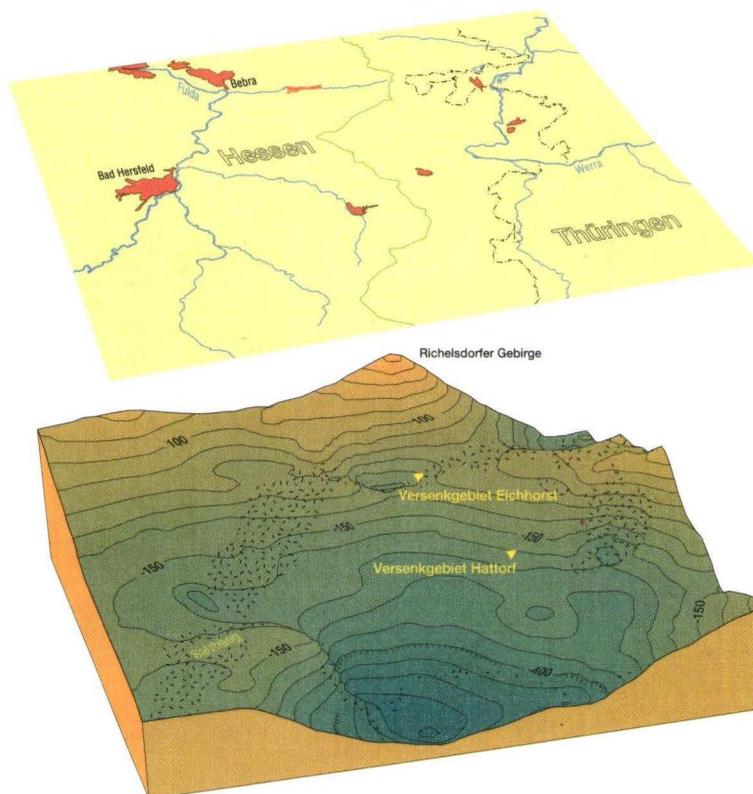


Die Versenkung und Ausbreitung von Salz- abwasser im Untergrund des Werra-Kaligebietes



von Frank Skowronek, Johann-Gerhard Fritsche, Ute Aragon & Dietrich Rambow

Geologische Abhandlungen Hessen, Band 105: 83 Seiten, 23 Abb., 12 Tab.; Wiesbaden 1999
ISBN 3-89531-807-8
ISSN 0341-4043

Die Versenkung und Ausbreitung von Salzabwasser im Untergrund des Werra-Kaligebietes

von Frank Skowronek, Johann-Gerhard Fritsche, Ute Aragon & Dietrich Rambow



**Hessisches Landesamt
für Bodenforschung**

Schriftleitung
Prof. Dr. Andreas Hoppe
Hessisches Landesamt für Bodenforschung
Leberberg 9, 65193 Wiesbaden

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Die Versenkung und Ausbreitung von Salzabwasser im
Untergrund des Werra-Kaligebietes** / HlFB, Hessisches Landesamt
für Bodenforschung. Von Frank Skowronek ... [Schriftl. Andreas
Hoppe]. - Wiesbaden : HlFB, 1999
(Geologische Abhandlungen Hessen ; Bd. 105)
ISBN 3-89531-807-8

Titelbild:
Höhenlage der Oberkante des Plattendolomits, dem
Versenchorizont von Salzabwässern des Werra-Kaligebietes.

Hinweis für Autoren
Manuskripte sind entsprechend den „Bonner Anweisungen“ abzu-
fassen: Richtlinien für die Verfasser geowissenschaftlicher Veröffent-
lichungen.
Ausgearbeitet von H. D. Lang, A. Rabien, W. Struve und E. Wiegel,
36 S.; Hannover 1976.
[Zu beziehen durch E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung]
(Nägele u. Obermiller); Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart.

© Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden 1999
ISBN 3-89531-807-8
ISSN 0341-4043

Printed in Germany

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Übersetzung, Nach-
druck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen - auch
auszugsweise - nur mit schriftlicher Genehmigung des Heraus-
gebers.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced,
stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any
means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or other-
wise, without permission of the publisher.

Redaktion: Hermann Brenner, Elisabeth Lommatzsch
Herstellung: Druckhaus „Thomas Müntzer“ GmbH
Neustädter Straße 1-4
99947 Bad Langensalza
gedruckt auf chlor- und säurefreiem Papier
Vertrieb: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
Leberberg 9, 65193 Wiesbaden
Telefon: 06 11/53 70; Fax: 06 11/53 73 27

Die Versenkung und Ausbreitung von Salzabwasser im Untergrund des Werra-Kaligebietes

Kurzfassung

Seit 1929 wird das bei der Aufbereitung von Rohsalzen zu Kalidüngemitteln im Werra-Kaligebiet anfallende Salzabwasser in großem Umfang in den Grundwasserleiter Plattendolomit (Zechstein 3) versenkt. Der Plattendolomit enthält geogen bereits Salzwasser und ist durch hydraulische Barrieren weitgehend von dem zur Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasserleiter im Buntsandstein isoliert. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Versenküberwachung hessischer und thüringischer Behörden und zusätzlicher Datenrecherchen wird der heutige Kenntnisstand zur Auswirkung der Salzabwasserversenkung auf Grundwasser und Oberflächengewässer im Werra-Kaligebiet dargestellt. Der Untersuchungsgegenstand ist (seit Deubel 1954 und Hoppe 1962) erstmalig seit 1945 der gesamte durch Salzabwasser betroffene Raum in Hessen und Thüringen, wobei die Untersuchungsschwerpunkte im Werratal zwischen Philippsthal und Gerstungen sowie im Einzugsgebiet der Fulda zwischen Hünfeld und Rotenburg liegen.

Basierend auf Grundwasseranalysen aus 123 Meßstellen im Versenkhorizont Plattendolomit werden Verbreitungskarten der wesentlichen chemischen Kennwerte Chlorid und Magnesium für die geogene Situation vor Versenkbeginn und die heutige Situation erstellt. Derzeitig ist im Versenkhorizont eine Fläche von rd. 480 km² durch ein Salzabwasser/Formationswassergemisch in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen beeinflusst. Aufgrund der geringen

Durchlässigkeiten des Plattendolomits im äußeren Bereich des Salzhangs sind, auch nach einer mehr als 70-jährigen Versenktätigkeit, keine Gebiete außerhalb des Werra-Salinars betroffen. Auf der Grundlage des vorliegenden Analysenmaterials und der Verbreitungskarten wird für die beeinflusste Fläche im Versenkhorizont eine Abschätzung der Salzabwasseranteile vorgenommen und kartenmäßig dargestellt. Aufgrund der zeitlichen Veränderungen der Salzabwasserzusammensetzungen während der Kalisalzproduktion können für Teilgebiete Aussagen zur Herkunft, Ausbreitungsrichtung und Laufzeit des versenkten Salzabwassers gemacht werden.

In den Grundwasserleitern über dem Versenkhorizont im Buntsandstein und Quartär beschränkt sich die stoffliche Beeinflussung durch die Versenktätigkeit auf lokal begrenzte Entlastungsgebiete. Ein wesentlicher Entlastungsschwerpunkt liegt bei Dankmarshausen an der Werra. Hier tritt Mischwasser bzw. verdrängtes natürliches Formationswasser aus dem Grundwasserleiter des Plattendolomit bis an die Geländeoberfläche. Das Mischwasser/Formationswasser tritt z.T. direkt oder aber über angrenzende Kiesseen in die Werra ein und erhöht als sogenannter „Diffuser Eintrag“ den Chloridtransport der Werra um ca. 10-18 kg/s, entsprechend ca. 10-20 % des Cl-Transportes der Werra. Der mittlere Austrag des versenkten Salzabwassers auf diesem Weg läßt sich für den Zeitraum von 1991-1996 mit etwa 15-25 % der jährlich ver-

* F. Skowronek, Falkenbergsweg 37, 21149 Hamburg

** Dr. J.-G. Fritsche, U. Aragon, Dr. D. Rambow, Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Leberberg 9, 65193 Wiesbaden

senkten Chloridmenge abschätzen und hat eine Laufzeit vom Versenkort bis zum Entlastungsgebiet im Werratal von mehr als 15 Jahren.

Zur Identifizierung von Salzabwassereinflüssen im Grund- und Oberflächenwasser werden Richtwerte vorgestellt, die auf der Grundlage von chemischen Analysendaten eine weitgehend zuverlässige Unterscheidung von geogenem und durch Salzabwasser beeinflusstem Grundwasser erlauben. Die Anwendung dieser Richtwerte auf das Werratal bei Heringen-/Widdershausen/Dankmarshausen, in dem ein Großteil der diffusen Salzwassereinträge in die Werra erfolgt, läßt Rückschlüsse auf die räumliche und zeitliche Ausbreitung des versenkten Salzabwassers zu. In diesem Teilgebiet trat insbesondere Ende der siebziger bis Mitte der achtziger Jahre hochkonzentriertes Mischwasser aus Formationswasser und Salzabwasser bis an die Oberfläche aus und trug durch diffusen

Eintrag in die Werra zu einem beträchtlichen Austrag versenkten Salzabwassers bei. Der seit einigen Jahren feststellbare Konzentrationsrückgang in einem Großteil der Beobachtungsmeßstellen ist i.a. mit einem Rückgang der Salzabwasseranteile verbunden. Offensichtlich wirkten sich in diesem Teilgebiet die zunächst 1986 und später 1991 weiter rückläufigen Versenkmengen reduzierend auf den Salzwasseranstieg aus.

Weitere punktuelle Übertritte von Mischwasser oder verdrängtem primären Formationswasser aus dem Plattendolomit in hangende Grundwasserleiter, die mit der Versenktätigkeit in Zusammenhang gebracht werden können, finden sich im oberirdischen Einzugsgebiet der Werra und der Fulda an mehreren Lokationen. Die Auswertungsergebnisse hierzu werden detailliert nach Art, Ort und Menge beschrieben.

Abstract

Deep well disposal and subterranean distribution of waste brine in the Werra Potash Region (States Hesse and Thuringia, FRG).

Since 1929, waste brines resulting from the production process of potash fertilizers in the Werra Potash Region have been disposed off into the Plattendolomit aquifer (Leine Carbonate, Zechstein 3). The Plattendolomit contains natural saline groundwater which is isolated by hydraulic barriers from the upper aquifer in the Bunter which is used for the production of drinking water.

Based on results of long term groundwater monitoring and (additional) data research, the current state of knowledge concerning the effects of deep well disposal on groundwater and surface water in the Werra Potash Region is presented. For the first time, the entire region between Bad Hersfeld (Hesse) and Bad Salzungen (Thuringia) that could potentially be affected by disposed waste brines is studied.

Chemical water analyses of 123 wells and springs in the Plattendolomit aquifer are used

to evaluate the groundwater quality development during the time of deep well disposal. The currently affected area of about 480 km² contains natural Plattendolomit groundwater (formation water) with relatively low to middle salt concentrations, highly concentrated waste brines and a mixture of both. A great amount of waste brine moves - more or less unmixed - into depressions of the Plattendolomit stratum and displaces the lighter natural groundwater.

The low permeability of the Plattendolomit reservoir in the outer region of the „Salzhang“ results in waste brine spreading only in the permeable area overlying the partly and completely undissolved Zechstein Halite. The „Salzhang“ is the inclined plain between beginning and total dissolution of the Zechstein Halite. In the outer region of the „Salzhang“ and outside of it, the overlying strata are strongly brecciated and therefore an aquifuge. Current chemical analyses and isoconcentration maps for natural conditions in the Plattendolomit groundwater are used to estimate the regional distribution of

waste brine. The varying compositions of waste brines, especially during the last 20 years, show the origin, the direction and velocity of waste brine flow.

Mainly in the valley of the river Werra near the villages of Heringen and Dankmarshausen mixtures of formation water and waste brine move along faults into the overlying aquifers and to the surface. The result is a discrete, continuous discharge of saline groundwater into the river Werra. This discharge increases the Chloride load in the range of 10–20% of the total chloride load of the river Werra. Such, about 15–25% of the totally disposed waste brine volumina is lost via surface discharge (years 1991–1996). The transport of disposed waste brines from the injection wells to the area of surface discharge is taking more than 15 years.

For determining the waste brine component in groundwater and surface water, an index of chemical parameters has been designed. The application of this index on the mainly affected region „Werra valley“ supplies evidence for the

distribution of waste brine in time and space. Waste brine influenced this region substantially between the end of the seventies to the middle of the eighties. During this time highly concentrated mixtures of natural groundwater with anthropogenic waste brine were discharged into the river Werra and increased its chloride load. For the last three to six years, the salt concentrations in most of the shallow groundwater monitoring wells and springs have decreased and at the same time the share of brine water in this region has diminished. This shows the connection between decreasing deep well disposal between 1986 and 1991 and the quality of the groundwater and the surface water in the affected regions.

Additional movements of saltwater into the overlying aquifer of the Buntsandstein (Bunter) possibly connected to deep well disposal occur at some isolated locations, but all over the highly permeable inner region of the „Salzhang“ in the surface catchment areas of the rivers Werra and Fulda.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Problemstellung	6
2. Material und Methoden	13
3. Versenktätigkeit	19
3.1 Versenktätigkeit	19
3.2 Beschaffenheit des versenkten Salzabwassers	22
4. Übersicht über das Untersuchungsgebiet	24
4.1 Geologie	24
4.1.1 Stratigraphische Einheiten	25
4.1.2 Lagerungsverhältnisse, Tektonik und Subrosion	25
4.2 Hydrogeologie	29
4.2.1 Hydraulik	29
4.2.2 Hydrogeochemie	30
5. Ausbreitung von Salzabwasser im Untersuchungsgebiet	34
5.1 Hydraulische Grundlagen	34
5.1.1 Plattendolomit	34
5.1.2 Buntsandstein und Quartär	36
5.2 Hydrogeochemische Grundlagen	36
5.2.1 Lösung und Fällung	37
5.2.2 Chemische Reaktionen	38
5.2.3 Sorption und Ionenaustausch	39

5.2.4 Mischung	40
5.3 Identifizierung von Salzabwasser im Grundwasser	41
5.3.1 Werratal	43
5.3.2 Gesamtes Untersuchungsgebiet	47
5.4 Ausbreitung im Versenkhorizont Plattendolomit	52
5.4.1 Versenkgebiete des Werkes Wintershall (Kali und Salz GmbH)	52
5.4.1.1 Versenkgebiet Eichhorst/Bodesruh/Kleinensee	52
5.4.1.2 Versenkgebiet Heringen	54
5.4.2 Versenkgebiet des Werkes Hattorf (Kali und Salz GmbH)	54
5.4.3 Versenkgebiete der Thüringischen Werke (ehem. VEB Kalibetrieb Werra)	56
5.4.3.1 Versenkgebiet Merkers-Dorndorf, Kaiseroda	56
5.4.3.2 Versenkgebiet Springen, Gospenroda, Frauensee	57
5.4.4 Sonstige Gebiete mit potentieller Salzabwasserbeeinflussung	57
5.4.5 Abschätzung der Salzabwasseranteile im Versenkraum	59
5.5 Ausbreitung von Salzabwasser und Mischwasser im Buntsandstein und Quartär	62
5.5.1 Werratal	62
5.5.1.1 Abschätzung der Beteiligung von Salzabwasser an den diffusen Einträgen im Werratal	68
5.5.2 Fuldaeinzugsgebiet	71
5.5.2.1 Langfristige Entwicklung	71
5.5.2.2 Entwicklung in Meßstellen mit erhöhten Cl-Konzentrationen	74
6. Schlußfolgerungen	77
7. Zusammenfassung	79
8. Schriftenverzeichnis	82
Glossar	83

1. Einleitung und Problemstellung

Im Werra-Kaligebiet (Abb. 1) wird seit 1925, in großem Umfang seit 1929 Salzabwasser aus der Kalidüngemittelproduktion in den tiefen Untergrund, in einen nicht zur Trinkwasserversorgung genutzten Grundwasserleiter versenkt. Die über Tiefbohrungen bis Ende 1998 entsorgte Menge beläuft sich auf 900 Mio. m³ hochkonzentriertes Salzabwasser mit Natrium, Magnesium, Chlorid und Sulfat als Hauptkomponenten. Die Versenkung erfolgt in den Plattendolomit (Leine-Karbonat, Ca₃), einen Kluftgrundwasserleiter im Zechstein (Abb. 2), der aufgrund guter Speichereigenschaften und der Unter- und Überlagerung mit gering durchlässigen Schichten günstige Voraussetzungen bietet (Mayrhofer 1965, Finkenwirth & Fritsche 1993).

Seit Beginn der Salzabwasserversenkung treten an mehreren Lokationen, vor allem im Werratal zwischen Bad Salzungen und Gerstungen, erhöhte Chlorid-Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser auf, die durch den Übertritt von verdrängten salzreichen Formationswässern, z.T. mit Salzabwasseranteilen aus dem Versenkhorizont, verursacht werden (Deubel 1954). In Abb. 3 sind beispielhaft für drei Meßstellen in der Grundwasserüberdeckung des Versenkhorizontes die lokal unterschiedlichen Auswirkungen der Versalzung dargestellt. Die flache Quartär-Meßstelle in der Werra-Aue (454, Meßstellenummer des hessischen Meß- und Beobachtungsplanes) liegt in einem der wesentlichen Salzabwasseraufstiegsgebiete am rechten

Werraufer bei Heringen-Widdershausen. Im Umfeld der Meßstelle dringt seit 1963 salzreiches Formationswasser aus dem Plattendolomit, seit 1981 mit geringen und seit 1985 mit deutlich nachweisbaren Salzabwasseranteilen von bis zu 10 % in die quartären Werratalschotter auf und erhöht die Cl-Konzentrationen in der Meßstelle bis auf 600 meq/l. In der Umgebung der 48 m tiefen Buntsandsteinmeßstelle Brunnen 21 am rechten Werraufer südlich von Heringen setzte die Versalzung etwa sieben Jahre später ein. Hier ist lediglich natürliches Formationswasser aus dem Plattendolomit beteiligt, Salzabwasser dringt nicht bis in den Entnahmbereich des Brunnens vor. Dies kommt auch in den niedrigeren Cl-Konzentrationen von maximal 270 meq/l zum Ausdruck. Ein Beispiel für die Versalzung eines tiefen Brunnens im Einzugsgebiet der Fulda gibt die Cl-Ganglinie des Brunnens

366. Auch hier steigt natürliches Salzwasser aus dem Plattendolomit bis in den Entnahmbereich des Brunnens auf. Es werden jedoch im Vergleich zu den Entlastungsgebieten an der Werra erheblich geringere Maximalkonzentration von 68 meq/l Cl erreicht.

Ein weiterer Effekt der Salzwasseraufstiege sind flächenhafte Übertritte von Salzwasser aus dem quartären Porengrundwasserleiter in die Werra; hier kommt es lokal begrenzt zu den sogenannten „diffusen Einträgen“. Vor allem im Raum Widdershausen/Dankmarshausen treten diffuse Einträge auf. Nach der Wiedervereinigung 1990 konnten der Eintrag von Salzwasser in die Werra mit einem geringeren Fehler quantifiziert werden. Zwischen 1991 und 1993 traten danach 12–18 kg/s Chlorid diffus in die Werra ein (Abb. 5) und trugen zum Gesamtchloridtransport der Werra am Pegel Gerstungen im

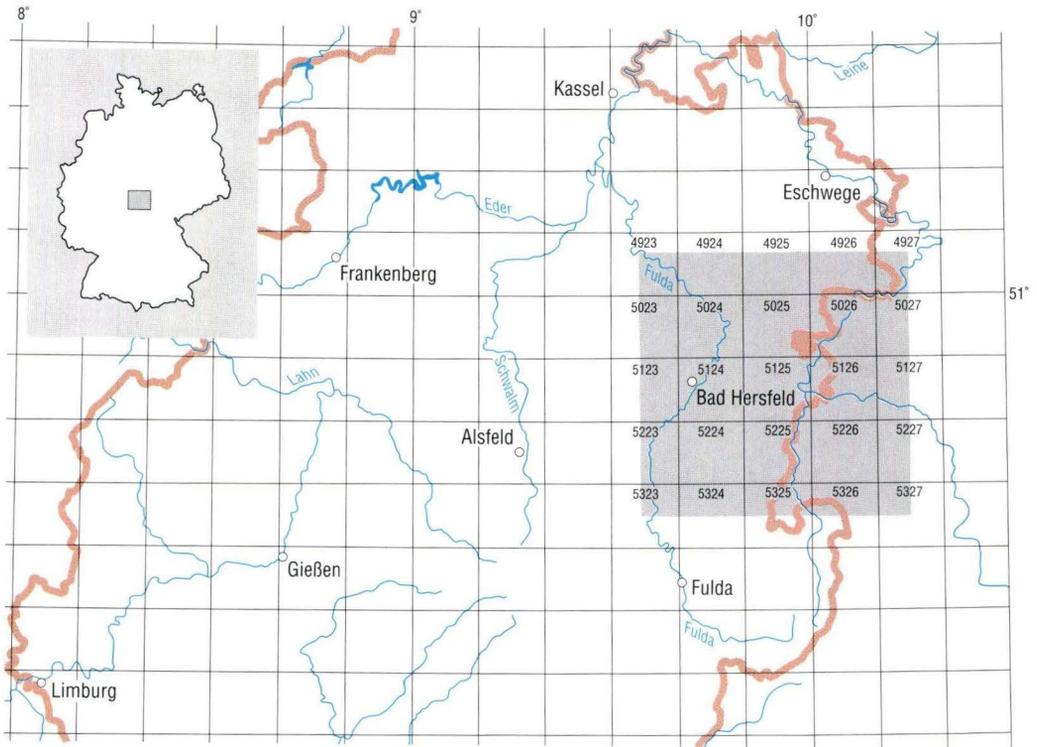


Abb. 1. Lage des Untersuchungsgebietes (mit TK 25-Blattschnitten).

Mittel mit 15 % bei. In den Jahren 1995–1997 betragen die diffusen Einträge unter 10 kg/s. Der wesentliche Teil des Chloridtransportes wird durch den Direktabstoß der hessischen und thüringer Kaliwerke in Werra und Ulster verursacht.

Abschätzungen für die Zeit vor der Wiedervereinigung ergaben insbesondere zwischen 1974 und 1989 hohe diffuse Einträge von mehr als 20 kg/s Chlorid (Abb. 2). Das diffus eingetragene Salzwasser setzt sich aus natürlich versal-

Stratigraphie	Mächtigkeit	Hydrogeol. Einteilung	Hydrogeologische Kurzbeschreibung
Q	0-3 Auenlehmedecke 0-50 Flußschotter und -sande		Grundwassergeringleiter Grundwasserleiter mit großer Permeabilität, unter Auenlehm gespannt
so	0-120 Oberer Buntsandstein		Grundwassernichtleiter bis Grundwassergeringleiter
sm	≈240 Mittlerer Buntsandstein		Grundwasserleiter mit wechselhafter Permeabilität, nur bei Überlagerung mit so gespannt
su	≈360 Unterer Buntsandstein		Grundwasserleiter mit grundwasserhemmenden Ton-/Sandstein-Wechselfolgen, überwiegend ungespannt
zB	35-40 Bröckelschiefer		Grundwassernichtleiter, vereinzelt in Zerrüttungszonen wasserwegsam
Ca3	10 "Obere Letten"		
T2-T3	23 Plattendolomit		Versenkhorizont
Na1r, A1r, T1r	35 "Untere Letten"		Grundwasserleiter mit Fein- bis Makroklüftung, z.T. kavernös und porös, gespannt
Na1γ	25 Steinsalz, Anhydrit, br. Salzton		
K1H			
Na1β			
K1Th	≈266 Werra-Steinsalz mit den Kalisalzflözen "Hessen" und "Thüringen"		Grundwassernichtleiter
Na1α			
CaA1, Ca1, T1, C1	15 Anhydritknotenschiefer, Zechsteinkalk, Kupferschiefer, Zechsteinkonglomerat		
ro	>100 Rotliegendes		Grundwasserleiter mit wechselnder, meist geringer Permeabilität auf Klüften, gespannt

Abb. 2. Stratigraphie und hydrogeologische Stockwerksgliederung im Werra-Kaligebiet. Die Schichtmächtigkeiten sind bis einschließlich Mittlerer Buntsandstein als Normalmächtigkeiten und für die darüber folgenden Schichten als Spannweiten angegeben.

zenem Formationswasser aus dem Plattendolomit mit unterschiedlichen Anteilen von Salzabwasser zusammen. Aus Abb. 5 ist die Relation der diffusen Einträge, an denen Salzabwasser beteiligt ist, zu der durch die Salzabwasserversenkung in den Plattendolomit eingetragenen Chloridmenge im Zeitraum 1968-1994 ersichtlich.

Die Auswirkungen der Versenkung sowie auch die Kontrolle der Salzabwasserausbreitung im Versenchorizont waren Gegenstand zahlreicher Gutachten, Berichte und Veröffentlichungen (u.a. Deubel 1954, Hoppe 1962, Finkenwirth 1964; Finkenwirth & Fritsche 1993).

Derzeit wird die Versenküberwachung durch Fachausschüsse der Länder Hessen und Thüringen [Salzabwasserausschuß Hessen (SaAbHe) und Salzabwasserausschuß Thüringen (SaAbTh)], unter Beteiligung der betroffenen Aufsichts- und Fachbehörden, sowie durch einen länderübergreifenden Koordinierungsausschuß Salz-

abwasser Hessen/Thüringen (KoSaAb) vorgenommen. In Vorbereitung der 1996 erfolgten Verlängerung der Versenkerlaubnis der beiden hessischen Kaliwerke wurden durch die zuständigen Fachausschüsse Sonderberichte vorgelegt. Im Sonderbericht „Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra - 1994“ (KoSaAb, Kurzfassung 1996 veröffentlicht) werden die geologisch-hydrogeologische Situation und die Folgen der Salzabwasserversenkung im Werra-Tal mit dem regionalen Schwerpunkt Heringen/Dankmarshausen/Widdershausen detailliert dargelegt. Der daran anschließende Bericht „Einflüsse der Salzabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet auf Grund- und Oberflächenwasser im Einzugsgebiet der Fulda - Fuldabericht“ (SaAbHe 1996, unveröffentlicht) faßt den aktuellen Kenntnisstand hinsichtlich möglicher Versenkeinflüsse im Fuldagebiet zwischen Hünfeld und Rotenburg zusammen. Die natürliche hydrogeochemische Situation sowie die Ausbrei-

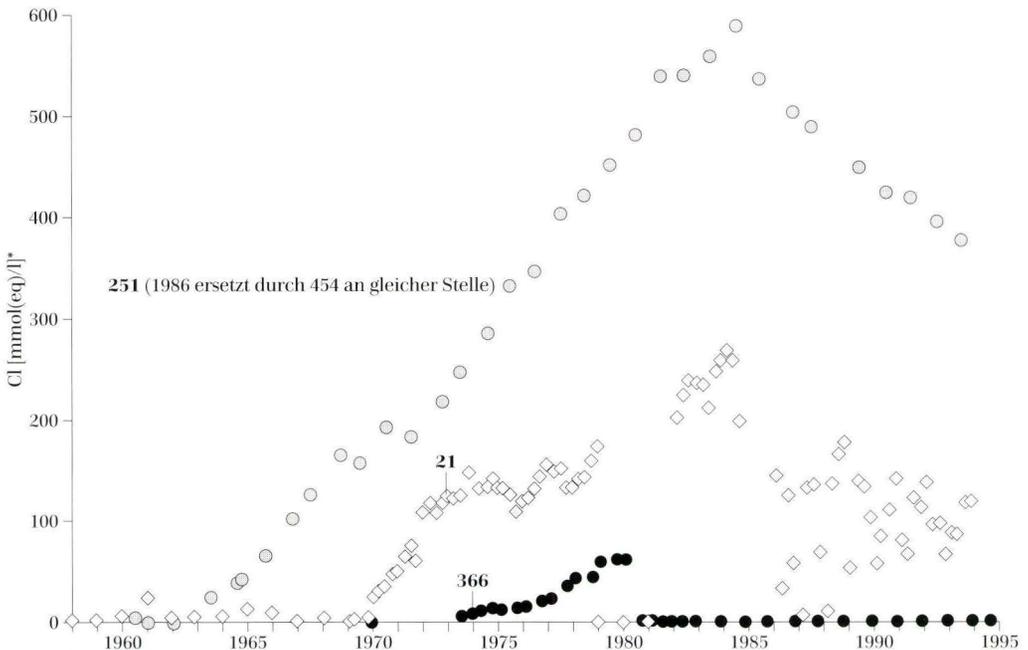
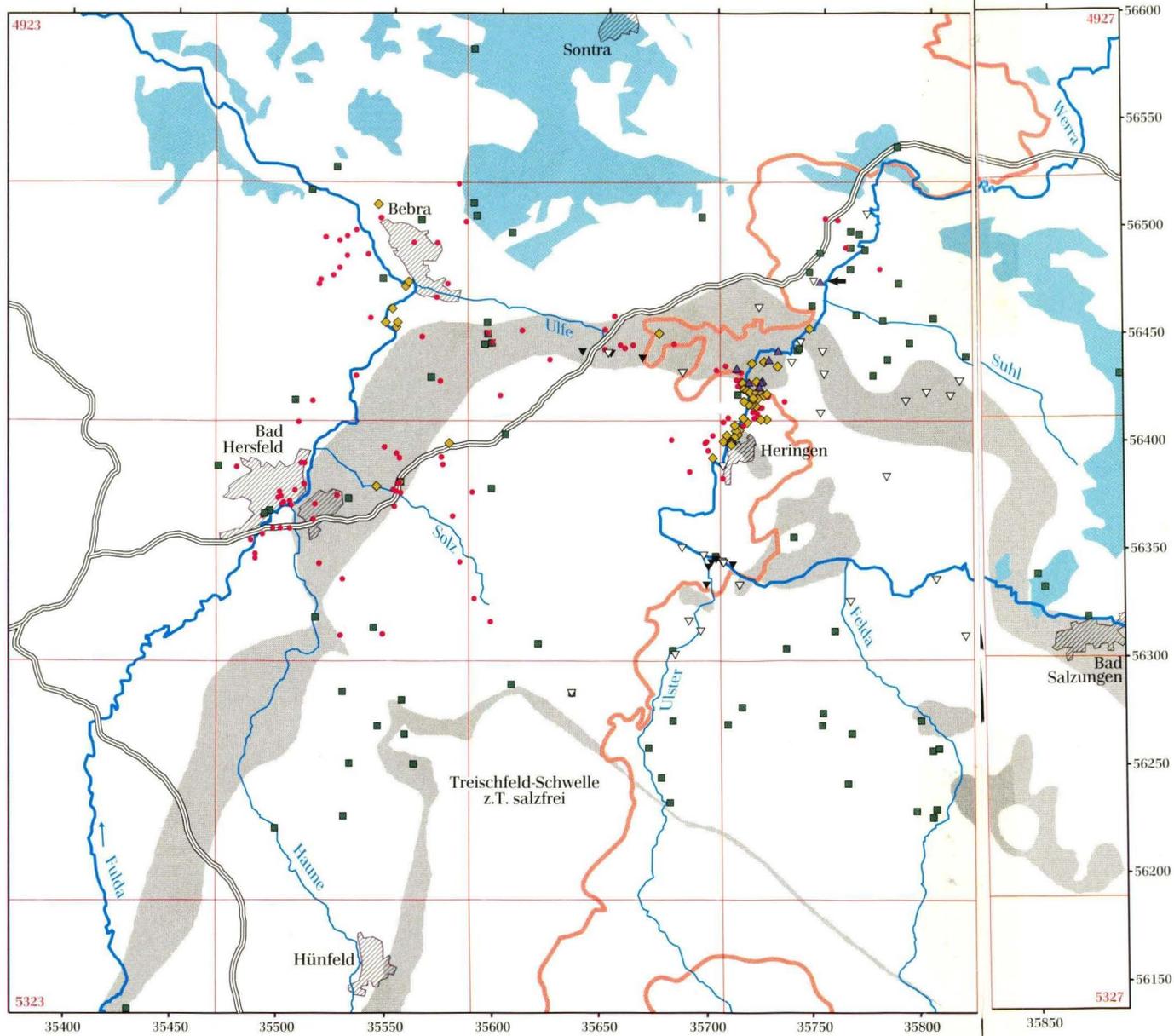


Abb. 3. Cl-Konzentrationsganglinien für eine Quartär- (454) und eine Buntsandsteinmeßstelle (21) im Werratal sowie eine Buntsandsteinmeßstelle (366) im Fuldagebiet. Der Rückgang der Cl-Konzentrationen in der Meßstelle 366 im Jahr 1980 resultiert aus einer Teilverfüllung (100 meq/l Cl entsprechen 3546 mg/l).

* mmol(eq)/l, im Text häufig in der Kurzform meq/l



- Bundesautobahn
 - Grenze Hessen/Thüringen
 - Salzhang und reduzierte Salzmächtigkeiten
in Hessen weitgehend basierend auf Angaben der Kali und Salz GmbH,
in Thüringen in Anlehnung an Hoppe (1960)
 - Zechsteinausbiß
- zur Auswertung verwendete Meßstelle/Brunnen/Bohrloch im
- Oberflächenwasser
 - Quartär
 - Buntsandstein
 - Plattendolomit
 - Versenkbrunnen in Betrieb
 - Versenkbrunnen außer Betrieb
 - Pegel Gerstungen

Abb. 4. Lage der zur Auswertung verwendeten Meßstellen und Versenkbohrungen (Maßstab 1:300 000).

tung des versenkten Salzabwassers im Plattendolomit wird im Bericht „Ausbreitung von Salzabwässern im Plattendolomit des Werra-Kaligebietes“ (HLfB 1996, unveröffentlicht) beschrieben. Auf der Grundlage dieser Arbeiten werden im folgenden die bis heute bekannten Auswirkungen der Salzabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet aus hydrogeologischer und hydrogeochemischer Sicht untersucht und dargestellt. Die Lage der zur Auswertung verwendeten Meßstellen ist in Abb. 4 dargestellt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den fachlichen Kenntnisstand hinsichtlich der Auswirkungen der Tiefenversenkung von Salzabwässern auf das Grundwasser darzustellen.

Wesentliche im Text verwendete Fachbegriffe und Definitionen werden im Anhang (S. 83) erläutert.

Der überwiegende Teil der verwendeten Da-

ten wurde von der Kaliindustrie erhoben und im Rahmen der Versenküberwachung zur Verfügung gestellt, daher gebührt an dieser Stelle insbesondere der Kali und Salz GmbH unser Dank für die konstruktive Durchsicht der Arbeit, die Bereitstellung und die Genehmigung zur Veröffentlichung von firmeneigenen Daten. Von Seiten der bei der Versenküberwachung beteiligten Behörden wurde freundliche Unterstützung durch die Herren Galle und Dr. Ziegler (Thüringer Landesanstalt für Umwelt), Dr. Hecht (Thüringer Landesanstalt für Geologie), Dr. Gerstenberg und Dr. Brahmer (Hessische Landesanstalt für Umwelt) sowie durch die heutige Abteilung Staatliches Umweltamt des Regierungspräsidiums Kassel seitens der Herren Caspar und Bernhard (ehem. Wasserwirtschaftsamt Fulda) und Bannert (ehem. Bergamt Bad Hersfeld) gewährt.

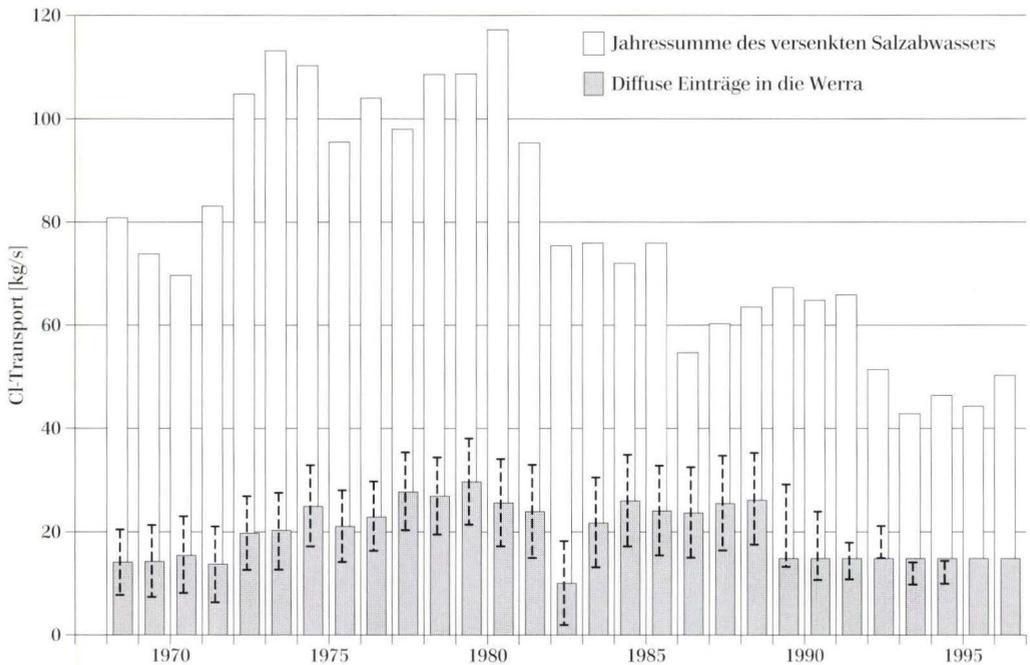


Abb. 5. Entwicklung des Chloridtransports von 1968–1996 für die Summe des versenkten Salzabwassers und die diffusen Einträge in die Werra, berechnet als Differenz des Cl-Transports zwischen der Gütemeßstelle Widdershausen und dem Pegel Gerstungen. Die gestrichelten Linien geben die Schwankungsbreite der diffusen Einträge an, die durch Ungenauigkeiten bei den Abflußbestimmungen hervorgerufen werden.

2. Material und Methoden

Zur Auswertung der Grundwasserbeschaffenheit im Plattendolomit standen Analysen aus insgesamt 123 Meßstellen zur Verfügung. Zur Unterscheidung von Salzabwassereinflüssen wurden die in den folgenden Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 vorgestellten Richtwerte herangezogen. Im folgenden wird immer Cl, SO₄ etc. geschrieben, wobei jeweils die Ionen gemeint sind, also z.B. Cl⁻ und SO₄²⁻.

Für die Auswertung der Grundwasserbeschaffenheit im Werratal standen insgesamt 75 Meßstellen in Oberflächengewässern, im Quartär und im Buntsandstein zur Verfügung. Die Untersuchungen im Einzugsgebiet der Fulda wurden an 81 Meßstellen im Buntsandstein durchgeführt.

Zur Abschätzung der Salzabwasseranteile im Plattendolomit wurde die allgemeine Mischungsgleichung verwendet:

$$C_{\text{end}} = m_1 C_1 + m_2 C_2,$$

wobei C_{end} = aktuell gemessene Stoffkonzentration in der Meßstelle,

C_1 = Stoffkonzentration im Salzabwasser,

C_2 = Stoffkonzentration des natürlichen Formationswassers am Ort der Meßstelle vor der Zumischung von Salzabwasser,

m_1 = Anteil Salzabwasser,

m_2 = Anteil Formationswasser

ist.

