geschiebemergel eher eine Größenordnung von 30 Jahren hat. Der Anteil des Berechnungssalzes  $\text{CaCl}_2$  war mit 10 % (OP) und 15 % (MP) ebenfalls auffällig erhöht. Die Analysenwerte der tiefsten Filterstrecke Klm 1/95 UP entsprachen 1996 eher dem Chemismus, der in einem pleistozänen tiefen bedeckten GWL natürlicherweise zu erwarten wäre. Eine leichte anthropogene Beeinflussung war auch hier bereits zu erkennen. Die Chlorid-Konzentrationen lagen noch unter 30 mg/l. Auch wurde noch kein  $\text{CaCl}_2$  festgestellt (Abb. 6). 1996 wären demnach bei Annahme des Chlorat-Eintrages im Kontrollstreifen im OP und MP bereits deutliche Anzeichen der Folgen des Eintrages nachgewiesen worden, der jedoch den tieferen Bereich des GWL 2 noch

nicht vollständig erfasst hatte. 2020 sind die Chlorid-Konzentrationen und die  $\text{CaCl}_2$ -Anteile in Klm 1/95 UP ähnlich hoch wie im OP und MP (200–230 mg/l, 30–40 %  $\text{CaCl}_2$ , Abb. 7).

Für den Brunnen 1/91 (Br. 1a), in dessen westlichen Anstrom sich die GWMS-Gruppe Klm 1/95 befindet, gibt es bereits seit 1991 Rohwasseranalysen. Diese zeigen bis zum Jahr 1999 relativ stabile und niedrige Chlorid-Konzentrationen um 40 mg/l, was den Konzentrationen von Klm 1/95 UP Mitte der 1990er Jahre entspricht.  $\text{CaCl}_2$  wurde bis 1999 im Rohwasser des Br. 1 nicht bzw. maximal mit 2 % an der Gesamtmineralisation angetroffen. Seit 1999 steigen auch in Br. 1 die Chlorid-Konzentrationen und  $\text{CaCl}_2$ -Anteile, sodass 2020 im Rohwasser des Nachfolgebrunnens Br. 1/14 (Br. 1b) doppelt so hohe Cl-Gehalte (80 mg/l) wie vor 1999 sowie deutlich erhöhte  $\text{CaCl}_2$ -Anteile (10 %) angetroffen werden. Die Gehalte in Br. 5/11 sind höher als in Br. 1, was in der nördlichen Lage des Brunnens begründet sein dürfte, da er sich näher am ehemaligen Kontrollstreifen befindet, für den der linienhafte Eintrag des Chlorats unterstellt wird.

Zur Plausibilitätsbewertung wurden die auf dem Kontrollstreifen eingetragenen Frachten mit den in den Br. 1 und 5 ab 2015 gemessenen Chlorid-Konzentrationen überschlägig verglichen. Gegenüber der anfänglich in Klm 1/95 UP gemessenen Chlorid-Konzentration (ca. 30 mg/l) ist in diesen Brunnen ein Chlorid-Überschuss von ca. 50 mg/l (Br. 1) bis 90 mg/l (Br. 5) zu beobachten. Bei durchschnittlichen Entnahmemengen von ca. 290 m<sup>3</sup>/d mit Br. 1 und 220 m<sup>3</sup>/d mit Br. 5 ergeben sich ab 2015 Chlorid-Frachten von ca. 21 000 kg/a (Br. 1) und 7 300 kg/a (Br. 5), die aus den Chlorat-Einträgen erklärt werden müssten. Mit der o. g. Anwendungsmenge von 120 g/m<sup>2</sup>/a und einer im Anstrombereich beider Brunnen liegenden Länge des Grenzstreifens von ca. 2,2 km ergibt sich eine eingetragene Chlorid-Fracht von ca. 700 kg/a. Somit könnten nur ca. 2 % der über die Brunnen ausgetragenen zusätzlichen Chlorid-Fracht durch den Herbizid-Einsatz erklärt werden. Die Fracht der beiden Brunnen weist auf weitere, mengenmäßig bedeutendere Salzeintragsquellen und ggf. eine höhere Anwendungsmenge des Herbizids hin.

