

# **Potenziale und Risiken der von K+S Kali GmbH vorgeschlagenen Neuen Integrierten Salzabwassersteuerung (NIS)**

Fachliche Stellungnahme und Einschätzung der NIS in Bezug auf Beeinflussung des Versenkungsraumes und der Entwicklung der Wasserqualität

Im Auftrag des

**Runden Tische**

**Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion**

**MARTIN SAUTER & EKKEHARD HOLZBECHER**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung .....</b>	<b>3</b>
1.1. Veranlassung .....	3
1.2. Historie der Versenkung von Salzabwässern im Werra-Kaligebiet .....	4
<b>2. Stand der Technik .....</b>	<b>6</b>
<b>3. Hydrogeologie .....</b>	<b>8</b>
3.1. Überblick .....	8
3.2. Bewirtschaftung und Bewirtschaftungsraum .....	10
3.3. Fluid-Bilanz .....	14
3.4. Chlorid Bilanz .....	16
<b>4. Die 'Neue Integrierte Salzabwassersteuerung'(NIS) .....</b>	<b>18</b>
4.1. Konzept .....	18
4.2. Methoden .....	19
4.3. Spezifische Fragestellungen .....	23
4.4. Kontrolle der NIS – Monitoring .....	32
<b>5. Beurteilung .....</b>	<b>34</b>

# 1. Einführung

## 1.1. *Veranlassung*

Der Runde Tisch ‚Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion‘ wurde im Jahre 2007 von den Landtagen Hessen und Thüringen ins Leben gerufen, mit dem Ziel, die Diskussion über die Verbesserung der Gewässerqualität von Werra und Weser und die Perspektiven nachhaltigen wirtschaftlichen Handelns auf eine konsolidierte sachliche Grundlage zu stellen, Vertrauen und Akzeptanz zu schaffen und tragfähige Lösungsvorschläge zu entwickeln‘ (Zitat der Einsetzungserklärung).

Die Verbesserung der Gewässerqualität impliziert vor allem die Reduktion der anfallenden Salzabwässer aus der Salzaufbereitung, die Minimierung der Einleitung der Salzabwässer in die Oberflächengewässer sowie die Inanspruchnahme von Speicherräumen im Untergrund.

In der Diskussion über die genannte Thematik wurde von der K+S Kali GmbH ein „Integriertes Maßnahmenkonzept für das hessisch-thüringische Kalirevier“ vorgestellt (K+S, 2009). In diesem Konzept wird die Planung der K+S Kali GmbH für die kommenden Jahre bis 2015 dargelegt. Das Maßnahmenkonzept umfasst:

- die Herstellung eines länderübergreifenden Salzwasserverbunds und Aufbau einer länderübergreifenden Neuen Integrierten Salzwassersteuerung (NIS)
- den Bau einer Anlage zur Eindampfung von Magnesiumchlorid<sup>1</sup>
- die Umstellung der Nassgewinnung von Kieserit auf das trockene ESTA-Verfahren
- den Bau einer Lösungstiefkühlanlage für Salzlösungen
- Weiterentwicklung der Flotation

In dieser Stellungnahme beschäftigen wir uns ausschließlich mit der NIS. Sie umfasst:

- Einrichtung eines Salzabwasserverbunds zwischen Thüringen und Hessen zur verbesserten Trennung zwischen natriumreichen, ‚weichen‘ und magnesium- und calciumreichen, ‚harten‘ Salzabwässern bei der Einleitung in die Werra und in den Plattendolomit. (Hohe Kalium und Magnesiumkonzentrationen in den Oberflächengewässern werden als problematisch für die Organismen eingestuft und bei Einleitung in die Werra werden dies Grenzwerte relativ schnell erreicht, während sog. weiche Salzabwässer in noch in größerem Umfang eingeleitet werden können).
- Ausbau der Rückförderkapazität von früher verpressten Salzabwässern aus dem Untergrund (Plattendolomit- und Buntsandsteingrundwasserleitern) im Werratal
- Ausbau der Beckenkapazität, d.h. Speicherkapazität über Tage, zur Zwischenspeicherung von Salzabwässern
- Einen Austausch, bei dem kalium- und magnesiumreiche („harte“) Salzabwässer in den Plattendolomitgrundwasserleiter eingeleitet werden und gleichzeitig kalium- und magnesiumarme, dafür natriumreiche („weiche“) Salzwässer aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter zurückgeführt werden.