Die Gleichung läßt sich nach Einsetzen der bekannten Stoffkonzentrationen C_{end} , C_1 und C_2 und Setzen der Randbedingung $m_1 + m_2 = 1$ numerisch iterativ lösen. Dabei wird vereinfachend angenommen, daß sich das Wasser nur aus zwei Mischungsgliedern zusammensetzt. Der gesuchte Salzabwasseranteil m_1 ergibt sich dann aus:

$$m_1 = (C_{\text{end}} - (1 - m_1)C_2) / C_1.$$

Für die Berechnung von m_1 bei der Mischung im Versenkhorizont müssen die in der Gleichung

vorkommenden Konzentrationen C_{end} , C_2 und C_1 bekannt sein. Die Konzentration C_{end} wird durch Messung bestimmt. Der Wert für C_2 kann aus den Verbreitungskarten für die geogene Situation entnommen werden (s. Abb. 6 und 7) oder es können, sofern vorhanden, alte Analysen aus der Zeit vor der Salzabwasserbeeinflussung herangezogen werden. Für C_1 werden Durchschnittsanalysen für Salzabwasser verschiedener Jahre verwendet. Zur Berechnung von Mischungsanteilen nach obiger Gleichung bietet sich insbesondere die Verwendung der Cl-Konzentrationen an. Cl hat ideale Tracer-eigenschaften und ist im Salzabwasser in annähernd gleichbleibenden Konzentrationen enthalten.

Zur Abschätzung von Salzabwasseranteilen wurden die Cl-Konzentrationen im Salzabwasser (C_1) wie folgt angesetzt:

Werk Wintershall:

mittlere Cl-Konzentration im Zeitraum 1968–1994 = 4870 ± 251 meq/l

Werk Hattorf:

mittlere Cl-Konzentration im Zeitraum 1968–1994 = 5029 ± 257 meq/l

Ehemaliger „VEB Kalibetrieb Werra“ (Thüringen):

mittlere Cl-Konzentration des zuletzt im Jahr 1968 versenkten Salzabwassers = 4889 meq/l.

Zu beachten ist bei Verwendung der Mischungsgleichung, daß zuverlässige Ergebnisse nur dann zu erwarten sind, wenn durch chemische Reaktionen, Ionenaustausch oder Lösung/Fällung, wie in den Kapiteln 5.2.1–5.2.3 beschrieben, keine wesentliche Veränderung der Lösungszusammensetzung eintritt. Für die Vermischung von Salzabwasser mit Formationswasser im Versenkhorizont Plattendolomit ist diese Bedingung in der Regel weitestgehend erfüllt. Im Buntsandstein und Quartär ist bei Anwendung der Mischungsgleichung in jedem Fall

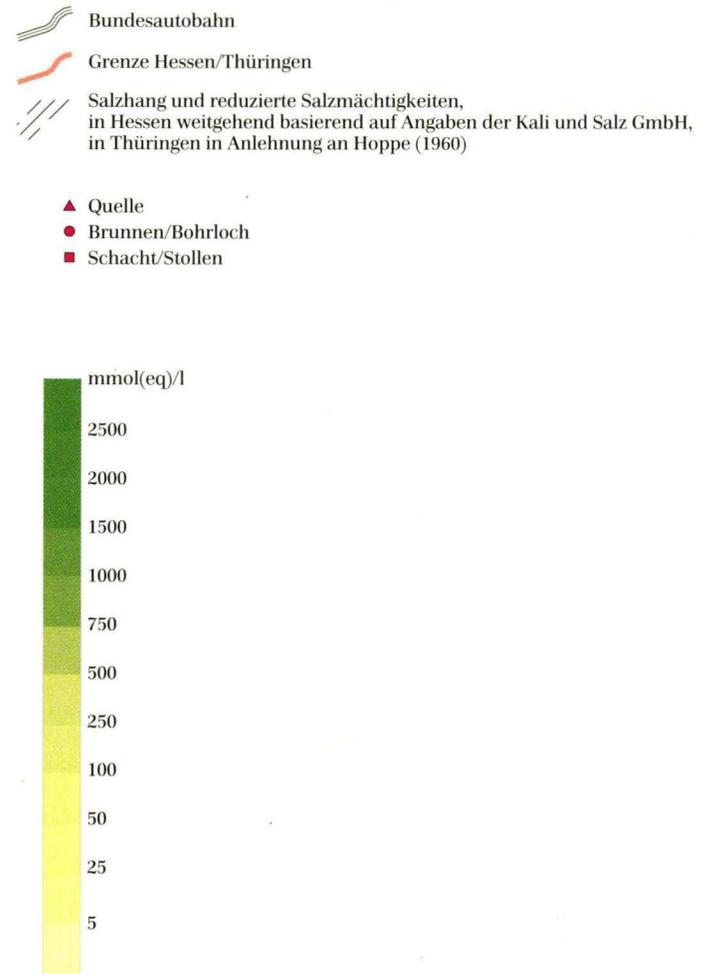
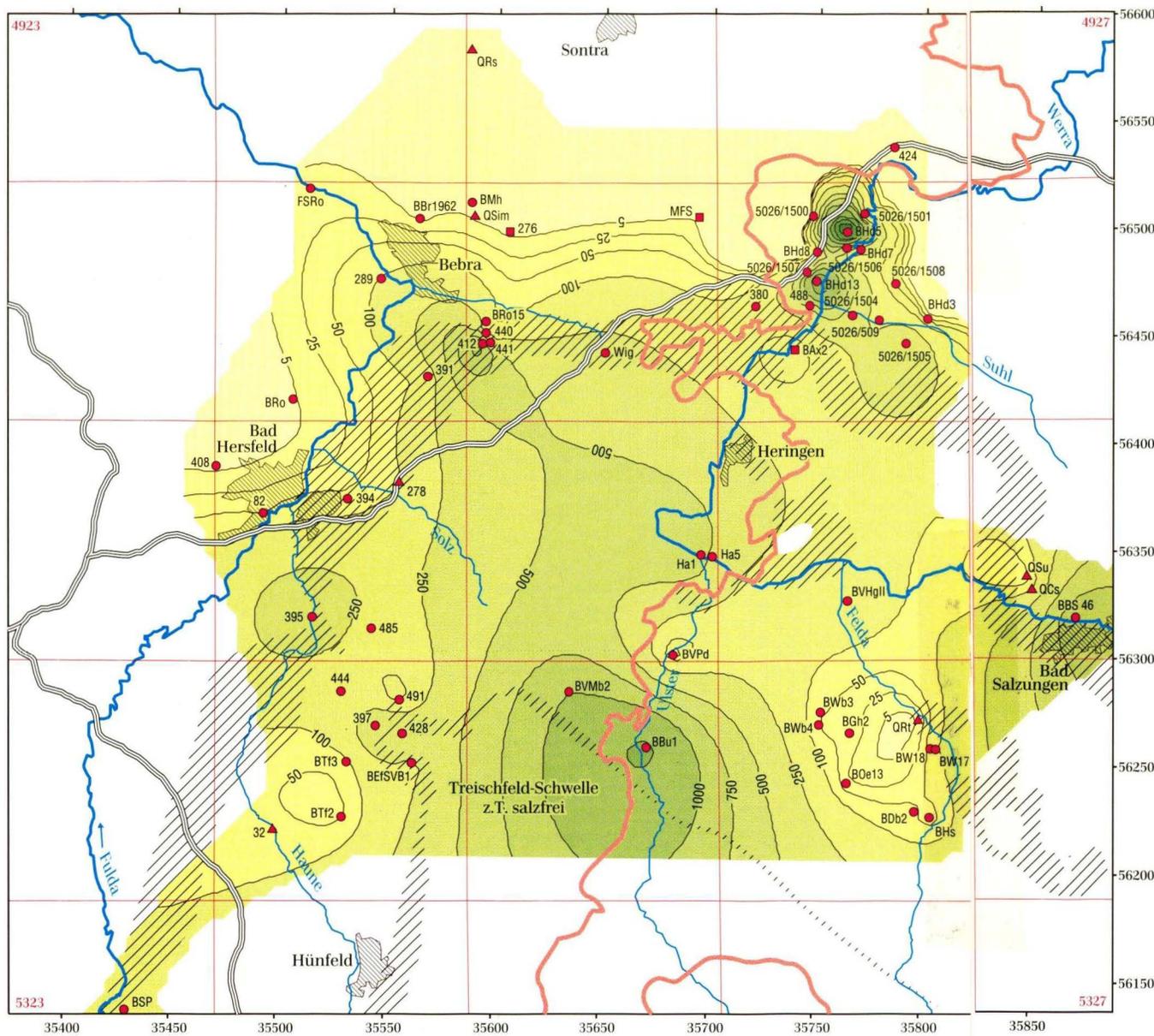
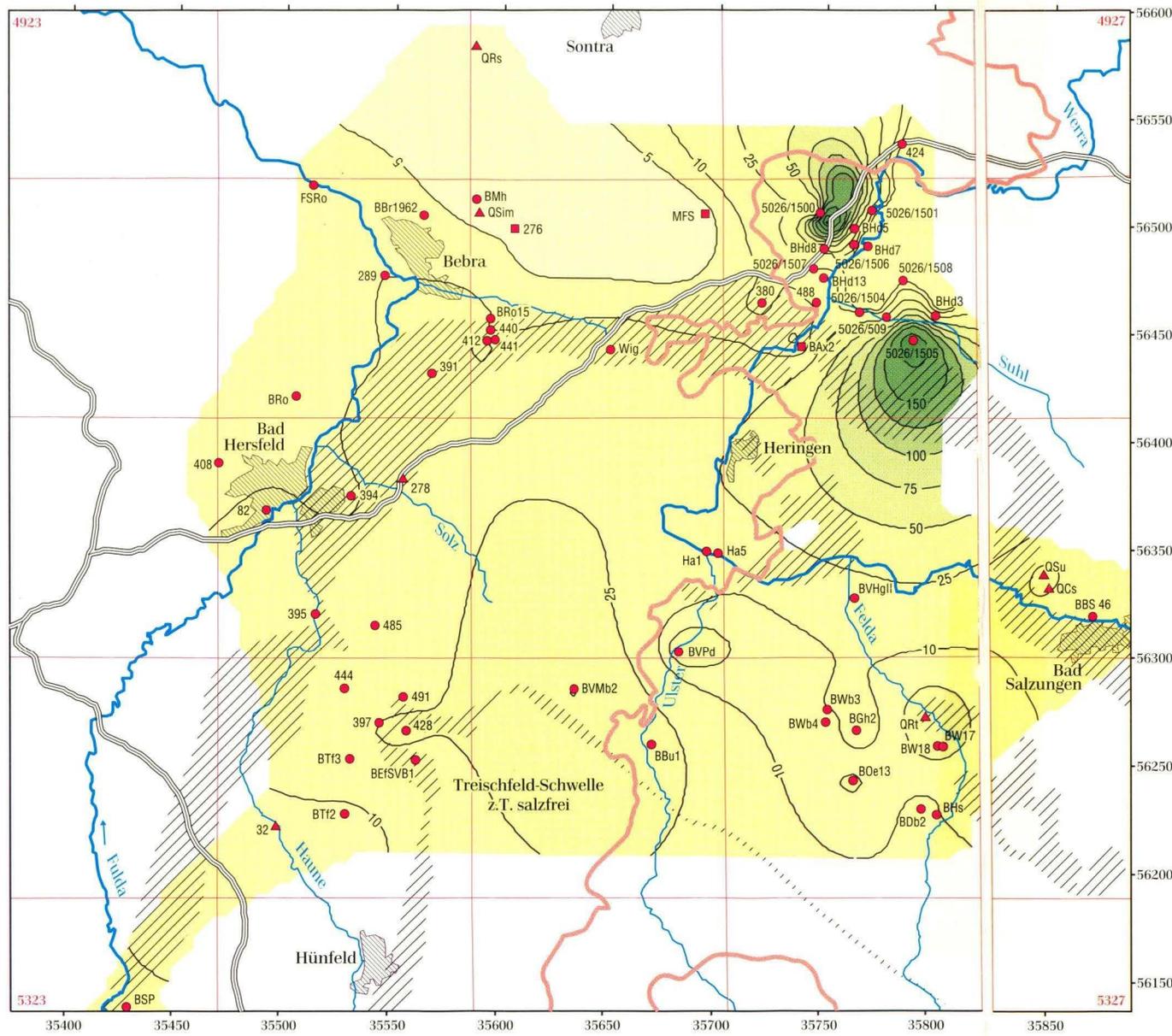


Abb. 6. Geogene Verteilung der Cl-Konzentrationen im Plattendolomit (Maßstab 1: 300 000).



 Bundesautobahn
 Grenze Hessen/Thüringen
 Salzhang und reduzierte Salzmächtigkeiten,
 in Hessen weitgehend basierend auf Angaben der Kali und Salz GmbH,
 in Thüringen in Anlehnung an Hoppe (1960)

 Quelle
 Brunnen/Bohrloch
 Schacht/Stollen

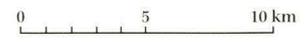
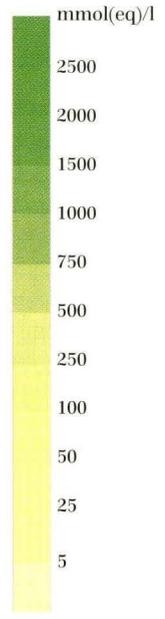


Abb. 7. Geogene Verteilung der Mg-Konzentrationen im Plattendolomit (Maßstab 1: 300 000).

zu prüfen, inwieweit die gemessenen Konzentrationen (C_{end}) durch Ionenaustauschprozesse beeinflusst wurden (s. Kap. 5.2.3). Wie aber oben bereits dargelegt, wird die Chloridkonzentration durch derartige Vorgänge nicht oder nur unwesentlich beeinflusst.

Bedingt durch unterschiedliche Rohsalzbeschaffenheit und veränderte Aufbereitungsverfahren wurde im Laufe der Salzabwasserversenkung chemisch unterschiedlich beschaffenes Salzabwasser versenkt (Kap. 3.2). Hieraus ergibt sich in begrenztem Umfang die Möglichkeit zur Abschätzung der Laufzeiten und Ausbreitungsgeschwindigkeiten für das Salzabwasser im Versenkhorizont. Die Grundlage hierfür bildet ebenfalls die allgemeine Mischungsgleichung in der oben beschriebenen Form.

Zur Durchführung der Mischungsrechnungen muß die Beschaffenheit des in Frage kommenden Salzabwassers, des unbeeinflussten Formationswassers am jeweils betrachteten Ort und in der zu untersuchenden Meßstelle (nachfolgend Prüfmessstelle genannt) bekannt sein. Für das in Hessen versenkte Salzabwasser wurden von der Kali und Salz GmbH Jahresdurchschnittsanalysen für das Kaliwerk Wintershall (1950–1994) und das Kaliwerk Hattorf (1960–1994) zur Verfügung gestellt. Für die Beschaffenheit des auf thüringischer Seite versenkten Salzabwassers wurde eine Jahresdurchschnittsanalyse aus dem Jahr 1968 herangezogen (TLFU). Hierdurch wurde nur das zuletzt im Jahr 1968 in größerem Umfang in Thüringen versenkte Salzabwasser berücksichtigt. Für das unbeeinflusste Formationswasser wurden nachweislich unbeeinflusste Analysen aus der Umgebung der Meßstelle, oder sofern vorhanden aus der Meßstelle selbst, herangezogen.

Zur Laufzeitbestimmung sind drei Arbeitsschritte erforderlich:

1. Mischung von Salzabwasser und Forma-

tionswasser bis zum Erreichen des Lösungsinhaltes der Prüfmessstelle. Dieser Arbeitsschritt wird mit jedem in Frage kommenden Salzabwasser für jeden möglichen Zeitraum durchgeführt.

2. Vergleich der chemischen Kennwerte im Mischwasser mit denjenigen in der Prüfmessstelle und Ermittlung der Salzabwassermischung mit der größten chemischen Übereinstimmung. Hierfür bietet sich ein rechnergestütztes Verfahren an. Die Laufzeit ergibt sich dann aus der zeitlichen Differenz zwischen dem Probenahmezeitpunkt für die Prüfmessstelle und für das Salzabwasser. Die zeitliche Auflösung des Verfahrens beträgt ein Jahr.

Die verwendete Methode liefert nur dann zuverlässige Ergebnisse, wenn keine wesentlichen chemischen Änderungen bei der Mischung von Salzabwasser und Formationswasser auftreten. Für den Grundwasserleiter Plattendolomit ist diese Bedingung im allgemeinen erfüllt (s.a. Kap. 5.2). Die größte Fehlerquelle resultiert aus der oftmals nur ungenügend bekannten Grundwasserbeschaffenheit des natürlichen Formationswassers im Bereich der Prüfmessstelle, die durch die Verwendung von Analysen aus der Umgebung möglicherweise nur ungenügend repräsentiert wird. Da die Lösungsinhalte des Formationswassers mit vorherrschenden Werten um 20–40 g/l erheblich unter denen des Salzabwassers mit Werten zwischen 280 und 350 g/l liegen, ist der Einfluß einer Spannweite in der Größenordnung von 20 g/l im Formationswasser auf die Zusammensetzung des Mischwassers begrenzt. Konsequenzen für die Genauigkeit der Mischwasserzusammensetzung ergeben sich hieraus lediglich für Gebiete mit deutlich abweichenden Lösungsinhalten, wie z.B. in Infiltrations- oder Salzablaugungsgebieten (Kap. 4.2.2).

3. Versenktätigkeit

3.1 Versenktätigkeit

Die Lage der Versenkgebiete und -brunnen ist in Abb. 9 dargestellt. Eine Übersicht über die bis 1995 versenkten Mengen gibt Abb. 8. Seit 1925 werden im Werra-Kaligebiet, beginnend mit einer Versenkbohrung bei Merkers, Salzabwasser in den Plattendolomit (Zechstein) versenkt. Im Jahre 1928 wurde die Versenkung im Versenkgebiet Philippsthal (Werk Hattorf, heutige Bezeichnung: Werk Werra, Standort Hattorf) und 1929 im Versenkgebiet Heringen (heutige Bezeichnung: Werk Werra, Standort Wintershall) aufgenommen. Neue Versenkräume wurden 1943 in der Auslaugungssenke Springen (NE Vacha), 1958 im Salzhanginnenbereich am Südrand der Hönebacher Senke bei Kleinensee (Werk Wintershall), 1959 in der Auslaugungssenke Horschlitt im Raum Gospenroda und 1964 im Gebiet Frauensee erschlossen. Der Versenkraum am Salzhanginnenbereich der Höne-

bacher Senke wurde 1967 durch Versenkbohrungen in den Gebieten Eichhorst/Bodesruh (Werk Wintershall) erweitert. Aufgrund der geologischen und hydrogeologischen Trennung des thüringischen Versenkraumes durch den NW-SE-verlaufenden Dippach-Tiefenorter Sattel wird ein nördlich davon gelegener Versenkraum mit den Versenkgebieten Gospenroda, Frauensee und teilweise Springen und ein südlich davon gelegener Versenkraum mit den Versenkgebieten Merkers-Dorndorf, Kaiserroda und teilweise Springen unterschieden.

Die Nutzung der Versenkbohrungen Heringen in der Werratalaue wurde 1967 eingestellt. In den thüringischen Versenkgebieten endete die Versenkung zwischen 1963 und 1968. Geringe Versuchsmengen wurden 1972-1974 noch in einigen Brunnen im Raum Gospenroda und Springen versenkt.

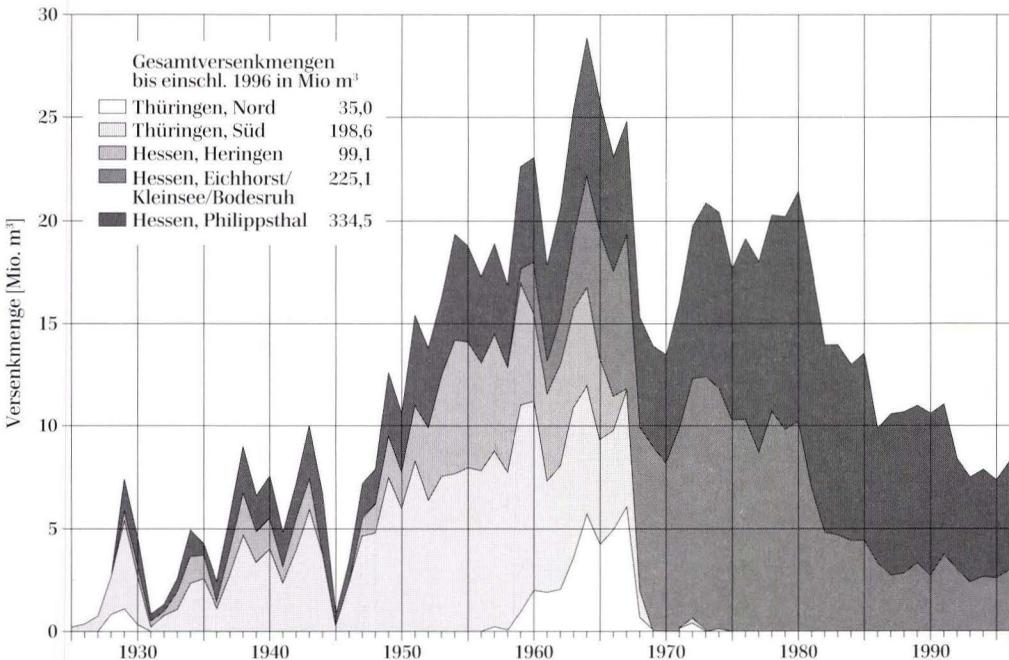
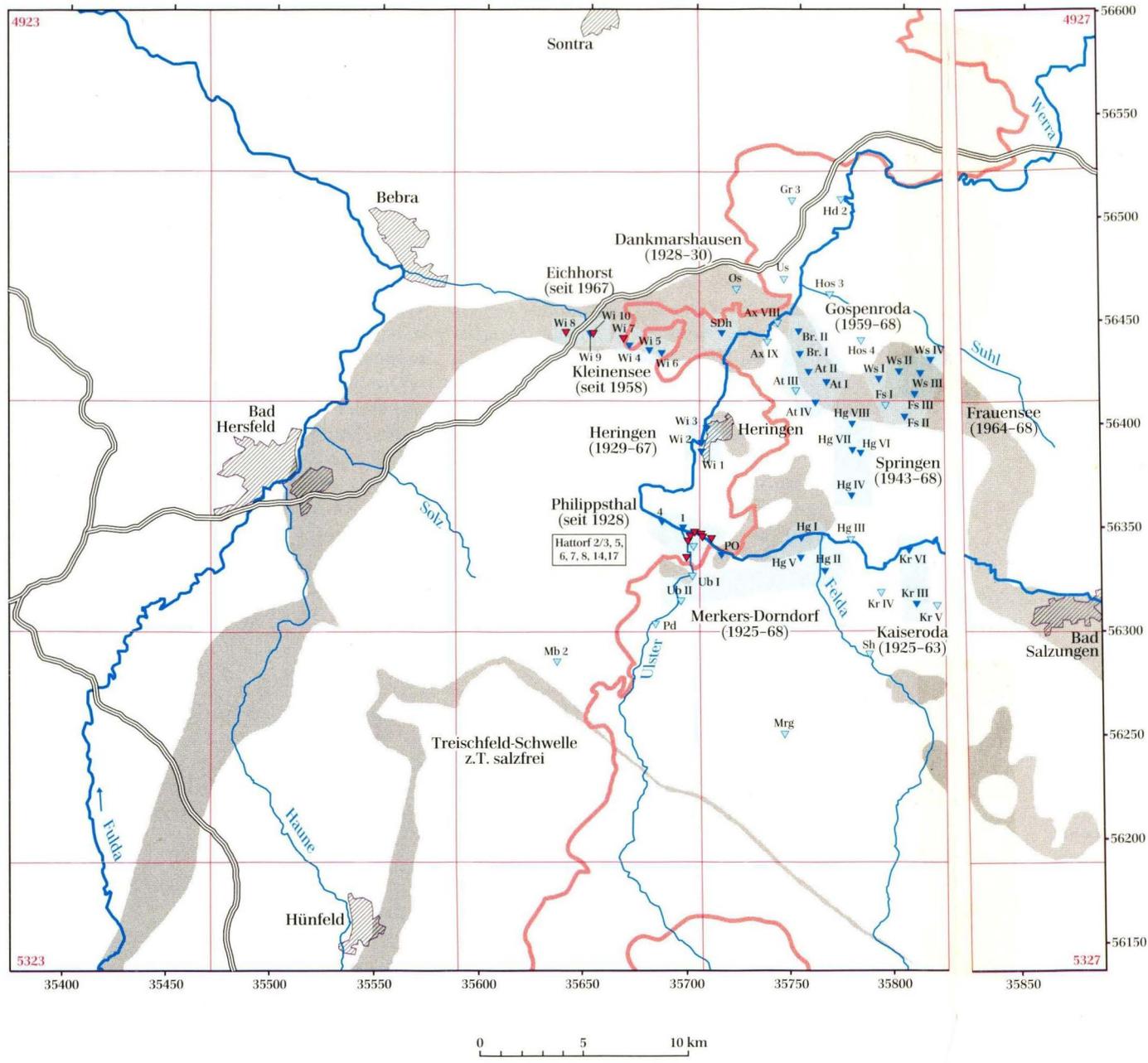


Abb. 8. Versenkmengen im Werra-Kaligebiet 1925-1996.



- Bundesautobahn
- Grenze Hessen/Thüringen
- Salzhang und reduzierte Salzmächtigkeit, in Hessen weitgehend basierend auf Angaben der Kali und Salz GmbH, in Thüringen in Anlehnung an Hoppe (1960)
- Versenkgebiet
- Versenkbrunnen in Betrieb
- Versenkbrunnen/-schacht mit 0–0,05 Mio. cbm Gesamtversenkmenge
- Versenkbrunnen/-schacht mit > 0,05 Mio. cbm Gesamtversenkmenge

Abb. 9. Lage der Versenkgebiete und Versenkbohrungen (Maßstab 1:300 000).

Die Versenkmengen erreichten mit 10 Mio m³/a erstmals 1943 ein Maximum; 1959 wurden 20 Mio m³/a überschritten (Abb. 8). Die versenkten Mengen reduzierten sich 1968 durch die Einstellung der Versenkung in Thüringen und seit 1981 durch die Einführung von abwasserarmen Aufbereitungsverfahren (ESTA) in der Kalisalzproduktion ganz wesentlich.

Auf hessischer Seite wurden nach Angaben des SaAbHe bis Ende 1997 rd. 667 Mio. m³ und in Thüringen nach Angaben der Thüringer Landesanstalt für Umwelt bis 1968 232 Mio. m³ Salzabwasser versenkt. In Hessen wurden ca. 99 Mio. m³ von der Gesamtversenkmenge im Gebiet Heringen versenkt. Die Verteilung der Versenkmengen auf die einzelnen Gebiete ist ebenfalls Abb. 8 zu entnehmen. Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR existierten insgesamt ca. 40

Versenkbohrungen, mehr als 90 % der Gesamtversenkmenge wurde jedoch in wenigen, besonders schluckfähigen Brunnen vorwiegend im südlichen Versenkgebiet versenkt (nach Dittich 1975 und Käbel 1984):

BVKr I, III und VI	91 Mio m ³ (südlicher Versenkraum Thüringen)
BVHg IV, VI und VII	78 Mio m ³ (südlicher Versenkraum Thüringen)
BVHg II, BVPhilOst	28 Mio m ³ (südlicher Versenkraum Thüringen)
BVAbtII, BVBrI	16 Mio m ³ (nördlicher Versenkraum Thüringen)
Summe	= 213 Mio. m ³ , entspr. 92 % der Gesamtversenkmenge in Thüringen

3.2. Beschaffenheit des versenkten Salzabwassers

Der im Vergleich zu anderen Kalisalzlagerstätten hohe Carnallitanteil (Carnallit: KCl·MgCl₂·6H₂O) im Rohsalz führt zwangsläufig zu einem hohen Anfall von Salzabwässern in den Werken. Das versenkte Salzabwasser resultiert überwiegend aus der Rohsalzaufbereitung. Die chemische Zusammensetzung wird wesentlich vom Rohsalz und vom verwendeten Aufbereitungsverfahren bestimmt. Daneben fällt in weit aus geringeren Mengen Siel- und Haldenwasser an, das nach Vermischung mit dem Produktionsabwasser teilweise zur Versenkung gelangt. Die Entwicklung der Salzabwasserbeschaffenheit ist in Abb. 10 als Prozentanteil der Äquivalentkonzentrationen der Ionen dargestellt.

Die gelösten Hauptbestandteile im Salzabwasser sind NaCl und vor allem bei carnallitreichen Rohsalzen MgCl₂, in geringeren Anteilen auch KCl und MgSO₄.

Bis Anfang der achtziger Jahre wurde vor allem NaCl-reiches Abwasser aus der nassen Rohsalzaufbereitung im Heißflöseverfahren versenkt. Für diesen Produktionsabschnitt sind die durchschnittlichen Abwasserzusammensetzungen

der verschiedenen Werke für das Produktionsjahr 1968 in Tab. 1 aufgeführt. Versenkt wurde Mg-reiches Na-(Mg)-Cl-Salzabwasser mit Lösungsinhalten von 280–300 g/l und Dichten zwischen 1,15 und 1,19 g/cm³. Die Mg-Äquivalentanteile betragen zwischen 12 und 37 %, K erreicht 2–4 % der Kationensumme. Bei den Anionen überwiegt Cl mit 93–95 % gegenüber 5–7 % SO₄.

Die Salzabwasserzusammensetzung änderte sich wesentlich nach Einführung der trockenen Rohsalzaufbereitung mit der elektrostatischen Aufbereitung, kurz ESTA, im Werk Wintershall ab 1976 und im Werk Hattorf ab 1981 sowie durch zunehmenden Einsatz der Flotationstechnik. Das nach Abschluß der ESTA-Einführung als Na-Mg-Cl- und Mg-Na-Cl-Salzabwasser einzustufende Abwasser mit einem Lösungsinhalt von 340–350 g/l und Dichten zwischen 1,25 und 1,29 g/cm³ hat erheblich höhere Mg- und K-Anteile und enthält momentan (1996) etwa 50 % Mg und 8–12 % K der Kationensumme. Bei den Anionen nimmt der SO₄-Anteil vor allem durch die Kieseritflotation auf 13–15 % zu. Nachfol-

gend wird Salzabwasser, das während oder nach der Einführung des ESTA-Verfahrens versenkt wurde, also für das Werk Wintershall ab 1976 und das Werk Hattorf ab 1981, als „Nach-ESTA“-Salzabwasser und entsprechend vorher versenktes Salzabwasser als „Vor-ESTA“-Salzabwasser bezeichnet. In Tab. 1 ist die durchschnittliche Zusammensetzung des Salzabwassers für das Produktionsjahr 1994 angegeben.

In den thüringischen Werken des Werra-Kaligebietes wurden die Rohsalze im Heißlöseverfahren mit anschließender Kieseritwäsche verarbeitet. Das bis 1968 versenkte Salzabwasser unterscheiden sich von den damaligen hessischen Salzabwässern vor allem durch ihre roh-salzbedingten hohen Magnesiumkonzentrationen, die in Hessen erst seit Umstellung auf das ESTA-Verfahren erreicht wurden (Tab. 1).

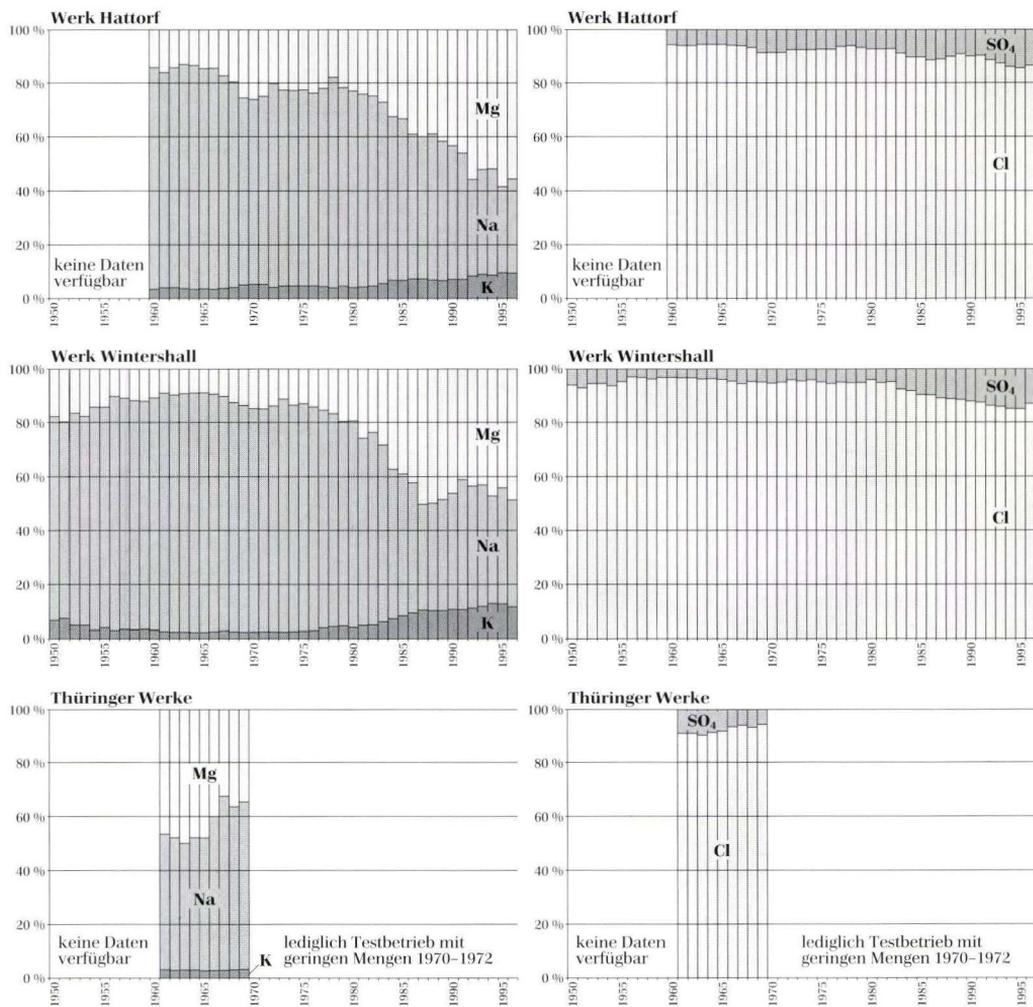


Abb. 10. Chemische Beschaffenheit (Äquivalentprozente) des versenkten Salzabwassers.

Tab. 1. Mittlere Zusammensetzung (jeweils bezogen auf ein Jahr) versenkter Salzabwässer für die Werke Hattorf und Wintershall in Hessen sowie für den ehemaligen VEB-Kalibetrieb Werra in Thüringen. Für die Werke Hattorf und Wintershall wurden zur Berechnung der Äquivalentanteile die Ca- und HCO₃-Konzentrationen mit 2,5 meq/l angesetzt

Herkunft		Werk Hattorf		Werk Wintershall		VEB Kalibetrieb Werra	
		1968	1994	1968	1994	1961	1968
Konzentrationen:							
K	meq/l	209	517	114	765	188	161
Na	meq/l	4034	2454	4188	2444	3197	3231
Ca	meq/l	2,5	2,5	2,5	2,5	5,3	6,1
Mg	meq/l	1006	3170	606	2851	2971	1989
Cl	meq/l	4893	5312	4659	5163	5485	4889
SO ₄	meq/l	357	830	249	897	432	282
HCO ₃	meq/l	2,5	2,5	2,5	2,5	5,3	6,1
Äquivalentanteile:							
K	%	4,0	8,4	2,3	12,6	3,0	3,0
Na	%	76,8	39,9	85,3	40,3	50,3	60,0
Ca	%	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
Mg	%	19,2	51,6	12,3	47,0	46,7	36,9
Cl	%	93,2	86,5	94,9	85,2	92,6	94,4
SO ₄	%	6,8	13,5	5,1	14,8	7,3	5,4
HCO ₃	%	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1

4. Übersicht über das Untersuchungsgebiet

Naturräumlich gesehen gehört das in Abb. 4 und 11 dargestellte Untersuchungsgebiet zum osthessischen Buntsandstein-Bergland und zum südwestthüringischen Buntsandsteinvorland des Thüringer Waldes.

Die nördliche Gebietsbegrenzung bildet das Richelsdorfer Gebirge mit Gesteinen des Zechstein an oder nahe der Erdoberfläche (Abb. 11). Am nordöstlichen und östlichen Rand verläuft der Thüringer Wald, dessen Südwestausläufer vorwiegend aus Gesteinen des Zechstein aufgebaut sind. Der Südrand des Gebietes wird durch Ausläufer der Kuppenrhön mit tertiären Basaltkup-

pen innerhalb einer hügeligen Muschelkalklandschaft gebildet. Im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes erstrecken sich die weiten Buntsandsteinlandschaften des Fulda-Haune-Berglandes sowie nach Nordwesten anschließend des Knüllgebirges. Den zentralen Teil zwischen Bebra und Schenklingfeld bildet die Buntsandsteinhügellandschaft des Seulingswaldes.

Im Untersuchungsgebiet überwiegen die Höhenlagen zwischen 250 und 400 m ü. NN. In die Buntsandsteinlandschaft schneiden die Täler der großen Vorfluter Werra und Fulda bis auf etwa 190–220 m ü. NN ein.

4.1 Geologie

Auf die geologische Entwicklung und tektonische Situation sowie die Lagerstätte im Werra-Kalibetrieb wird in mehreren Veröffentlichun-

gen eingegangen (u.a. Dietz 1928, Finkenwirth 1964, Jungwirth & Seifert 1966, Beer 1996). Einen großräumigen Überblick über die Höhenla-

ge der Zechsteinbasis und Schwellen und Senken zur Zeit des tieferen Zechsteins geben Kulick et al. (1984). Der Kenntnisstand zur fazi-

ellen Ausbildung des Plattendolomits ist umfassend in Füchtbauer (1964) und Möller (1985) dargestellt.

4.1.1 Stratigraphische Einheiten

Die wesentlichen stratigraphischen Einheiten im Werra-Kaligebiet sind dem Normalprofil in Abb. 2 zu entnehmen. In Abb. 11 ist die geologische Situation im Untersuchungsgebiet in einer Übersichtskarte zusammengestellt. Teilweise nicht dargestellt sind darin basaltische Vulkanite,

die während des Tertiärs vor allem im südlichen Untersuchungsgebiet schlot- oder gangförmig auf rheinisch bis eggisch streichenden Störungszonen empordrangen (Käding 1962, Knipping 1989).

4.1.2 Lagerungsverhältnisse, Tektonik und Subrosion

Die Lagerungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet sind anhand eines geologischen West-Ost-Schnittes in Abb. 12 dargestellt.

Das Werra-Kaligebiet gehört großtektonisch zum Werra-Fulda-Becken als einem Teil des Saar-Selke-Trogs bzw. Saar-Werra-Trogs, der im NW von der Hunsrück-Oberharz-Schwelle und im SE von der Spessart-Rhön-Schwelle begrenzt wird. In dem Teil des Beckens, das vom Untersuchungsgebiet eingenommen wird, liegen die Schichten des Zechsteins, Buntsandsteins sowie die jüngeren Folgen überwiegend in flacher bis flach geneigter Lagerung (Einfallen $< 10^\circ$) mit einem generellen Einfallen nach Süden bis Südwesten.