Neben dem Anstieg des Chlorids und dem Nachweis des Berechnungssalzes  $\text{CaCl}_2$  in relativ hohen Anteilen an der Gesamtmineralisation sind außerdem erhöhte Gehalte an DOC,  $\text{Fe}^{2+}$  und Sulfat als Reaktionsprodukte der Oxidation von organischer Substanz (DOC) und Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) durch das starke Oxidationsmittel Chlorat zu erwarten und auch nachgewiesen.

Allgemein muss beachtet werden, dass die hier vorgenommenen Kalkulationen grobe Abschätzungen darstellen. Es ist zudem von unterschiedlichen Sickerzeiten (Heterogenität des Geschiebemergels) und unterschiedlich langen Fließwegen von den verschiedenen Eintragsstellen auszugehen.

## 6.2 Auftausalz-Eintrag im Zeitraum 1968 – 1990 am Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz sowie entlang der A 115

Im Folgenden wird der Transfer und die Fracht von Auftausalzen ausgehend von der Fläche des Kontrollpunkts Dreilinden/Drewitz und von dem ca. 1.200 m langen Autobahnabschnitt im Einzugsgebiet der Wasserfassung betrachtet und ein Vergleich zur Fracht der Brunnen gezogen. Zu DDR-Zeiten wurden NaCl, MgCl<sub>2</sub> und evtl. CaCl<sub>2</sub> in nicht bekannten Mischungsverhältnissen und Mengen im Winterdienst eingesetzt (Sprühsalz). Da für die DDR-Zeit keine Auftragsmengen recherchiert werden konnten, wurde der für 2011 – 2017 recherchierte Mittelwert (770 g/m<sup>2</sup> pro Winter) auf die Vergangenheit übertragen.

Der **Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz** lag im Areal des heutigen Europarcs westlich bis südwestlich von den Brunnen (Abb. 1) und wurde zwischen 1969 und 1990 betrieben. Die schnee- und eisfrei zu haltende Fläche wurde anhand historischer Luftbilder zu 7 ha angesetzt.

Im Bereich des Kontrollpunkts sind der GWL 1 und der Geschiebemergel geringer mächtig ausgebildet (vgl. Bohrprofil Klm 2/18 in Abb. 2) als am Standort der Br. 1 und 5 und im Bereich der Kontrollstreifen. Die Fließzeit bis zur GWMS Klm 02/18 OP wird zu ca. 25 – 30 a, bis zur GWMS Klm 1/95 MP sowie Br. 1 und 5 zu ca. 35 – 40 a abgeschätzt. Mit einem ersten Salzzutritt ausgehend vom Kontrollpunkt war demnach in Klm 02/18 OP in den Jahren 1995 – 2000 und in Klm 1/95 OP bis UP bzw. den Brunnen in den Jahren 2005 – 2010 zu rechnen. Die in der GWMS Klm 1/95 MP und mit ca. 2 Jahren Verzögerung im UP beobachteten Anstiege der Berechnungsalze CaCl<sub>2</sub> und NaCl ab den Jahren 2011 bzw. 2013 passen zum Beginn des Tausalzeintrags auf der Fläche des Kontrollpunkts Dreilinden/Drewitz Ende der 1960er Jahre mit einer Reaktionszeit, die mit 43 – 45 a geringfügig länger ist als die oben abgeschätzte Fließzeit. Die angenommene Eintragsmenge würde, wenn es sich um reines NaCl handelte, stöchiometrisch betrachtet zu einem vollständigen Kationenaustausch in weniger als einem Jahr führen. Unter diesen Bedingungen ist es unwahrscheinlich, die Erdalkalisierung und den Durchbruch von NaCl in den Ganglinien auflösen zu können. Zudem ist davon auszugehen, dass ein Gemisch von NaCl, MgCl<sub>2</sub> und evtl. CaCl<sub>2</sub> eingetragen wurde, sodass es zu keinem vollständigen Ionenaustausch im Sinne einer Erdalkalisierung kommt. Insgesamt kann angenommen werden, dass sich das Mischungsverhältnis der Salze beim Transport nicht wesentlich ändert.