---

<sup>1</sup> Diese Maßnahmen wird zwischenzeitlich von der K+S AG nicht mehr weiter verfolgt (Pressemitteilung der K+S AG vom 01.04.2010)

- Bewirtschaftung des Untergrundes im Werratal durch temporäre Stapelung von Salzabwasser in Zeiten mit niedrigen Abflussverhältnissen in der Werra und Rückförderung und Einleitung dieser Salzabwässer in Zeiten mit hoher Wasserführung der Werra
- Ein umfangreiches Grundwassermonitoring
- Eine weitere Verbesserung der Salzlaststeuerung

An Teilen dieses Konzepts wurden vom ‚Runden Tisch‘ Zweifel geäußert. Um diesen nachzugehen, wurden die Autoren, u.a. zur Beantwortung der folgenden Punkte beauftragt:

- Kann der Plattendolomitgrundwasserleiter als ein quasi geschlossener Bewirtschaftungsraum angesehen werden?
- Was bedeutet NIS für die höheren Grundwasserstockwerke im Buntsandstein und unter Berücksichtigung der geogenen Störungszonen?
- Wie werden sich die diffusen Salzeinträge in die Werra in ihrem Trend entwickeln?
- Kann erwartet werden, dass bei einem volumenmindernden, aber frachtnutralen Salzlaugenaustausch eine Entlastung des Grundwasserkörpers eintritt?
- Ist mit hydrogeochemischen Reaktionen zu rechnen, wenn man ‚harte‘, magnesiumreiche Lauge Salzwässer gegen ‚weiche‘, chloridreiche natriumreiche Lauge Salzwässer austauscht?
- Sind zusätzliche Monitoringmaßnahmen erforderlich und welcher Aufwand würde entstehen, um den Betrieb von Versenkung und Rückförderung so zu überwachen, dass etwaige Restrisiken kalkulierbar bzw. beherrschbar bleiben?
- Können aus bergsicherheitlicher Sicht negative Auswirkungen für die Standsicherheit des Grubengebäudes infolge der Rückförderung ungesättigter Salzlösungen und den damit verbundenen Lösungsprozessen der Salzlagerstätte ausgeschlossen werden?

Insgesamt lässt sich die Problematik mit der folgenden übergeordneten Fragestellung zusammenfassen:

Kann vor dem Hintergrund der Historie, der Erfahrungen und bei den gegebenen Verhältnissen aus Sicht des Grundwasserschutzes erwartet werden, dass die Bewirtschaftung der unterirdischen Speicherräume mit Versenkung und Rückförderung von Salzwässern eine kontrollierbare (und damit genehmigungsfähige) Strategie ist?

## **1.2. *Historie der Versenkung von Salzabwässern im Werra-Kaligebiet***

Seit 1925 wird im tiefen Plattendolomitgrundwasserleiter des Werra-Kali-Reviere Prozessabwasser aus der Herstellung von Kali-Düngemittel versenkt (Standort Merkers). Bis heute beträgt das versenkte Gesamtvolumen der Salzabwässer ca. 1.000 Mio. m<sup>3</sup>.

Im Jahr 1928 wurde mit der Versenkung in Philippsthal (Werk Werra, Standort Hatdorf) und 1929 im Raum Heringen (Werk Werra, Standort Wintershall) begonnen. Die Versenkungen im Thüringer Raum wurden jedoch bereits Ende der Sechziger Jahre wieder eingestellt.