Die tektonische Beanspruchung der Schichten im Untersuchungsgebiet wurde vor allem durch saxonische Bruchtektonik mit vorherrschend herzynisch (NW-SE bis WNW-ESE) und rheinisch/eggisch (um Nord-Süd) streichenden Elementen bestimmt. Durch pseudotektonische Senkungen, die im Gefolge von Salzauslaugungsvorgängen auftraten, erfolgte eine erhebliche Überprägung dieser älteren tektonischen Anlage (Lange & Käding 1961). In Abb. 11 sind die wesentlichen Strukturelemente dargestellt.

Für die Salzabwasserverbreitung im Plattendolomit dürfte bedeutsam sein, daß größere Verwerfungen und Störungszonen oftmals in Richtung von Gebieten mit intaktem Salinar,

d.h. innerhalb der Salzhangverbreitung, auslaufen und daß generell diese Gebiete geringer tektonisch beansprucht sind. Ein Beispiel hierfür liefert der Verlauf des Hersfelder Grabens, der von Westen nach Osten verlaufend, östlich Katus am Salzhanginnenrand endet (Becker & Laemmlen 1994).

Die Zechsteinabfolge mit der Salzlagerstätte bildet eine nach Norden herausgehobene flache Mulde, deren Westflanke im Bereich des Hauene-/Fulda-Tales bzw. westlich davon und deren Ostflanke zwischen dem Feldatal und Berka verläuft. Im Gebiet der Treischfeld-Schwelle, wo es primär zu keiner bzw. nur geringmächtiger Salzablagerung kam, erreicht der Plattendolomit in der Eiterfelder Mulde mit etwa 600 m unter NN die größte Tiefe. Vereinzelt größere Senken mit Höhenlagen der Obergrenze des Plattendolomits bis 300 m unter NN finden sich an der Nordostflanke der Muldenstruktur mit der Gerstunger und Horschlitter Mulde, sowie im Westen mit der Hersfelder Senke. Diese Senken über dem Residualgebirge sind mit bis zu 50 m mächtigen quartären Lockergesteinen gefüllt.

Ein wesentliches und für die Ausbreitung von Salzabwasser im Untersuchungsgebiet wichtiges Strukturelement ist der Salzhang. Als solcher wird die geneigte Fläche zwischen vollständig erhaltenem Salz und vollständig ab-

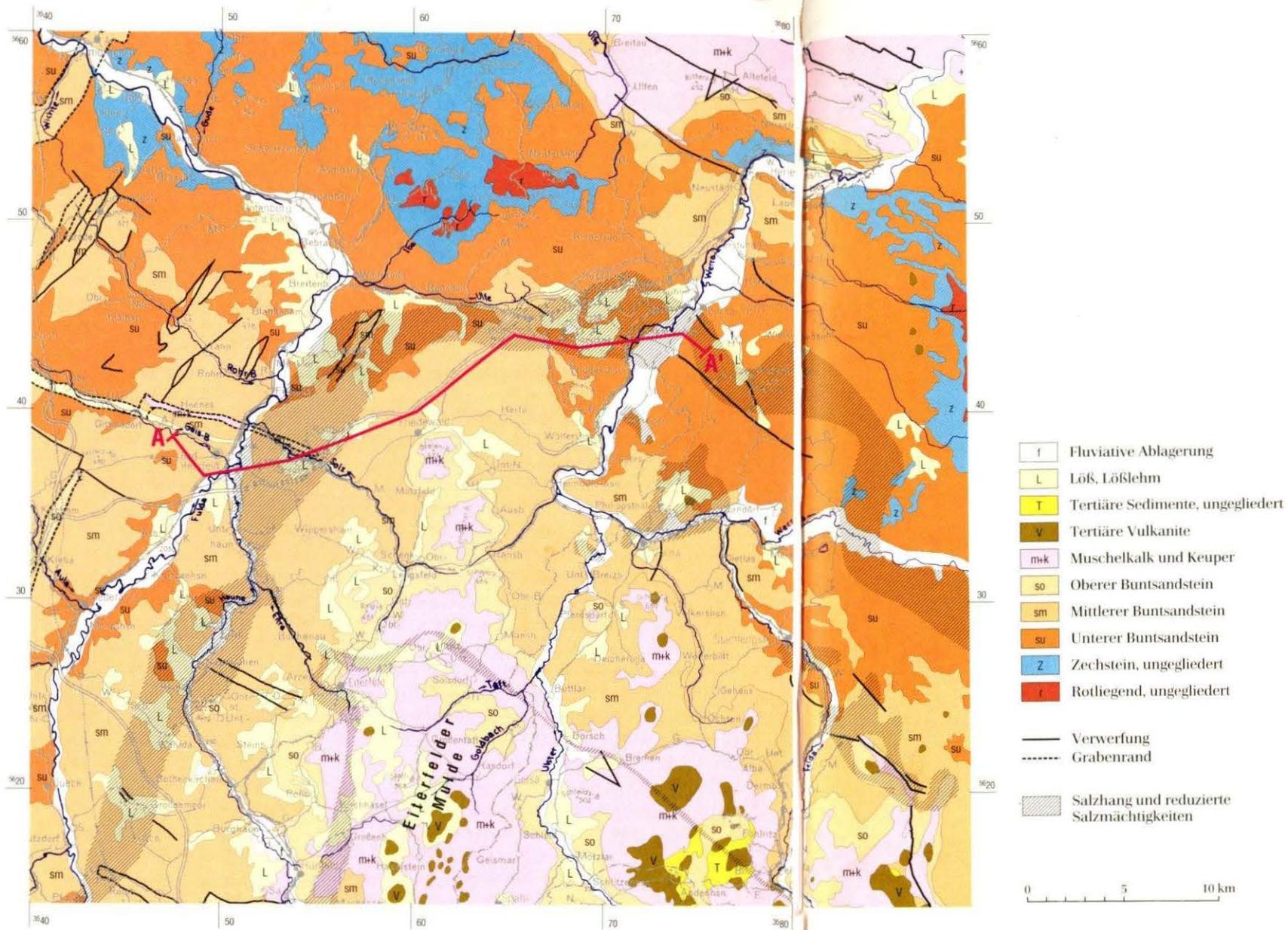


Abb. 11. Geologische Übersichtskarte 1:200 000 mit Lage des Geologischen Schnittes A-A'.

gelaugtem Salz bezeichnet (Fulda 1923). Vor allem am Salzhanginnenrand kam es zu einer intensiven Zerrüttung der Schichten oberhalb des Salinar mit entsprechender Klüftung und erhöhten Wasserwegsamkeiten. Über dem fast vollständig weggelösten Salinar im äußeren Teil des Salzhanges mit seinen ebenfalls intensiv zerrütteten, aber mit pelitischem Material verheilten Subrosionsbrekzien, kommt es dagegen zu einer deutlichen Verringerung der Wasserwegsamkeiten, so daß der Salzhangaußenrand als hydraulische Barriere wirkt. Der Verlauf des Salzhanges ist, zusammen mit den Bereichen primär und durch Auslaugung reduzierter Salzmächtigkeiten, in den Abb. 4, 6, 7, 9 und 11 dargestellt.

Der durch diffuse Einträge betroffene Abschnitt des Werratales gehört geologisch zum Salzhang. Die randliche Ab- und Auslaugung greift von Berka aus nach Süden in die Werraue von Widershausen vor. Das Deckgebirge ist durch Auslaugungsvorgänge zerrüttet und zerbrochen. Durch den hohen Zerrüttungsgrad bestehen zusammen mit der geringen Tiefenlage des Plattendolomit und der Häufung von Basaltgängen in diesem Gebiet besonders günstige Voraussetzungen für eine Druckentlastung des gespannten Grundwasserleiters Plattendolomit.

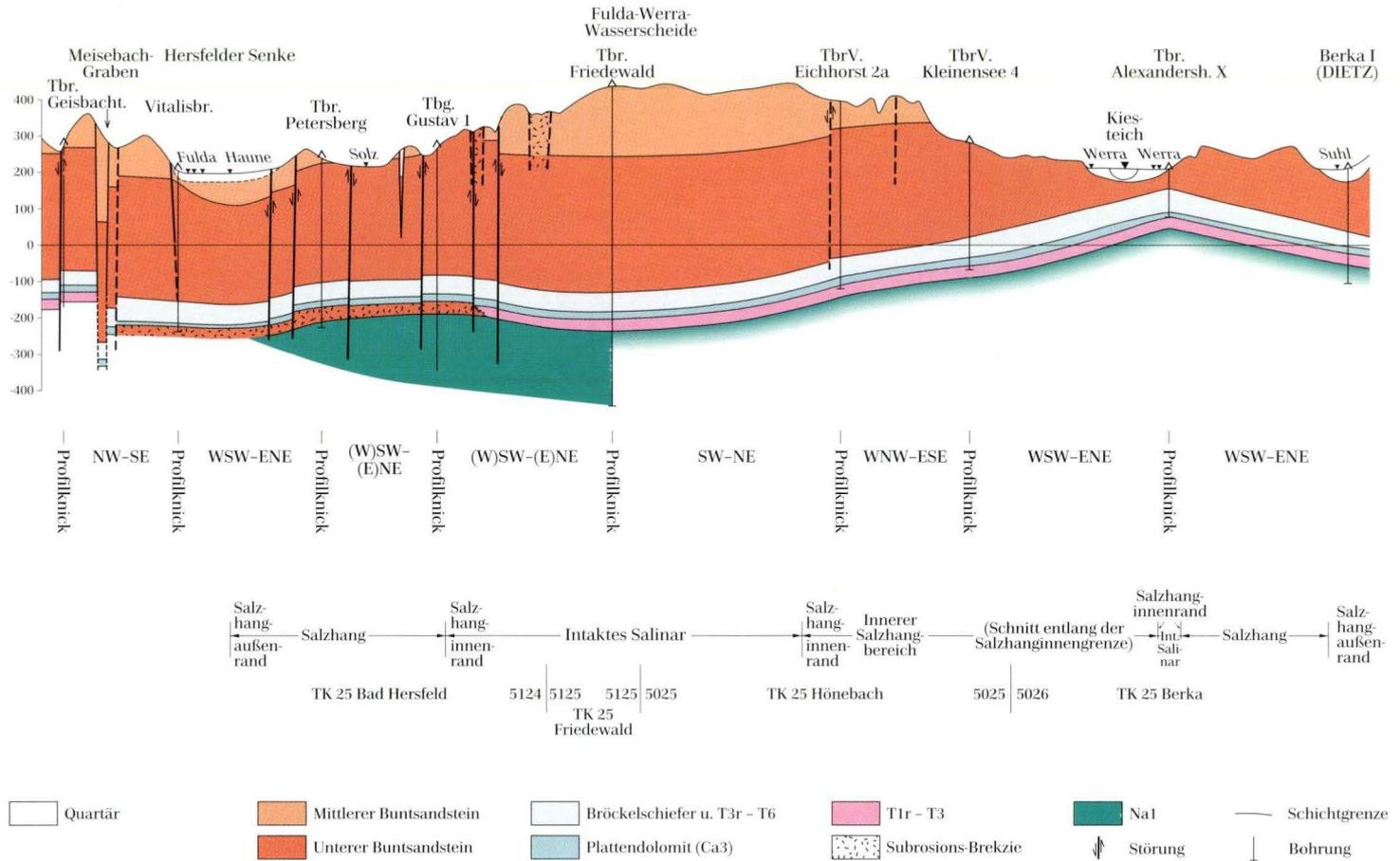


Abb. 12. Geologischer West-Ost-Schnitt A-A' im Werra-Kaligebiet.

4.2 Hydrogeologie

4.2.1 Hydraulik

Im Werra-Kaligebiet können drei Hauptgrundwasserleiter unterschieden werden (Abb. 2):

1. Der **Plattendolomit**, der durch seine Überlagerung mit schlecht durchlässigen Ton- und Schluffsteinen der ca. 10 m mächtigen Folge des Zechstein 3 bis 6 und der 35–40 m mächtigen Bröckelschieferfolge zum hangenden Buntsandstein großräumig abgedichtet ist. Das Liegende des Plattendolomits bilden ebenfalls schlecht durchlässige Ton- und Schluffsteine des Zechstein 1–3. Der Plattendolomit ist ein plattiger bis dünnbankiger Kalk- und Dolomitstein, der überwiegend gut geklüftet ist. Er ist ein Kluftgrundwasserleiter mit unterschiedlich hohen Anteilen an Porenhohlräumen und geringen Verkarstungserscheinungen.
2. Der **Mittlere und Untere Buntsandstein**, aufgebaut aus Sandsteinen und Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen, der vornehmlich ein Kluftgrundwasserleiter ist.
3. **Quartäre Lockersedimente** (Kies, Sand, Schluff) in Talfüllungen und Subrosionssenkungen, die örtlich einen Porengrundwasserleiter bilden. Dieser Porengrundwasserleiter steht in hydraulischer Verbindung mit dem Kluftgrundwasserleiter im Buntsandstein und ist nur gelegentlich und engräumig durch eine tonige Verwitterungsschicht am Top des Buntsandsteins von diesem hydraulisch getrennt. Örtlich können an der Basis des Quartärs noch tertiäre Lockergesteine auftreten, die hydraulisch an das Quartär gekoppelt sind. Dies ist z.B. im Gebiet von Bad Hersfeld der Fall.

Durch die Über- und Unterlagerung mit undurchlässigen Schichtfolgen ist das Grundwasser im **Plattendolomit** gespannt, teilweise sogar artesisch.

Die Grundwasserdruckfläche liegt geogen mehrere Zehnermeter über dem Niveau der

Hauptvorfluter Werra und Fulda. Dies ist ein Beweis für die Tatsache, daß Werra und Fulda nicht oder nur in engräumig begrenzten Gebieten direkte Vorfluter für den Grundwasserkörper im Plattendolomit sind. Die Grundwasserneubildung, die sicher sehr gering ist, erfolgt wohl teilweise an den Zechsteinausbissen im Thüringer Wald. Aus der Druckverteilung wird ersichtlich, daß ein Teil der Grundwasserneubildung auch in der Rhön erfolgen muß. In großen Gebieten, insbesondere in der Eiterfelder Mulde, ist von sehr geringen Grundwasserbewegungen auszugehen.

Durch die Versenkttätigkeit wird die Grundwasserdruckfläche lokal angehoben. Im unmittelbaren Versenkbereich betragen die Druckdifferenzen zwischen Versenkpausen und Versenkttätigkeit 3 bar und mehr, hier kommt es zum Aufbau eines Druckkegels. Die Reichweite des Druckkegels beträgt zwischen 5 und 12 km. Durch die hydraulische Barrierewirkung des äußeren Salzhangbereiches mit seinen intensiv zerrütteten, brekzierten und anschließend kompaktierten Gesteinen kommt es hier i.a. zu einer lateralen Begrenzung der Druckauswirkungen.

Ein Grundwasseraufstieg aus dem Versenkhorizont in den **Buntsandstein** oder an die Tagesoberfläche kann aufgrund der abdichtenden Wirkung der Grundwassernichtleiter im Zechstein 3–6 und im Bröckelschiefer nur kleinräumig in Gebieten mit tiefgreifenden tektonischen oder salinartektonischen Störungen stattfinden. Insbesondere im Gebiet des hydraulisch gut durchlässigen Salzhanginnenrandes ist bei dem Zusammentreffen von geringer Tiefenlage des Plattendolomits, tiefen Geländeeinschnitten und zusätzlichen saxonischen Störungen (auch in Verbindung mit Basaltgängen) mit einem Salzwasseraufstieg aus dem Plattendolomit zu rechnen. Beispiele hierfür sind das Gebiet Breitzbachs-Mühle sowie das Werratal bei Tiefenort und zwischen Heringen und Berka. Salzwasseraufstiege in den Buntsandstein oder an die Tagesoberfläche in Be-

reichen des intakten Salinars außerhalb von Subrosionsgebieten sind nicht bekannt.

Für den zur Trinkwasserversorgung genutzten Kluftgrundwasserleiter im Buntsandstein sind im Gegensatz zum Plattendolomit die Werra und Fulda, teilweise auch die Nebengewässer, unmittelbar Vorfluter. Die Grundwasseroberfläche fällt mit einer Neigung von ca. 1:50 bis 1:100 vom Gebirge in Richtung der Vorfluter ab. Dadurch ist die Grundwassermächtigkeit bzw. Süßwasserauflast im Gebirge am größten und nimmt in Richtung zu den Tälern ab. Dies begünstigt generell einen Salzwasseraufstieg in Tälern. Im Bereich des Werratales mit seinem geringen hydraulischen Potential im Buntsandstein kommt es durch die geringe Süßwasserauflast bei geringem Flurabstand des Versenkhorizontes und intensiver Gebirgszerrüttung am Salzhang zu einem natürlichen Salzwasserübertritt in den Buntsandstein. In den tieferen Bereichen des Buntsandstein kann das Grundwasser durch einen örtlich über tiefgreifende Störungen möglichen Aufstieg von Salzwasser aus dem Zechstein geogen höher mineralisiert sein. Verschiedene tiefe Brunnen im Buntsandstein in Bad Hersfeld sind ein Beispiel hierfür. Im Bereich des nördlichen Salzhanginnenrandes kommt es lokal begrenzt zu einem Übertritt von Salzwasser aus dem Plattendolomit [Brunnen 365, 366 und 386, Quelle QBM (278)].

Das Grundwasser ist in den **quartären Porengrundwasserleitern** im Bereich des Werra- und Fuldatales durch die abdichtende Auen-

Lehmdecke gespannt, teilweise artesisch. Salzwasser, das lokal aus dem Plattendolomit in den Buntsandstein-Grundwasserleiter übergetreten ist, kann durch die hydraulische Kommunikation der quartären Grundwasserleiter mit dem Buntsandstein-Grundwasserleiter weiter bis in den quartären/tertiären Grundwasserleiter aufsteigen. Im Werratal bei Tiefenort und zwischen Heringen und Dankmarshausen kommt es zu einem Salzwasseranstieg bis zur Sohle der Vorfluter; das Salzwasser tritt hier diffus in den Vorfluter ein. In diesen Salzwasseraufstiegsgebieten besteht ein empfindliches Gleichgewicht zwischen dem an Talrändern aus der Grundwasserneubildung zufließenden süßen Grundwasser und den aus dem Plattendolomit übertretenden Salzwasser. Es kommt zur Ausbildung einer oberen Süßwasserschicht aus gering konzentriertem Grundwasser über einer Salzwasserschicht aus hochkonzentriertem Mischwasser von Formationswasser mit Salzabwasser. Die Mächtigkeit der Süßwasserschicht ist stark von Niederschlagsereignissen, Wasserständen in natürlichen und künstlich geschaffenen Vorflutern (Kiesseen mit Abflüssen, Meliorationsgräben) sowie von der Höhenlage der Grundwasserdruckfläche im Plattendolomit abhängig. Dadurch schwanken die diffusen Einträge in ihrer Höhe.

Im Einzugsgebiet der Fulda sind – mit Ausnahme der historischen Salzwasserquellen in Bad Hersfeld und bei Burghaun – keine Salzwasseraufstiege in den Porengrundwasserleiter bekannt.

4.2.2 Hydrogeochemie

Die **quartären** Porengrundwasserleiter führen im durch die Versenkung unbeeinflussten Zustand gering konzentriertes Süßwasser mit Gesamtlösungsinhalten unter 0,4 g/l. Die Hauptkomponenten im Grundwasser sind Ca und Mg, HCO_3 und SO_4 . In Tab. 2 sind zwei typische Analysen des gering konzentrierten Grundwassers aus Quartärmeßstellen im Werratal (Grundwassermeßstelle 454) und im westlich angrenzenden Bergland (Quelle 174) aufgeführt. Eine Aus-

nahme von dem allgemein geringen Konzentrationsniveau ist für die Grundwassermeßstelle 24 in der Werratalaue bei Heringen belegt. Hier sind bereits zu Beginn der Beobachtung im Jahr 1930, kurz nach der verstärkten Aufnahme der Versenkung im Jahr 1929 (Abb. 8), erhöhte Salzkonzentrationen nachweisbar, die auf eine Beeinflussung durch Formationswasser aus dem Plattendolomit zurückzuführen sind (Tab. 2).

Am Beispiel der Analyse aus der Grundwas-

sermeßstelle 24 wird deutlich, daß mit der Zumischung salzreichen Grundwassers eine Erdalkalisierung verbunden ist (s. Kap. 4.2.3). Hinweise hierauf geben die im Vergleich zu geogenem Formationswasser aus dem Plattendolomit hohen EA : A(Erdalkalien : Alkalien)- und Cl : Na-Verhältnisse. Für den Zeitpunkt der Probenahme läßt sich die durch Ionenaustausch freigesetzte Menge an Erdalkalien als Differenz $C_{Cl} - (C_{Na} + C_K)$ mit 16 meq/l abschätzen.

Das Grundwasser im **Buntsandstein** ist in den Gebieten über intaktem Salinar und einer durchgehenden hydraulischen Trennung vom Grundwasserleiter Plattendolomit ebenso wie das quartäre Grundwasser meist gering konzentriert. Im tiefen Unteren Buntsandstein sind die Konzentrationen oftmals höher. Beim Teufen des Schachtes Neurode wurden z.B. mehrere 10 g/l („Soole“ laut Teufbericht) im Unteren Buntsandstein gefunden. Ein Pumpversuch im Unteren Buntsandstein an der Grundwassermeßstelle 523 (Salzhanginnenrand bei Bad Hersfeld) im Jahre 1996 erbrachte einen Gesamtlösungsinhalt von 2,9 g/l. Die Konzentrationen liegen aber in den höheren Bereichen des Buntsandstein-Grundwasserleiters überwiegend unter 1 g/l und erreichen nur bei Beteiligung von Gipsablaugungswasser bis zu 2,5 g/l. Als Richtwert für die Grundwasserbeschaffenheit können die Durchschnittswerte in der Tab. 3 herangezogen werden. Darin ist die durchschnittliche Beschaffenheit von gering konzentrierten Grundwässern im Buntsandstein des Fuldagebietes mit weniger als 2 meq/l Cl (71 mg/l) angegeben. Im Einzugsgebiet der Fulda fällt mit 62 von insgesamt 81 ausgewerteten Meßstellen die überwiegende Zahl der Fälle in diese Kategorie. Der Tab. 3 ist zu entnehmen, daß gering konzentriertes Grundwasser im Buntsandstein überwiegend Ca und Mg auf der Kationenseite und HCO_3 und SO_4 auf der Anionenseite enthält. Die beträchtlichen Spannweiten für die meisten der aufgeführten chemischen Kennwerte sind vor allem darauf zurückzuführen, daß keine Unterscheidung in Untergruppen wie z.B. Quellen, Brunnen, Unterer Buntsandstein und Mittlerer Buntsandstein vorgenommen wird.

Bei einem Übertritt von Formationswasser aus dem Plattendolomit in den Buntsandstein kommt es schon bei geringen Formationswasseranteilen zu einem beträchtlichen Anstieg der Konzentrationen. Durch den Zutritt natürlichen Salzwassers werden vor allem Na und Cl zugeführt. Hieraus resultiert ein starker Anstieg der Cl : SO_4 -Verhältnisse. Ähnlich wie in den quartären Grundwasserleitern werden auch im Buntsandstein in begrenztem Umfang sorbierte Erdalkalien durch Austausch gegen gelöstes Na aus

Tab. 2. Geogene Grundwasserbeschaffenheit in ausgewählten Quartärmeßstellen

		Quelle 174	GWM 454	GWM 24
Probenahmedatum		30.08.94	06.11.57	27.10.30
Konzentrationen:				
K	meq/l	0,05	0,14	1,4
Na	meq/l	0,39	0,65	35
Ca	meq/l	1,2	1,7	23
Mg	meq/l	0,66	1,2	8,3
Cl	meq/l	0,62	1,4	52
SO_4	meq/l	1,0	0,46	7,6
HCO_3	meq/l	0,70	1,9	4,5
fCO_2	g/l	3,8		
Gesamthärte	meq/l	1,8	2,9	31
Summe gelöster Bestandteile				
	g/l	0,15	0,25	3,9
Ionenverhältnisse:				
Ca : Mg		1,7	1,3	2,7
Na : K		7,7	4,8	25
Cl : SO_4		0,62	3,0	6,9
K : Ca		0,04	0,08	0,06
Na : Mg		0,59	0,53	4,3
Cl : Mg		0,94	1,1	6,3
EA : A		4,1	3,7	0,83
Cl : Na		1,58	2,12	1,48
Äquivalentanteile:				
K	%	2,3	3,7	2,1
Na	%	17,4	17,8	52,2
Ca	%	51,0	44,9	33,3
Mg	%	29,3	33,7	12,3
Cl	%	26,7	37,1	81,2
SO_4	%	43,1	12,3	11,8
HCO_3	%	30,2	50,6	7,0

dem Grundwasserleitermaterial mobilisiert. In Tab. 4 sind typische Analysen von Buntsandstein-Grundwasser aufgeführt, daß durch den Übertritt natürlichen Formationswassers beeinflusst ist.

Die Zumischung von Salzwasser in den Grundwasserleiter Buntsandstein ist ebenso wie im Quartär mit einer Erdalkalisierung verbunden, die im Brunnen 366 zu einer Freisetzung von ca.

18 meq/l und im Brunnen 21 zu einer Freisetzung von ca. 88 meq/l Erdalkalien führt (s. Kap. 4.2.3). Im ersten Fall wurden etwa 40 % und im zweiten Fall 50 % der durch Salzwasser eingebrachten Na-Konzentration durch Ionenaustausch verbraucht und etwa 1/3 dieser Menge als gelöstes Mg in die Lösung freigesetzt. Dieser Prozeß kann bei der Identifizierung von geringen

Tab. 3. Grundwasserbeschaffenheit in Buntsandstein-Meßstellen im Fuldagebiet. Die Angaben basieren auf Analysen aus 62 Meßstellen (Quellen und Brunnen) im Mittleren und Unteren Buntsandstein mit Cl-Konzentrationen unter 2 meq/l, entspr. 71 mg/l. Die Fehlerangabe für den Mittelwert bezieht sich auf die einfache Standardabweichung

		Mittelwert	Min.	Max.
Konzentrationen:				
K	meq/l	0,10 ± 0,11	0,041	0,56
Na	meq/l	1,2 ± 2,7	0,22	14
Ca	meq/l	3,8 ± 5,1	0,53	28
Mg	meq/l	1,6 ± 1,4	0,39	7,8
Cl	meq/l	0,67 ± 0,49	0,15	1,8
SO ₄	meq/l	2,4 ± 5,6	0,10	30
HCO ₃	meq/l	2,9 ± 1,7	0,30	7,9
Gesamthärte	meq/l	15 ± 18	2,7	101
Summe gelöster Bestandteile	g/l	0,47 ± 0,54	0,13	2,5
Ionenverhältnisse:				
Ca : Mg		2,0 ± 0,75	0,90	5,0
Na : K		9,1 ± 8,3	0,62	48
Cl : SO ₄		0,94 ± 0,74	0,01	4,2
K : Ca		0,04 ± 0,05	0,01	0,34
Na : Mg		0,63 ± 0,75	0,07	4,4
Cl : Mg		0,63 ± 0,61	0,04	2,9
EA : A		7,8 ± 7,6	0,66	50
Cl : Na		1,2 ± 0,57	0,09	2,9
Äquivalentanteile:				
K	%	2,2 ± 2,3	0,4	16,0
Na	%	14,2 ± 10,9	1,6	59,1
Ca	%	54,4 ± 11,2	0,5	78,4
Mg	%	29,4 ± 8,2	0,4	52,6
Cl	%	18,6 ± 15,8	0,2	63,4
SO ₄	%	26,0 ± 20,7	0,1	89,4
HCO ₃	%	55,4 ± 22,9	0,3	90,2

Tab. 4. Durch Formationswasser aus dem Plattendolomit beeinflusste Brunnen im Buntsandstein 366 und 21 und durch ein Formations-/Salzabwassergemisch beeinflusste Buntsandsteinquelle 31 in Widdershausen

		Brunnen 366	Brunnen 21	Quelle 31
Probenahmedatum		26.10.78	19.12.78	25.09.78
Konzentrationen:				
K	meq/l	0,19	0,72	89
Na	meq/l	27	86	2957
Ca	meq/l	16	63	48
Mg	meq/l	12	42	447
Cl	meq/l	44	175	3140
SO ₄	meq/l	6,7	18	160
HCO ₃	meq/l	3,4	0,30	7,9
Gesamthärte	meq/l	27	105	495
Summe gelöster Bestandteile	g/l	3,18	10,8	194
Ionenverhältnisse:				
Ca : Mg		1,3	1,5	0,11
Na : K		141	120	33
Cl : SO ₄		6,6	9,7	20
K : Ca		0,01	0,01	1,9
Na : Mg		2,3	2,1	6,6
Cl : Mg		3,8	4,2	7,0
EA : A		1,0	1,2	0,16
Cl : Na		1,66	2,03	1,06
Äquivalentanteile:				
K	%	0,3	0,4	2,5
Na	%	49,2	45,0	83,5
Ca	%	28,8	32,8	1,4
Mg	%	21,6	21,9	12,6
Cl	%	81,5	89,3	95,1
SO ₄	%	12,3	9,2	4,8
HCO ₃	%	6,2	1,6	0,1

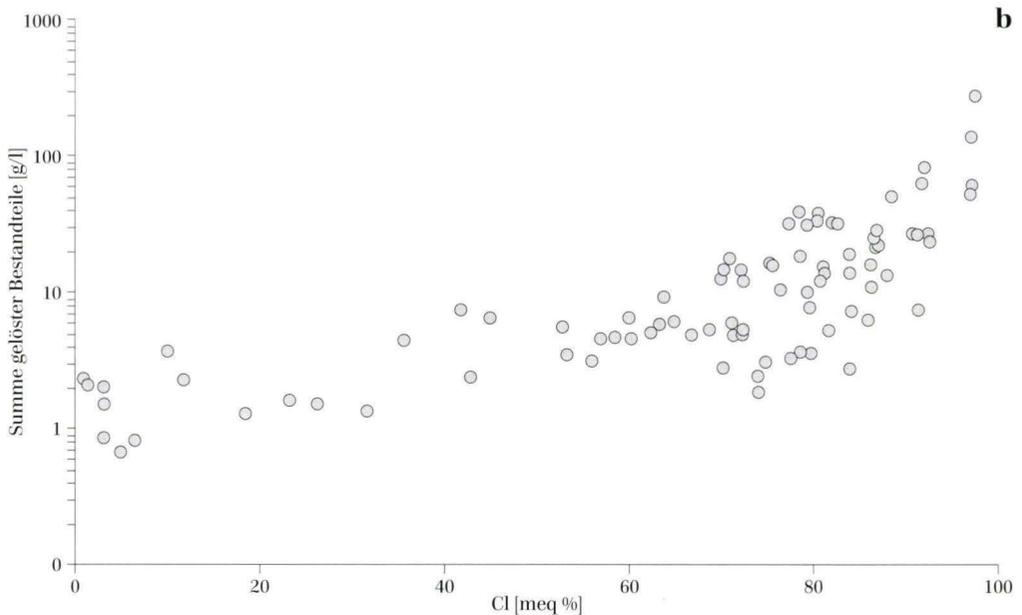
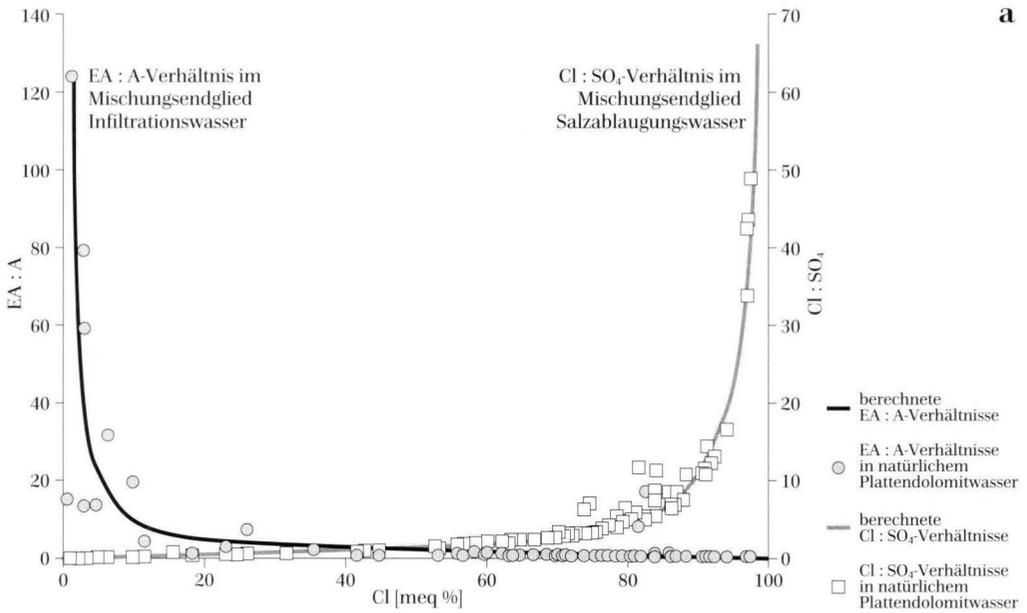


Abb. 13. a) In natürlichem Formationswasser gemessene und durch Mischung von Infiltrations- und Salzablaugungswasser berechnete Cl : SO₄- und Erdalkalien : Alkalien-Verhältnisse.
 b) Beziehung zwischen der Summe gelöster Bestandteile und dem Cl-Äquivalentanteil im natürlichen Formationswasser aus dem Plattendolomit.

Salzabwassermengen in zugeführtem Salzwasser relevant werden und ist bei jeder Typisierung im Einzelfall zu überprüfen (s. Kap. 5.3.1).

Bei Beteiligung von Salzabwasser wird neben Na und Cl noch Mg und in geringerem Umfang K und SO_4 zugeführt. Hierdurch nehmen insbesondere die Ionenverhältnisse für Ca : Mg, Na : K und das Erdalkali : Alkali-Verhältnis (EA : A) ab und Cl : SO_4 zu. Ein Beispiel für die Grundwasserbeschaffenheit bei Beteiligung von ca. 60 % „Vor-ESTA“-Salzabwasser zeigt die Analyse der Buntsandsteinquelle 31 in Tab. 4.

Die Beschaffenheit des Grundwassers im **Plattendolomit** schwankt beträchtlich von Süßwasser mit Gesamtlösungsinhalten von weniger als 1 g/l und Cl-Konzentrationen unter 5 meq/l (180 mg/l) in Grundwasserneubildungsgebieten bis hin zu hochkonzentriertem Salzwasser mit Gesamtlösungsinhalten von mehr als 100 g/l und Cl-Konzentrationen über 4000 meq/l (142 g/l) im Einfluß von Subrosionsgebieten. In den Abb. 6 und 7 ist die geogene Verteilung der Cl- und Mg-Konzentrationen im Grundwasserleiter Plattendolomit dargestellt.

Die Beschaffenheit des Formationswassers aus dem Plattendolomit wird wesentlich durch den Anteil von Lösungen aus der Ablaugung des Werra-Salinars geprägt. Sie läßt sich darstellen als eine Mischungsreihe von süßem Infiltrationswasser, wie es in den Grundwasserneubildungsgebieten im Richelsdorfer Gebirge und Thüringer Wald auftritt, mit hochkonzentriertem Salzablaugungswasser, das durch Werra-

Steinsalz-Subrosion am Salzhang oder in Subrosionssenken entstanden ist. Hierbei ergeben sich in dem jeweiligen Mischwasser je nach Anteil des Ablaugungswassers typische Konzentrationen und Ionenverhältnisse.

In Abb. 13a sind die theoretisch bei einer Mischung von Infiltrations- und Salzablaugungswasser zu erwartenden, sowie die tatsächlich im Untersuchungsgebiet vorkommenden Ionenverhältnisse Cl : SO_4 und EA : A über den Cl-Äquivalentanteil dargestellt. Für das Infiltrationswasser wurde eine Analyse aus dem im Richelsdorfer Gebirge (276) mit extrem niedrigen Cl-Äquivalentanteilen (1,4 %) herangezogen. Das Salzablaugungswasser wird durch eine Analyse aus der Solebohrung 4 (27 %ige Sole) in Bad Salungen repräsentiert. Der Abb. 13 ist zu entnehmen, daß diese für die Grundwasserbeschaffenheit wesentlichen Ionenverhältnisse mit hinreichender Genauigkeit als Funktion des Chlorid-Äquivalentanteiles darstellbar sind. Der Chlorid-Äquivalentanteil wiederum prägt entscheidend den Gesamtlösungsinhalt im Formationswasser (Abb. 13b). Somit kann die Grundwasserzusammensetzung für das Formationswasser im Untersuchungsgebiet mit dem angeführten Mischungsmodell erklärt werden. Auf der Grundlage dieser Überlegungen wurde eine Klassifizierung des geogenen Formationswassers in Gruppen mit ähnlicher Grundwasserbeschaffenheit vorgenommen. Hierauf wird im Kap. 5.3.2 eingegangen.

5. Ausbreitung von Salzabwasser im Untersuchungsgebiet

5.1 Hydraulische Grundlagen

5.1.1 Plattendolomit

Die Ausbreitung von schwerem Salzabwasser mit Dichten zwischen 1,15 und 1,29 g/cm³ im Versenkhorizont Plattendolomit wird wesentlich durch drei Faktoren bestimmt:

- gravitatives Fließen des Salzabwassers in Richtung des größten Gefälles (Einfallen) der Grundwassersohlfäche (Plattendolomituntergrenze),

- Strömung in Richtung des größten Gefälles der Grundwasserdruckfläche, d.h. senkrecht zu den Grundwasserisohypsen,
- räumliche Verteilung des durchflußwirksamen Hohlraumanteiles im Grundwasserleiter.

Die Ausbreitungsrichtung des Salzabwassers ergibt sich aus dem resultierenden Richtungsvektor der beiden ersten Größen und dem durchflußwirksamen Hohlraumanteil des Plattendolomit in der Ausbreitungsrichtung (Abb. 14). Letzterer ist abhängig von der faziellen Ausbildung und der tektonischen und atektonischen Beanspruchung am jeweiligen betrachteten Ort. Bei ungünstigen Voraussetzungen im Grundwasserleiter, wie z.B. annähernd dichter fazieller Ausbildung und fehlendem Klufthohlraum, kann es zu einer völligen Umkehr von der hydraulisch vorgezeichneten Ausbreitungs-

richtung und zu einem Druckstau kommen.

Bei der Versenkung von Salzabwasser ist für den Nahbereich der Versenkbohrung von einer nahezu vollständigen Verdrängung des ursprünglich im Grundwasserleiter vorhandenen Formationswassers auszugehen. Mit zunehmender Entfernung vom Versenkstandort unterschichtet das Salzabwasser aufgrund seiner höheren Dichte das Formationswasser. Da beide Flüssigkeiten auch miteinander mischbar sind, kommt es zur Ausbildung einer Mischungs- und Verdrängungszone, deren Mächtigkeit mit zunehmender Entfernung vom Versenkgebiet zunimmt. In Abb. 15 sind die hydrodynamischen Vorstellungen zur Salzabwasser-ausbreitung im Versenkhorizont schematisch zusammengefaßt.