Für die überschlägige Frachtberechnung wurde eine 1:1-Mischung von NaCl und MgCl<sub>2</sub> angesetzt (jährliche Auftragsmenge 770 g/m<sup>2</sup>). In diesem Fall wäre eine Fracht von ca. 36 000 kg/a Chlorid von der ca. 7 ha großen schnee- und eisfrei zu haltenden Fläche des Kontrollpunktes zu erwarten.

Der Kontrollpunkt liegt im Anstrom der Brunnen 1, 2, 5 und 7 mit einer mittleren Gesamtförderung von ca. 2 000 m<sup>3</sup>/d seit dem Jahr 2015. Die Brunnen zeigen im Mittel einen Chlorid-Überschuss von ca. 55–65 mg/l gegenüber der Hintergrundkonzentration (ca. 30 mg/l). Die überschüssige Chlorid-Fracht beträgt dann ca. 40 000–48 000 kg/a. Somit können bei der Annahme, dass das auf die Fläche aufgebraachte Salz den GWL 2 erreicht, ca. 75–90 % der über die Brunnen ausgetragenen zusätzlichen Chlorid-Fracht erklärt werden. In Abhängigkeit davon, ob das Tausalz der gesamten Fläche oder nur eines Teiles davon den Untergrund erreichte, fiel die Fracht geringer aus.

Über die betrachteten Eintragsquellen ehemaliger Grenzstreifen und Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz hinaus ist zu beachten, dass von der **Autobahn A115** seit ihrer Inbetriebnahme im Jahr 1968 ebenfalls jährlich ein winterlicher Eintrag von Auftausalzen anzunehmen ist. Zu DDR-Zeiten hatte die Autobahn insgesamt vier Fahrstreifen, also eine eisfrei zu haltende Breite von ca. 14 m. Unter Ansatz einer Länge von 1 200 m (aus der numerischen Modellierung ermitteltes Einzugsgebiet) und dem angenommenen mittleren jährlichen Auftrag von 770 g/m<sup>2</sup> ist zwischen 1968 und 1990 mit einer mittleren jährlichen Chlorid-Fracht von 9 000 kg/a zu rechnen.

Die insgesamt vom Kontrollpunkt und der Autobahn ausgehende jährliche Fracht (ca. 44 700 kg/a im Zeitraum 1968–1990) kann somit den Fracht-Überschuss von 40 000–48 000 kg/a Chlorid der Brunnen im GWL 2 erklären.

## 6.3 Rezentler Eintrag von Salz entlang der BAB 115

Die **linienhafte Versickerung** der Straßentausalze entlang der BAB 115 setzt sich ab 1990 fort, wobei i. d. R. nur NaCl als Auftausalz verwendet wird. Von dem 1 200 m langen Autobahnstreifen (Annahme 6 Streifen, ca. 29 m breit) im Einzugsgebiet der Wasserfassung ist im Zeitraum 1990–2000 im Mittel von einer Fracht in Höhe von 16 000 kg/a Chlorid auszugehen. Da mit der Inbetriebnahme eines Regenrückhaltebeckens im Jahr 2000 drei Fahrstreifen auf einer Länge von 600 m nicht mehr zur linienhaften Versickerung beitragen (gestrichelte Linie in Abb. 1), wird für den verbleibenden Autobahnabschnitt (600 m × 3 Fahrstreifen + 600 m × 6 Fahrstreifen) ab dem Jahr 2000 eine mittlere jährliche linienhafte Chlorid-Fracht von 12 000 kg/a abgeschätzt.