Die Zusammensetzung der Wässer wird im Wesentlichen durch die Kationen Natrium und Magnesium und die Anionen Chlorid und Sulfat bestimmt. Der Plattendolomit (Leinekarbonat des Zechstein, geologisches Symbol „Ca3“) wurde in der Vergan-

genheit, auf Grund seiner spezifischen Eigenschaften als Kluftgrundwasserleiter und der Hohlraumerweiterung durch Karbonatlösung als Versenkhorizont als geeignet betrachtet, große Mengen an injizierten Salzabwässern aufzunehmen. Ein weiterer Aspekt ist, dass der Plattendolomitgrundwasserleiter in diesem Raum wegen der großen Tiefe und der hohen Konzentration der ursprünglichen Formationswässer nicht als Grundwasserleiter genutzt wird (Skowronek et al. 1999; Deubel 1965; Hoppe 1962).

Die Salzabwässer treten an verschiedenen Stellen entweder als verdrängte Formationswässer, bzw. als Mischwässer von Formationswasser / oberflächennahem Grundwasser / Salzabwasser zu Tage („diffuser“ Zustrom). Die Werra und untergeordnet die Fulda agieren dabei als regionale Vorfluter. Die Hauptaustrittsstelle liegt in der Umgebung des Ortes Heringen. Aus der Änderung der Zusammensetzung der hochsalinen Wässer an den Austrittsstellen leiten Skowronek et al. (1999) mittlere Verweilzeiten von ca. 15 Jahren im tiefen Untergrund ab.

Es ist davon auszugehen, dass der Bereich zwischen Plattendolomitgrundwasserleiter und dem Vorfluter Werra, d.h. die entsprechenden von Störungen durchsetzten Buntsandsteinhorizonte im weiteren Werratalbereich, ebenfalls vom Salzabwasser in größerem Umfang erfüllt ist.

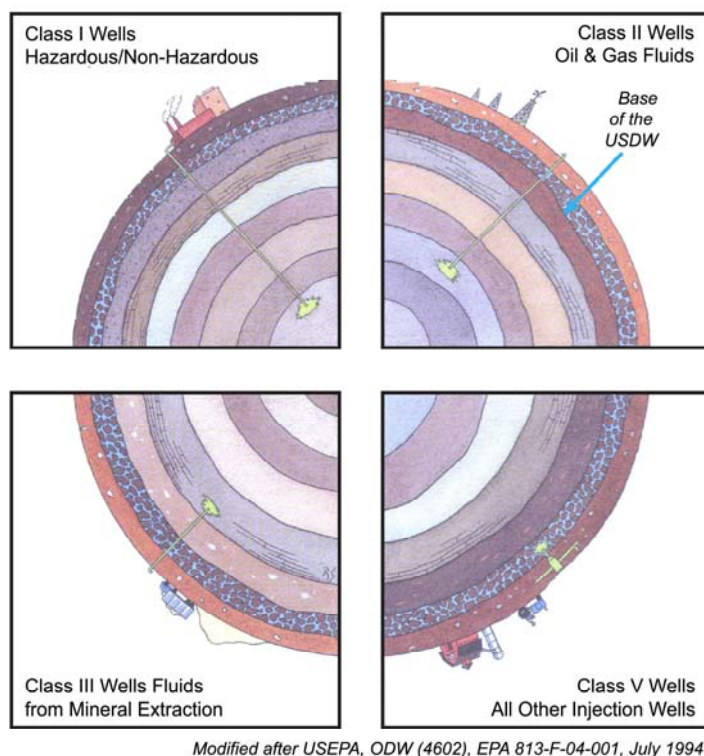
Seit Mitte der 80er Jahre ist eine deutliche Abnahme in den „diffusen“ Einträgen von Salzwasser in die Werra zu verzeichnen. Hier wirken sich offensichtlich die reduzierten hydraulischen Gradienten auf Grund abnehmender Versenkraten auf den Abstrom von Salzabwasser in die Vorfluter aus.