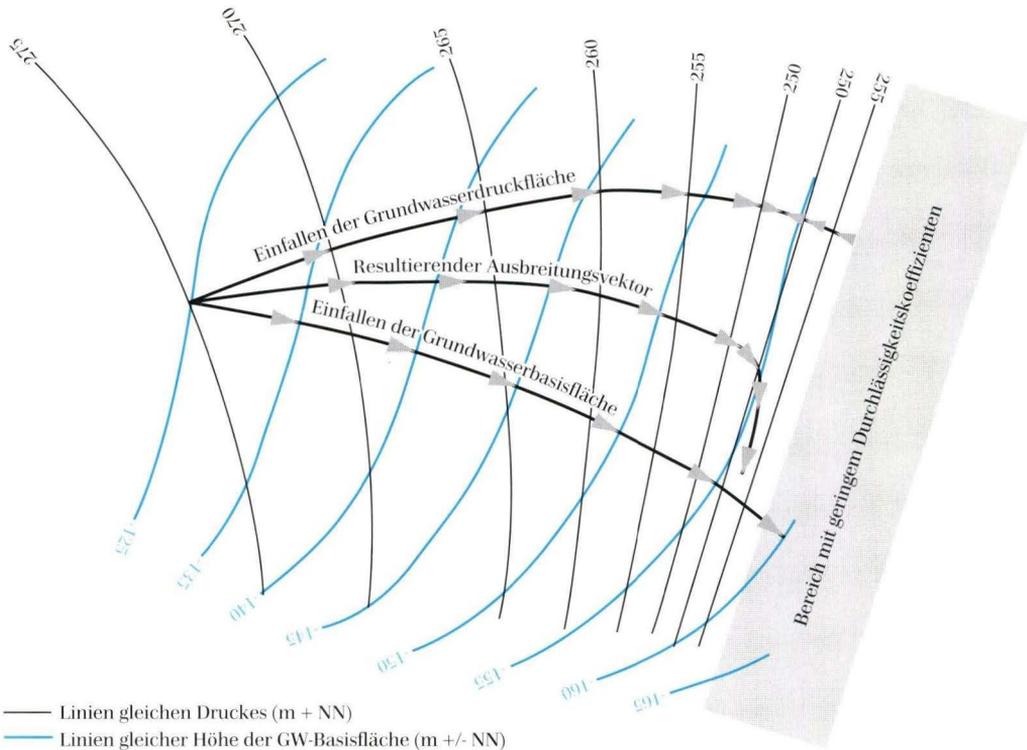


Abb. 14. Einflußfaktoren auf die Bewegung von Salzabwasser im Plattendolomit.

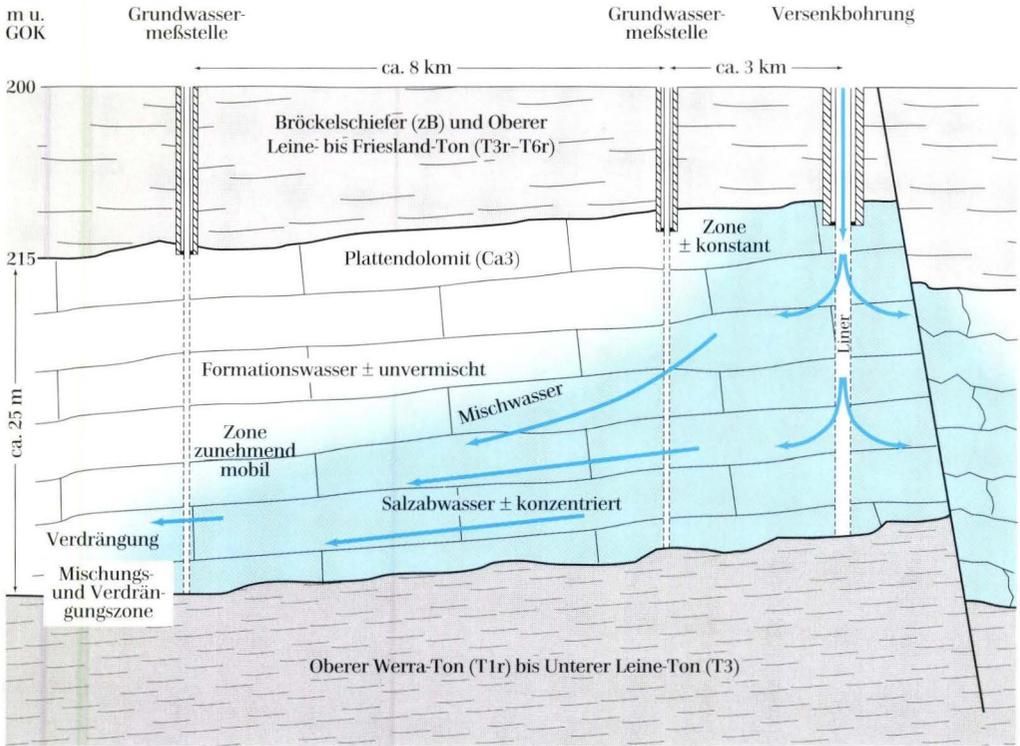


Abb. 15. Prinzip der Salzabwasserausbreitung im Plattendolomit.

5.1.2 Buntsandstein und Quartär

Bei einem Übertritt von Salzwasser aus dem Plattendolomit in den Grundwasserleiter im Buntsandstein handelt es sich vom Prinzip her um eine Leckage zwischen zwei Grundwasserstockwerken. In diesem Fall tritt an lokalen Fehlstellen (Störungen, Gebirgzerrüttung durch Subrosion) Grundwasser mit höherer Dichte aus dem unteren gespannten Grundwasserleiter in den oberen, in der Regel ungespannten Grundwasserleiter über. Die weitere Ausbreitung des Salzwassers im Buntsandstein erfolgt in Grund-

wasserfließrichtung und auch in Abhängigkeit von der Neigung der Grundwassersohlfäche, da es sich um Wasser mit höherer Dichte handelt. Bei Grundwasserentnahmen durch Brunnen kann es durch die Reduzierung der Süßwassermächtigkeit im Entnahmebereich (Druckentlastung) zu Salzwasseraufwölbungen kommen, die im Extremfall bis zur Filterstrecke reichen. In jedem Fall kommt es im Grundwasserleiter zur Ausbildung einer Salz- und Süßwasser-schicht sowie einer Übergangszone.

5.2 Hydrogeochemische Grundlagen

In den folgenden Abschnitten wird auf die wesentlichen hydrogeochemischen Prozesse eingegangen, die für das Verständnis der Salz-

abwasserausbreitung im Versenkhorizont und der Grundwasserüberdeckung im Buntsandstein und Quartär von Bedeutung sind.

5.2.1 Lösung und Fällung

Durch das Zusammenbringen von hochkonzentriertem Salzabwasser mit wesentlich geringer konzentriertem Formationswasser im Versenkhorizont kann es zur Überschreitung von Löslichkeitsprodukten und damit zu Mineralausfällungen kommen. Natürliches Formationswasser im Plattendolomit enthält Ca- und SO_4 -Konzentrationen, die nahe der Sättigungsgrenze für Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) liegen. Bei Zufuhr von gelöstem SO_4 durch Salzabwasser, welche 15–50 g/l gut lösliches Magnesiumsulfat enthalten, wird das Löslichkeitsprodukt für Gips von $6,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol}^2/\text{l}^2$ (angegeben für Gips in reinem Wasser bei 25 °C, Küster et al. 1972) schon bei geringer Vermischung überschritten und es kommt zu einer Gipsausfällung. Dies gilt vor allem für Mischwasser mit dem sulfatreichem Salzabwasser, das nach der Umstellung auf die Kieserit-Flotation versenkt wurde.

Anhand einer Beispielrechnung läßt sich die Größenordnung der potentiellen Gipsausfällung zeigen. Hierzu wird für die heute nicht mehr in Betrieb befindliche Versenkbohrung Wintershall 9 die Versenkung von Salzabwasser mit einer mittleren Zusammensetzung aus dem Jahr 1990 modelliert. Für diesen Brunnen liegt eine Referenzanalyse aus der Zeit vor Versenkbeginn vor, die zur Berechnung verwendet wird. Die Grundlage der Berechnung bildet das Löslichkeitsprodukt (K_L), resultierend aus der Fällungsreaktion



und entsprechend

$$K_L = C_{\text{Ca}^{++}(\text{aq})} \cdot C_{\text{SO}_4^{--}(\text{aq})} = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol}^2/\text{l}^2$$

(bei 25 °C nach Küster et al. 1972)

Bei Annahme einer Mischung von Salzabwasser und Formationswasser im Verhältnis 9:1 ergibt die Modellierung mit dem Programm PHRQPITZ (Plummer et al. 1988) eine potentielle Ausfällung von 32 meq/l Gips. Bei fortgesetzter Verdünnung des Salzabwassers mit Formationswasser ist eine weitere Gipsausfällung

entsprechend den zugeführten Ca-Mengen möglich. Eine weitere Verdünnung des Salzabwassers mit Formationswasser im Verhältnis 4:1 hätte die Ausfällung von 28 mmol/l Gips zur Folge. Hierbei wurde die geringfügige Erhöhung des Löslichkeitsproduktes durch relativ hohe Temperaturen im Versenkhorizont (etwa 20 °C) und die damit geringfügig bessere Löslichkeit für Gips berücksichtigt. Der Temperatureffekt hat unter diesen Bedingungen keine wesentliche quantitative Bedeutung. Umgerechnet in die Einheit t/m^3 ergibt sich für beide Schritte zusammen ein Gipsfällungspotential von 0,01 t/m^3 , das bezogen auf die Jahresversenkmenge im Jahr 1990 von 10,6 Mio. m^3 , entsprechend 13,3 Mio. t Salzabwasser, ein Fällungspotential von rd. 0,1 Mio. t Gips ergibt. Bei vollständiger Ausfällung der berechneten Gipsmengen würde sich das zur Verfügung stehende Hohlraumvolumen somit um ca. 0,4 % verringern. Hierbei kann eine Gipsfällung nur dort erfolgen, wo eine Mischung von Salzabwasser und Formationswasser stattfindet.

Die Grundwasserbeschaffenheit ändert sich durch eine Gipsfällung in der oben angegebenen Größenordnung nicht wesentlich. Dem Mischwasser würden nach dem zweiten Mischungsschritt etwa 8 % SO_4 sowie der größte Teil des ohnehin nur in geringer Konzentration vorhandenen gelösten Ca entzogen. Die u.a. zur Typisierung verwendeten Ca:Mg- und Cl: SO_4 -Verhältnisse (s. Kap. 4.3.1) ändern sich hierdurch nur unwesentlich. Maßgeblich für die Gipsausfällung sind die Ca-Konzentrationen im zugemischten Formationswasser, die absolut gesehen gering sind. Beispielsweise stellt sich die Ca-Konzentration bei Lösungsgleichgewicht im ersten Lösungsschritt gemäß obiger Lösungsreaktion bei

$$C_{\text{Ca}^{++}(\text{aq})} = \frac{K_L}{C_{\text{SO}_4^{--}(\text{aq})}} = 19 \text{ meq/l} \quad \text{ein.}$$

Anhand der vorliegenden gemessenen Analysedaten ist das Maß der tatsächlichen Gipsausfällung nur schwer nachzuvollziehen. Hierzu

müßte die SO_4 -Konzentration des beteiligten Salzabwassers genau bekannt sein. Diese Information ist aufgrund der üblicherweise nur ungenau abschätzbaren Laufzeiten der versenkten Salzabwässer und der damit verbundenen Spannweite möglicher SO_4 -Konzentrationen im Salzabwasser in der Regel nicht gegeben. Hier wird als Lösung vorgeschlagen, das maximal ausfällbare Gipspotential in erster Näherung mit dem vier- bis fünffachen Wert der Ca-Konzentration des natürlichen Formationswassers an der jeweiligen Lokation abzuschätzen. Somit kann für die Versenkbohrung Wintershall 9 ein Fällungspotential von etwa 65–80 mmol/l entsprechend 11–14 kg/m³ Gips angenommen werden.

In den Grundwasserleitern im Buntsandstein und Quartär ist bei Eindringen von Mischwasser aus Salzabwasser und Formationswasser nicht oder nur in sehr geringem Umfang mit einer Gipsfällung zu rechnen. Hierfür sind die Ca-Konzentrationen des Süßwassers zu gering. Außerdem ist davon auszugehen, daß die wesentliche Gipsfällung bereits bei der Mischung im Versenkhorizont erfolgt.

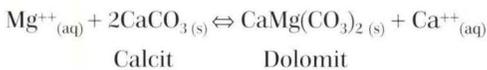
Durch die Erhöhung des CO_2 -Partialdruckes bei der Versenkung sind Salzabwässer gegen-

über Calcit untersättigt und haben ein Lösungspotential für Kalk in einer Größenordnung von einigen Zehner-mmol/l. Weitere quantitativ bedeutsame Fällungsreaktionen sind bei der Mischung von Formations- und Salzabwasser nicht zu erwarten.

Untersuchungen an Süß-/Salzwassergrenzen im Meer-/Brackwasser- und auch im Grundwasserbereich geben Hinweise darauf, daß es an dieser Grenze unter bestimmten Voraussetzungen zu Tonmineralausflockungen und zur Ausscheidung von kolloidal gelösten Metallhydroxiden (v.a. Eisenkolloide) sowie gelösten organischen Substanzen kommen kann. Diese Effekte wurden insbesondere im Bereich der Mischungszonen von Süß- und Salzabwasser in Ästuargebieten beobachtet und sind in gewissen Grenzen auf Grundwasser mit hohen Schwebstoff-, Eisen-, Mangan- und DOC-Konzentrationen übertragbar. Hierdurch ist die Verringerung der hydraulischen Durchlässigkeit im Grundwasserleiter möglich. Für den Versenkhorizont ist aufgrund der niedrigen Konzentrationen dieser Substanzen ein Auftreten der beschriebenen Effekte weitgehend auszuschließen.

5.2.2 Chemische Reaktionen

Im Versenkhorizont können die mit dem Salzabwasser zugeführten Mg-Ionen mit dem Kalk im Plattendolomit zu Dolomit umgesetzt werden. Hierbei ist eine Ca-Freisetzung in die Lösung nach folgendem Reaktionsschema zu erwarten:



Unter den im Versenkhorizont gegebenen Temperatur- und Konzentrationsbedingungen ist die Dolomitbildung thermodynamisch begünstigt. Laborexperimente zur Dolomitgenese haben jedoch gezeigt, daß die sehr geringe Reaktionsgeschwindigkeit der Dolomitbildung (Mason & Moore 1985) zu einer gehemmten Umsetzung führt.

Prinzipiell wirkt die Dolomitbildung bei dem Kontakt von Salzabwasser mit Grundwasserleitermaterial durch den Verbrauch von Mg-Ionen der Abnahme des Ca : Mg-Verhältnis entgegen. Aus diesem Grund ist die Beurteilung von Salzabwassereinflüssen allein aufgrund des Ca : Mg-Verhältnisses unsicher. Aus den aktuellen Ca-Konzentrationen in stark durch Salzabwasser beeinflussten Meßstellen (z.B. 392, 430, BVKrVI) ist jedoch zu folgern, daß die maximale Menge der durch Dolomitisierung und Ionenaustausch (s. Kap. 5.2.3) freigesetzten Ca-Ionen im Plattendolomit weniger als 30 meq/l beträgt und somit das Ca : Mg-Verhältnis nur bei stark verdünnten Gemischen relevant beeinträchtigt. In einem zweiten Reaktionsschritt können die bei der Dolomitbildung freigesetzten Ca-Ionen mit SO_4 zu

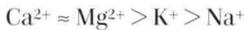
Gips umgesetzt werden (s. Kap. 5.2.1). Hierdurch wird in der obigen Reaktion auf der Produktseite ständig Ca^{++} entzogen und die Dolomitbildung begünstigt.

Im Buntsandstein und Quartär ist aufgrund

des geringen Kalkgehaltes im Gestein und der geringeren Mg-Konzentrationen in Mischwässern aus Formations- und Salzabwasser nicht oder nur in geringem Maße mit einer Dolomitierung zu rechnen.

5.2.3 Sorption und Ionenaustausch

Für das Rückhaltevermögen der durch Salzabwasser zugeführten Kationen K, Na und Mg ist eine Bindungsintensität entsprechend der allgemeinen Abfolge



zu erwarten (z.B. in Matthess 1990). Demnach sollte Mg stärker als K und dieses stärker als Na im Grundwasserleiter sorbiert bzw. zurückgehalten werden. Abweichend von dieser generellen Abfolge kann es durch hohe Alkali- und Mg-Konzentrationen und sehr geringe Ca-Konzentrationen im Salzabwasser zu einer Ca-Erdalkalisierung des Grundwassers kommen. Hierbei werden sorbierte Ca-Ionen durch Ionenaustausch an dem als Sorbens fungierenden Festgestein (R) nach der folgenden allgemeinen Reaktionsgleichung



in das Grundwasser freigesetzt. Der umgekehrte Prozeß der Alkalisierung ist bei der Verdünnung mit Ca-reichem Infiltrationswasser zu erwarten.

Der Nachweis von Austauschprozessen in Salzabwasser/Formationswasser-Gemischen kann nicht mit dem üblicherweise verwendeten $(\text{Na}+\text{K})/\text{Cl}$ - und $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{SO}_4+\text{HCO}_3)$ -Verhältnis (z.B. im Basenaustauschindex nach Schoeller 1956) geführt werden. Deren Anwendung geht davon aus, daß bei der Auflösung natürlicher chloridischer Salze, die fast ausschließlich aus NaCl und in geringem Maße aus KCl bestehen, ein $(\text{Na}+\text{K})/\text{Cl}$ -Verhältnis um 1 zu erwarten ist. Bei Abweichungen davon kann auf Austauschprozesse geschlossen werden. Die künst-

lich angereicherten Mg-, Cl- und SO_4 -Konzentrationen im Salzabwasser schließen jedoch deren Verwendung aus.

Für den Kluftgrundwasserleiter Plattendolomit ist von geringen Ionenaustauschkapazitäten in der Größenordnung von einigen meq/100 g Gestein auszugehen. Hieraus ist keine wesentliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit durch Sorptions-/Desorptionsprozesse abzuleiten. Bei Annahme einer Austauschkapazität von maximal 5 meq/100 g Gestein, einer mittleren Dichte von 2,8 g/cm³ und einem Hohlraumvolumen von 10 % für den Plattendolomit können nicht mehr als 126 meq Ionen je dm³ Gestein in das Grundwasser freigesetzt werden. Hinzu kommt, daß Salzabwasser in einen Grundwasserleiter versenkt wird, der Formationswasser mit natürlich erhöhten Alkalikonzentrationen in der Größenordnung von 100–300 meq/l führt. Hieraus ergibt sich ein hoher Anteil sorbierter Alkalien am Gestein und ein entsprechend verringertes Potential für freisetzbare Erdalkalien.

Bei dem Zufluß von Formationswasser bzw. Formationswasser mit Salzabwasseranteilen aus dem Plattendolomit in gering konzentriertes Grundwasser im Buntsandstein und Quartär kann es in größerem Umfang zur Erdalkalisierung des Grundwassers kommen. Dies ist in der Vorbelegung des Gesteins mit sorbierten Erdalkalien und mit im Vergleich zum Plattendolomit größeren Austauschkapazitäten begründet. Insbesondere beim erstmaligen Zufluß salzreichen Grundwassers ist festzustellen, daß der größte Teil der im Gestein festgelegten Erdalkalien durch Austausch gegen Na in Lösung geht. Dieser Prozeß ist an einer ganzen Reihe von Meßstellen zu beobachten. Als Beispiel sei hier

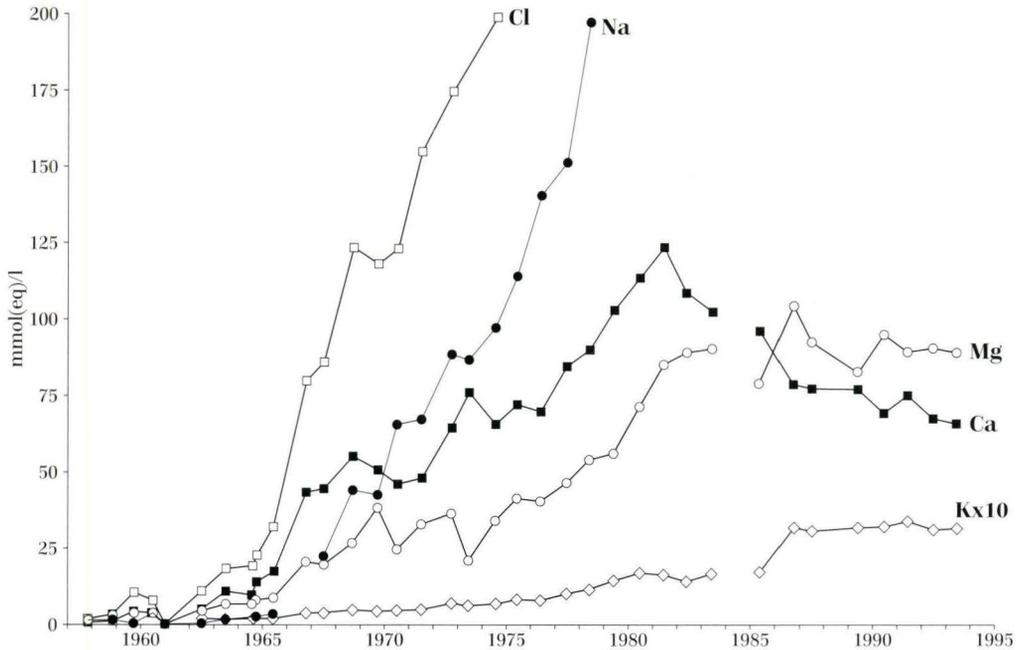


Abb. 16. Veränderung der Cl-, Ca- und Mg-Konzentrationen sowie der Ionenverhältnisse Ca : Mg durch Zufluß von Formationswasser aus dem Plattendolomit in der Quartärmeßstelle 457 in der Werratalaue.

die zeitliche Entwicklung in der Grundwassermeßstelle 457¹ (Werratalaue) in Abb. 16 aufgeführt. In dieser Meßstelle fließt seit dem Jahr 1963 Formationswasser aus dem Plattendolomit zu. Der Verlauf der Ca- und Mg-Ganglinien zeigt, daß im selben Jahr erhöhte Ca- und Mg-Konzentrationen auftraten, während die Na-Konzentrationen hinter dem zu erwartenden Konzentra-

tionsniveau zurückblieben. Es kommt unmittelbar nach dem Zudringen von Salzwasser zu einer Erdalkalisierung nach oben beschriebenem Schema. Hierbei werden Ca und Mg etwa im Verhältnis 2 : 1 freigesetzt. Dies ist auf die etwas höhere Bindungsintensität von Mg an austauschfähigen Mineralen zurückzuführen (Matthess 1990).

5.2.4 Mischung

Bei der Untersuchung der Salzabwasserausbreitung ist vor allem von Interesse, zu welchen Anteilen das Grundwasser Salzabwasser enthält und ob diese mit der Zeit zu- oder abnehmen. Hierzu werden im folgenden einige grundsätzliche Überlegungen angestellt.

Grundsätzlich ist Salzabwasser mit natürlichem Formationswasser im Plattendolomit und

mit gering konzentriertem Grundwasser im Buntsandstein und Quartär mischbar. Aufgrund der beträchtlichen Dichteunterschiede der Mischungspartner ist eine vollständige Durchmischung im Grundwasserleiter jedoch nicht zu erwarten, es kommt zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Dichteschichtung (s. Kap. 5.1). Bei der Probenahme mittels Pump-

¹ Bis 1986 wurde die Meßstelle unter der Nr. 255 geführt und nach Ersatz erhielt sie die Nr. 457

oder Swabprobe werden, bei genügend großer Entnahmemenge, repräsentative Proben gewonnen, die unabhängig von einer Dichteschichtung die mittlere Grundwasserzusammensetzung am Entnahmeort repräsentieren. Für die Beprobung von frei auslaufenden Bohrungen und Quellen ist ebenfalls von einer vollständig durchmischten Probe auszugehen.

Bei Anwendung dieser Probenahmeverfah-

ren und unter der Annahme, daß keine wesentliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit durch chemische Reaktionen, Ionenaustausch oder Lösungs-/Fällungsprozesse stattgefunden hat, ist zur Abschätzung von Mischungsanteilen die Anwendung der allgemeinen Mischungsgleichung für mischbare Flüssigkeiten anwendbar (s. Kap. 2).

5.3 Identifizierung von Salzabwasser im Grundwasser

Die Beeinflussung des natürlichen Grundwassers durch Salzabwasser äußert sich zunächst in einer massiven Zufuhr von Cl-, Na- und Mg-Ionen. Diese Hauptbestandteile machen zusammen mehr als 80–90 % an der Salzabwasserzusammensetzung aus (s. Kap. 3.2). Die Zumischung von K- und SO₄-Konzentrationen wirkt sich aufgrund ihrer wesentlich geringeren Konzentrationen im Salzabwasser erst bei relativ hohem Mischungsanteil meßbar aus.

Die Auswirkung von Salzabwassereinflüssen im Plattendolomit wird in den Abb. 17a–f anhand von Schoeller-Diagrammen für verschiedene hydrochemische Situationen veranschaulicht. Hieraus wird ersichtlich, daß bereits geringe Salzabwasseranteile zu einer meßbaren Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit führen (Abb. 17b und d), die den natürlichen Schwankungsbereich im Formationswasser deutlich übersteigen (Abb. 17a). Hierbei kann sich eine Salzabwasserbeeinflussung in Gebieten mit geogen erhöhten Konzentrationen, wie sie z.B. in der Mulde von Sünna-Buttlar vorkommen (Abb. 17d), ohne wesentliche Zunahme der Cl-Konzentrationen und Gesamtlösungsinhalte lediglich durch Anstieg der K- und Mg-Konzentrationen bemerkbar machen. Der Extremfall, d.h. die komplette Verdrängung des primär vorhandenen Formationswassers, ist in Abb. 17c dargestellt. Aus den Abb. 17e–f wird ersichtlich, wie die Entwicklung im Nahbereich von Versenkgebieten nach Einstellung der Versenkfähigkeit verlaufen kann. In beiden Fällen nähert sich die Grundwasserbeschaffenheit

dem ursprünglichen Formationswasser wieder an. Dies zeigt, daß die hydrochemischen Auswirkungen der Versenkung in einer Meßstelle bzw. in gewissen Teilräumen reversibel sind. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, daß der überwiegende Teil des Salzabwassers in dem Grundwasserleiter Plattendolomit verbleibt.

Der Anteil, ab dem eine Salzabwasserbeeinflussung im natürlichen Formationswasser mittels chemischer Analysen zuverlässig erkannt werden kann, liegt bei einem Salzabwasseranteil von 0,5–2 % und ist von der Zusammensetzung des beteiligten Salzabwassers und dem Lösungsinhalt des Formationswassers abhängig. Am nachfolgenden Beispiel wird diese Aussage verdeutlicht.

Beispiel: Mischung eines Salzabwassers (Werk Hattorf 1980, „Vor-ESTA“-Zusammensetzung) mit einem natürlichen Formationswasser aus dem Plattendolomit (Meßstelle QSPhil, 1920, siehe Tab. 5) mit einem Lösungsinhalt von 25 g/l.

Ergebnis: Die Mischwasseranalysen in Tab. 5 zeigen, daß bereits bei einem Salzabwasseranteil von 0,5 % Cl-, Mg- und K-Konzentrationen erreicht werden, die außerhalb des natürlichen Schwankungsbereiches für das Formationswasser liegen. Eine sichere Identifizierung von Salzabwasser ist in diesem Fall ab einem Salzabwasseranteil von 1 % möglich. Bei einer Beteiligung von „Nach-ESTA“-Salzabwasser ist aufgrund der weitaus höheren Mg- und K-Konzentrationen im Salzabwasser eine Identifizierung bei noch geringeren Salzabwassergehalten möglich.

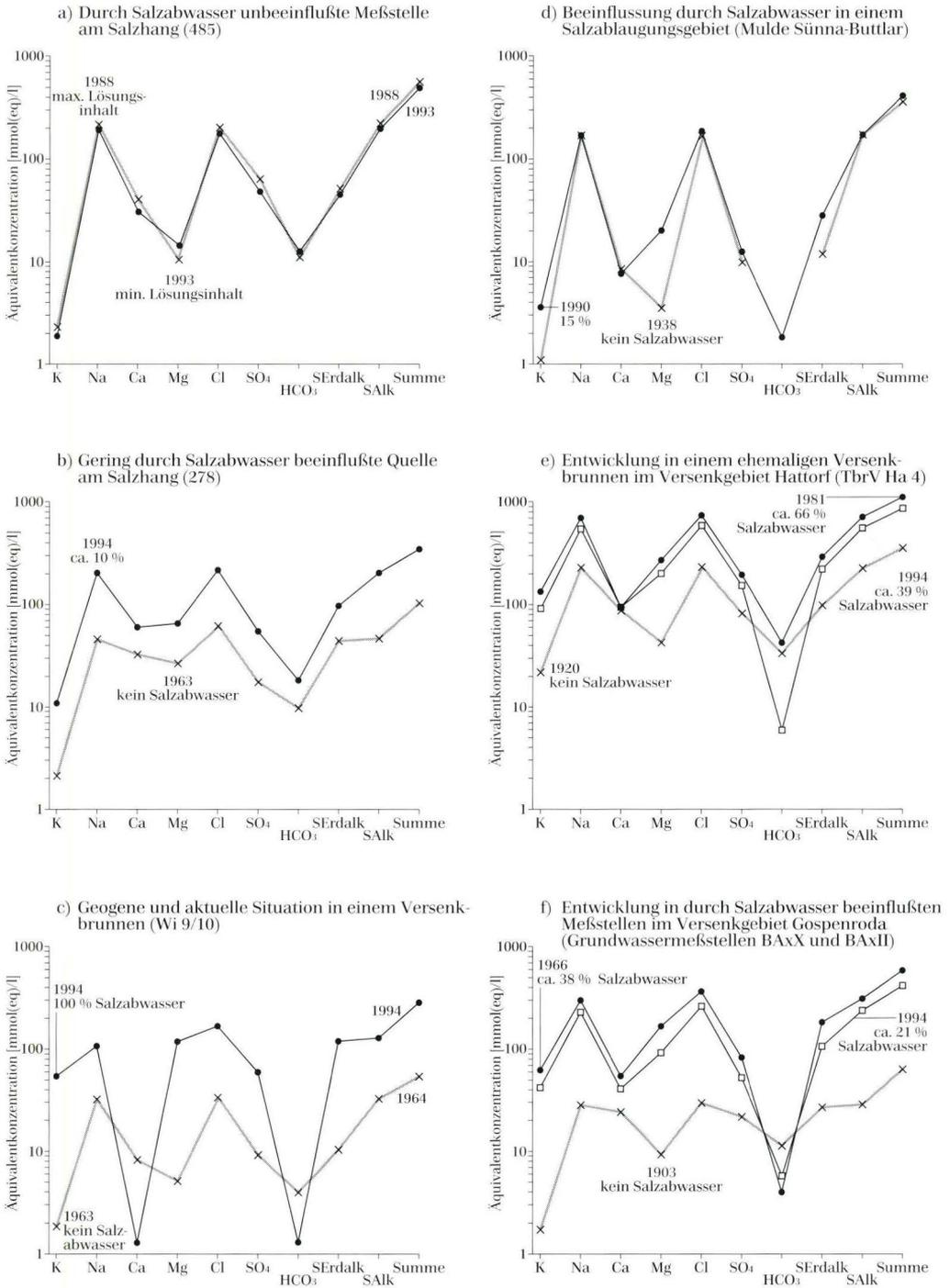


Abb. 17. Beispiele für verschiedene Grundwasserbeschaffenheitssituationen im Plattendolomit anhand von Schoeller-Diagrammen.

Das Beispiel zeigt auch, daß eine ganze Reihe von weiteren chemischen Kennwerten zur Identifizierung einer Salzabwasserbeeinflussung geeignet sind. Bei schwacher Beeinflussung durch Salzabwasser kommen, neben den K- und Mg-Konzentrationen, noch der Lösungsinhalt als

Summe der gelösten Bestandteile und das Ca:Mg-, Cl:Mg- und Na:K-Äquivalentverhältnis zur Identifizierung in Frage. Für Mischwasser mit höheren Salzabwasseranteilen kann das K:Ca- und Cl:SO₄-Äquivalentverhältnis hinzugenommen werden.

Tab. 5. Mischung von Salzabwasser (Werk Hattorf, 1980, K + S, unveröffentl. Mitteilung) und Formationswasser am Beispiel der QSPHil (Analyse aus dem Jahr 1920 in Finkenwirth 1964). Die Ca- und HCO₃-Konzentrationen wurden für die Salzabwasseranalyse mit jeweils 2,5 meq/l angenommen. Die Werte der Standardabweichung für die Formationswasseranalyse wurden für eine langjährig beobachtete Meßstelle mit vergleichbarem Lösungsinhalt ermittelt und für die hier verwendete Analyse übernommen.

Parameter		QSPHil	Werk Hattorf					Salzabwasseranteil im Mischwasser in %	
			0,1	0,5*	1,0	2,0	5,0		
K	meq/l	3,8 ± 0,24	208	4,0	4,8	5,8	7,8	14	
Na	meq/l	357 ± 13	3875	361	375	392	428	533	
Ca	meq/l	54 ± 4,7	2,5	53	53	53	52	51	
Mg	meq/l	13 ± 2,5	1187	14	19	25	37	72	
Cl	meq/l	363 ± 9,4	4896	368	386	409	454	590	
SO ₄	meq/l	48 ± 5,1	374	48	50	51	54	64	
HCO ₃	meq/l	8,4 ± 1,2	2,5	8,4	8,4	8,3	8,3	8,1	
Ca : Mg		4,1 ± 1,0	0,002	3,7	2,8	2,1	1,4	0,71	
Na : K		95 ± 10	19	91	78	68	55	38	
K : Ca		0,07	83	0,07	0,09	0,11	0,15	0,27	
Cl : SO ₄		7,6 ± 0,9	13	7,6	7,8	8,0	8,3	9,2	
EA : A		0,18 ± 0,01	0,29	0,19	0,19	0,20	0,20	0,22	
Cl : Na		1,02 ± 0,04	1,26	1,02	1,03	1,04	1,06	1,11	
Cl : Mg		28 ± 4,6	4,1	26	20	16	12	8,2	
Summe	g/l	25,3 ± 0,8	304	25,6	26,7	28,1	30,9	39,2	

* Diese Spalte gibt die untere Grenze für den Salzabwasseranteil an, ab dem eine Unterscheidung vom Ausgangswasser möglich ist.

5.3.1 Werratal

Auf der Grundlage der o.a. Überlegungen wurde für höher konzentrierte Oberflächengewässer und Grundwasser in der Umgebung der Werratalaue zwischen Heringen und Dankmarshausen im Sonderbericht „Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra – 1994“ (KoSaAb, Kurzfassung 1996) eine Typisierung vorgenommen. Die Richtwerte für die dort angegebenen Kennwerte wurden aus Mischungsrechnungen mit dem im Untersuchungsgebiet versenkten Salzabwasser und mit einem durchschnittli-

chen natürlichen Formationswasser aus der Umgebung der Werratalaue gewonnen. Für das hessische Salzabwasser wurden jeweils Jahresdurchschnittsanalysen für den Zeitraum 1968–1993 verwendet. Das thüringische Salzabwasser ist mit der zuletzt im Jahr 1968 versenkten Zusammensetzung in die Entwicklung der Richtwerte eingegangen. Die durchschnittliche Zusammensetzung des Formationswassers im Plattendolomit basiert auf Analysen aus Meßstellen in der Umgebung des Werratales, für die

Tab. 6. Referenzanalysen aus unbeeinflussten Meßstellen im Plattendolomit in der Umgebung des Werratales. Konzentrationsangaben in meq/l

Meßstelle	Jahr der Beprobung	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	Ca : Mg	Na : K	Cl : SO ₄	Cl : Mg	EA : A
488	1993	2,0	426	27	11	413	36	2,6	216	11	38	0,09
BVHal	1928	5,8	736	82	23	749	70	3,5	128	11	33	0,14
BVHgII	1937	1,8	169	42	15	185	32	2,8	92	5,8	12	0,33
QSPHil	1920	3,8	357	54	13	364	48	4,1	95	7,6	28	0,19
BHb	1993	1,3	240	44	13	247	49	3,4	188	5,0	19	0,24
Mittelwert		2,9	386	50	15	392	47	3,3	144	8,1	26	0,20

mit Sicherheit eine Salzabwasserbeeinflussung ausgeschlossen werden kann (Tab. 6). Daneben wurden Richtwerte für einen Haldenwassertyp zur Bearbeitung von lokalen Haldenwasserbeeinflussungen im Grundwasser entwickelt. Hierfür wurden Durchschnittsanalysen für das Haldenwasser der Halde IV (Werk Wintershall, Zeitraum 1986–93, Kali und Salz GmbH) verwendet.

Für die Typisierung des Grundwassers und der Oberflächengewässer im Werratal und dessen Umgebung wurden sechs Grundwassertypen unterschieden, wobei jeweils ein Zweikomponentengemisch von einem Typ Salzabwasser mit einem Typ Formationswasser berücksichtigt werden kann. Die Typeinteilung läßt unter Berücksichtigung der Ungenauigkeiten einer Analyse und der Möglichkeit, daß sich auch mehr als zwei Komponenten mischen können, größenordnungsmäßige Rückschlüsse auf den Anteil von Salzabwasser in einer zu beurteilenden Probe zu:

Typ 1a: Stark durch Salzabwasser beeinflusst

Ermittlung der Richtwerte in Anlehnung an ein berechnetes Salzabwasser/Formationswasser-Gemisch mit 20% Salzabwasser.

Typ 1b: Merkbar durch Salzabwasser beeinflusst

Ermittlung der Richtwerte in Anlehnung an ein berechnetes Salzabwasser/Formationswasser-Gemisch mit 1% Salzabwasseranteil.

Typ 2: Stark durch Haldenwasser beeinflusst

Ermittlung der Richtwerte durch rechnerische Verdünnung von durchschnittlichem Haldenwasser mit gering mineralisiertem (Buntsandstein-) Wasser im Verhältnis 20 % : 80 %.

Typ 3: Beeinflusst durch Formationswasser aus dem Plattendolomit.

Die Richtwerte geben die Spannweite für die durchschnittliche Zusammensetzung von unbeeinflusstem Formationswasser in der Umgebung des Werratales bei Heringen wieder.

Typ 4a: Geringe Beeinflussung durch Formationswasser aus dem Plattendolomit.

Als Richtwert wird eine erhöhte Cl-Konzentration (≥ 28 meq/l) und ein unauffälliges Ca : Mg-Verhältnis (≥ 1) verwendet.

Typ 4b: Geringe Beeinflussung durch Mischwasser aus Salzabwasser/Formationswasser aus dem Plattendolomit.

Als Richtwert wird eine erhöhte Cl-Konzentration (≥ 28 meq/l) und ein auffälliges Ca : Mg-Verhältnis (≤ 1) verwendet.