Das den Br. 5 bzw. Br. 1 zufließende Grundwasser erfasst relativ zentral ein **Regenwasserrückhaltebecken** (Abb. 1), über das die am östlichen Fahrbahnrand (600 m × 3 Fahrstreifen, gestrichelte Linie in Abb. 1) abfließenden Niederschlagswässer seit dem Jahr 2000 punktuell versickert werden. Es ist davon auszugehen, dass vom Regenrückhaltebecken ein punktförmiger Eintrag und damit konzentrierter Zutritt zu den Br. 5 bzw. Br. 1 erfolgen wird. Da das Regenrückhaltebecken im Jahr 2000 in Betrieb genommen wurde

und die Verweilzeit im GWL 1 und dem liegenden Geschiebemergel auf 25–35 Jahre geschätzt wird, ist erst zukünftig (ca. ab 2025) mit dem Zutritt von Salzwasser in den Br. 5 bzw. 1 zu rechnen. Die Fracht ausgehend vom Regenwasserrückhaltebecken wird auf ca. 4 000 kg/a geschätzt.

Seit 1990 ist ausgehend von dem Salzauftrag auf die Autobahn mit einer Fracht von ca. 16 000 kg/a Chlorid auszugehen (linienhafte und punktförmige Einträge). Langfristig sollte folglich die durchschnittliche Chlorid-Belastung der Brunnen wieder abnehmen, da die Fracht ausgehend von den zeitlich begrenzten Einträgen (1961–1990) am Kontrollpunkt Dreilinden, an der Grenzanlage und entlang der Autobahn (insges. ca. 44 700 kg/a und ca. 700 kg/a aus Chlorat) ca. dreimal so groß war. Bei einer Fließzeit vom ehem. Kontrollpunkt von ca. 40 Jahren (Abschnitt 6.2) ist ein Rückgang der Chlorid-Belastung aufgrund der Stilllegung der Grenzanlagen frühestens ab 2030 zu erwarten. In den Br. 5 bzw. 1 könnte es durch den punktförmigen Eintrag über das Regenwasserrückhaltebecken ab ca. 2025 zu einer Erhöhung der Chloridbelastung gegenüber den anderen Brunnen kommen, wobei dieser Anstieg geringer zu erwarten ist als der ab ca. 2030 erwartete generelle Konzentrationsrückgang infolge der nachlassenden Wirkung des Grenzkontrollpunktes.

#### 6.4 Zusammenfassende Bewertung der Chloridbeeinflussung des GWL 2

Mehrere Indizien sprechen für eine anthropogene Ursache der beobachteten signifikanten Erhöhung der Chlorid-Konzentrationen in GWL 2:

1. keine auffällige Chlorid-Belastung und kein Chlorid-Anstieg im GWL 3 (Abb. 5) sowie in den südlichen bis nordöstlich gelegenen GWMS im GWL 2 (Abb. 4)
2. unauffälliger Induktionslog-Befund in Klm 01/18 UP
3. Belege und Zeitzeugenberichte zur intensiven Verwendung von Auftausalzen (Sprühsalz) auf dem Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz und der Autobahn
4. Ergebnisse der Altersdatierung und sonstigen Isotopenuntersuchungen der im März 2019 genommenen Proben aus Klm 01/18 OP und Br. 5/11, die auf ca. 35–45 Jahre altes Grundwasser deuten
5. zunehmende Chlorid-Konzentrationen im GWL 2, die sich mit der Tiefe in einem zeitlichen Versatz zeigen (s. Klm 1/95 OP nach UP) und damit auf den Eintrag von oben deuten
6. Konzentrationsänderungen, die zeitlich mit den erwarteten Verweil- und Transferzeiten von Salz übereinstimmen, das vor 1990 im ehemaligen Grenzbereich als Tausalz bzw. Herbizid (Chlorate) eingetragen wurde
7. Die abgeschätzte Eintragsmenge an Chloriden auf ehemaligen Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz und entlang der Autobahn kann die Chlorid-Fracht der Brunnen des GWL 2 erklären. Dazu kommt der ebenfalls abgeschlossene Eintrag von Chlorid über Chlorat im ehemaligen Grenzgebiet.