## 2. Stand der Technik

Obwohl die Versenkung von industriellen Prozessabwässern in den tiefen Untergrund seit Anfang des letzten Jahrhunderts in Europa und in den USA systematisch betrieben wird (insbesondere zur Entsorgung von Wässern, die im Zusammenhang mit der Erdölförderung anfallen), existieren keine einheitlichen Regeln für die Tiefenverpressung von Abwässern. Die Entsorgung dieser Wässer erfolgte in Europa im Einzelfall auf der Grundlage von lokalen geologisch-hydrogeologischen Untersuchungen.

In den USA erforderte die zunehmende Beanspruchung des tiefen Untergrunds durch Wässer aus der Erdölförderung eine administrativ-rechtliche Grundlage. Im Jahr 1974 wurde die Safe Drinking Water Act (SDWA) Verordnung verabschiedet. Diese beinhaltet die Unterscheidung in vormals 5 und heute noch 4 unterschiedliche Kategorien von Versenkungsbrunnen: a) „Class I wells“ (Versenkung von Fluiden und Sonderabfälle *unterhalb* von zur Trinkwassergewinnung vorgesehenen Grundwasserleitern), b) „Class II wells“ (Wässer aus der Erdöl- und Erdgasförderung), c) „Class III wells“ (Brunnen aus dem In-situ Bergbau, z.B. Solung) und d) Class V wells (alle anderen Brunnen, die nicht in die o.g. Kategorien fallen, z.B. Geothermiebrunnen). Class IV wells werden nicht mehr zugelassen, da sie die Injektion von Abwässern in Horizonte *oberhalb* von zur Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasserleitern betrafen.

Die Tiefenversenkung wird heute, neben der Entsorgung von Abwässern (Erdölförderwässer, kommunale Abwässer, Salzabwässer, radioaktive Abwässer in Sibirien) insbesondere auch zur Verpressung von CO<sub>2</sub> und zur Zwischenspeicherung von Hochwasser für die Wasserversorgung (Aquifer Storage and Recovery, ASR) als Maßnahme eingesetzt



**Abb. 1:** Klassifikation von Installationen zur Tiefenversenkung (Clark et al. 2003)

Tsang & Apps (2005) geben einen sehr guten Überblick über den heutigen Stand der Technik und anstehende Probleme und wissenschaftliche Fragestellungen. Für die hier diskutierte Thematik sind vor allem Themen wie die Risikoabschätzung, Hydraulik der Injektionsbrunnen und Charakterisierung des Versenkungsraumes, die Hydrogeochemie der Wechselwirkung der injizierten Wasserinhaltsstoffe mit dem Aquifermaterial, sowie die induzierte Seismizität von Relevanz.

Der Bereich der Risikoabschätzung beinhaltet hauptsächlich Methoden zur Abschätzung des Verbleibs der injizierten Lösungen, d.h. der Umgang mit der Unsicherheit, die insbesondere aus einer Parameterunsicherheit der hydraulischen Kenngrößen des Injektionsraumes sowie der hydrogeologischen Randbedingungen resultiert. Es werden Versagensszenarien des Injektionsbauwerks und der isolierenden Deckschichten (Caprock) und die Ausbreitung der Abwässer mit probabilistischen Methoden analysiert (z.B. Rish, 2005).

Kapitel 3, in dem von Tsang & Apps (2005) herausgegebenen Werk, widmet sich intensiv brunnenhdraulischen Methoden zur Charakterisierung des Verpressraumes. Die meisten Methoden stammen aus dem Reservoirengineering-Bereich der Kohlenwasserstoffindustrie. Diese Methoden sind sehr gut entwickelt für die Charakterisierung des Nahbereichs der Bohrung und hydraulische Effekte im Grenzbereich Bohrung / Formation (Skin-Effekte durch Korrosion der Verrohrung, Biofilmbildung, Lösung / Ausfällung im Porenraum des angrenzenden Reservoirs, etc.). Sie erlauben auch eine initiale Charakterisierung der Formation.