Eine Übersicht der einzelnen Richtwerte für die Grundwassertypen zeigt Tab. 7. Grundsätzlich ist die vorgestellte Typisierung bei genügend hohen Chloridkonzentrationen ($Cl > 28$ meq/l, entsprechend ~ 1000 mg/l) für die An-

wendung in den verschiedenen Grundwasserleitern im Plattendolomit und Buntsandstein/Quartär und in Oberflächengewässern geeignet. Da sich die Typisierung auf Mischungsrechnungen mit den in Tab. 6 angegebenen Referenzanalysen für unbeeinflusstes Plattendolomitwasser im Gebiet des Werratal bezieht, ist sie auf Gebiete mit anderer natürlicher Grundwasserbeschaffenheit im Plattendolomit nicht oder nur eingeschränkt anwendbar. Durch Mischungsrechnung mit dem dortigen natürlichen Plattendolomitwasser kann jedoch eine für das spezifische Gebiet gültige Typisierung entwickelt werden. Für die Typisierung von Grundwasser im Buntsandstein und Quartär muß

außerdem für den Einzelfall geprüft werden, inwieweit erhöhte Mg-Konzentrationen auf Ionenaustausch und nicht auf eine Salzabwasserbeeinflussung zurückzuführen sind (s. Kap. 4.2.2 und 5.2.3).

Aufgrund der zeitlichen Veränderungen der Salzabwasserzusammensetzung, insbesondere seit der Umstellung auf das ESTA-Aufbereitungsverfahren (s. Kap. 3.2), ist aus der Typzuordnung alleine **kein** exakter Rückschluß auf den Salzabwasseranteil in der jeweiligen Meßstelle möglich. Dies ist dadurch begründet, daß bei der Mischung von Formationswasser aus dem Plattendolomit mit Salzabwasser vor und nach der ESTA-Umstellung für die Überschrei-

Tab. 7. Für die Typisierung im Werratal verwendete Richtwerte

Typ-Nr.	Beschreibung	Richtwert
1a	Stark durch Salzabwasser beeinflusst Äquivalentkonzentrationen und -verhältnisse entspr. einer rechnerischen Mischung von Salzabwasser und Plattendolomit-Formationswasser (Werratalaue) im Verhältnis 1 : 4	K ≥ 23 meq/l (≅ 900 mg/l) Mg ≥ 120 meq/l (≅ 1460 mg/l) Ca : Mg ≤ 0,5 Na : K ≤ 50 K : Ca ≥ 0,4 Cl : SO ₄ ≤ 25
1b	Merkbar durch Salzabwasser beeinflusst Äquivalentkonzentrationen und -verhältnisse entspr. einer rechnerischen Mischung von Salzabwasser und Plattendolomit-Formationswasser (Werratalaue) im Verhältnis 1 : 99	K ≥ 4 meq/l (≅ 156 mg/l) Mg ≥ 20 meq/l (≅ 240 mg/l) Ca : Mg ≤ 1 Na : K ≤ 100
2	Stark durch Haldenwasser beeinflusst Äquivalentkonzentrationen und -verhältnisse entspr. einer 1 : 4 mit Süßwasser verdünnten Referenzanalyse für Haldenwasser (Halde 4)	Mg ≥ 1000 meq/l (≅ 12200 mg/l) SO ₄ ≥ 300 meq/l (≅ 14400 mg/l) Na : K ≥ 1 und 5 Na : Mg ≤ 1 Cl : Na ≥ 2 Cl : SO ₄ ≤ 8
3	Beeinflusst durch Formationswasser aus dem Plattendolomit Äquivalentkonzentrationen und -verhältnisse entspr. einer Referenzanalyse für unbeeinflusstes Plattendolomitwasser in der Umgebung des Werratales bei Heringen	K ≤ 10 meq/l (≅ 390 mg/l) Ca ≥ 10 meq/l (≅ 200 mg/l) Mg ≤ 150 meq/l (≅ 1800 mg/l) SO ₄ ≤ 100 meq/l (≅ 480 mg/l) Ca : Mg ≥ 1 K : Ca ≤ 0,2
4a	Geringe Beeinflussung durch Formationswasser aus dem Plattendolomit	Cl ≥ 28 meq/l (≅ 1000 mg/l) Ca : Mg ≥ 1
4b	Geringe Beeinflussung durch Mischwasser aus Salzabwasser und Formationswasser aus dem Plattendolomit	Cl ≥ 28 meq/l (≅ 1000 mg/l) Ca : Mg ≤ 1

Tab. 8. Zusammensetzung in einem Mischwasser aus Formationswasser und Salzabwasser mit „Vor-ESTA“- und „Nach-ESTA“-Zusammensetzung bei Erreichen der Richtwerte für den Typ 1a

Kennwert		Gemisch mit Salzabwasser aus dem Jahr 1975	Gemisch mit Salzabwasser aus dem Jahr 1987
Konzentrationen:			
K	meq/l	23	27
Mg	meq/l	148	165
Summe gelöster fester Bestandteile	g/l	70,5	37,7
Ionenverhältnisse:			
Na : K		44	17 *
K : Ca		0,56	0,56
Cl : SO ₄		14	8,3
Ca : Mg		0,28	0,29
Mischungsanteile:			
Salzabwasser		17	3,5
Formationswasser		83	96,5

tung der Richtwerte der Typen 1a, 1b und 4b (Tab. 7) unterschiedliche Salzabwasseranteile notwendig sind. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen.

Beispiel: Mischung von Formationswasser und Salzabwasser im Verhältnis 1 : 4 mit Salzabwasser aus dem Werk Wintershall vor (1975) und nach der Umstellung auf das ESTA-Verfahren (1987). Das Mischungsziel ist die Überschreitung der Richtwerte für Typ 1a (Tab. 7).

Ergebnis: Bei der Mischung nach diesen Vorgaben mit dem schon bekannten Referenz-Formationswasser Werratal (Tab. 6) werden die Richtwerte für die Zuordnung in den Typ 1a bei Salzabwasseranteilen von mehr als 17 % (Mischung mit Salzabwasser aus dem Jahr 1975) bzw. mehr als 3,5 % (Mischung mit Salzabwasser aus dem Jahr 1987) überschritten (Tab. 8). Bemerkenswert ist außerdem, daß mit Konzentrationen von 71 g/l im ersten Fall gegenüber 38 g/l im zweiten Fall erhebliche Unterschiede in der Summe gelöster Bestandteile auftreten. Dies zeigt auch, daß bei geringen, aber merkbar Salzabwasseranteilen (Typ 1b) ein Einfluß einer geringen Menge von „Nach-ESTA-Salzabwasser“ auf die Grundwasserbeschaffenheit ebenso stark oder stärker sein kann als von einer größeren Menge „Vor-ESTA-Salzabwasser“.

Das Beispiel zeigt, daß in einem beeinflussten

Grundwasser die sichere Zuordnung und eindeutige Quantifizierung von Salzabwasseranteilen und damit auch die Bestimmung der Zu- oder Abnahme mit der Zeit nur bei bekanntem Alter und bekannter Herkunft des beteiligten Salzabwassers gelingt. Genauere Aussagen lassen sich mit den in Kap. 2 beschriebenen Verfahren auf der Grundlage der Cl-Konzentrationen und des Vergleiches mit „Vor-/Nach-ESTA“-Mischwasser erzielen.

Es soll noch einmal betont werden, daß die Typisierung nach oben angegebenem Schema für die Situation im Werratal entwickelt wurde. Für das gesamte Untersuchungsgebiet ist somit die Anwendung nur eingeschränkt möglich. Dies ist dadurch begründet, daß die meisten der in Tab. 7 aufgeführten Richtwerte auf Mischungsrechnungen mit durchschnittlichem Formationswasser aus dem Bereich des Werratales beruhen. Im gesamten potentiellen Einflußbereich des versenkten Salzabwassers liegt jedoch eine erheblich größere Spannweite für die Grundwasserbeschaffenheit des Formationswasser vor (Kap. 5.1.1). Mischungsrechnungen mit diesen verschiedenen Konzentrationen führen zwangsläufig zu anderen Richtwerten als in Tab. 7 angegeben. Aus diesem Grund empfiehlt sich die **Anwendung der vorgestellten Typisierung außerhalb des Werratales**

nur in Gebieten mit mittleren Gesamtlösungsinhalten im geogenen Formationswasser, also zwischen **10 und 40 g/l**. Hierbei ist die Abwei-

chung von den in Tab. 7 angegebenen Richtwerten noch gering und rechtfertigt die Typisierung nach den vorgeschlagenen Richtwerten.

5.3.2 Gesamtes Untersuchungsgebiet

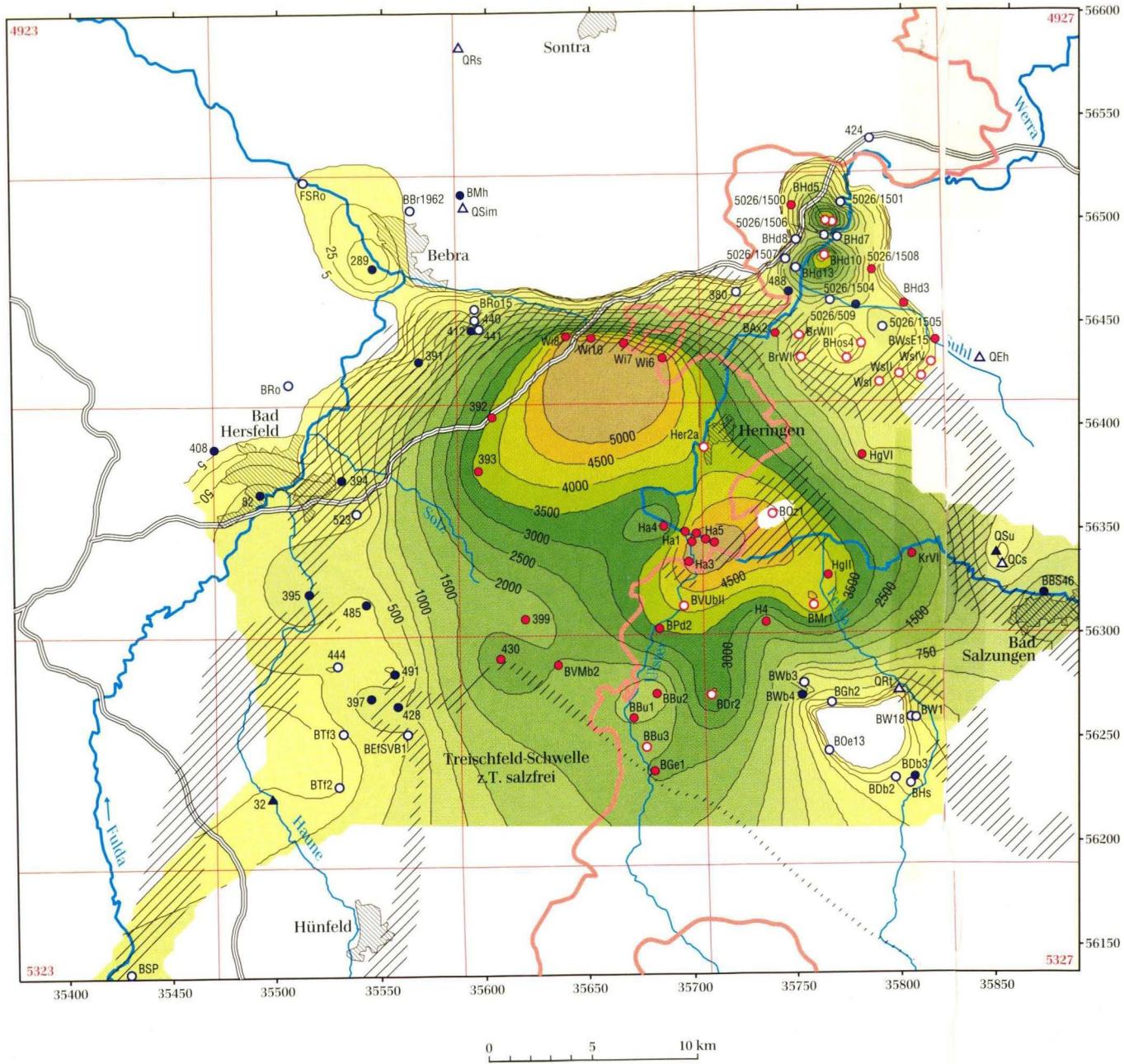
Um trotz der im Kapitel 5.3.1 genannten lokalen Einschränkungen Salzabwassereinflüsse in den unterschiedlichsten Formationswassertypen nachweisen zu können, müssen hierfür geogene Hintergrundwerte bekannt sein (z.B. in Hecht 1995 und 1996). Von wenigen Ausnahmen abgesehen, resultiert die Versalzung oberflächennaher Grundwasserleiter aus dem Über-

tritt von Formationswasser-/Salzabwasser-Gemischen aus dem Plattendolomit. Somit können chemische Kennwerte für geogenes Formationswasser im Plattendolomit ebenfalls für die Beurteilung von Salzabwassereinflüssen in Buntsandstein- und Quartärgrundwässern herangezogen werden. Hinzu kommt, daß die Beteiligung von süßen Grundwässern aus dem

Tab. 9. Einteilung der natürlichen Grundwässer im Plattendolomit (Formationswässer)

Gebiet	Infiltrationsgebiet		Transit-/Entlastungsgebiet			Salzablau-
	(I)	(Is)	(T/E)			gungsgebiet (S)
Kennwert						
Ges.lösungs-	bis 5 g/l	bis 8 g/l	bis 15 g/l	bis 25 g/l	bis 70 g/l	über 30 g/l
inhalt	Cl _{eq%} < 40 %	Cl _{eq%} ≥ 40 %				
Anzahl	n = 10	n = 16	n = 19	n = 8	n = 7	n = 6
Konzentrationen:						
K meq/l	0,03-0,55 (0,22)	0,24-4,4 (1,7)	0,46-1,6 (1,1)	1,1-3,5 (2,3)	2,1-6,1 (4,1)	1,5-10 (5,9)
Ca meq/l	7,7-32 (20)	7,9-29 (19)	15-39 (27)	24-48 (36)	23-81 (52)	27-107 (67)
Mg meq/l	2,3-7,8 (5,0)	3,6-12 (7,7)	6,4-15 (11)	6,6-13 (9,9)	11-36 (21)	20-32 (26)
Cl meq/l	4,0-12 (5,1)	22-68 (45)	51-165 (108)	194-310 (252)	292-779 (536)	124-3272 (1698)
SO ₄ meq/l	4,9-33 (19)	9,2-32 (20)	13-45 (29)	33-63 (48)	33-76 (54)	49-110 (90)
Äquivalentverhältnisse:						
Ca : Mg	2,4-5,5 (3,9)	1,1-3,9 (2,5)	1,5-3,9 (2,7)	2,4-5,3 (3,8)	1,7-3,5 (2,6)	1,0-4,5 (2,7)
Na : K	2,4-53 (25)	17-98 (58)	48-188 (118)	65-242 (154)	93-193 (143)	86-244 (165)
EA : A	1,20-73 (34)	0,26-1,0 (0,63)	0,15-2,58 (0,81)	0,10-0,26 (0,18)	0,09-0,18 (0,14)	0,04-0,14 (0,08)
Cl : SO ₄	0,03-0,5 (0,26)	0,63-6,6 (3,3)	1,7-8,0 (4,9)	2,8-9,3 (6,0)	7,1-14 (10)	5,0-44 (25)
Cl : Na	1,02-2,45 (1,74)	0,90-1,24 (1,07)	0,66-3,0 (1,39)	0,89-1,0 (0,95)	0,93-1,09 (1,01)	0,95-1,06 (1,00)
Cl : Mg	0,06-1,6 (0,8)	2,7-12 (7,2)	4,8-17 (11)	16-41 (29)	20-38 (29)	0,9-138 (70)
Äquivalentanteile :						
K %	0,05-1,6 (0,79)	0,01-4,8 (2,1)	0,4-1,1 (0,7)	0,33-1,1 (0,73)	0,47-0,87 (0,67)	0,36-0,97 (0,66)
Na %	0,70-28,3 (13,2)	46,1-74,4 (60,0)	51,4-86,3 (68,8)	78,3-89,8 (84,1)	83,7-91,4 (87,6)	87,0-96,3 (91,7)
Ca %	50,3-81,8 (69,8)	14,7-38,5 (26,6)	8,9-34,0 (21,4)	7,1-16,8 (12,0)	5,5-11,4 (8,4)	2,2-8,1 (5,2)
Mg %	12,8-23,9 (18,7)	6,5-15,8 (11,2)	2,3-15,9 (9,1)	2,1-4,4 (3,2)	2,2-4,5 (3,4)	0,8-4,2 (2,5)
Cl %	1,4-27,0 (14,5)	49,6-77,9 (63,8)	59,5-86,5 (73,0)	75,0-88,9 (82,0)	84,1-93,3 (88,7)	83,2-98,9 (91,0)
SO ₄ %	43,3-76,1 (61,8)	15,9-43,0 (29,5)	8,9-34,7 (21,8)	10,3-22,3 (16,3)	5,9-13,1 (9,5)	1,2-14,3 (7,7)
HCO ₃ %	6-38,7 (23,7)	3,0-10,6 (6,8)	2,1-8,2 (5,2)	0,16-3,3 (1,7)	0,42-3,2 (1,8)	0,02-2,6 (1,2)

Angegeben ist der natürliche Schwankungsbereich von x -s bis x +s; mit x = arithmetischer Mittelwert und s = Standardabweichung (p=0,67) sowie fett und in Klammern der arithmetische Mittelwert.



Bundesautobahn
 Grenze Hessen/Thüringen
 Salzhang und reduzierte Salzmächtigkeiten, in Hessen weitgehend basierend auf Angaben der Kali und Salz GmbH, in Thüringen in Anlehnung an Hoppe (1960)

- ▲ Quelle, unbeeinflusst, aktuelle Analyse vorhanden (ab 1994)
- △ Quelle, unbeeinflusst, keine aktuelle Analyse vorhanden
- Quelle, beeinflusst, aktuelle Analyse vorhanden (ab 1994)
- Brunnen/Bohrloch, unbeeinflusst, aktuelle Analyse vorhanden (ab 1994)
- Brunnen/Bohrloch, unbeeinflusst, keine aktuelle Analyse vorhanden
- Brunnen/Bohrloch, beeinflusst, aktuelle Analyse vorhanden
- Brunnen/Bohrloch, beeinflusst, keine aktuelle Analyse vorhanden
- Schacht/Stollen, unbeeinflusst, aktuelle Analyse vorhanden (ab 1994)

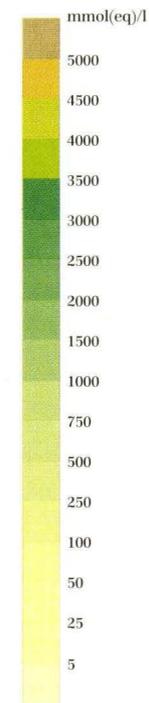


Abb. 18. Aktuelle Verteilung der Cl-Konzentrationen im Plattendolomit (Maßstab 1:300 000).

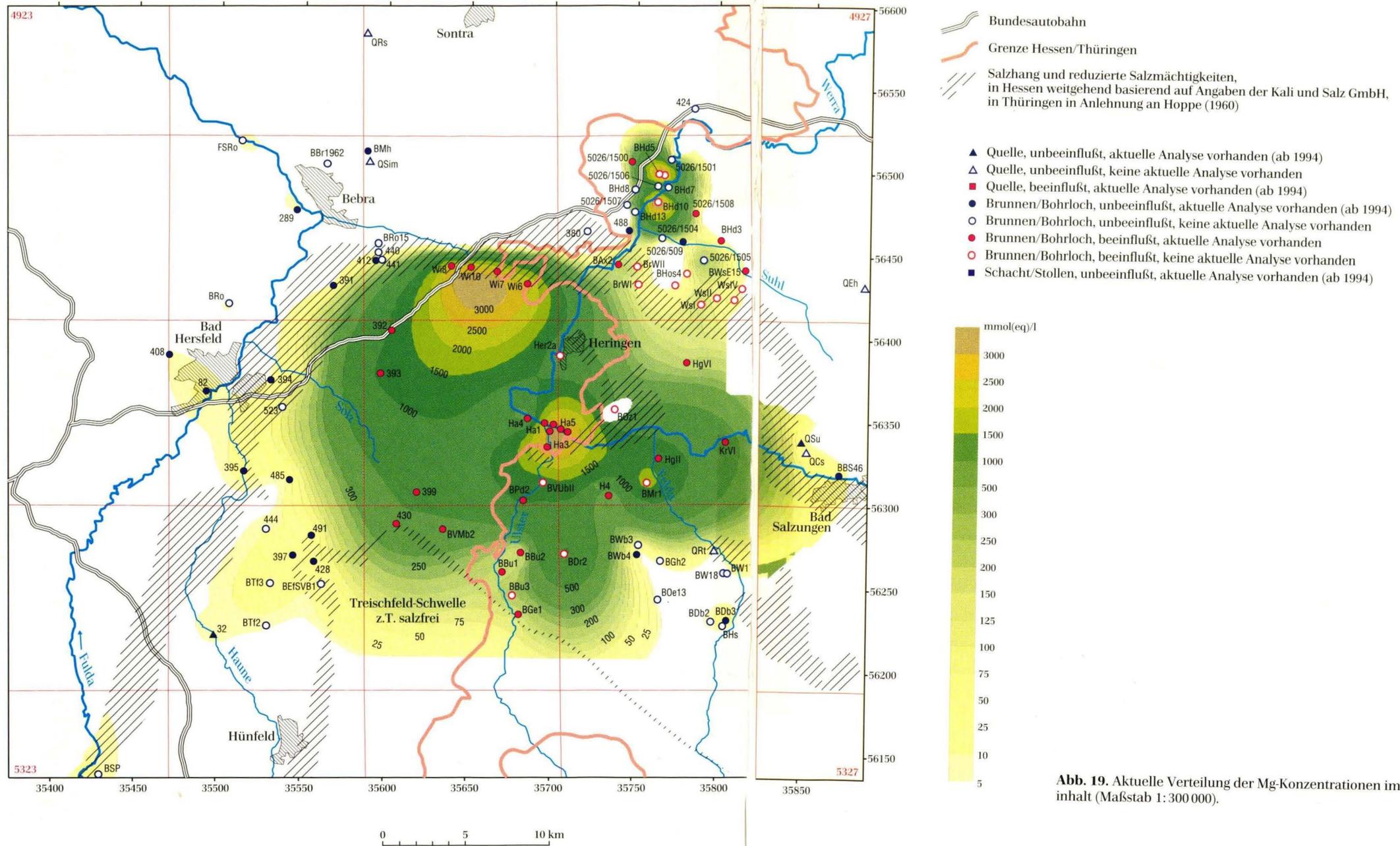


Abb. 19. Aktuelle Verteilung der Mg-Konzentrationen im Plattendolomitinhalt (Maßstab 1: 300 000).

Buntsandstein und Quartär, abgesehen von einem verdünnenden Effekt und der in begrenztem Umfang stattfindenden Erdalkalisierung (Kap. 5.2.3), keine Auswirkung auf die Grundwasserbeschaffenheit hat.

Auf der Grundlage dieser Überlegungen wird eine Einteilung des **geogenen** Formationswassers im Plattendolomit in Gruppen mit ähnlicher Grundwasserbeschaffenheit vorgenommen. Hierzu werden aus sämtlichen sicher durch Salzabwasser unbeeinflussten Meßstellen im Untersuchungsgebiet Einzelanalysen herangezogen. Folgende drei Grundwassergebiete mit jeweils typischer Grundwasserbeschaffenheit (Formationswasserbeschaffenheit) werden unterschieden:

- Infiltrationsgebiete, in denen die Grundwasser-

neubildung vorwiegend in Zechsteinausstrichgebieten erfolgt. Das Grundwasser hat keinen oder nur einen geringen Kontakt mit Salzablaugungswasser und weist geringe Lösungsinhalte ($< 8 \text{ g/l}$) auf,

- Transit- und Entlastungsgebiete mit mittleren Gesamtlösungsinhalten ($5\text{--}70 \text{ g/l}$),
- Salzablaugungsgebiete mit hohen Gesamtlösungsinhalten ($> 70 \text{ g/l}$).

Die wesentlichen chemischen Kennwerte der einzelnen Teilgebiete sind Tab. 9 zu entnehmen. Bei bekannter Zuordnung einer Grundwasseranalyse in eines der o.a. Teilgebiete kann eine Salzabwasserbeeinflussung durch eine Abweichung von den in der Tabelle aufgeführten Richtwerten identifiziert werden.

5.4 Ausbreitung im Versenkhorizont Plattendolomit

Die Lage der Versenkgebiete und Versenkbohrungen ist Abb. 9, die Versenkmengen, aufgeschlüsselt nach Versenkgebieten, Abb. 8 zu entnehmen. Die aktuelle Verbreitung der Kennwerte Cl und Mg im Grundwasser des Plattendolomits ist den Abb. 18 und 19 dargestellt, die

geogene Situation ist den Abb. 6 und 7 zu entnehmen. In Abb. 20 ist die Verteilung der anhand aktueller und geogener Cl-Konzentrationen abgeschätzten Salzabwasseranteile dargestellt (s. Kap. 5.4.5, S. 59).

5.4.1 Versenkgebiete des Werkes Wintershall (Kali und Salz GmbH)

5.4.1.1 Versenkgebiet Eichhorst/Bodesruh/Kleinensee

Die bis 1996 in diesem Versenkraum eingebrachte Versenkmenge von 225 Mio. m^3 hat sich vor allem südlich in Richtung der Eiterfelder Mulde und auch zum Entlastungsgebiet Werratal in der Umgebung von Dankmarshausen/Heringen ausgebreitet. Im Versenkhorizont wird die Verbreitung des Salzabwassers aus diesem Versenkgebiet durch die beeinflussten Meßstellen

- ehem. Versenkbohrung Wintershall 6 (BVKs4),
- die Grundwassermeßstelle 392,
- die Grundwassermeßstelle 393,
- die Grundwassermeßstelle 516 (ehem. Versenkbohrung) und
- Quelle 278
belegt (Abb. 18, 19, 20).

Für einige der o.a. Meßstellen ist anhand von Mischungsrechnungen eine Schätzung der Laufzeiten für die Strecke Versenkgebiet-Meßstelle und damit der mittleren Abstandsgeschwindigkeiten im Versenkhorizont möglich (Tab. 10). Das hierzu verwendete Verfahren ist in Kap. 2 beschrieben. Aus Tab. 10 wird ersichtlich, daß vor allem für die südwestlich des Versenkgebietes gelegene Grundwassermeßstelle 392 sehr hohe Abstandsgeschwindigkeiten erreicht werden. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß die Grundwasserleitersohlfäche vom Versenkgebiet in südliche Richtung einfällt und durch die Druckerhöhung im Versenkgebiet ein hydraulisches Druckgefälle aufgebaut wird.

Südöstlich in Richtung des Entlastungsgebietes Werratal wird für die Ausbreitung bis zur ehemaligen Versenkbohrung 516 bei vergleichbarer Entfernung eine wesentlich längere Laufzeit und somit eine geringere Abstandsgeschwindigkeit erreicht. In dieser Richtung steigt die Grundwasserleitersohlfäche an und durch den Druckaufbau im Versenkgebiet Hattorf ist auch ein geringeres hydraulisches Gefälle gegeben.

Seit 1987 ist für die Grundwassermeßstelle 392 keine wesentliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit mehr feststellbar. In diesem Zeitraum war nur noch ein geringer Anstieg der Cl-, Mg- und SO₄-Konzentrationen und eine geringe Veränderung der hiermit verbundenen Ionenverhältnisse zu verzeichnen. Mischungsrechnungen mit Salzabwasser aus dem Zeitraum nach 1987 ergeben einen erheblichen Zuwachs der Laufzeiten im Zeitraum 1987–1994 und mithin abnehmende Abstandsgeschwindigkeiten. Für die Analyse aus dem Jahr 1994 ist z.B. eine Laufzeit von 13–14 Jahren anzunehmen. Hieraus ist abzuleiten, daß die Geschwindigkeit der Salzabwasserausbreitung im Bereich dieser Meßstelle erheblich zurückgegangen ist. Als Ursache können verringerte Versenkmengen im Versenkgebiet Eichhorst/Kleineseesee (Abb. 8) und der hohe Füllungsgrad für den Plattendolomit in diesem Bereich angenommen werden. Die Grundwassermeßstelle 393 hat nach dem Resultat von Mischungsrechnungen mit Analysen aus verschiedenen Jahren eine ähnliche Entwicklung. Die Mischungsrechnungen für die Jahre 1987, 1990 und 1994 ergeben zunehmende Laufzeiten von 8,5; 9,5 und 11 Jahren. Für die ehem. Versenkbohrung 516 liegt aus neuerer Zeit lediglich eine Einzelanalyse

vor, so daß hier keine Aussagen zur zeitlichen Entwicklung der Laufzeiten möglich sind.

Die maximale Ausbreitung des im Versenkgebiet Eichhorst/Kleineseesee versenkten Salzabwassers wird durch die bis heute stofflich unbeeinflussten Grundwassermeßstellen 412, 391, 394 und 485 belegt. Ebenfalls stofflich unbeeinflusst durch Salzabwasser aus diesem Versenkraum ist die südlich des Versenkgebietes, ca. 14 km entfernt gelegene Grundwassermeßstelle 399, in der die Salzkonzentrationen nach einem Versenkversuch im Jahr 1965 beständig zurückgehen. Diese Grundwassermeßstelle ist wegen des schlechten hydraulischen Anschlusses jedoch nicht repräsentativ.

Im Gegensatz zu früheren Auffassungen (Käbel 1984, Käbel & Trottner 1984) wurde die östlich des Versenkgebietes gelegene Grundwassermeßstelle BAX X nicht durch Salzabwasser aus diesem Versenkgebiet erreicht. Die weiteste Ausdehnung in dieser Richtung markieren die stark beeinflusste ehemalige Versenkbohrung 516 und stark beeinflusste Quellen und Grundwasserblänken (z.B. Quelle 31 und 379) im Werratal (Kap. 5.3.1). Hinweise auf das bis 1967 bei Heringen in den Plattendolomit versenkte Salzabwasser existieren heute für die ehemalige Versenkbohrung 516 nicht mehr. Diese führt im August 1993 Salzabwasser aus dem Versenkgebiet Eichhorst/Kleineseesee, da diese Analyse auf einen Einfluß von „Nach-ESTA“-Salzabwasser hinweist. Durch Mischungsrechnungen mit Salzabwasseranalysen des Werkes Wintershall läßt sich die Herkunft und die Laufzeit des Salzabwassers aus diesem Versenkgebiet recht zuverlässig mit 16 Jahren schätzen (Tab. 10). Hierbei zeigt sich deutlich, daß die K- und Mg-Kon-

Tab. 10. Anhand von Mischungsrechnungen ermittelte Schätzwerte für die Laufzeiten der Salzabwasser und mittlere Abstandsgeschwindigkeiten im Versenkhorizont

Meßstelle (Probenahmedatum)	zur Berechnung verwendetes geogenes Formationswasser	mittlere Laufzeit Jahre	Entfernung zum mittl. Versenkgebiet [km]	Abstands- geschwindigkeit [km/a]
392 (1982/85/87)	Versenkbohrung Wi 9 (1964)	5 ± 1	5,4	1,1 ± 0,3
393 (1987/90/94)	Versenkbohrung Wi 9 (1964)	10 ± 2	7,8	0,8 ± 0,2
516 (1993)	Referenzanalyse Werratal (s. Tab. 6)	16 + 0/- 2	4,7	0,3 - 0,05

zentrationen des zuletzt im Jahr 1967 im Versenkgebiet Heringen versenkten Salzabwassers zu niedrig sind, um die in der Meßstelle vorgefundenen Konzentrationen zu erklären. Die

Versenkfähigkeit in den thüringischen Versenkgebieten sowie im Versenkgebiet Hattorf kommt vor allem aufgrund abweichender Mg-Konzentrationen als Verursacher nicht in Frage.

5.4.1.2 Versenkgebiet Heringen

In dieses Versenkgebiet wurden bis 1967 99 Mio. m³ Salzabwasser versenkt. Der Verbleib dieses Salzabwassers ist anhand der vorliegenden Analysen nicht mehr nachvollziehbar. Es ist jedoch auszuschließen, daß heute noch Salzabwasser aus der damaligen Versenkfähigkeit im ehemaligen Versenkgebiet vorhanden sind. Dies läßt sich z.B. an der Grundwasserbeschaffenheit in der ehemaligen Versenkbohrung 516 anhand einer Analyse aus dem Jahr 1993 zeigen (s. Kap. 5.4.1.1).

Den einzigen Hinweis auf die ehemalige Versenkfähigkeit im Raum Heringen gibt möglicherweise eine Probe aus der Grundwassermeßstelle 0508 (BOz 1) aus dem Jahr 1988. Das Grundwasser hat niedrige Mg-Konzentrationen von 450 meq/l, hohe Cl-Konzentrationen von 4700 meq/l und einen hohen Gesamtlösungsinhalt von 288 g/l. Hierfür sind grundsätzlich zwei Erklärungen möglich:

1. In der Meßstelle liegt weitgehend unverdünntes Mg-armes Salzabwasser vor, welches lediglich bei der Versenkfähigkeit des Werkes Wintershall im Zeitraum 1961–66 auftrat. In diesem Fall ist anzunehmen, daß sich das

durch das Werk Wintershall im Versenkgebiet Heringen versenkte Salzabwasser in der Tieflage der Auslaugungssenke von Oberzella gesammelt hat. Aufgrund der 1967 im Versenkgebiet Heringen eingestellten Versenkfähigkeit konnte das in der Senke angesammelte Salzabwasser nicht durch nachdrängendes Salzabwasser verdrängt werden und verblieb somit quasi als Reliktlösung an Ort und Stelle.

2. In der Meßstelle liegt ein Mischwasser vor, welches Mg-reiches Salzabwasser aus den Versenkgebieten Hattorf oder aus der ehemaligen Versenkung in Thüringen und hochkonzentriertes natürliches Formationswasser aus der Auslaugungssenke enthält. In diesem Fall wären im Formationswasser Gesamtlösungsinhalte von mehr als 250 g/l notwendig, die in Tieflagen in Gebieten mit ehemaliger oder rezenter Salzablaugung durchaus erreicht werden können (Beispiel Gerstunger Mulde).

Eine abschließende Bewertung beider Möglichkeiten ist anhand des vorliegenden Datentmaterials nicht möglich.

5.4.2 Versenkgebiet des Werkes Hattorf (Kali und Salz GmbH)

In diesem Versenkgebiet wurden bis 1996 335 Mio. m³ Salzabwasser versenkt. Aufgrund der geologisch/hydrogeologischen Situation (Höhenlage der Plattendolomitunterfläche, hydraulisches Potential) in der Umgebung des Versenkraumes ist die Ausbreitung des Salzabwassers in die nächstgelegenen Auslaugungssenken Unterbreizbach und möglicherweise Vacha-Oberzella sowie darüber hinaus in die Mulde Sünna-Butt-

lar und in die Tieflage der Eiterfelder Mulde zu erwarten. Die bevorzugten Ausbreitungsrichtungen sind in Abb. 18 und 19 anhand der aktuellen Verteilung der Cl- und Mg-Konzentrationen dargestellt. Die Abschätzung von Laufzeiten und Abstandsgeschwindigkeiten anhand von Mischungsrechnungen führt für die Meßstellen in diesem Versenkgebiet nicht zu eindeutigen Ergebnissen.

Die Verbreitung des Salzabwassers im Versenkhorizont aus diesem Versenkgebiet wird durch die Grundwassermeßstellen

- 400 (chem. Versenkbohrung Hattorf IV),
- 430,
- 0510 (BPd 2),
- BVUb II,
- BDr 2,
- 0507 (BVh 4),
- BMr 1 und
- 0589 (BGe 1) belegt.

Es ist nicht auszuschließen, daß ein Teil des versenkten Salzabwassers in östliche Richtung bis zur ehemaligen Versenkbohrung 0510 (BVKs VI) und möglicherweise weiter darüber hinaus nach Osten strömt oder geströmt ist. Wahrscheinlich ist jedoch, daß die hohen Salzabwasseranteile in dieser Meßstelle (ca. 48 %) aus der vor 28 Jahren eingestellten Versenktätigkeit im Raum Merkers-Dorndorf stammen. Das zuletzt durch den ehemaligen VEB Kalibetrieb Werra versenkte Salzabwasser und das zwischen 1980 und 1986 versenkte Salzabwasser des Werkes Hattorf sind in chemischer Hinsicht relativ ähnlich und schwer unterscheidbar. Durch die Anwendung von Mischungsrechnungen ist hier keine eindeutige Aussage möglich. Einen Hinweis auf die Beteiligung von altem „VEB-Salzabwasser“ geben jedoch die in der Meßstelle vorliegenden Äquivalentverhältnisse für Cl : Mg ($< 3,7$) und Na : K (> 20). Diese Kombination von Äquivalentverhältnissen ist mit Hattorfer Salzabwasser nur schwer zu erreichen. Eine ältere Analyse aus dem Jahr 1988 belegt einen Anstieg des Gesamtlösungsinhaltes bei annähernd gleicher chemischer Zusammensetzung. Hieraus ist indirekt auf eine Beeinflussung in diesem Raum durch die Verdrängung von altem thüringischen Salzabwasser bei fortgesetzter Versenktätigkeit im Versenkgebiet Hattorf zu schließen.

Für die Grundwassermeßstelle 430, südwestlich des Versenkgebietes Hattorf, ist eine Beeinflussung durch Salzabwasser aus dem Versenkgebiet Eichhorst/Kleinensee nach Mischungsrechnungen mit Salzabwasser aus dem Werk

Wintershall nicht nachzuvollziehen. Bei der Berechnung ergeben sich theoretisch Laufzeitdifferenzen zwischen den ca. 9 km voneinander entfernten Grundwassermeßstellen 393 und 430 von 1,5 bis 3 Jahren. Hieraus resultieren extrem hohe Abstandsgeschwindigkeiten von 3–6 km/a, die in diesem Grundwasserleiter nicht realistisch sind. Grundsätzlich ist es entsprechend den theoretischen Grundlagen der Versenkung (Ausbreitung des schweren Salzabwassers in tiefliegende Bereiche des Plattendolomits) für diese Meßstelle jedoch nicht ausgeschlossen, daß Salzabwasser aus beiden hessischen Werken (Wintershall und Hattorf) beteiligt ist. Da für Mischungsrechnungen mit drei Komponenten, in diesem Fall zwei verschiedenen Typen von Salzabwasser und einem Typ Formationswasser, keine eindeutige mathematische Lösung möglich ist, kann hierzu keine Aussage gemacht werden. Die bis 1991 in der Grundwassermeßstelle 430 ansteigenden Salzkonzentrationen belegen die zunehmende Salzabwasserausbreitung und Verdrängung natürlichen Formationswassers in südwestliche Richtung. Seit 1991 steigt die Summe gelöster fester Bestandteile in dieser Meßstelle nur noch gering an, während die Mg- und K-Anteile weiter deutlich zunehmen (s. Sonderbericht „Einflüsse der Salzabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet auf Grund- und Oberflächenwasser“, SaAbHe 1996). Hieraus kann abgeleitet werden, daß in diesem Gebiet, bei gleichbleibenden Salzabwasseranteilen im Plattendolomit, Änderungen in der Grundwasserbeschaffenheit nur noch durch produktionsbedingt unterschiedliche Zusammensetzungen des Salzabwassers hervorgerufen werden. Offensichtlich wurde in dieser Meßstelle seit 1991 der unter den derzeitigen Druckbedingungen im Einflußbereich der Versenkung maximal mögliche Auffüllungsgrad für Salzabwasser im Plattendolomit erreicht. Somit ergibt sich für diese Meßstelle eine ähnliche Situation wie in der Grundwassermeßstelle 392 (Kap. 5.4.1.1).