Die LBGR-Software GEBAH kann im nördlichen bis zum südöstlichen Einzugsgebiet der WF Kleinmachnow nur zur Ermittlung der Berechnungssalze verwendet werden, um charakteristische Zusammensetzungen zu erkennen. Die Mineralisation des Grundwassers im Umfeld des WW ist durch die Verwendung von Tausalzen (vor 1999 Gemische aus NaCl, MgCl<sub>2</sub>, ggf. auch CaCl<sub>2</sub>), den Einsatz von Natrium- und/oder Kaliumchloraten als Herbizid (vor 1990) und diverse Quellen wie ehemalige Industrieansiedlungen (ggf. auch unterschwellig Chlorid aus LCKW-Abbau), Altablagerungen und ggf. Rieselfeldabfluss massiv verändert worden. Die Verhältniszahlen GGV und SMK aus GEBAH haben hier deshalb i. d. R. keine Aussagekraft. Um eine geogen salinare Komponente bei GWMS mit hohen oder steigenden Chlorid- bzw. Sulfat-Gehalten ausschließen zu können, werden weitere Isotopenuntersuchungen zur Altersdatierung empfohlen.

Die Chlorid-Konzentration im Reinwasser, die in den letzten Jahren infolge der Fahrweise der Brunnen und des Anstieges von Chlorid in den Brunnen des GWL 2 (v. a. Br. 1 und Br. 5) von im Mittel 25 mg/l auf 56 mg/l zugenommen hat, wird in den nächsten Jahren in der Größenordnung der bisher analysierten Konzentrationen (Spitzen bis 100 mg/l) zu erwarten sein und langfristig (frühestens ab 2030) evtl. etwas zurückgehen, wenn die oben dargelegte Hypothese zutrifft, dass das Salz hauptsächlich aus der Streusalzanwendung auf dem Kontrollpunkt Dreilinden/Drewitz und der Autobahn stammt.

Die Entwicklung der Salinarbeeinflussung wird im GWL 2 und 3 jährlich über die Untersuchung der Hauptanionen und -kationen erfolgen. Dabei wird die Entwicklung der Berechnungssalze aus GEBAH mit ausgewertet, um Änderungen der Mineralisationszusammensetzung erkennen zu können.

Es ist empfehlenswert, das Regenrückhaltebecken der Autobahn außerhalb des Einzugsgebietes des WW zu verlegen sowie die übrigen Fahrstreifen der Autobahn auch über ein Entwässerungssystem zu erfassen und schadlos aus dem Einzugsgebiet abführen.

#### Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden v. a. im nordwestlichen Zufluss des Wasserwerks Kleinmachnow steigende Chlorid-Konzentrationen festgestellt, die nach den hier vorgestellten Untersuchungen anthropogen bedingt sind. Im Rohwasser der Brunnen 5 und 1 sind bis zu 190 mg/l bzw. 100 mg/l Chlorid analysiert worden. In deren Vorfeldmessstellen werden Chlorid-Konzentrationen in der Größenordnung des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung gefunden.

Die Hauptanionen- und -kationenanalysen der Brunnen und Grundwassermessstellen wurden umfassend mit Hilfe der LBGR-Software GEBAH, unterstützt durch eine Iso-

topenuntersuchung zur Altersbestimmung, ausgewertet. Auf Basis von Recherchen zu möglichen Eintragsorten und -mengen von Auftausalzen im Bereich des ehemaligen Kontrollpunktes Dreilinden und entlang der Autobahn BAB 115 sowie auf Basis der Annahmen zum Stofftransport lassen sich sowohl die Konzentrationsentwicklungen in den betroffenen Grundwassermessstellen und Brunnen als auch die beobachteten Chloridfrachten der Brunnen erklären. Als weitere mögliche Chlorid-Quellen kommen der Einsatz von Chlorat als Herbizid entlang des Grenzkontrollstreifens im Zeitraum 1961–1990 sowie Altlasten und ggf. Rieselfeldeinfluss in Betracht. Die Abschätzungen zu diesen Eintragungsmengen können einen kleinen Teil der Chlorid-Fracht der Brunnen plausibel machen.