Limitierungen zeigen sich jedoch in der Quantifizierung der Heterogenität der hydraulischen Parameter der Formation im regionalen Maßstab. Park et al. (2005) setzen z.B. geostatistische Verfahren (Markov-Ketten) zur Quantifizierung der Unsicherheit und zur Generierung eines Parametersatzes ein. Die genannte Limitierung liegt weniger in den Methoden begründet, als vielmehr in den begrenzt vorliegenden Daten bei aufwendigen Tiefbohrungen. Bezeichnend ist, dass keine Aussagen zur Quantifizierung der durchflusswirksamen Porosität, d.h. des Speicheranteils gemacht werden. Dies liegt hauptsächlich daran, dass diese Größe nur durch aufwendige Markierungsversuche bestimmt werden kann. Deren Erfolg ist jedoch stark abhängig vom Verdünnungsgrad des markierten Fluids mit den Hintergrundwässern, der Heterogenität der Formation und der Anzahl der Probenahmepunkte (Bohrungen), die, wie erwähnt, in tiefen Systemen begrenzt sind. Ferner handelt es sich bei den Versenkungshorizonten um großskalige Systeme, die vielfach lange Transportdistanzen und damit lange Transportzeiten aufweisen.

Hydrogeochemische Untersuchungen im Zusammenhang mit Tiefenversenkungen beschränken sich im Wesentlichen auf das unmittelbare Umfeld von Injektionsbohrungen und auf theoretische Modellstudien (z.B. Dyer et al., 2005; Spycher & Larkin, 2005) mit z.B. dem Simulationsmodell TOUGHREACT. Die Untersuchungen berücksichtigen Prozesse wie Adsorption sowie Minerallösung und Fällung.

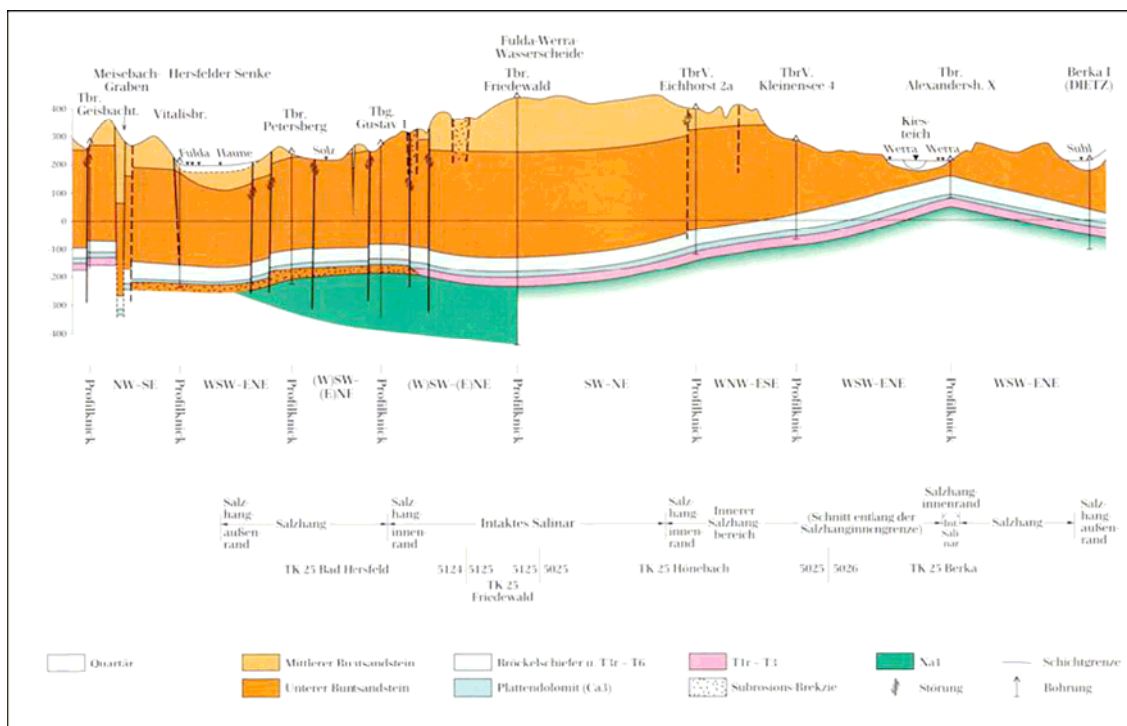
Umfangreiche internationale Erfahrungen mit der Injektion von Salzabwässern existieren hauptsächlich auf der Projektebene, insbesondere aus der Entsorgung von Salzabwässern im Werra-Kalirevier seit den Dreißiger Jahren. Systematische Untersuchungen zum Verständnis des Gesamtsystems des Versenkhorizonts erfolgten jedoch erst seit ca. 15 Jahren (z.B. Skowronek et al., 1999).