Für die Grundwassermeßstelle 0506 (BVh 4) liegt lediglich eine weitere Analyse aus dem Jahr 1990 vor, die einen abnehmenden Lö-

sungsinhalt ausweist. Die Grundwassermessstelle 0589 (BGe 1) hat etwa gleichbleibende Salzkonzentrationen. Auffallend ist in dieser Messstelle die in Relation zum Lösungsinhalt niedrige Mg-Konzentration und das entsprechend hohe Cl : Mg-Verhältnis (> 19), welches durch die Verbreitung von hochkonzentriertem natürlichen Salzauslaugungswasser in der Mulde Sünna-Buttlar zu erklären ist. Über die weitere Ausbreitung des Salzabwassers südlich dieser Messstelle ist aufgrund fehlender Aufschlüsse keine Aussage möglich. Der Verlauf der in diesem Bereich nicht durch Meßwerte gestützten Isolinien in den Abb. 18 und 19 kann nur eine grobe Schätzung darstellen.

Südöstlich des Versenkgebietes wird die Verbreitung von Salzabwasser aus dem Werk Hattorf durch das hohe hydraulische Potential im Bereich Sünna, Völkershäuser, Wölferbütt, Schorngraben (300–330 m ü. NN, Angabe der Kali und Salz GmbH) begrenzt. Die geringen Gesamtlösungsinhalte in den Grundwassermessstellen BGh 2, BOe13, BDb 2 und 0522 (BDb 3), BHs, BW 17 und BW 18 und der Quelle QRt belegen die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen in dem durch diese Messstellen beschriebenen Gebiet. Vermutlich wird der Zustrom von Salzabwasser durch die Süßwässerflut zusammen mit dem hohen hydrostatischen Druckniveau verhindert.

Die zeitliche Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit der im Jahr 1943 stillgelegten Versenkbohrung 400 (BVHa 4) läßt auf die Salz-

abwasserausbreitung im nordwestlichen Teil des Versenkgebietes schließen (Abb. 17e). Seit dem Beobachtungsbeginn im Jahre 1981 nahm der Gesamtlösungsinhalt von 223 g/l auf 143 g/l im Jahr 1996 ab. Für dieses Gebiet muß somit ein funktionierender Grundwasseraustausch mit natürlichem Formationswasser existieren. Ein Kontakt mit aktuell versenktem Salzabwasser ist für diese Messstelle nicht feststellbar, so daß eine Salzabwasserausbreitung in nordwestliche Richtung ausgeschlossen werden kann.

Für die nordöstlich des Versenkgebietes Hattorf gelegene Auslaugungssenke Oberzella-Vacha besteht die Möglichkeit, daß hier Restlösungen aus dem ehemaligen Versenkgebiet Heringen (Kap. 5.4.1.2) vorliegen und somit eine Ausbreitung in die Auslaugungssenke Oberzella-Vacha nicht stattgefunden hat.

Im Bereich des Pferdsdorfer Sattels weisen geringe Gesamtlösungsinhalte in der Grundwassermessstelle 0510 (BVPd, Analyse aus dem Jahr 1964) auf ein weiteres, jedoch eng begrenztes Infiltrationsgebiet hin. In der Bohrung wurden offensichtlich in den sechziger Jahren oder noch früher Versenkversuche durchgeführt. Darauf läßt das extrem niedrige Ca : Mg-Verhältnis von 0,09 schließen. Sowohl die Cl- als auch Mg-Konzentrationen sind im Jahr 1964 mit 1,4 meq/l Cl und 0,4 meq/l Mg sehr gering. Unter der Voraussetzung, daß kein Probenahme- bzw. Analysefehler vorliegt, ist hier eine erhebliche Verdünnung durch Süßwasser anzunehmen.

5.4.3 Versenkgebiete der thüringischen Werke (ehem. VEB Kalibetrieb Werra)

5.4.3.1 Versenkgebiet Merkers-Dorndorf, Kaiserroda

In diesen Versenkkräusen im südlichen Werra-Kaligebiet wurden rd. 60 %, entsprechend etwa 140 Mio. m³, der Gesamtversenkmenge der thüringischen Werke versenkt.

Die Verbreitung des im Gebiet Merkers-Dorndorf (v.a. Versenkbohrung PO, s. Abb. 9) versenkten Salzabwassers ist heute vollständig durch Salzabwasser aus dem Werk Hattorf überprägt. Es ist anzunehmen, daß das vorwiegend in die

Auslaugungssenke Unterbreizbach versenkte Salzabwasser durch aus dem Versenkgebiet Hattorf nach Süden in die Mulde Sünna-Buttlar abfließendes Salzabwasser verdrängt wurde. Aufgrund der aktuellen Verteilung der Isolinien (Abb. 18 und 19) ist für das bei Dorndorf versenkte Salzabwasser (Versenkbohrung BVHg I, II, V) eine Verdrängung in östliche Richtung in den Raum Kaiserroda anzunehmen. Der heutige

Verbleib des Salzabwassers aus diesem Versenkraum ist aufgrund der Ähnlichkeit in der chemischen Zusammensetzung des Salzabwassers aus dem ehemaligen VEB-Kalibetrieb Werra und

dem Werk Hattorf nicht mehr nachzuvollziehen. Zur Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit in der ehem. Versenkbohrung 0510 (BVKr VI) wird auf das Kapitel 5.4.2 verwiesen.

5.4.3.2 Versenkgebiet Springen, Gospenroda, Frauensee

In diesen Gebieten wurden ca. 40 %, entsprechend etwa 93 Mio. m³, der Gesamtversenkmenge in Thüringen versenkt.

In den ehemaligen Versenkgebieten Frauensee und Gospenroda entspricht die heutige Grundwasserbeschaffenheit (Abb. 18 und 19) etwa derjenigen der primären Situation (Abb. 6 und 7). Daraus wird ersichtlich, daß die durch Versenkung von Salzabwasser hervorgerufene massive Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit in Gebieten mit funktionierendem Grundwasseraustausch reversibel ist. Ehemalige Salzabwassereinflüsse sind oftmals nur noch anhand niedriger Ca : Mg-, Na : K- und Cl : Mg-Verhältnisse auszumachen. Ein Beispiel gibt die Entwicklung in der ehemaligen Versenkbohrung BVWs IV. Durch Verdünnung mit Infiltrationswasser aus den Infiltrationsgebieten im angrenzenden Thüringer Wald nahm der Gesamtlösungsinhalt zwischen 1979 und 1992 von 25 g/l auf 0,9 g/l ab. Der Salzabwassereinfluß ist 1992 nur noch über die Verhältnisse Ca : Mg (0,32), Na : K (6,3) und Cl : Mg (2,3) zu identifizieren (vgl. Tab. 9). Mit zunehmender Entfernung zu den randlichen Infiltrationsgebieten vollzieht sich die Verdünnung des Mischwassers entsprechend langsamer. Ein Beispiel hierfür gibt die ehemalige Versenkbohrung BVBr II, in der der Gesamtlösungsinhalt zwischen 1979 und 1992 von 57 auf 42 g/l abnahm. Nach Käbel (1984) ist es denkbar, daß hier über eine bei Berka das

Werratal querende Störungszone geringkonzentriertes Infiltrationswasser aus dem benachbarten Richelsdorfer Gebirge oder dem Dippach-Tiefenorter Sattel zugeführt wird.

Den einzigen Hinweis auf steigende Salzkonzentrationen in den Versenkgebieten Frauensee/Gospenroda gibt die zeitliche Entwicklung in der ehemaligen Versenkbohrung BVWs I, in der der Gesamtlösungsinhalt zwischen 1979 und 1992 von 11 auf 31 g/l anstieg. Die in diesem Zeitraum abnehmenden K- und Mg-Äquivalentanteile weisen darauf hin, daß hier verdrängtes, höher konzentriertes Formationswasser, möglicherweise aus der Horschlitter Mulde, beteiligt ist.

Im ehemaligen Versenkgebiet Springen existieren Beobachtungsergebnisse lediglich für die ehemalige Versenkbohrung 0509 (BVHg VI). Der heutige Lösungsinhalt belegt eine starke Verdünnung des Mischwassers bis auf einen Salzabwasseranteil von ca. 8 % bezogen auf die Cl-Konzentration des zuletzt durch den VEB Kalibetrieb Werra versenkten Salzabwassers und eine angenommene primäre Cl-Konzentration von 150 meq/l. Für dieses Versenkgebiet ist zu vermuten, daß die Infiltration gering konzentrierten Wassers im Bereich von Hochlagen entlang des Dippach-Tiefenorter Sattels z.B. im Hügelland bei Frauensee zu der erheblichen Verdünnung des Mischwassers führt (Käbel 1984).

5.4.4 Sonstige Gebiete mit potentieller Salzabwasserbeeinflussung

Im Zentrum der Bad Hersfelder Auslaugungssenke entnimmt das Staatsbad Bad Hersfeld aus zwei Tiefbrunnen im Plattendolomit Heil- bzw. Mineralwasser. Beide Brunnen, der

Tiefbrunnen 82 und der Tiefbrunnen 362, befinden sich im salzfreien Bereich des bereits vollständig abgelagerten Salinars westlich des Salzhangs. Der Plattendolomit erreicht in der Hers-

felder Senke Tiefen bis ca. 400 m u. GÖK und liegt damit tiefer als in den östlich anschließenden Meßstellen am Salzhang (Grundwassermessstellen 392, 393, 394, 391, 395, 485, 523), so daß von hier ein potentieller Abstrom in das Zentrum der Senke möglich wäre.

In beiden Tiefbrunnen stiegen die Salzkonzentrationen im Beobachtungszeitraum erheblich an. Im Tiefbrunnen 82 nahm der Lösungsinhalt durch Zunahme der Na- und Cl-Konzentrationen von 8,7 g/l im Jahr 1950 auf maximal 15 g/l im Jahr 1992 zu. Im Tiefbrunnen 362 war der Anstieg von 6,1 g/l im Jahr 1965 auf 20 g/l im Jahr 1982 noch stärker. Seit 1991 ist im Tiefbrunnen 82 ein etwa stationäres Konzentrationsniveau erreicht. Im Tiefbrunnen 362 stiegen die Salzkonzentrationen bis 1982 an und nahmen bis heute auf 16 g/l ab. Die Zunahme wird durch den Zufluß von geogenem Formationswasser mit höheren Na- und Cl- und im Tiefbrunnen 362 auch höheren Ca-, Mg- und SO₄-Konzentrationen verursacht. Eine Beteiligung von Salzabwasser ist zu keinem Zeitpunkt gegeben.

Als Ursache für die Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit kommen folgende Möglichkeiten in Betracht:

1. Die Tiefbrunnen werden von höher konzentriertem Formationswasser angeströmt. Aufgrund der hierfür erforderlichen Grundwasserbeschaffenheit kommt lediglich eine Herkunft aus östlicher bis südöstlicher Richtung in Betracht. Hier weisen sowohl die Grundwassermessstelle 395 als auch 485 und die östlich Bad Hersfeld gelegene, 1996 gebohrte Grundwassermessstelle 523 (sehr ähnlich 485) eine geeignete Grundwasserbeschaffenheit auf, die typisch für Plattendolomitwasser im Salzhangbereich bzw. in Subrosionsgebieten ist. Beide Staatsbadbrunnen werden seit 48 Jahren (Tiefbrunnen 82) bzw. 33 Jahren (Tiefbrunnen 362) nahezu ununterbrochen mit einer Jahresfördermenge von insgesamt etwa 0,079 Mio. m³ betrieben. Abgesehen von kurzfristigen Probenahmen wird aus den umliegenden Meßstellen kein Grundwasser ent-

nommen, so daß hier die einzigsten Dauerentnahmestellen im Plattendolomit mit einem entsprechend großen Entnahmebereich vorliegen.

2. Durch die fortgesetzte Entlastung des gespannten Grundwasserleiters fließt im Entnahmebereich der Tiefbrunnen höher konzentriertes Formationswasser aus dem unteren Abschnitt des Plattendolomit und aus näher zum Salzhang gelegenen Bereichen zu. Hierfür ist die Ausbildung einer primären Dichteschichtung im Grundwasserleiter erforderlich. Diese Möglichkeit kommt deshalb in Betracht, weil beide Brunnen nicht als vollkommene Brunnen ausgebaut wurden und der unterste Abschnitt des Grundwasserleiters nicht mit der Filterstrecke erfaßt wird. Unter Umständen kann auch der Zufluß von höher konzentriertem Formationswasser aus einem tieferen, hydraulisch nur wenig mit dem oberen Stockwerk kommunizierenden weiteren Grundwasserstockwerk im Plattendolomit durch Leckage herangezogen werden. Hierfür könnte eine möglicherweise auch im Bereich von Bad Hersfeld vorhandene fazielle Untergliederung des Plattendolomit durch tonige Zwischenmittel sprechen, auf deren Vorkommen Bohrerergebnisse hinweisen.

Falls die erste Möglichkeit zuträfe, wäre eine indirekte Beeinflussung durch die Salzabwasserversenkung über die Verdrängung geogenen Formationswassers in Richtung Bad Hersfeld nicht auszuschließen. In diesem Fall könnte bei einer Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit in den Grundwassermessstellen 395, 425 und 523 in Richtung Salzabwasserbeeinflussung langfristig eine potentielle Gefährdung des Tiefbrunnens 82 abgeleitet werden. Der Überwachung der drei Grundwassermessstellen kommt somit wesentliche Bedeutung zu. Eine Druckauswirkung der Versenkung auf die Bad Hersfelder Brunnen konnte allerdings - auch in Zeiten hoher Versenkleistungen - nicht eindeutig nachgewiesen werden. Allerdings erschließt auch die im Salzhanginnenbereich gelegene neu abgeteufte Grundwassermessstelle 523 le-

diglich unbeeinflusstes Plattendolomit-Formationswasser.

Die zweitgenannte Möglichkeit ist daher die wahrscheinlichere, zumal auch die Bohrung 523 sowohl im Plattendolomit als auch bei einer Beprobung des tiefen Unteren Buntsandstein während des Abteufens 1996 eine verwandte, stofflich von der Versenkung unbeeinflusste Grundwasserbeschaffenheit hatte.

Nördlich von Bad Salzungen entnimmt der Salinenbetrieb Bad Salzungen Mineralwasser aus drei Brunnen im Plattendolomit. Aufgrund der dauernden Druckentlastung am Rand des ehemaligen Versenkgebietes Kaiseroda besteht hier, ebenso wie für die Staatsbadbrunnen von Bad Hersfeld, langfristig ein generelles Gefährdungspotential. Angaben von Käbel (1984) zufolge, war die nordwestlich etwa 3 km entfernt gelegene Solquelle QSu Mitte der siebziger Jahre eindeutig durch Salzabwasser beeinflusst.

Aufgrund der vorliegenden Einzelanalysen aus den Jahren 1931, 1938, 1967 und 1995 ist dieses nicht nachzuvollziehen. Die zuletzt entnommene Analyse aus dem Jahr 1995 weist keine Salzabwasserbeeinflussung auf und ist sowohl im Lösungsinhalt als auch in der Zusammensetzung nahezu identisch mit der 1938 entnommenen Probe. In den Tiefbrunnen der Salinenbetriebe selbst wurde den vorliegenden Unterlagen zufolge zu keinem Zeitpunkt eine Salzabwasserbeeinflussung festgestellt. Es bleibt festzustellen, daß zum heutigen Zeitpunkt, aufgrund der aktuellen unbeeinflussten Situation in der Solquelle QSu, eine Beeinflussung der Salinenbrunnen im Plattendolomit nicht wahrscheinlich ist. Für die zukünftige Frühwarnung zum Schutz der Salinenbrunnen kommt der laufenden Überwachung der Grundwassermeßstelle 0510 (BVKr VI) und der Solquelle QSu wesentliche Bedeutung zu.

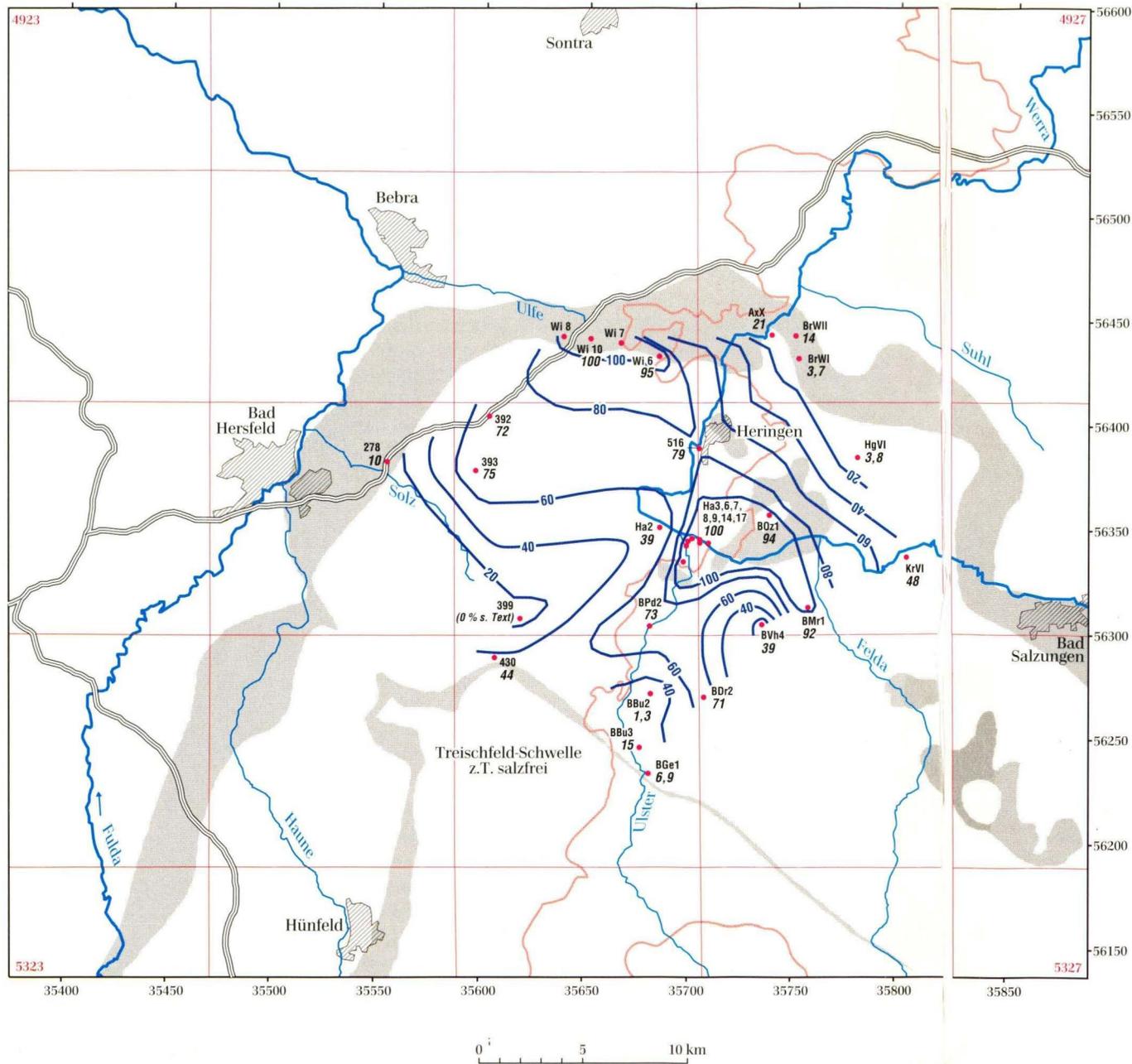
5.4.5 Abschätzung der Salzabwasseranteile im Versenkraum

Die quantitative Beurteilung der Salzabwasserausbreitung im Versenkhorizont läßt sich für das Salzabwasserverbreitungsgebiet über eine Abschätzung der Salzabwasseranteile vornehmen. Hierzu werden die jeweils aktuellen vorliegenden Analysen von insgesamt 19 beeinflussten Grundwassermeßstellen aus dem Zeitraum 1987–1994 herangezogen. Der Bereich Gerstunger- und Horschlitter- Mulde wird von der Auswertung ausgenommen, da in diesem Gebiet aufgrund verschiedener Versenkversuche keine einfache Abschätzung möglich ist. Für die Quelle 278 wurde der anhand der Cl-Konzentration für den Zeitraum 1993–1994 ermittelte Salzabwasseranteil aus dem Sonderbericht „Einflüsse der Salzabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet auf Grund- und Oberflächenwasser im Einzugsgebiet der Fulda – Fuldabereich“ (SaAbHe 1996) zugrundegelegt.

Die Schätzwerte für die einzelnen Meßstellen sowie die flächenhafte Verbreitung der Salzabwasseranteile sind in Abb. 20 dargestellt. Die verwendete Methode zur Ermittlung der Salzab-

wasseranteile ist in Kap. 2 beschrieben. Als günstig für die Berechnung erweist sich die trotz Produktionsumstellung in den hessischen Kaliwerken relativ geringe Schwankungsbreite der Cl-Konzentrationen. Der maximal mögliche Fehler, der sich durch Verwendung mittlerer Cl-Konzentrationen ergibt, beträgt für das Werk Wintershall 16 % und für das Werk Hattorf 12 %. In Einzelfällen wird für die Schätzung der Salzabwasseranteile auf die Mg-Konzentrationen zurückgegriffen. Der Fehler ist in diesen Fällen erheblich größer. Die Zuordnung von Meßstellen zu Verursachern erfolgte mit den in Kapitel 5.4.1–5.4.3 vorgestellten Ergebnissen. Die primären Cl- bzw. Mg-Konzentrationen (C_2) am Ort der Meßstelle werden aus den Isolinenplänen für die natürliche Situation (Abb. 6 und 7) bzw. aus „alten“, unbeeinflussten Analysen entnommen.

Als realistische Summe der Teilfehler kann für die berechneten Salzabwasseranteile eine Abweichung vom Schätzwert in Höhe von maximal 35 % angenommen werden (bei Verwen-



- Bundesautobahn
- Grenze Hessen/Thüringen
- Salzhang, und reduzierte Salzmächtigkeiten in Hessen weitgehend basierend auf Angaben der Kali und Salz GmbH, in Thüringen in Anlehnung an Hoppe (1960)

HgVI Bezeichnung der Meßstelle/des Versenkbrunnens

3,8 geschätzter Salzabwasseranteil in %

Ermittlung der Schätzwerte

Die Abschätzung der Salzabwasseranteile erfolgte überwiegend auf der Grundlage der Cl-Konzentrationen in der Meßstelle zum Probenahmezeitpunkt. Details zur Berechnung und zur Fehlerbetrachtung im Text.

Abb. 20. Geschätzte Salzabwasseranteile im Plattendolomit (Maßstab 1:300 000).

derung der Cl-Konzentrationen). Die relativen Fehler liegen in Abhängigkeit vom Salzabwasseranteil zwischen 6 und 27 %. Die in Abb. 20 dargestellte flächenhafte Verteilung gibt eine stark interpolierte Situation wieder. Dies trifft

besonders auf die Bereiche zwischen Weisenborn und Hattorf/Heringen sowie zwischen Heringen und Berka zu. Hier wird die Isolinienkonstruktion nicht durch Meßwerte gestützt.

5.5 Ausbreitung von Salzabwasser und Mischwasser im Buntsandstein und Quartär

5.5.1 Werratal

In den Entlastungsgebieten an der Werra tritt lokal begrenzt Salzabwasser aus dem Plattendolomit in die Grundwasserleiter im Buntsandstein und Quartär über. Bei einem Aufdringen des Salzabwassers bis zur Sohle der Vorfluter kommt es zu diffusen Salzabwassereinträgen. Der überwiegende Teil der diffusen Einträge erfolgt im Untersuchungsgebiet im Werratal zwischen Heringen und Dankmarshausen. Hier traten seit 1991 zwischen 10 und 18 kg/s Cl diffus in die Werra ein (Sonderbericht „Diffuse Einträge von Salzabwasser in die Werra – 1994“ (KoSaAb 1996). Am linken Werraufer in Dankmarshausen ist ein direkter Eintritt von Salzabwasser in das Flußbett beobachtet worden.

Zur Beurteilung der räumlichen und zeitlichen Verbreitung von Salzabwassern in einem Salzabwassersteigsgebiet wird für das Teilgebiet Werratal die in Kap. 5.3.1 beschriebene Typisierung herangezogen. Hierzu werden Analysen aus den vorhandenen Grund- und Oberflächenaufschlüssen aus jeweils drei verschiedenen Zeiträumen verwendet. Ausgewertet werden Wasseranalysen aus den für die Betrachtung von diffusen Einträgen relevanten Grundwasserleitern im Buntsandstein und Quartär sowie aus Oberflächengewässern mit Grundwasserzufluß. Um die Datenmenge zu reduzieren, werden ausschließlich Meßstellen berücksichtigt, in denen seit den sechziger Jahren erhöhte Salzabwasserkonzentrationen gemessen wurden. Das Auswahlkriterium hierfür sind entweder zeitweise oder ständig Chloridkonzentrationen von mehr als 28 meq/l (= 1 g/l) in der jeweiligen Meßstelle. Zur Untersuchung der zeit-

lichen Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in der Werratalaue werden Analysendaten aus den folgenden drei Zeiträumen ausgewertet.

Die Einteilung in die Vergleichszeiträume ergibt sich zum einen aufgrund der zeitlichen Analysendichte in dem vorliegenden Datenmaterial und zum anderen aufgrund der Versenkfähigkeit der Kaliwerke in der Umgebung der Werratalaue. Dabei können den o.a. Zeiträumen folgende Versenkereignisse zugeordnet werden (s.auch Kap. 3.1):

Zeitraum I, 1965–1968: Versenkung von Salzabwasser in den Plattendolomit der Werratalaue im Versenkgebiet Heringen durch das Werk Wintershall (bis 1967), im Versenkgebiet Hattorf bei Philippsthal durch das Werk Hattorf sowie durch die thüringischen Werke in den Versenkgebieten Gospenroda und Springen (bis 1968). Die Gesamtversenkmengen liegen zwischen 16 und 28 Mio. m³/a (Abb. 8).

Zeitraum II, 1978–1985: Die Versenkmengen der hessischen Werke im Werra-Kaligebiet erreicht ihr Maximum mit ca. 21 Mio. m³/a (1980, Abb. 8). Seit 1968 versenkt das Werk Wintershall nicht mehr in der Werratalaue, sondern ausschließlich nordwestlich davon im Versenkgebiet Eichhorst/Kleinensee. Aufgrund der Umstellung der Aufbereitung der hessischen Werke auf das ESTA-Verfahren zwischen 1976 und 1985 wird zunehmend kalium-, magnesium- und sulfatreicheres Salzabwasser versenkt.

Zeitraum III, 1990–1993: Die Versenkmengen geht auf ca. 8–10 Mio m³/a zurück (Abb. 8).

Um eine möglichst große Zahl von Meßstellen innerhalb eines Zeitraumes vergleichen zu

können, werden jeweils zeitlich möglichst eng zusammenliegende Messungen aus einer Zeitspanne von drei Jahren (Zeitraum I und III) bis sieben Jahren (Zeitraum II) aus dem vorliegenden Datensatz herausgesucht und nach der Plausibilitätskontrolle der Analyse für die Typisierung verwendet. Diese Vorgehensweise erscheint gerechtfertigt, weil innerhalb der gewählten Zeitspannen i.a. keine gravierenden Änderungen der Wasserbeschaffenheit zu beobachten waren. Aufgrund der nicht einheitlichen Meßintervalle sowie einiger erst in den siebziger Jahren hergestellten Meßstellen können für den Zeitraum I (1965-68) lediglich 42 verwertbare Analysen zur Typisierung herangezogen werden. In den Zeiträumen II (1978-85) und III (1990-93) stehen 75 bzw. 74 verwertbare Analysen zur Verfügung.

Aufgrund der o.a. Einschränkungen ist bei dem Ergebnis der Typisierung zu berücksichtigen, daß nicht alle verwendeten Analysendaten für die jeweils betrachteten Zeiträume aus demselben Jahr stammen. Weiterhin ist der Zeitraum 1965-68 aufgrund der geringeren Analysenzahl nicht direkt mit den nachfolgenden Zeiträumen vergleichbar.

In einigen Meßstellen lagen die Cl-Konzentrationen zeitweise unterhalb von 28 meq/l (= 1 g/l). Aufgrund der geringen Mineralisation wird in diesen Fällen auf eine Typisierung verzichtet. Im folgenden werden hiervon betroffene Meßstellen mit dem **Typ 0** gekennzeichnet.

Zur Verifizierung der Güte der mittels Typisierung erreichten Zuordnung von Meßstellen wird eine Diskriminanzanalyse am vorliegenden typisierten Datenmaterial mit den Kennwerten K, Na, Ca, Mg, Cl, SO₄, Ca : Mg, Na : K, Cl : SO₄, K : Ca, Na : Mg, EA : A und Cl : Na (aus meq/l) durchgeführt. Mittels Diskriminanzanalyse werden die einzelnen Fälle (Meßstellen) auf der Grundlage berechneter statistischer Wahrscheinlichkeiten den vorgegebenen Typen zugeordnet. Das Ergebnis der Diskriminanzanalyse läßt sich als prozentuale Übereinstimmung der statistischen Zuordnung angeben. Bei vollständiger Übereinstimmung der diskriminanzanalytischen Typzuordnung mit der vorgegebenen

Typzuordnung werden 100 % und bei kompletter Fehlzuweisung 0 % erreicht. Hierdurch kann überprüft werden, inwieweit bei einer Zuordnung des Analysenmaterials nach statistischen Verfahren unter Berücksichtigung von weitaus mehr Einzelkennwerten abweichende Ergebnisse erreicht werden.

Bei der Diskriminanzanalyse werden folgende Ergebnisse erzielt:

Typ	% Übereinstimmung	Anzahl zugewiesener Meßstellen
1a	87,5	18
1b	80	20
2	100	3
3	96,5	107
4a	50	9
4b	87,5	30

Die Diskriminanzanalyse mit dem typisierten Datenmaterial ergibt eine überwiegend gute Zuordnungsqualität. Lediglich für den Typ 4a werden 50 % Fehlzuweisungen erreicht. Hierdurch wird ersichtlich, daß eine Typisierung mit lediglich zwei Kennwerten (Kriterien), wie im Fall des Typ 4a, zu unsicheren Ergebnissen führen kann. Insgesamt wird das Ergebnis der Typisierung nach den in Kap. 5.3.1 vorgestellten Vorgaben bestätigt.

Die räumliche Verteilung der Grundwasserbeschaffenheitstypen ist den Karten in Abb. 21a, b, c zu entnehmen. Hieraus wird ersichtlich, daß die Grund- und Oberflächengewässer im betrachteten Teilgebiet im Zeitraum I (1965-68) am geringsten und im Zeitraum II am stärksten durch Salzabwasser beeinflusst sind.

Im Zeitraum I sind lediglich zwei Meßstellen im Buntsandstein (31 und 304) sowie der Kieselsee (379) merkbar durch Salzabwasser beeinflusst (Typ 1b). Die zunehmende Beeinflussung durch Salzabwasser im Zeitraum II (1978-85) zeigt sich im Auftreten von starken Salzabwasserbeeinflussungen (Typ 1a) insbesondere in Meßstellen am linken Werraufer in Widdershausen (31, 480 und 483) und bei Heringen (477 und 478) sowie im Kieselsee Ks1D. Im Zeitraum III (1990-93) treten vornehmlich in flachen

Quartär-Meßstellen am rechten Ufer im Bereich der Werratalaue merkbare Beeinflussungen durch Salzabwasser (Typ 1b) auf. Auffallend ist, daß die zunehmende Beimischung von Salzabwasser in der Werratalaue in der überwiegenden Zahl der untersuchten Meßstellen mit zurückgehenden Gesamtlösungsinhalten verbunden ist. Dies ist vermutlich auf die Verringerung der Formationswassermächtigkeit über

der Salzabwasserschicht (s.a. Kap. 5.1 und 5.2 und Abb. 15) im Plattendolomit durch fortwährende diffuse Einträge (Aufstieg von Formationswasser) zusammen mit einem generellen Absinken der Salz-/Süßwassergrenze im Quartär bzw. Buntsandstein (Verdünnung durch Grundwasserneubildung) zurückzuführen. Die Grundwasserspiegelhöhen in vielen Grundwassermeßstellen der Werratalaue erreichten zu-

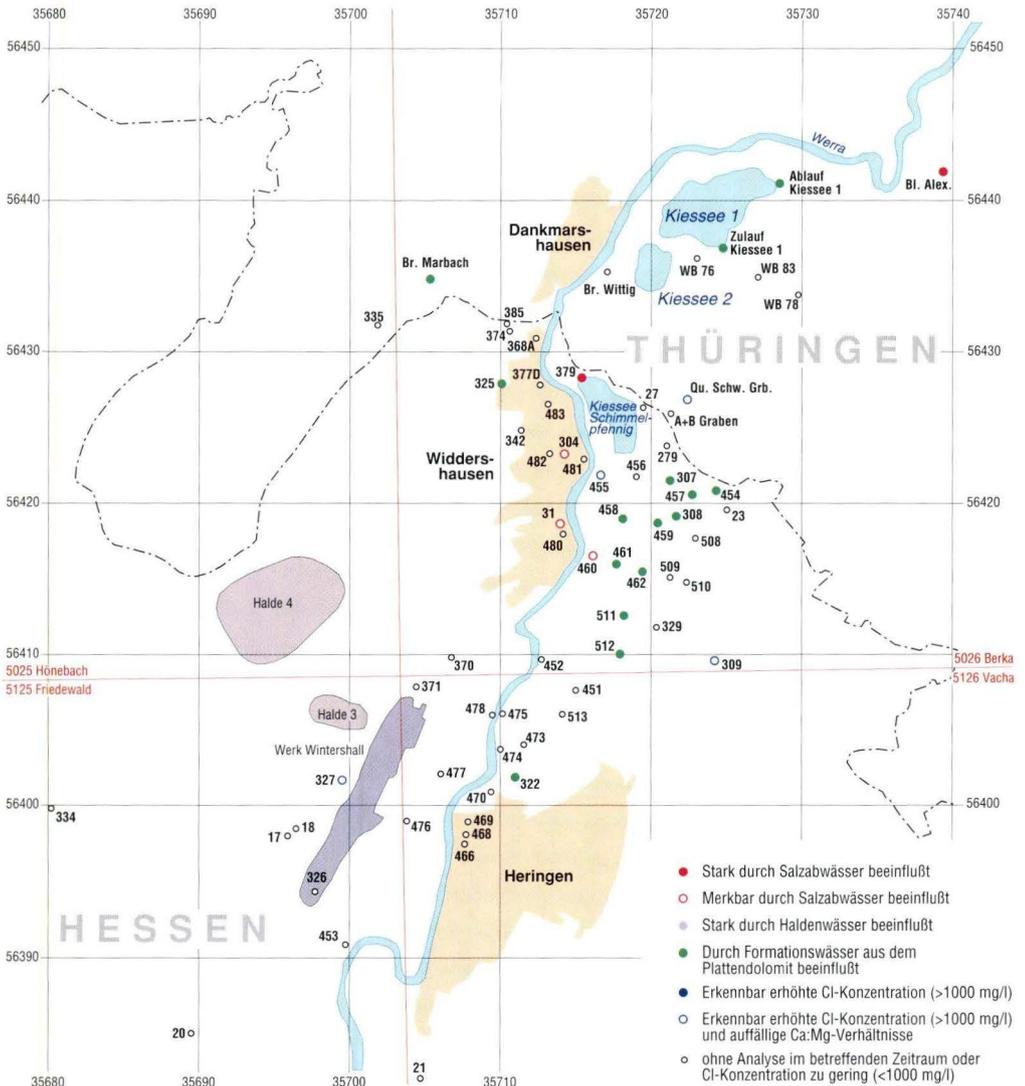


Abb. 21a. Verteilung der Grundwasserbeschaffenheitstypen (Zeitraum I).

dem im Zeitraum II ihren höchsten Stand und sanken im Zeitraum III wieder um durchschnittlich 1 m auf das Niveau des Zeitraumes I ab, so daß hier ein Zusammenhang mit den Versenkmengen zu erkennen ist. Das Auftreten von starken Salzabwassereinflüssen in den Meßstellen 370, 477 und 478 am linken Werraufer resultiert nicht aus Übertritten von Salz- wasser aus dem Plattendolomit, sondern hat an-

dere Ursachen auf die im folgenden näher ein- gegangen wird.

Für Meßstellen mit einer starken Beeinflus- sung durch Salzabwasser (Typ 1a) wird eine detaillierte Auswertung vorgenommen, deren Er- gebnisse im folgenden zusammengefaßt sind. Der Zeitraum, in dem eine Typ 1a-Beeinflussung festgestellt wird, ist nachfolgend in Klammern hinter der Meßstellenbezeichnung aufgeführt.

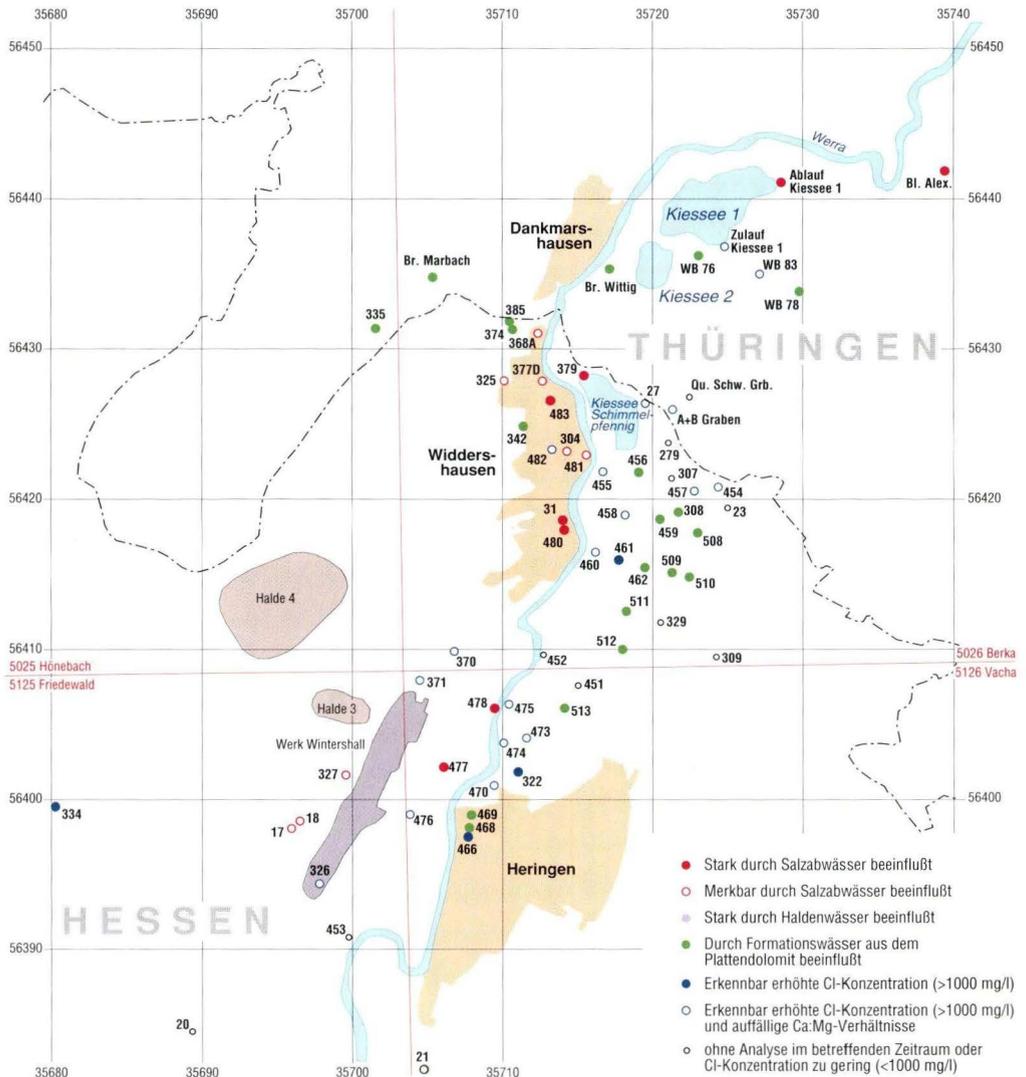


Abb. 21b. Verteilung der Grundwasserbeschaffenheitstypen (Zeitraum II).