Die Auswirkungen des winterlichen Salzeintrages sind jeweils mit einem Zeitversatz von ca. 40 Jahren im Grundwasserleiter 2 zu beobachten. Es ist deshalb in den nächsten Jahren weiterhin mit Chlorid-Konzentrationen im Rohwasser zu rechnen wie sie in den letzten Jahren analysiert wurden. Ab dem Jahr 1990 (nach Schließung des Grenzkontrollpunkts) trägt allein die Behandlung des Autobahnabschnittes, der im Einzugsgebiet der Wasserfassung liegt, zur Aufsalzung des Grundwassers bei. Es kann deshalb langfristig mit einem Rückgang der Chlorid-Konzentrationen gerechnet werden.

## Summary

In the last years, increasing chloride concentrations in groundwater especially to the northwest of the waterworks Kleinmachnow have been observed, which are of anthropogenic origin according to the investigations presented in this article. Maximum concentrations in raw water from production wells 5 and 1 have reached 190 mg/l and 100 mg/l, respectively. The monitoring wells upstream of these production wells exhibit concentrations around the limit of the German drinking water ordinance.

Major ion analyses of production and monitoring wells have been extensively evaluated using the software GEBAH (developed by the State Geological Survey of Brandenburg), supported by groundwater dating by isotope analyses. The development of concentrations in production and monitoring wells and mass fluxes from production wells can be explained based on a review of locations and amounts of road salt use on the former border checkpoint Dreilinden/Drewitz and the highway BAB 115, and by estimated conditions of mass transport in the aquifers. Other possible sources of chloride are the use of chlorates as herbicide along the former border control stripes during 1961–1990, as well as abandoned hazardous sites and former sewage farms. The estimated inputs from these sources can explain an additional small fraction of the chloride flux in the wells.

Effects of road salt use can be observed with a delay of approx. 40 years in the second aquifer. Therefore, it is likely that for the near future raw water chloride concentrations

stay on the level of the last years. Since closure of the border checkpoint in 1990, only salt use on the highway section located in the wellfield catchment zone contributes to salinisation of the groundwater. In the long term, a reduction of chloride concentrations can be expected.

## Danksagung

Die Autoren danken der MWA (Hr. Könnemann, Fr. Krüger) für die Bereitstellung der Daten und Diskussion der Ergebnisse, dem LBGR (Hr. Brose, Hr. Hotzan) für die umfangreichen Diskussionen zu den GEBAH-Analysen und der Unteren Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde Potsdam-Mittelmark (Hr. Buschalsky) für die umfangreiche Recherche zu potentiellen Chloridquellen.

## Literatur

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. Hrsg. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 5. Aufl.

BUSCHALSKY & WALTHER (2018): Kurzbericht zu erhöhten Chloridkonzentrationen im Wasserwerk Kleinmachnow. 12 S., Untere Abfallwirtschafts- und Bodenschutzbehörde Landkreis Potsdam-Mittelmark, 07.09.2018

HEIDINGER, M. (2019): Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen zur Grundwasseraltersabschätzung auf Basis der Gehalte von Kohlenstoff-14/Kohlenstoff-13, Tritium und tritigenem Helium-3 Kleinmachnow. 29 S., Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen, 11.11.2019

LBGR (2021): Software GEBAH. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, <https://lbgr.brandenburg.de/lbgr/de/landesamt/abteilung-geologie/hydrogeologie/hydrogeochemische-grundlagen/>, Abruf am 28.09.2021

VVB AZ (1973): Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel aus der chemischen Industrie der Deutschen Demokratischen Republik. VVB Agrochemie und Zwischenprodukte, 3. Aufl.

## Anschriften der Autoren

Florian Jenn, Silvia Dinse, Anett Bremer,  
Dietmar Schäfer  
GCI GmbH  
Bahnhofstr. 19  
15711 Königs Wusterhausen  
03375 294785  
mail@gci-kw.de  
<http://www.gci-kw.de/>