### 3. Hydrogeologie

#### 3.1. Überblick

Grundlage für eine Beurteilung der Auswirkungen der Salzabwasserversenkungen ist in erster Linie die Kenntnis der hydrogeologischen Verhältnisse, d.h. Information über die Geometrie des Versenkungsraumes und der hydraulischen Parameter, sowie deren Variabilität.

Die hydrogeologische Situation ist umfassend in Skowronek et al. (1999) zusammengefasst, wobei der Schwerpunkt dieser Synthese auf der Beurteilung der hydrogeochemischen Verhältnisse liegt. Diese, am Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) entstandene Arbeit fasst auch frühere Arbeiten (Deubel, 1954; Käbel, 1984; Hecht, 2000) zusammen. Plümacher (2008) bereitet diese Arbeiten für die Erstellung eines zweidimensionalen Grundwasserströmungs- und Transportmodells auf. Ein weiterer Bericht zur hydrogeologischen Situation im Werra-Kaligebiet wurde von der K+S AG (Plümacher et al., 2008) erarbeitet. Dieser Bericht konzentriert sich im wesentlichen auf die hydrogeochemische Situation, insbesondere auf die Dynamik der Entwicklung der Zusammensetzung der, von der Versenkung beeinflussten, Grundwässer. Die wesentlichen geologischen und hydrogeologischen Elemente des Systems sind in Abb. 2 dargestellt.



**Abb. 2:** Typisches Geologisches Profil durch den Untersuchungsraum (HLUG 2008)



Im Bereich der Versenkräume und in Tallagen der regionalen Vorfluter ist die Datengrundlage, in Bezug auf die hydraulischen Parameter und die Zusammensetzung der Grundwässer gut. In den Höhenlagen außerhalb der Täler ist die hydrogeologische Charakterisierung auf Grund der geringen Zahl an Aufschlussbohrungen schwierig. In den diversen Modellen wird davon ausgegangen, dass dieser Bereich von der Versenkung stark beansprucht wird und aus diesem Grund ist die hydrogeologische Information als sehr relevant einzuschätzen.

Seitens K+S AG wird derzeit als Grundlage für ein dreidimensionales Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell ein dreidimensionales hydrogeologisches Modell erstellt. Die Daten liegen den Autoren dieses Gutachtens noch nicht vor. Es ist jedoch zu erwarten, dass die dreidimensionale Analyse der Struktur und des Strömungsfeldes wesentlich zur Aufklärung der hydrogeologischen Verhältnisse beiträgt. An dieser Stelle soll im Interesse des Gesamtverständnisses kurz auf die hydrogeologische Situation eingegangen werden.