1. Zwei Quartärmeßstellen, 477 und 478 (II und III), südlich und östlich des Werkes Wintershall, sind seit etwa 1990 durch eine Althalde und/oder Leckageverluste aus den benachbarten Stapelteichen des Werkes Wintershall beeinflusst. Zur Untersuchung der Herkunft der Salzbelastung wurden zwei weitere flache Meßstellen (518, 519) im Nahbereich der Stapelteiche bzw. der Althalde erstellt. Anhand der daran

vorgenommenen Grundwasseranalysen erfolgte die weitere Zuordnung der Salzbelastung.
 2. Für eine Quelle (370) resultiert die Zuordnung in den Typ 1a im Zeitraum III vermutlich aus der Beteiligung von Haldenwasser aus der Großhalde IV. Eine weitergehende Auswertung zu dieser Meßstelle ist im Sonderbericht „Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra – 1994“ (KoSaAb 1996) enthalten.

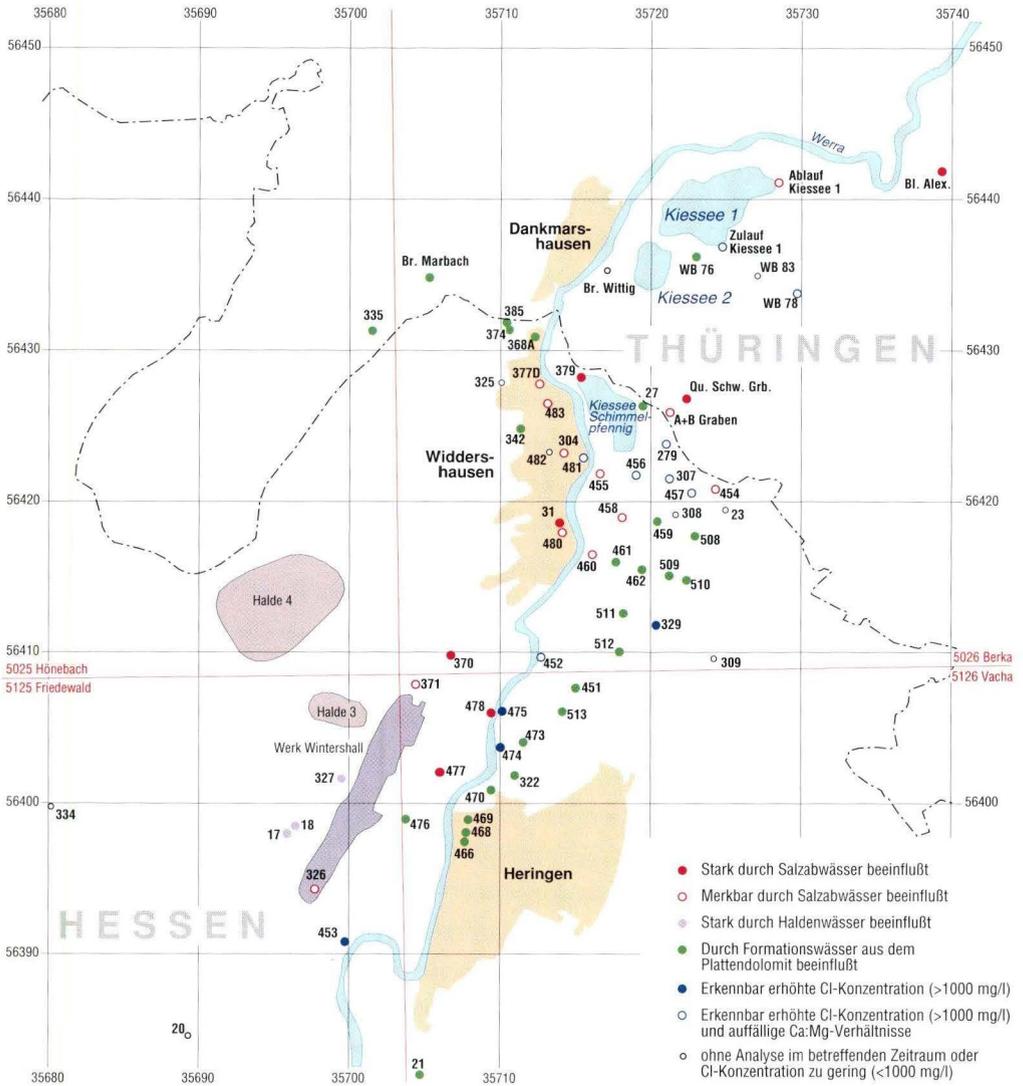


Abb. 21c. Verteilung der Grundwasserbeschaffenheitstypen (Zeitraum III).

3. In der Ortschaft Widdershausen am linken Werraufer sind eine Buntsandsteinquelle (31, Zeitraum II und III) sowie zwei flache Quarztärmeßstellen (480 und 483, Zeitraum II) erheblich mit Salzabwasser belastet. Das Maximum der Salzabwasserbelastung wird für alle drei Meßstellen im Zeitraum II erreicht. In der Quelle (31) werden in diesem Zeitraum Lösungsinhalte bis zu 200 g/l gemessen. Der größte Salzabwasseranteil wird 1979 mit etwa 68 % und der geringste Anteil in der letzten aus dem Jahr 1991 entnommenen Probe mit etwa 10 % erreicht. Der Rückgang der Salzabwasseranteile ging mit einem Rückgang der Quellschüttung einher.
4. Ein weiterer Bereich, in dem es zu Salzabwasseraufstiegen kommt, befindet sich am rechten Werraufer im Kiese See 379, (Zeitraum I, II und III) und an der Salzquelle 0527 (QSGr, Zeitraum III). Seit Beobachtungsbeginn im Jahr 1955 ist der Kiese See 379 stark durch Salzabwasser beeinflusst. Im Beobachtungszeitraum wurden darin volumenbezogene Salzabwasseranteile zwischen ca. 40 und 65 % erreicht. Die Abnahme der Cl : Mg-Verhältnisse in den letzten Jahren der Beobachtung auf Werte unter 6 deutet auf die Beteiligung von „Nach-ESTA“-Salzabwasser hin, das nicht mehr aus der ehemaligen Versenktätigkeit im benachbarten Versenkgebiet Heringen stammen kann. Für die Salzquelle 0527 in Thüringen ist eine entgegengesetzte Entwicklung zu beobachten. Hier nehmen die Cl : Mg-Verhältnisse bei abnehmenden Gesamtlösungsinhalten von 5,5 im Jahr 1964 auf 7,1 im Jahr 1993 zu, was auf eine fortgesetzte Verdünnung des zufließenden Mischwassers mit unbeeinflusstem Formationswasser aus dem Plattendolomit schließen läßt.
5. Im weiter nördlich am rechten Werraufer bei Dankmarshausen gelegenen Kiese See Ks1D steigt Salzabwasser auf, das im Zeitraum II (1978–1985) ca. 15–40 % Salzabwasser enthielt. Der Eintrag von Salzabwasser mit Salzabwasserbeteiligung im Kiese See, ist eindeutig anhand der Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit zwischen dem Zu- und Ablauf

feststellbar. Den Zustrom von Grundwasser über die Seesohle belegen Abflußdifferenzen zwischen dem Zu- und Abfluß in der Größenordnung von 30–150 l/s. Zu Beginn der Beobachtung im Jahr 1964 strömte dem Kiese See unbeeinflusstes Formationswasser aus dem Plattendolomit mit einem Lösungsinhalt von ca. 25 g/l sowohl über den Zulauf als auch über die Gewässersohle zu. Dieses zufließende Formationswasser wird als Anhaltspunkt für die natürliche Grundwasserbeschaffenheit im Plattendolomit im Bereich Dankmarshausen angenommen. Aufgrund der Konzentrationsdifferenz $C_{Cl^-} (C_{Na+K})$ und dem Ca : Mg-Verhältnis kann für das Formationswasser die durch Ionenaustausch in Lösung gebrachte Mg-Menge mit ca. 40–60 meq/l angesetzt werden (s. a. Kap. 5.2.3). Dieses neben dem Eintrag durch Salzabwasser zusätzlich eingebrachte Magnesium muß für eine Typisierung nach den in Kap. 5.3.1 vorgestellten Richtwerten berücksichtigt werden. Durch die Beteiligung von Salzabwasser seit Anfang der siebziger Jahre werden im Kiese Seeablauf Lösungsinhalte bis zu 130 g/l erreicht. Die Herkunft des Salzabwassers im Kiese See ist nicht eindeutig zu beantworten. Eine Beteiligung von modernem „Nach-ESTA“-Salzabwasser aus dem Versenkgebiet Eichhorst/Kleinensee erscheint für das aktuell im Kiese See vorgefundene Wasser nicht sehr wahrscheinlich. Hierfür sind die Na : K-, Cl : Mg-, Na : Mg- und Cl : SO_4 -Äquivalentverhältnisse zu hoch und unterscheiden den Kiese See Ks1D bei Dankmarshausen auch von dem Kiese See 379, in dem eine Beteiligung von „Nach-ESTA“-Salzabwässern vermutet wird (s. Pkt. 4). Werden die vorliegenden Analysen aus dem thüringischen Versenkgebiet zugrundegelegt, erscheint auch eine Herkunft aus dem benachbarten Versenkgebiet Gospenroda nicht wahrscheinlich. Die Ionenverhältnisse sprechen eher für eine Herkunft aus dem ehemaligen Versenkgebiet Heringen, also für eine Beteiligung von „Vor-ESTA“-Salzabwasser.

5.5.1.1 Abschätzung der Beteiligung von Salzabwasser an den diffusen Einträgen im Werratal

Die Auswertung des vorhandenen Analysenmaterials aus Oberflächengewässern und Grundwassermeßstellen im Werratal bei Heringen/Widdershausen/Dankmarshausen in Kap. 5.5.1 ergibt eine teilweise starke Beteiligung von Salzabwasser. Dies läßt im untersuchten Teilgebiet auch für die diffusen Einträge von Salzabwasser in die Werra eine mengenmäßige bedeutsame Beteiligung von Salzabwasser erwarten. Um eine Vorstellung von der Größenordnung der Salzabwasserbeteiligung und somit des Austrages versenkten Salzabwassers über die diffusen Einträge zu bekommen, wird im folgenden anhand des vorhandenen Analysenmaterials eine Abschätzung der Salzabwasserbeteiligung vorgenommen. Hierbei wird untersucht, inwieweit der Cl-Anteil in den diffusen Einträgen auf den Zufluß hochkonzentrierten Salzabwassers und mäßig konzentrierten Formationswassers zurückzuführen ist.

Der mengenmäßig größte Anteil diffuser Einträge entfällt im betrachteten Gebiet auf den Kiessee Ks1D. Hier wurde z.B. im Jahr 1992 ein Cl-Transport von $5,4 \pm 1,4$ kg/s über den Kiesseeabfluß in den schwarzen Graben festgestellt. In diesem Jahr erreichten die gesamten diffusen Einträge in die Werra innerhalb der Fließstrecke Heimboldshausen–Gerstungen 18 ± 3 kg/s (Sonderbericht „Diffuse Einträge von Salzabwasser in die Werra – 1994“, KoSaAb 1996). Somit entfielen etwa 30 % der diffusen Einträge auf den Cl-Eintrag aus dem Kiessee. Anhand von Mischungsrechnungen mit den Cl-Konzentrationen im Kiesseeablauf, den bekannten Cl-Konzentrationen im Salzabwasser und den Cl-Konzentrationen im natürlichen Formationswasser sind für die Lokation Kiessee Ks1D konkrete Angaben zum Salzabwasseraustrag möglich. Für sonstige diffuse Einträge an weiteren Lokationen kann hieraus in gewissen Grenzen die Größenordnung der Salzabwasserbeteiligung abgeleitet werden.

Da es sich bei den diffusen Einträgen um Immissionen von Salzabwasser handelt, die in Ihrer Summe über die Änderung des Cl-Transportes zwischen der Gütemeßstelle Widdershausen

und dem Pegel Gerstungen erfaßt werden, werden sämtliche Ergebnisse auf den Chlorid-Transport in der Einheit kg/s bezogen. Sämtliche im folgenden durchgeführten Berechnungen beziehen sich auf den Meßzeitraum 1990–1993.

Für das beteiligte Salzabwasser wird angenommen, daß dieses nicht vor 1968 und nicht nach 1982 versenkt wurde, also ein Alter von minimal 8 und maximal 25 Jahren hat. Angesichts der heutigen Grundwasserbeschaffenheit in stark durch Salzabwasser beeinflussten Meßstellen im Buntsandstein und Quartär der Werratalaue zwischen Heringen und Dankmarshausen handelt es sich dabei um eine realistische Annahme (Kap. 5.5.1), die auch durch Mischungsrechnungen mit einer Analyse aus dem ehemaligen Versenkbohrung 516 aus dem Jahr 1993 (Kap. 5.4.1.1) gestützt wird. Für die hier angestellten Betrachtungen bleibt offen, aus welchem Versenkgebiet das Salzabwasser in den diffusen Einträgen stammt. Da sich im untersuchten Zeitraum die als „Eichgröße“ verwendete Cl-Konzentration in dem durch verschiedene Kaliwerke versenkten Salzabwasser nur unwesentlich unterscheidet, ergibt sich hierdurch keine Einschränkung. Im Zeitraum 1968–1982 lagen die Cl-Konzentrationen des versenkten Salzabwassers zwischen 4 580 meq/l (Werk Wintershall, 1970) und 5 070 meq/l (Werk Hattorf, 1976). Im Mittel aller vorliegenden Salzabwasseranalysen wurden im betrachteten Zeitraum 4 790 meq/l erreicht.

Für das dem Kiessee Ks1D zufließende Formationswasser aus dem Plattendolomit wird eine mittlere Cl-Konzentration von 500 meq/l aus den jeweiligen maximalen Cl-Konzentrationen in den ersten drei Beobachtungsjahren von 1964–1966 abgeleitet. Eine Salzabwasserbeteiligung im Kiesseewasser kann aufgrund der Wasserbeschaffenheit in diesem Zeitraum ausgeschlossen werden. Durch die Verwendung von Maximalkonzentrationen ist sichergestellt, daß keine wesentliche Verdünnung durch Niederschlagswasser anzunehmen ist.

Im Zeitraum 1990–1993 wurden im Ablauf des Kiesees Ks1D im Mittel 1474 meq/l, minimal 479 meq/l und maximal 2236 meq/l gemessen.

Somit ergeben sich folgende Ausgangsdaten für die Cl-Konzentrationen:

im Formationswasser (C_{FW}): 500 meq/l
 im Salzabwasser (C_{SA}): minimal: 4580 meq/l
 maximal: 5070 meq/l
 im Mittel: 4790 meq/l
 im Ablauf des Kiesees Ks1D
 (C_{KD}): minimal: 479 meq/l
 maximal: 2236 meq/l
 im Mittel: 1474 meq/l

Mit diesen Daten läßt sich der minimale, maximale und mittlere volumenbezogene Salzabwasseranteil über die Verwendung von Mischungsrechnungen ermitteln (zur Methodik s. Kap. 2):

Ausgangsdaten zur Ermittlung des **minimalen** Salzabwasseranteiles: $C_{SA} = 5070$ meq/l
 $C_{FW} = 500$ meq/l
 $C_{KD} = 479$ meq/l

Ergebnis: Da die Cl-Konzentrationen im Kiese die Cl-Konzentrationen im Formationswasser nicht überschreitet, ist **kein** Salzabwasser beteiligt. Der Cl-Austrag aus dem Kiese resultiert ausschließlich aus dem Zufluß von Formationswasser aus dem Plattendolomit.

Ausgangsdaten zur Ermittlung des **maximalen** Salzabwasseranteiles: $C_{SA} = 4580$ meq/l
 $C_{FW} = 500$ meq/l
 $C_{KD} = 2236$ meq/l

Ergebnis: Mit diesen Ausgangsdaten erreicht der maximale volumenbezogene Salzabwasseranteil in den diffusen Einträgen **43 %**.

Ausgangsdaten zur Ermittlung des **mittleren** Salzabwasseranteiles: $C_{SA} = 4790$ meq/l
 $C_{FW} = 500$ meq/l
 $C_{KD} = 1474$ meq/l

Ergebnis: Mit diesen Ausgangsdaten erreicht

der mittlere volumenbezogene Salzabwasseranteil in den diffusen Einträgen **23 %**.

Da es sich bei den berechneten Werten um **volumenbezogene Anteile** handelt, jedoch der Anteil des Salzabwassers an der Cl-Konzentration im Kiese bzw. an der über den Kiese abtransportierten Cl-Menge interessiert, wird die Umrechnung der Werte auf **den Cl-bezogenen Anteil** erforderlich. Hierzu wurde folgender Ansatz verwendet:

$$\text{Cl-bezogener Salzabwasseranteil} = \frac{\text{volumenbez. Salzabwasseranteil} \cdot \text{Cl-Konz. Salzabwasser}}{\text{Cl-Konzentration Kiese}}$$

Hierbei ergeben sich folgende Cl-konzentrationsbezogene Salzabwasseranteile im Kieseabfluß:

minimal: 0 %
 maximal: 87 %
 im Mittel: 74 %.

Für den hier betrachteten Zeitraum wurden folgende diffusen Einträge in die Werra sowie Cl-Austräge aus dem Kiese ermittelt (Die "diffusen Einträge" schließen immer den Ablauf aus dem Kiese mit ein!):

Jahr	Cl-Transport Werra [kg/s]	Cl-Transport Kiese [kg/s]
1990	17,4 ± 6,7	keine Daten
1991	14,4 ± 3,5	3,6
1992	18,1 ± 3,0	5,4
1993	12,0 ± 2,1	6,2

Durch die Salzabwasserversenkung wurden in den Plattendolomit

Jahr	Cl-Transport [kg/s]
1990	65
1991	66
1992	52
1993	43

eingetragen.

Werden die für den Kiese Ks1D berechneten Salzabwasseranteile angesetzt, ergeben sich

somit folgende auf die Cl-Konzentrationen bezogenen Austräge von Salzabwasser über den Kieseeablauf:

Jahr	Austrag von Salzabwasser über den Kieseeablauf		
	minimal [kg/s]	im Mittel [kg/s]	maximal [kg/s]
1990			
1991	0	2,6	3,1
1992	0	4,0	4,7
1993	0	4,6	5,4

Jahr	Anteil des Cl-Austrages über den Kiesee an der Jahresversenkmenge		
	minimal [%]	im Mittel [%]	maximal [%]
1990			
1991	0	4	5
1992	0	8	9
1993	0	11	13

und bei dem Ansatz dieser Werte für die gesamten diffusen Einträge:

Jahr	Geschätzter Austrag von Salzabwasser über die diffusen Einträge		
	minimal [kg/s]	im Mittel [kg/s]	maximal [kg/s]
1990			
1991	0	10,7	12,5
1992	0	13,4	15,7
1993	0	8,9	10,4

Jahr	Anteil des Cl-Austrages über diffuse Einträge an der Jahresversenkmenge		
	minimal [%]	im Mittel [%]	maximal [%]
1990			
1991	0	16	19
1992	0	26	30
1993	0	21	24

Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die zuletzt aufgeführten Angaben für die Salzabwasserbe-

teilung in den diffusen Einträgen lediglich auf einem Analogieschluß beruhen und daher nur die Größenordnung der Salzabwasserbeteiligung beschreiben. Weiterhin ist aufgrund eingeschränkter Bedingungen für die Abflußmessungen am Kiesee Ks1D mit beträchtlichen Abweichungen für die Absolutbeträge des Cl-Transportes und die daraus ermittelten prozentualen Salzabwasseranteile am Cl-Transport zu rechnen. An der generellen Aussage, daß der volumenbezogene Salzabwasseranteil am Kieseeablauf zwischen 0 % und 43 % und der auf die Cl-Konzentration bezogene Anteil zwischen 0 und 87 % ausmacht, ändert sich hierdurch nichts. Eine weitere, hier nicht berücksichtigte Fehlerquelle liegt in dem Meßfehler für die Cl-Bestimmung, der bei diesen Konzentrationen mit weniger als 5 % anzusetzen ist.

Zusammenfassend läßt sich aus den am Beispiel des Kiesees Ks1D angestellten Betrachtungen ableiten, daß die Salzabwasserbeteiligung an den diffusen Einträgen starken Schwankungen unterworfen ist. Dies ist aufgrund der variablen Einflußfaktoren, die maßgeblich für den Eintrag von salzhaltigem Grundwasser in dieses Oberflächengewässer sind, auch nicht anders zu erwarten. Als einige wesentliche Steuergrößen seien hier beispielhaft die wechselnde Süßwasserbeimischung und Süßwasserauflast durch Niederschläge und die durch den Versenkbetrieb beeinflusste Höhenlage der Grundwasserdruckfläche im Versenkhorizont genannt (s. Sonderbericht „Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra – 1994“, KoSaAb 1996). Im ungünstigsten Fall kann ein beträchtlicher Anteil der versenkten Cl-Menge (ca. 13 %) über einen diffusen Eintrag vom Versenkhorizont über den Kiesee in die Werra ausgetragen werden, wobei aber eine direkte Korrelation mit der Versenkmenge nicht herzustellen ist, da die oben angeführten weiteren Faktoren wie Süßwasserauflast etc. zusätzlich steuernd wirken. Im Mittel wurden im Zeitraum 1991–1993 jährlich 43–66 kg/s Cl in den Plattendolomit versenkt und ca. 2,6–4,6 kg/s, entsprechend ca. 4–11 % von teilweise sehr viel früher versenktem Salzabwasser, über den Kiesee Ks1D wieder

ausgetragen. Für die gesamten diffusen Einträge auf der Fließstrecke zwischen den Oberflächen-gewässermessstellen Widdershausen-Gerstungen läßt sich, bei Ansatz der Mittelwerte für den Kiessee Ks1D, eine Größenordnung für den Cl-

bezogenen Salzabwasseranteil von ca. 9–13 kg/s, entsprechend ca. 15–25 % der versenkten Cl-Menge, und eine Laufzeit vom Versenkort bis zum Entlastungsgebiet im Werratal von mehr als 15 Jahren angeben.

5.5.2 Fuldaeinzugsgebiet

Zur Beurteilung der Auswirkungen der Salzabwasserversenkung im Fulda-Einzugsgebiet werden sämtliche verfügbaren Analysen aus 81 Meßstellen im Buntsandstein ausgewertet. Hierzu werden Meßreihen aus langfristig, d.h. mehr als 25 Jahren beobachteten Meßstellen

herangezogen. Daneben erfolgt die Auswertung von Analysen aus Meßstellen, in denen im Laufe der Beobachtung ständig oder zeitweise erhöhte Cl-Konzentrationen über 7 meq/l, entspr. 250 mg/l, festgestellt werden.

5.5.2.1 Langfristige Entwicklung

Von insgesamt 27 langjährig, d.h. mehr als 25 Jahre beobachteten Meßstellen haben 12 über den Beobachtungszeitraum eine im wesentlichen gleichbleibende Grundwasserbeschaffenheit, in zwei weiteren Meßstellen nimmt die Cl-Konzentration langfristig ab. Für die durch diese

Meßstellen repräsentierten Entnahmebereiche ist innerhalb des Beobachtungszeitraumes keine vermehrte Zumischung von tiefem salzreichen Grundwasser erkennbar und somit keine direkte oder indirekte Beeinträchtigung durch die Salzabwasserversenkung gegeben. Aufgrund der

Tab. 11. Buntsandstein-Meßstellen im Fuldaeinzugsgebiet mit zunehmenden Cl-Konzentrationen

Meßstelle	Sohltiefe (bei Quellen GOK), m ü. NN	Anstieg der Cl-Konzentration in meq/l seit Beobachtungsbeginn, Angaben in Klammern geben das Jahr der Messung an	
		Beginn	Maximum
Quellfassung 49	320	0,34 (1928)	8,6 (1977)
Quelle 278	235	41 (1959)	755 (1994)
Brunnen 298	o.A.	0,37 (1962)	1,9 (1963)
Quellfassung 336	355	0,96 (1966)	5,3 (1990)
Brunnen 344	o.A.	0,85 (1966)	10 (1991)
Brunnen AH5124010 von 1941–1946 und nach der Brunnenstillegung	137/130	17,5 (1941)	43 (1969)
Brunnen 359 von 1958–1984			
Brunnen 361	135	0,90 (1969)	2,8 (1993)
Brunnen 365	135	0,19 (1969)	38 (1992)
Brunnen 366	155	0,22 (1969)	68 (1980)
Brunnen 402	149	0,37 (1939)	1,2 (1963)
Brunnen 403	152	0,67 (1947)	2,2 (1986-89, 1991)
Quelle NA5024003	248	0,42 (1950)	1,0 (1992)
Brunnen NA5024007	162	0,37 (1965)	1,8 (1989)

langjährigen chemischen Beharrung bzw. abnehmender Konzentrationen ist nicht zu erwarten, daß in den Entnahmebereichen der heute noch betriebenen Grundwassermeßstellen eine wesentliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit eintreten wird. Die Verteilung der Meßstellen ist in Abb. 22 dargestellt.

In 13 langjährig beobachteten Meßstellen verändert sich die Grundwasserbeschaffenheit im wesentlichen durch eine Zunahme der Cl-Konzentrationen. Der Cl-Anstieg ist lediglich in 6 langjährig beobachteten Meßstellen (Brunnen 359, 365 und 366, Quelle 278, Quellfassung 49 und Brunnen 344) beträchtlich, in diesen Meßstellen wird der Grenzwert nach der TrinkwV vom 12.12.1990 von 7 meq/l, entspr. 250 mg/l überschritten (Tab. 11).

Für die übrigen sieben langjährig beobachteten Meßstellen, Quellfassung 336, Brunnen 361, Quellfassung NA5024003, Brunnen NA5024007,

Brunnen 298, Brunnen 402 und Brunnen 403 stiegen die Cl-Konzentrationen im Beobachtungszeitraum zwar an, jedoch wird der Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 250 mg/l für Cl nicht erreicht. Die Ursachen des Anstiegs der Cl-Konzentrationen liegen nicht in der Salzabwasserversenkung.

Die Auswertung langjähriger Meßreihen an insgesamt 27 Meßstellen im Untersuchungsgebiet zeigt, daß keine flächenmäßig bedeutsame Zunahme der Cl-Konzentrationen und damit der Versalzung des Grundwassers im Buntsandstein gegeben ist. Eine Zunahme der Versalzung aufgrund des Aufdringens von tiefen salzreichen Grundwässern, die zu einem wesentlichen und längerfristigen Anstieg der Cl-Konzentrationen führt, ist lediglich punktuell für begrenzte Bereiche im Stadtgebiet von Bad Hersfeld (Brunnen 359) sowie im Umfeld der Brunnen 365 und 366 und Quelle 278 festzustellen.

5.5.2.2 Entwicklung in Meßstellen mit erhöhten Cl-Konzentrationen

Die Änderung der Grundwasserbeschaffenheit in Meßstellen mit zeitweise bzw. dauerhaft erhöhten Cl-Konzentrationen über 7 meq/l ist in der Tab. 12 zusammengefaßt.

Im folgenden werden lediglich die Meßstellen behandelt, die durch Übertritte von Formationswasser aus dem Plattendolomit beeinflusst sind.

Tab. 12. Buntsandstein-Meßstellen im Fuldaeinzugsgebiet mit Cl-Konzentrationen über 7 meq/l, entspr. 250 mg/l

Meßstelle	Sohltiefe (bei Quellen GOK), m ü. NN	Cl-Konzentration in meq/l, Angaben in Klammern geben das Jahr der Messung an	
		Minimum	Maximum
Quellfassung 49	320	0,34 (1928)	8,6 (1977)
Quelle 278	235	41 (1959)	755 (1994)
Brunnen 344	o.A.	0,85 (1966)	10 (1991)
Brunnen AH5124010 von 1941 bis 1946 und nach der Brunnenstillegung	137/130	17,5 (1941)	43 (1969)
Brunnen 359 von 1958 bis 1984			
Brunnen 81		32 (1931)	45 (1948)
Brunnen 407	1	8,7 (1977)	10 (1987)
Brunnen 432	147	7,3 (1984)	18 (1990/92/94)
Brunnen 433	140	7,5 (1993)	20 (1982)
Brunnen 445	137	2,1 (1984)	10 (1994)
Brunnen 365	135	0,19 (1969)	38 (1992)
Brunnen 366	155	0,22 (1969)	68 (1980)
Brunnen 386	160	0,65 (1976)	16 (1984)

Aus drei Brunnen im Stadtgebiet von Bad Hersfeld (Brunnen 407, Brunnen 433, Brunnen 81/432) wird bzw. wurde Grundwasser mit beständig hohen Gesamtlösungsinhalten und praktisch gleichbleibender Grundwasserbeschaffenheit gefördert. Somit ergeben sich daraus keine Hinweise auf einen Anstieg der Salz-/Süßwasserfront im Entnahmbereich der Brunnen. Insbesondere für das Brunnenpaar Brunnen 81/432, das einen erheblichen Anteil an Formationswässern aus dem Plattendolomit führt und seit 66 Jahren beobachtet wird, wird diese Aussage eindeutig anhand der Beobachtungsergebnisse bestätigt. In der Subrosionssenke von Bad Hersfeld trat schon in historischen Zeiten aufsteigendes Formationswasser auf. Möglicherweise waren Mineralquellen mitbestimmend für die Klostergründung im 8. Jahrhundert. Nach anderen Angaben (Ortschroniken) wurden die Heilquellen Anfang des 17. Jahrhunderts entdeckt.

In den Brunnen AH5124010 bzw. 359 ist innerhalb des Beobachtungszeitraumes (1941-1984) annähernd eine Verdoppelung der Cl-Konzentrationen bei insgesamt gleichbleibender Grundwasserzusammensetzung zu beobachten. Dies ist auf den zunehmenden Aufstieg von Formationswasser aus dem Plattendolomit zurückzuführen, das eine ähnliche Grundwasserbeschaffenheit hat (z.B. Tiefbrunnen 82). Auch in der Grundwassermeßstelle 523 östlich Bad Hersfeld wurde beim Abteufen im tiefen Unteren Buntsandstein ein Grundwassertyp erschlossen, der bis auf einen geringeren Gesamtlösungsinhalt (Verdünnung) dem Plattendolomit-Formationswasser entspricht. Einschränkend ist anzuführen, daß für die Meßstelle Brunnen AH5124010 bzw. 359 weder Informationen zum Brunnenbetrieb noch zum verwendeten Probenahmeverfahren vorliegen.

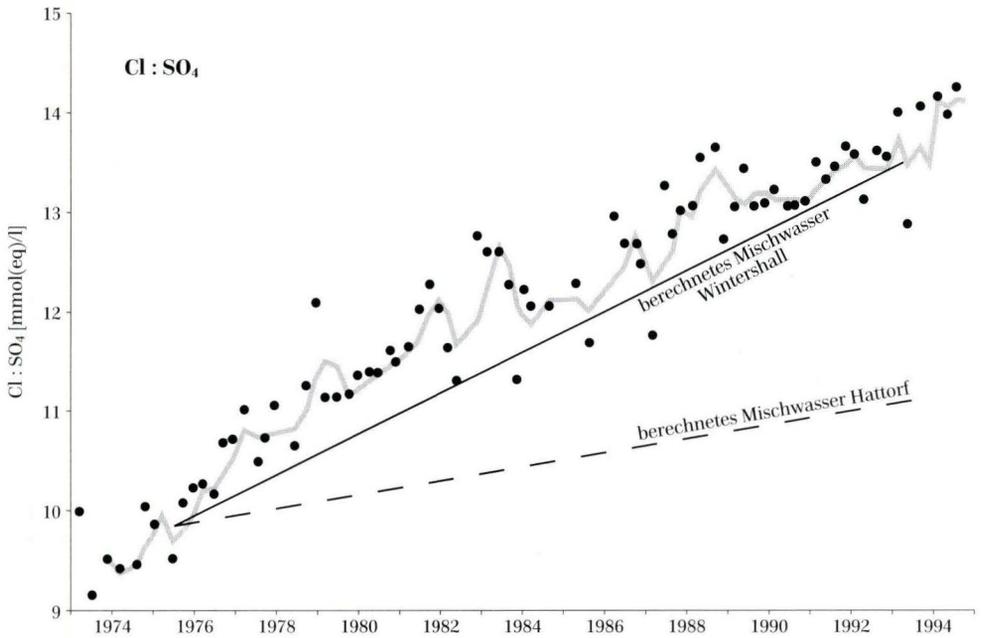
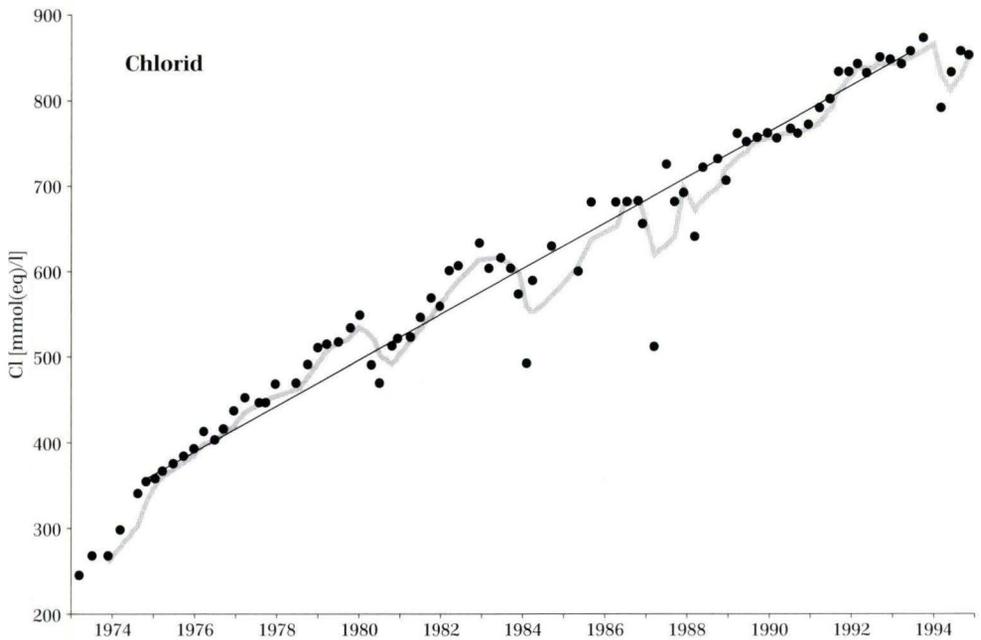
Der Brunnen 445 südsüdöstlich von Bad Hersfeld im Bereich des Salzhanges hat seit dem Beobachtungsbeginn im Jahr 1983 eine äußerst wechselhafte Grundwasserbeschaffenheit, die im wesentlichen auf unterschiedliche Probenahmebedingungen (Entnahmemengen) zurückzuführen ist. Die Cl-Konzentrationen

überschreiten nur zeitweise im Jahr 1983 und 1994 den Grenzwert von 7 meq/l.

In den drei Meßstellen 365 und 366 und Brunnen 386 im Bereich des nördlichen Salzhanges steigen etwa seit Anfang der siebziger Jahre die Salzkonzentrationen an und weisen auf einen Anstieg der Salz-/Süßwassergrenzfläche und somit zunehmende Anteile von Formationswasser aus dem Plattendolomit bzw. tiefen Unteren Buntsandstein hin. Die höchsten Cl-Konzentrationen wurden im Brunnen 366 mit maximal 68 meq/l und die geringsten im Brunnen 386 mit 16 meq/l gemessen. Im Vergleich zu den Quartär- und Buntsandstein-Meßstellen des Werra-tales, die durch Formationswasser/Salzabwasserübertritte aus dem Versenkhorizont beeinflusst sind, werden in den o.a. Brunnen erheblich geringere Cl-Konzentration erreicht. Charakteristisch für alle betroffenen Meßstellen ist eine Erdalkalisierung mit zunehmendem Zufluß von Salzwasser (s. Kap. 5.2.3). Für keinen dieser Brunnen ist eine Beeinflussung durch Salzabwasser aus der Kalisalzproduktion festzustellen.

Als Ursache der Versalzung ist ein lokal begrenzter Übertritt von Formationswasser aus dem Plattendolomit oder tiefen Unteren Buntsandstein im Entnahmbereich der Brunnen zu vermuten. Hierfür sprechen vor allem die in allen drei Brunnen festgestellten hohen Cl : SO₄-Verhältnisse im zuströmenden Salzwasser, die typisch für Formationswasser aus dem Plattendolomit im Salzhangbereich sind. Hierbei muß offen bleiben, inwieweit der Übertritt des Formationswassers aus dem Plattendolomit in den Unteren Buntsandstein bzw. der Anstieg der Salz-/Süßwassergrenze im Unteren Buntsandstein geogener Natur ist durch die Entnahme aus dem Brunnen oder durch Druckauswirkungen der Versenkung verursacht wurde.

Eine Bilanzierung des für die Brunnen 365 und 366 zur Verfügung stehenden Grundwasserangebot und der langfristig entnommenen Grundwassermengen zeigt, daß durch die Entnahme keine Überbeanspruchung des Grundwasserangebot erfolgt ist. Dies zeigt sich auch in dem langfristigen Anstieg der Cl-



— berechnete Cl-Konzentration im Mischwasser
 — 3 Per. gleitender Durchschnitt (Meßwerte)

Berechnungsgrundlagen:
 Zeitintervall 18 Jahre
 Cl-Differenz 481 mmol(eq)/l/Jahr
 Steigung für Cl 26,711 mmol(eq)/l/Jahr

Abb. 23. Modellierung der Chlorid-Konzentrationsentwicklung sowie des Cl : SO₄-Äquivalentverhältnisses in der Meßstelle Quelle 278.

Konzentrationen, der sich auch nach Rücknahme der Fördermengen weiter fortsetzt. Der Anstieg der Salzkonzentrationen ist allein durch die Grundwasserentnahme aus den Brunnen nicht zu erklären. Als eine mögliche Ursache für Formationswasserübertritte kann die Erhöhung des Druckpotentials im Versenkhorizont durch die Salzabwasserversenkung angesehen werden. Hierdurch ist an hydraulischen Fehlstellen eine Verdrängung geogenen Formationswassers in höhere Bereiche des Grundwasserleiters bzw. ein Übertritt vom Plattendolomit in den Unteren Buntsandstein möglich. Besonders in den Zeiträumen mit hohen Versenkmengen, also etwa von 1973–1980, kann für die betroffenen Gebiete am Salzhangnordrand eine Druckbeeinflussung angenommen werden. Die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit an der nahe den Brunnen 365 und 366 gelegenen Quelle 278 zeigt, daß dieses Gebiet im Plattendolomit auch stofflich durch die Salzabwasserversenkung betroffen ist.

Im Gegensatz zu den Brunnen 365, 366 und 386, in denen die Salzwasserbeeinflussung etwa zu Beginn der siebziger Jahre einsetzte, werden in der Quelle 278 bereits Mitte der fünfziger Jahre ansteigende Salzkonzentrationen festgestellt. Bei der Quelle 278 handelt es sich um eine Sammelfassung von Quellen, die in einem sumpfi-

gen Wiesengelände austreten. Ebenso wie in den o.a. Brunnen ist die Versalzung auf zuströmendes Formationswasser aus dem Plattendolomit zurückzuführen. Im Zeitraum 1973 und 78 steigen die Salzkonzentrationen stark an und erreichen etwa 1975 ein Konzentrationsniveau für Magnesium, das die Beteiligung von Salzabwasser im zuströmenden Salzwasser anzeigt. Die Salzkonzentrationen erreichen bis Ende 1993 einen maximalen Lösungsinhalt von 54 g/l und schwanken seitdem um diesen Wert.

Zur Bestimmung der Salzabwasserherkunft wird eine Meßreihe 1975 bis 1993 näher untersucht. Hierzu wird dem Quellwasser, ausgehend von der Wasserzusammensetzung im Jahr 1975, modellhaft „Vor-ESTA“-Salzabwasser aus den Werken Wintershall und Hattorf zugemischt. Es zeigt sich, daß bei Verwendung von Salzabwasser aus dem Werk Wintershall der im Quellwasser gemessene Anstieg der Cl- und Na-Konzentrationen und der Cl : SO₄- und Cl : Na-Verhältnisse gut mit der für das Modellwasser berechneten Zeitreihe übereinstimmt (Abb. 23). Hieraus läßt sich ableiten, daß der Quellaufschlag im Zeitraum 1975–1993 mit einer mittleren jährlichen Zuwachsrate von 5,7 ‰ Salzabwasser aus dem Versenkgebiet Wintershall zugeströmt ist und im Jahr 1996 einen Mischungsanteil von etwa 10 % Salzabwasser erreicht hat.

6. Schlußfolgerungen

Seit 1928 wird Salzabwasser aus der Rohsalzaufbereitung in den Untergrund versenkt. Die Versenkung in den Plattendolomit ist nach wie vor die einzige Möglichkeit, den weitaus größten Teil des Salzabwassers mit tragbaren Auswirkungen auf die Umwelt zu entsorgen. Der Verbleib des im Werra-Kaligebiet versenkten Salzabwassers läßt sich anhand des umfangreichen Datenmaterials aus der Versenküberwachung heute größtenteils qualitativ und in einigen Teilgebieten auch quantitativ nachvollziehen. Hierzu kann vor allem die Anwendung hydrochemischer Methoden einen wichti-

gen Beitrag leisten. Aufgrund der Auswertung von Analysen aus 123 Meßstellen im Plattendolomit des gesamten Versenkraumes und angrenzender Gebiete, 81 Meßstellen im Buntsandstein des Fuldaeinzugesgebietes und 72 Meßstellen im Buntsandstein und Quartär sowie in Oberflächengewässern in der Umgebung des Werratales bei Heringen/Widdershausen/Dankmarshausen insbesondere mit hydrochemischen Methoden ergeben sich folgende Schlüsse für die Ausbreitung von Salzabwasser im Untersuchungsgebiet:

- Ein Großteil der Versenklokationen nutzt gute

Gebirgsdurchlässigkeiten am inneren Salzhang aus, und sowohl vom Druckpotential als auch vom Gefälle der Grundwasserleitersohlschicht her erscheint eine Ausbreitung über den Salzhang hinaus möglich. Dennoch ist keine stoffliche Beeinflussung in Gebieten außerhalb der Salzverbreitung (jenseits der Salzhangaußengrenze) erfolgt. Hierfür sind geringe Gebirgsdurchlässigkeiten im äußeren Salzhang ursächlich. Eine Ausnahme bilden die Versenkgebiete Gospenroda und Frauensee in Thüringen, in denen auch außerhalb des Salzhanges versenkt wurde.

- Im Bereich der Plattendolomit-Meßstellen 392 und 393 sind zwischen ca. 50 und 75 % der Versenkhorizontmächtigkeit (bzw. des Hohlraumvolumens des Versenkhorizontes) mit Salzabwasser aufgefüllt. Aufgrund der seit mehreren Jahren quasistationären Salzkonzentrationen wird angenommen, daß in diesem Gebiet die unter den gegenwärtigen Druckbedingungen maximal mögliche Auffüllung des Versenkhorizontes mit Salzabwasser erreicht wurde.
- Für die Staatsbadbrunnen in Bad Hersfeld, die aus dem Plattendolomit in der Hersfelder Senke Heil- und Mineralwasser entnehmen, ist aus den Untersuchungsergebnissen derzeit keine Gefährdung durch die Salzabwasserversenkung abzuleiten. Die gleiche Aussage kann für die Solbrunnen der Salinenbetriebe Bad Salzungen getroffen werden. Für die Überwachung kommt insbesondere der regelmäßigen Beprobung von vier Plattendolomitmeßstellen am nordwestlichen bis westlichen Bereich des Salzhangs sowie einer Plattendolomitmeßstelle und einer Solquelle westlich von Bad Salzungen eine besondere Bedeutung zu.
- Für das im Entlastungsgebiet Werratal bei Heringen und Dankmarshausen derzeit aufdringende Salzabwasser ergibt sich anhand von Mischungsrechnungen der Schluß, daß hierbei nicht nur Salzabwasser aus der ehemaligen Versenktätigkeit in Heringen, sondern auch solches aus der Versenktätigkeit nach Einführung des ESTA-Verfahrens beteiligt ist.
- Über die diffusen Einträge in die Werra wird

ein Teil des versenkten Salzabwassers wieder aus dem Versenkhorizont ausgetragen. Dies läßt sich für den Kiessee Ks1D, über den ein erheblicher Anteil der diffusen Einträge stattfindet, quantifizieren.

- In den Grundwassermeßstellen im Entlastungsgebiet Werratal bei Heringen und Dankmarshausen wurde Ende der siebziger bis Mitte der achtziger Jahre das Maximum der Versalzung erreicht. Bis heute (Stand 1997) ist für den überwiegenden Teil der betroffenen Meßstellen im Quartär und Buntsandstein ein Rückgang der Salzkonzentrationen und Salzabwasseranteile feststellbar. Als ursächlich kann die Verringerung der Versenkmengen vor allem des Werkes Wintershall angesehen werden. Seit 1986 kamen dort weniger als 4 Mio. m³/Jahr zur Versenkung, während in den Spitzenzeiten zwischen 1972 und 1980 zwischen 9 und 12 Mio. m³/Jahr erreicht wurden.
- Es ist generell nicht auszuschließen, daß es im inneren Salzhangbereich hydraulische Verbindungen zwischen Unterem Buntsandstein und Plattendolomit gibt. Einziges Beispiel im Fuldaeinzugsgebiet für einen Aufstieg von Plattendolomitformationswasser mit Salzabwasseranteilen ist das Gebiet Breitzbachs-Mühle (278). Die intensive Zerrüttung am inneren Salzhang und das Zusammentreffen mit dem Ende des Hersfelder Grabens ermöglicht zusammen mit der durch die Versenkung bedingten Druckerhöhung im Plattendolomit diesen isolierten Aufstieg. Vereinzelt punktuelle Salzwasseraufstiege im Buntsandstein des Fuldaeinzugsgebietes belegen das Vorkommen lokaler Leckagestellen zwischen den Grundwasserstockwerken Plattendolomit und Buntsandstein. Hier kann ein Übertritt von Salzwässern durch Verdrängung der ursprünglichen Formationswässer und Druckerhöhung im Versenkhorizont erfolgen, der durch die intensive Zerrüttung am inneren Salzhangrand begünstigt wird. Beispiele hierfür sind Brunnen an der Gißlingskirche und bei Ronshausen sowie die Quelle Breitzbachs-Mühle bei Kathus.
- Zwei Trinkwassergewinnungsbrunnen im Bereich des Inneren Salzhangrandes im Unteren

Buntsandstein haben zunehmende Salzkonzentrationen, die nicht auf eine Überbeanspruchung des genutzten Grundwasserleiters zurückzuführen sind. Die Druckentlastung durch die Herausbildung eines Absenktrichters kann jedoch zusammen mit Wasserwegsamkeiten zwischen Plattendolomit und Unterem Buntsandstein und einer versenkbedingten Druckerhöhung im Plattendolomit zu einem lokalen Anstieg der Salz-/Süßwassergrenzfläche führen.

- Auch im Fuldata bei Bad Hersfeld spricht die Grundwasserbeschaffenheit im Unteren Buntsandstein für eine hydraulische Verbindung zwischen Plattendolomit und Unterem Buntsandstein. Die Auswertung des vorliegenden Analysenmaterials läßt den Schluß zu, daß die Grundwasserbeschaffenheit im Buntsandstein in diesem Teilgebiet bei den meisten Meßstellen keiner wesentlichen zeitlichen Veränderung unterworfen ist und bei allen eine Beein-

flussung durch die Salzabwasserversenkung ausgeschlossen werden kann. Auch in historischen Zeiten gab es hier natürliche Salzwasseraufstiege, die zur weiteren Erschließung der Mineralwasservorkommen führten.

- Bei der Auswertung des Datenmaterials für das Fuldaeinzugsgebiet ergaben sich keine weiteren Hinweise auf Salzwasseraufstiege in die Grundwasserüberdeckung des Plattendolomit. Dies bestätigen auch limnologische Untersuchungen an der Fulda und deren Nebengewässern Ulfe, Solz, Eitra, Meckbach und deren Seitenbächen (Meijering & Haass 1995, unveröffentlicht). Eine über das Quellgebiet Breitzbachs-Mühle hinausgehende Gefährdung von Oberflächengewässern durch diffuse Salzwassereinträge ist nicht erkennbar. Ebenso ist für die Zukunft eine zusätzliche Beeinflussung von bestehenden Grundwasserfassungen durch den Zustrom von Salzwasser nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht abzuleiten.

7. Zusammenfassung

Im Werra-Kaligebiet zwischen Bad Hersfeld und Bad Salzungen wird seit etwa 70 Jahren ein Teil des bei der Kalisalzproduktion anfallenden Salzabwassers an bestimmten Lokationen in einen tieferliegenden, natürlich versalzten und damit für die Trinkwassergewinnung nicht geeigneten Grundwasserleiter im Plattendolomit (Leinekarbonat, Zechstein 3) versenkt. Insgesamt wurden in den Plattendolomit von 1925–1997 900 Mio. m³ Salzabwasser eingeleitet. In den sechziger und siebziger Jahren wurde in Hessen die Versenkung besonders intensiv betrieben, die Jahresversenkmengen erreichten mehr als 20 Mio. m³. Nach Einführung neuer Aufbereitungsverfahren gingen die Versenkmengen Anfang und Mitte der achtziger Jahre erheblich zurück. Seit 1992 liegen die Jahresversenkmengen bei etwa 8 Mio. m³. Die Zusammensetzung des versenkten Salzabwassers änderte sich seit Anfang der achtziger Jahre deutlich und kann teilweise zur Rekonstruktion der

Salzabwasserausbreitung verwendet werden.

Der Plattendolomit ist ein im Mittel 23 m mächtiger Kluftgrundwasserleiter mit einer Tiefenlage von 200–900 m unter GOK und einem nutzbaren Hohlraumvolumen von ca. 10 bis maximal 15 %. Zwischen dem Versenkhorizont und den genutzten Grundwasservorkommen im Buntsandstein liegen ca. 50 m mächtige, überwiegend tonige, wasserundurchlässige Gesteine des höchsten Zechsteins. Im Bereich des inneren Salzhangs und an Rändern von Subrosions-senken können diese Deckschichten örtlich zerrüttet und zerbrochen sein und Salzwasser aus dem Plattendolomit bis in das oberflächen-nahe Grundwasser bzw. in Vorfluter aufsteigen. Bevorzugte Aufstiegszonen finden sich vor allem entlang der Entlastungsbereiche der großen Flußtäler und an tiefgreifenden Störungszonen am Salzhang. Beispiele hierfür sind die Salzwasseraustritte im Werratal und an der Breitzbachs-Mühle (Einzugsgebiet der Fulda).

Zur Identifizierung von Salzabwassereinflüssen im Plattendolomit werden die Analysen des geogenen Formationswassers auf der Grundlage ihres Gesamtlösungsinhalts und der Genese in Gruppen mit ähnlicher Grundwasserbeschaffenheit unterteilt. Hierdurch ist eine Unterscheidung von Salzabwassereinflüssen trotz der im Untersuchungsgebiet räumlich sehr unterschiedlichen Grundwasserbeschaffenheit des originären Formationswassers im Plattendolomit möglich.

Das z.T. artesisch gespannte Grundwasser im Plattendolomit weist ohne Versenkeinfluß eine große chemische Spannweite auf, die von Süßwasser mit Gesamtlösungsinhalten unter 1 g/l in Grundwasserneubildungsgebieten bis zu hochkonzentriertem Salzwasser mit 280 g/l Gesamtlösungsinhalt in morphologischen Senken des Plattendolomits reicht. Die geogene Grundwasserbeschaffenheit im Untersuchungsgebiet wird anhand der Kennwerte Cl und Mg in Verbreitungskarten dargestellt. Durch die jahrzehntelange Versenkung wurde die hydrochemische Situation im Versenkhorizont flächenhaft nahezu vollständig überprägt. Ausgehend von den heute noch beaufschlagten Versenkgebieten der hessischen Werke Wintershall, Eichhorst/Kleinensee und Hattorf sowie der vor 28 Jahren eingestellten Versenktätigkeit in Thüringen hat sich das Salzabwasser in diesem Grundwasserleiter vor allem in die Tieflagen der Eiterfelder Mulde, der Mulde Sünna-Buttlar und der Auslaugungssenke Vacha-Oberzella sowie in die Entlastungsgebiete entlang des Werratales zwischen Heringen und Dankmarshausen und bei Philippsthal bewegt. Aufgrund der geringen Durchlässigkeiten des Plattendolomits im Bereich des Salzhangaußenrandes beschränkt sich die Verbreitung des Salzabwassers, auch nach einer mehr als 70-jährigen Versenktätigkeit, auf die Gebiete oberhalb des intakten Salinars, also die Gebiete innerhalb des Salzhanges. Die aktuelle Ausbreitung des Salzabwassers im Plattendolomit wird in Verbreitungskarten für die Kennwerte Cl und Mg^{2+} dargestellt. Auf der Grundlage der Cl- und Mg-Verbreitungskarten für die geogene Situation im Plattendolomit

und der aktuellen Meßwerte in beeinflussten Meßstellen wird eine größenordnungsmäßige erste Abschätzung der Salzabwasseranteile vorgenommen und in Karten dargestellt.

In den Grundwasserleitern über dem Versenkhorizont im Buntsandstein und Quartär beschränkt sich die stoffliche Beeinflussung durch die Versenktätigkeit auf lokal begrenzte Entlastungsgebiete. Ein wesentlicher Belastungsschwerpunkt liegt im Gebiet der hessisch-thüringischen Grenze im Werratal bei Heringen/Widdershausen/Dankmarshausen an der Werra. Hier kommt es zu Übertritten von Mischwasser bzw. verdrängtem natürlichen Formationswasser aus dem Grundwasserleiter Plattendolomit bis an die Geländeoberfläche. Das Mischwasser/Formationswasser tritt z.T. direkt oder aber über angrenzende Kiesen in die Werra ein und trägt als sogenannte „diffuse Einträge“ zu einer Erhöhung des Chloridtransportes in der Werra um ca. 10–20 %, bezogen auf den mittlerenden berechneten Chlorid-Transport der Jahre 1990–1997 am Pegel Gerstungen bei. Für den Kiessee Ks1D, einer der größten Quellen für die diffusen Einträge, wird für den Zeitraum 1990–1993 die Salzabwasserbeteiligung abgeschätzt. Danach liegt der volumenbezogene Salzabwasseranteil im Ablauf des Kiessees zur Werra zwischen 0 und 43 % und im Mittel bei 23 %. Damit beträgt der Salzabwasseranteil am Chlorid-Transport über den Kiesseeablauf für den Zeitraum 1991–1993 im Jahresmittel 2,6 bis 4,6 kg/s Cl. Dies entspricht etwa 4–11 % der im Zeitraum 1991–1993 von beiden hessischen Kaliwerken versenkten Chloridfracht. Für die gesamten diffusen Einträge auf der Fließstrecke Widdershausen–Gerstungen läßt sich, bei Ansatz der Mittelwerte für den Kiessee Ks1D, eine Größenordnung für den Chlorid-bezogenen Salzabwasseranteil von ca. 9–13 kg/s, entsprechend ca. 15–25 % der im untersuchten Zeitraum versenkten Chlorid-Menge, angeben.

Anhand charakteristischer chemischer Kennwerte wird für Meßstellen in der Umgebung des Werratales eine Typisierung vorgenommen, die für Grund- und Oberflächenwasser eine weitge-

hend sichere Zuordnung von Salzabwassereinflüssen erlaubt. Die Überprüfung der Typzuordnung mittels Diskriminanzanalyse bestätigt die Anwendbarkeit der gewählten Richtwerte. Die kartenmäßige Darstellung der Grundwassertypen zeigt, daß starke Beeinflussungen durch Salzabwasser vor allem in einer Buntsandsteinquelle und zwei flachen Quartärmeßstellen am linken Werraufer sowie am rechten Werraufer im Kiessee 379 bei Widdershausen und Kiessee Ks1D bei Dankmarshausen vorkommen. Eine Mischungsrechnung läßt für den Kiessee 379 eine hauptsächliche Beeinflussung von Salzabwässern aus der Zeit nach Einführung der Elektrostatischen Aufbereitung („Nach-ESTA“) aus dem Werk Wintershall vermuten. Dies deckt sich mit dem Ergebnis der Mischungsrechnungen für den ehemaligen Versenkbrunnen 516, für den ebenfalls eine Beteiligung von „Nach-ESTA“-Salzabwasser zu vermuten ist. Danach wäre die Laufzeit vom Versenkgebiet des Werkes Wintershall bis zum Entlastungsgebiet Werratalaue mit derzeit etwa 16 Jahren anzunehmen. Eine eindeutige Aussage, ob es sich bei der Salzabwasserbeimischung alleine um Salzabwasser des Werkes Wintershall handelt, ist allerdings nicht möglich, da bei den Mischungsrechnungen jeweils nur eine Berechnung des Mischwasser zweier Komponenten erfolgen kann. Sollten auch Salzabwasser des Werkes Hattorf oder der früheren Versenkung in Heringen beteiligt sein, ist dies rechnerisch nicht nachzuweisen.

Die Anwendung der Typisierung auf verschiedene Zeiträume läßt Rückschlüsse auf die räumliche und zeitliche Ausbreitung des versenkten Salzabwassers zu. In diesem Teilgebiet traten insbesondere Ende der 70er bis Mitte der 80er Jahre hochkonzentrierte Mischwässer aus Formationswässern und Salzabwässern bis an die Oberfläche auf und trugen durch diffuse Einträge in die Werra zu einem beträchtlichen

Austrag versenkter Salzabwässer bei. Der seit einigen Jahren feststellbare Konzentrationsrückgang in einem Großteil der Beobachtungsmeßstellen im Quartär der Werratalaue ist i.a. mit einem Rückgang der Salzabwasseranteile verbunden. Offensichtlich wirkten sich hier die zunächst 1986 und später seit 1991 weiter verringerten Versenkmengen reduzierend auf den Salzwasseraufstieg aus, so daß durch den Zufluß bzw. die Neubildung von süßem Grundwasser teilweise eine langsame Aussüßung einsetzen konnte.

Neben den Salzwasseraufstiegen im Werratal und dem angrenzenden Buntsandstein-Talrand sowie bei Vacha/Philipppthal/Tiefenort, die hier nicht weiter besprochen werden, beschränkt sich der stoffliche Einfluß durch die Versenktätigkeit in den Plattendolomit auf die Grundwasserleiter Buntsandstein und Quartär auf ein lokal begrenztes Entlastungsgebiete am Salzhang. Im Fulda-Einzugsgebiet ist das Quellgebiete Breitzbachs-Mühle durch den Aufstieg von Mischwasser aus natürlichem Formations- und Salzabwasser beeinflusst.

In drei Buntsandstein-Brunnen am nördlichen Salzhanginnenrand führte der lokale Zufluß von natürlichem Formationswasser als Folge der intensiven salinartektonischen Zerrüttung, der Druckentlastung durch Förderung und möglicherweise auch der Druckerhöhung durch die Versenkung zu erheblichen Anstiegen der Salzkonzentrationen. Natürliche, durch die Versenktätigkeit auch druckmäßig nicht unbeeinflusste Übertritte von Formationswasser aus dem Plattendolomit bzw. tiefen Unteren Buntsandstein sind im Stadtgebiet von Bad Hersfeld sowie in der Quelle 32 zu finden. Eine Gefährdung von Oberflächengewässern und von bestehenden Grundwasserfassungen über die derzeit bekannten Stellen hinaus ist für das Fuldaeinzugsgebiet nicht abzuleiten.

8. Schriftenverzeichnis

- Becker, R. E. & Laemmlen, M. (1994): Die östlichen Fortsetzungen von Hersfelder und Großenluderer Graben. – Geol. Jb. Hesse, **122**: 39–48; Wiesbaden.
- Beer, W. W. (1996): Kalilagerstätten in Deutschland. – Kali und Steinsalz, Bd. 12, Heft 1: 18–30; Essen.
- Dietz, C. (1928): Die Salzlagerstätte des Werra-Kalibereiches. Archiv Lagerst.-Forsch., **40**, 130 S., – Hrsg. Preuß. Geol. L.-A., Berlin.
- DIN 4049 T2 (1990): Hydrologie – Begriffe der Gewässerbeschaffenheit. – Berlin (Beuth-Verlag).
- Deubel, F. (1954): Zur Frage der unterirdischen Abwasserversenkung in der Kali-Industrie. – Abh. dt. Akad. Wiss., math.-nat. Kl., Jg. 1954, **H3**, 23 S.; Berlin.
- Dittrich, E. (1975): Gutachten zu Problemen der Kaliabwasserversenkung im Kalibetrieb „Werra“. – Im Archiv der Thür. Landesanstalt f. Geologie, 4104131.
- Finkenwirth, A. (1964): Die Versenkung der Kaliabwässer im hessischen Anteil des Werra-Kalireviers. – Z. dt. Geol. Ges., **116**: 215–231; Hannover.
- Finkenwirth, A. & Fritsche, H. G. (1993): Hydrogeologische Möglichkeiten und Grenzen der Versenkung. – Mitt. DVWK, **24**: 40–65; Bonn.
- Füchtbauer, H. (1964): Fazies, Porosität und Gasinhalt der Karbonatgesteine des norddeutschen Zechsteins. – Z. dt. geol. Ges., **114**: 484–531; Hannover.
- Fulda, E. (1923): Salzspiegel und Salzhang. – Z. dt. geol. Ges., **75**: 10–14, Berlin.
- Hecht, G. (1995): Die Solebohrungen von Bad Salzungen. – Geowiss. Mitt. v. Thüringen, **3**: 135–172; Weimar.
- Hecht, G. (1996): Heilbäder Südthüringens aus balneologischer Sicht. – Geowiss. Mitt. v. Thüringen, Beih. **5**: 173–191; Weimar.
- Hoppe, W. (1962): Grundlagen, Auswirkungen und Aussichten der Kaliabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet. – Geologie, **11** H9: 1059–1086; Berlin.
- Jungwirth, J. & Seifert, J. (1966): Zur Stratigraphie und Fazies des Zechsteins in Südwest-Thüringen. – Geologie, **15**: 421–433; Berlin.
- Käbel, H. (1984): Hydrogeologie und Kaliabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet der DDR. – ZGI-Bericht 62/83.
- Käbel, H. & Trottnier, D. (1984): Hydrogeologische Auswertung der Grundwasserversalzung im Werra-Kaligebiet der DDR, Zeitraum 1980–82. – ZGI-Bericht 1/84.
- Käding, K.-C. (1962): Geologische, magnetische und petrographische Untersuchungen tertiärer Vulkanite und ihrer Begleiterscheinungen im Bereich des hessischen Werra-Kaligebietes. – Diss. FU Berlin, 112 S.; Berlin.
- Kali und Salz GmbH (1995): Verhalten des Druckspiegels im Plattendolomit während einer Versenkpause im Juli 1991. – Sonderbericht (unveröff.); Kassel.
- Knipping, B. (1989): Basalt Intrusionen in Evaporiten. In: Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 24, VI; Berlin (Springer).
- KoSaAb (1994): „Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra – 1994“, Langfassung des Sonderberichts des KoSaAb (unveröff.), Hrsg.: HlFB, Wiesbaden.
- KoSaAb (1996): „Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra – 1994“, Kurzfassung des Sonderberichts des KoSaAb, Thür. Min. f. Landw., Naturschutz und Umwelt, Erfurt.
- Kulick, J., Leifeld, D., Meisl, S., Pöschl, W., Stellmacher, R., Strecker, G., Theuerjahr, A.-K. & Wolf, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. – Geol. Jb., **D 68**: 1–223; Hannover.
- Küster, F. W., Thiel, A. & Fischbeck, K. (1972): Logarithmische Rechenverfahren. – 101. Auflage, 307 S.; Berlin–New York (Walter de Gruyter).
- Lange, P. R. & Käding, K.-C. (1961): Stratigraphie und Tektonik im Buntsandstein des Werra-Kaligebietes östlich Bad Hersfeld. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **89**: 242–265; Wiesbaden
- Mayrhofer, H. (1965): Die Kali-Abwasser-Versenkung in den Plattendolomit des Werra-Kaligebietes. – Exkursionsführer Kongreß I.A.H., Hannover
- Mason, B. & Moore, C. B. (1985): Grundzüge der Geochemie. – 340 S., 97 Abb., 66 Tab.; Stuttgart (Enke)
- Matthess, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers. Lehrbuch der Hydrogeologie. – 2. Aufl., 498 S., 139 Abb., 116 Tab.; Berlin/Stuttgart (Borntraeger)
- Möller, H. (1985): Petrographie und Fazies des Plattendolomits (Leine-Karbonat, Ca3) im hessischen Zechstein-Becken. – Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **20**: 77–112, 11 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- Plummer, L. N., Parkhurst, D. L., Fleming, G. W. & Dunkle, S. A. (1988): A computer program incorporating Pitzer's equations for calculation of geochemical reactions in brines. – US Geol. Surv. Water Res. Inv. Rep., **88-4153**: 163 S.; Washington D.C.
- SaAbHe (1996): Einflüsse der Salzabwasserversenkung im Werra-Kaligebiet auf Grund- und Oberflächengewässer im Einzugsgebiet der Fulda – Fuldabericht – Sonderbericht des Salzabwasserausschuß Hessen (unveröff.), Federführung Hess. Landesamt f. Bodenforsch.
- Schoeller, H. (1956): Géochimie des eaux souterraines. Application aux eaux des gisements de pétrole. – Rev. Inst. Pétrole et Ann. des Combustibles liquides, **10**: 181–213, 219–246, 507–552, 671–719, 823–874; Paris

Glossar

Diffuse Einträge

alle Einträge von höher mineralisiertem Wasser, also Wasser mit höheren Konzentrationen gelöster Feststoffe in Vorfluter, die nicht als Einzelquelle erfassbar und/oder meßbar sind. In diesem Begriff werden geogen und anthropogen verursachte Einträge zusammengefaßt. Derartige Einträge können sowohl direkt in größere Vorfluter eintreten als auch aus dem Untergrund aufsteigend zuerst in sedimentäre Talfüllungen übertreten und von hier in kleinere oder größere Vorfluter gelangen.

ESTA-Verfahren

Von der Kali und Salz GmbH entwickeltes elektrostatisches Verfahren zur Trennung der Rohsalzbestandteile auf trockenem Wege. Hierbei werden die spezifischen elektrischen Aufladungen der einzelnen Salzbestandteile (Kaliumchlorid, Steinsalz und Kieserit) im elektrischen Feld genutzt.

Formationswasser

das ursprünglich, also geogen im Plattendolomit enthaltene und teilweise durch die Versenkung des Salzabwassers verdrängte Grundwasser. Dieses kann, je nach Lokation, von unterschiedlicher Beschaffenheit sein aber ohne nachweisbaren Einfluß der Salzabwasser Versenkung. Auch **natürliches** oder **primäres** oder **geogenes Formationswasser**.

Salzabwasser (früher Endlauge, Versenklauge oder Kaliabwasser)

das bei der Rohsalzaufbereitung zum verkaufsfertigen Kaliprodukt anfallende und meist in den Untergrund versenkte Abwasser. Es besteht aus hochkonzentriertem Abwasser verschiedener Herkunft und Zusammensetzung.

Vor-/Nach-ESTA-Salzabwasser

Als „Nach-ESTA“-Salzabwasser wird Salzabwasser bezeichnet, das während oder nach der Einführung des Elektrostatischen Aufbereitungsverfahrens versenkt wurde. Die ESTA-Einführung begann im Werk Wintershall 1976 und im Werk Hattorf 1981. Entsprechend wird vorher versenktes Salzabwasser als „Vor-ESTA“-Salzabwasser bezeichnet.

Mischwasser

ein beliebiges erkennbares Gemisch von Formations- und Salzabwasser.

Versalzung

Zunahme der Konzentrationen an gelösten salzbildenden Hauptionen. Hauptionen sind die im Wasser ionar oder komplex gelösten Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{++} und Mg^{++} sowie Anionen Cl^- , SO_4^- und HCO_3^- . Im Text erfolgt die Angabe ohne die jeweilige Wertigkeitsangabe. Die Verfasser weisen darauf hin, daß die ebenso aus Gründen der Anschaulichkeit verwendeten Begriffe **Salzkonzentration** und **Mineralisation** sich ebenfalls auf die Konzentrationen der o.a. gelösten Hauptionen beziehen und nicht im streng chemischen oder mineralogischen Sinne zu verstehen sind.

Salzwasser

entspr. DIN 4049 T2, Hydrologie-Begriffe der Gewässerbeschaffenheit (1990), ist ein Wasser mit hohen Konzentrationen (mehrere g/l) an gelösten Salzen (überwiegend Natriumchlorid) ohne Angabe eines exakten Grenzwertes für die Salzkonzentration.

Süßwasser

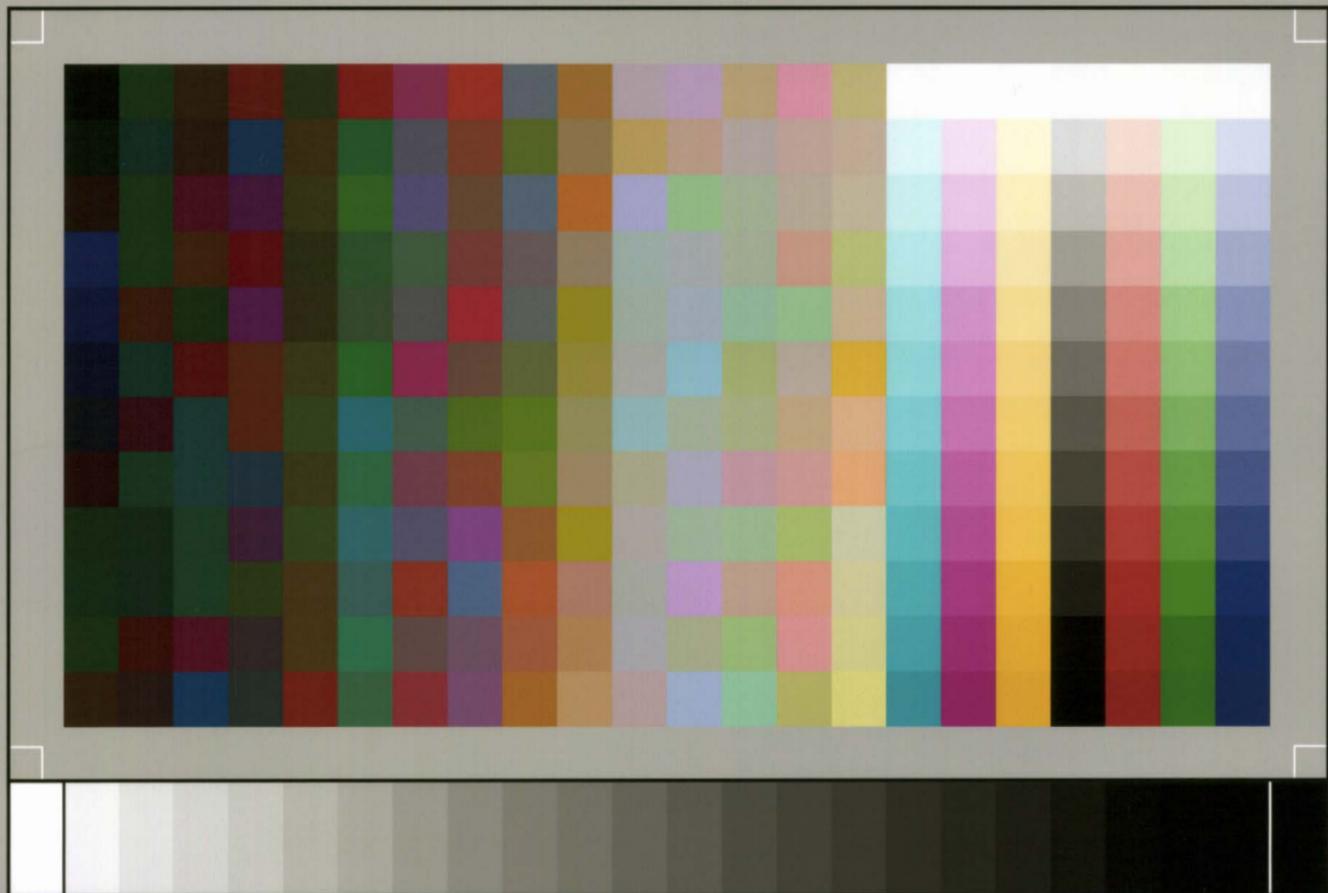
entspr. DIN 4049 T2, Hydrologie-Begriffe der Gewässerbeschaffenheit (1990), ist ein Wasser mit geringen Konzentrationen (je nach Einzelstoff $< 50\text{--}500$ mg/l) an gelösten Salzen (überwiegend Natriumchlorid) ohne Angabe eines exakten Grenzwertes für die Salzkonzentration.

Salinar

ein Gesteinskomplex in großräumiger Verbreitung, der überwiegend aus chloridischen Evaporiten und zu einem geringen Teil aus Sulfaten und Karbonaten besteht (Werra-Salinar des Zechstein). Die auf der Hunsrück-Oberharz-Schwelle verbreitete anhydritische Fazies des Zechstein 1 (Werra-Anhydrit) wird nicht dazugerechnet.

K + S

heutige Kali und Salz GmbH und deren Vorgängerfirmen.



SP050509001

ScanPrint® *autopilot* Scan Target v2.0

Kurzfassung des Inhalts

Die Versenkung und Ausbreitung von Salzabwasser im Untergrund des Werra-Kaligebietes

Seit 1929 wird das bei der Aufbereitung von Rohsalzen zu Kalidüngemitteln im Werra-Kaligebiet anfallende Salzabwasser in großem Umfang in den Grundwasserleiter Plattendolomit (Zechstein 3) versenkt. Der Plattendolomit enthält geogen bereits Salzabwasser und ist durch hydraulische Barrieren weitgehend von dem zur Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasserleiter im Buntsandstein isoliert. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Versenküberwachung hessischer und thüringischer Behörden und zusätzlicher Datenrecherchen wird der heutige Kenntnisstand zur Auswirkung der Salzabwasserversenkung auf Grundwasser und Oberflächengewässer im Werra-Kaligebiet in Hessen und Thüringen dargestellt.

Basierend auf Grundwasseranalysen aus 123 Meßstellen im Versenkhorizont Plattendolomit werden Verbreitungskarten der wesentlichen chemischen Kennwerte Chlorid und Magnesium für die geogene Situation vor Versenkbeginn und die heutige Situation erstellt. Derzeitig ist im Versenkhorizont eine Fläche von rd. 480 km² durch ein Salzabwasser/Formationswassergemisch in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen beeinflusst. Aufgrund der geringen Durchlässigkeiten des Plattendolomits im äußeren Bereich des Salzhanges sind, auch nach einer mehr als 70-jährigen Versenktätigkeit, keine Gebiete außerhalb der Salzhangverbreitung betroffen. Auf der Grundlage des vorliegenden Analysenmaterials und der Verbreitungskarten wird für die beeinflusste Fläche im Versenkhorizont eine Abschätzung der Salzabwasseranteile vorgenommen und in Karten dargestellt.

Durch zeitliche Veränderungen der Salzabwasserzusammensetzungen während der Kalisalzproduktion können für Teilgebiete Aussagen zur Herkunft, Ausbreitungsrichtung und Laufzeit des versenkten Salzabwassers gemacht werden.

In den Grundwasserleitern über dem Versenkhorizont im Buntsandstein und Quartär beschränkt sich die stoffliche Beeinflussung durch die Versenktätigkeit auf lokal begrenzte Entlastungsgebiete.

Zur Identifizierung von Salzabwassereinflüssen im Grund- und Oberflächenwasser werden Richtwerte vorgestellt, die auf der Grundlage von chemischen Analysendaten Rückschlüsse auf die räumliche und zeitliche Ausbreitung des versenkten Salzabwassers zulassen.

Ein wesentlicher Entlastungsschwerpunkt liegt im Werratal im Bereich des nördlichen Salzhanges. Mischwasser bzw. verdrängtes natürliches Formationswasser aus dem Plattendolomit tritt direkt und über angrenzende Kiesseen in die Werra ein und erhöht als „Diffuser Eintrag“ den Chloridtransport der Werra. Der seit einigen Jahren feststellbare flächenhafte Konzentrationsrückgang ist mit einem Rückgang der Salzabwasseranteile verbunden. Ursache sind die seit 1986 durch ein neues Rohsalz-Aufbereitungsverfahren rückläufigen Versenkmengen.

Weitere punktuelle Übertritte von Mischwasser oder verdrängtem Plattendolomit-Formationswasser in hangende Grundwasserleiter finden sich im oberirdischen Einzugsgebiet der Werra und der Fulda an mehreren Lokationen. Sie werden detailliert nach Art, Ort, Menge und Ursache ausgewertet.

Herausgabe und Vertrieb:
Hessisches Landesamt für Bodenforschung,
Leberberg 9, 65193 Wiesbaden