Der Versenchorizont ist im Werra-Kalirevier der Grundwasserleiter „Plattendolomit“, eine Karbonatabfolge des oberen Zechsteins (geologisches Symbol „Ca3“). Der Plattendolomit weist eine durchschnittliche Mächtigkeit von ca. 15 m auf, wobei diese zwischen deutlich weniger als 10 m bis über 40 m variieren kann. Er streicht im Bereich des Richelsdorfer Gebirges und des Thüringer Waldes aus. Diese Ausstrichgebiete, die durch Salzauslaugung charakterisiert sind (Salzhang) sind wesentlich für die Grundwasserneubildung im Plattendolomitgrundwasserleiter und damit für die Gesamtwasserbilanz. Die Durchlässigkeiten im Plattendolomitgrundwasserleiter variierten sehr stark zwischen  $10^{-3}$  m/s im Bereich des Werratal bis zu  $10^{-7}$  m/s im Bereich der Plateau (Höhen-) lagen. Es ist davon auszugehen, dass im Werratalbereich die erhöhten Durchlässigkeiten auf bruchtektonische Versätze und Verkarstungsprozesse zurückzuführen sind, da die Werra in diesem Raum der Hauptvorfluter ist und damit nicht notwendigerweise repräsentativ für einen größeren Raum sind. Obwohl die Bildung des geometrischen Mittels eine gängige Methode zur Bestimmung der Durchlässigkeit in heterogenen Systemen ist, so überschätzt u. a. der von Plümacher (2008) ermittelte Wert von  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s als Wert für das Gesamtsystem Plattendolomitgrundwasserleiter die repräsentative hydraulische Leitfähigkeit, da die hohen Werte des Werratal, eines Gebiets mit relativ geringem Flächenanteil, den Mittelwert dominieren.

Das effektive Porenvolumen ist für die Prognose der Transportzeiten im Untergrund ein weiterer wichtiger Parameter. In der Literatur (zitiert in Plümacher, 2008 und Skowronek et al., 1999) variieren die Porositäten für den Plattendolomitgrundwasserleiter zwischen  $< 3\%$  und  $> 15\%$ . Von den verschiedenen Autoren werden durchflusswirksame (effektive) Porositäten von ca. 10% angenommen, die hauptsächlich auf Laborbestimmungen an kleinskaligen Proben, sowie aus Feldexperimenten im Bereich des Salzhanges beruhen. Wie oben erwähnt, dominieren auch hier die Messstellen im Vorfluterbereich. Markierungsversuche, die eine bessere Abschätzung dieser wichtigen Kenngröße erlauben, existieren zu unserer Kenntnis nicht. Es ist davon auszugehen, dass die hohen Porositätswerte nur für die Umgebung von Störungen, im Salzhang- und Vorfluterbereich gelten, an den Orten an denen jüngere Verkarstung in Aufstiegsbereichen stattfinden konnte. Erhöhte Löslichkeit durch den Ionenstärkeeffekt dürfte hier zu einer verstärkten Verkarstung beigetragen haben. Gängige Erfahrungswerte für effektive Kluftporositäten für tiefe Festgesteine bewegen sich im Bereich  $< 3\%$ . Für eine zuverlässige Prognose des Grundwassertransports ist die Ermittlung hydraulischer Parameter im flächenmäßig dominierenden Bereich der Höhenlagen dringend erforderlich.

Der Plattendolomitgrundwasserleiter wird überlagert von den ca. 40 m mächtigen geringdurchlässigen Gesteinen des Oberen Leine-Tons und Bröckelschiefers. Auf

Grund der Präsenz dieses Geringleiters („caprock“) wurde der Plattendolomitgrundwasserleiter in der Vergangenheit als geeigneter Versenkhorizont betrachtet.

Die Abfolge im Hangenden des Zechstein wird vom Buntsandstein gebildet, einer geklüftet-porösen Sandsteinabfolge von mehreren 100 m Mächtigkeit, in Abhängigkeit von der topographischen Lage.

Die Strömung innerhalb des Plattendolomits wird bestimmt durch den Zufluss an den hydraulischen Rändern und Ausstrichflächen am Richelsdorfer Gebirge und Thüringer Wald und durch das Potential in den Entlastungsgebieten Werra- und Fuldata. Die hydraulische Bedeutung des Entlastungsgebiets der Werra wird durch die Daten aus den elektromagnetischen Erkundung aus der Hubschrauberbefliegung (Siemon et al., 2008) eindrucksvoll dokumentiert. Die deutlich verringerten scheinbaren Widerstände des Gebirges im Werratalbereich auf Grund der hohen Salinitäten des abströmenden Plattendolomitformationswassers bzw. der Salzabwässer, zeigen die Rolle als Abstromgebiet.

Aus dem Süden, d.h. der Kuppenrhön wird von Plümacher (2008) auf der Basis von Einzelmessungen des hydraulischen Potentials ein Zustrom nach Norden angenommen, obwohl dort der Plattendolomitgrundwasserleiter unter hoher Überdeckung, d.h. der Zustrom eingeschränkt ist. Abb. 3 aus Plümacher (2008) stellt, gemessen an der Datenlage, die hydraulische Situation im Plattendolomitgrundwasserleiter plausibel dar. Wie im späteren Kapitel zur Wasserbilanz jedoch diskutiert wird, dürften durch die Kombination einer Annahme eines Festpotentialrandes im Süden und der hohen durchschnittlichen Durchlässigkeit von  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s unrealistisch hohe Volumenströme nach Norden entstehen.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden: Der Plattendolomit ist ein stark heterogener Kluftgrundwasserleiter (geklüftet-poröses Gestein). Er besitzt eine sehr variable Geometrie mit starken faziellen Änderungen, bedingt durch Riff- und Schwellenstrukturen während der Ablagerungen. Diese räumliche Variabilität wurde durch Karbonatlösung im Bereich des Werratales noch verstärkt. Die effektiven Porositäten (Kluft, Matrix) sind für ein Kluftgestein (wahrscheinlich nur im Bereich des Werratales) hoch (7-8%) und weisen eine hohe Variabilität auf. Im Bereich der Hochflächen dürfte das durchflusswirksame Porenvolumen eher in dem für Festgesteine üblichen Prozentbereich, d.h. ca. 1-3% liegen. Die hydraulischen Leitfähigkeiten variieren ebenfalls sehr stark bis zu drei Größenordnungen. Diese hohen Variabilitäten in der Geometrie und in den hydraulischen Parametern sind primär ein Erkundungsproblem mit der Folge, dass die Prognose der Ausbreitung des Salzabwassers mit hohen Unsicherheiten behaftet ist.

### **3.2. Bewirtschaftung und Bewirtschaftungsraum**

Eine zentrale Frage des „Runden Tisches Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“ war die Klärung des Verbleibs der versenkten Abwässer. Wiederholt kam auch die Frage auf, inwieweit der Plattendolomitgrundwasserleiter als geschlossener Bewirtschaftungsraum betrachtet werden kann, d.h. existieren Kontrollmöglichkeiten für den Abstrom an Salzabwässern.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass bei der Injektion von Wasser in einen Grundwasserleiter bereits vorhandenes Wasser aus dem gesättigten Porenraum verdrängt wird. Geologisch-hydrogeologisch gibt es so gut wie keine geschlossenen Systeme („Dilemma der Endlagerforschung“). Dies bedeutet, dass man nicht von „Stapelung“ größerer Fluidvolumina in diesem Zusammenhang sprechen kann. Bei erhöhten Porenwasserdrücken, die durch Injektion erzeugt werden, kann der Porenraum auf Grund der Elastizität des Grundwasserleiters leicht vergrößert werden.

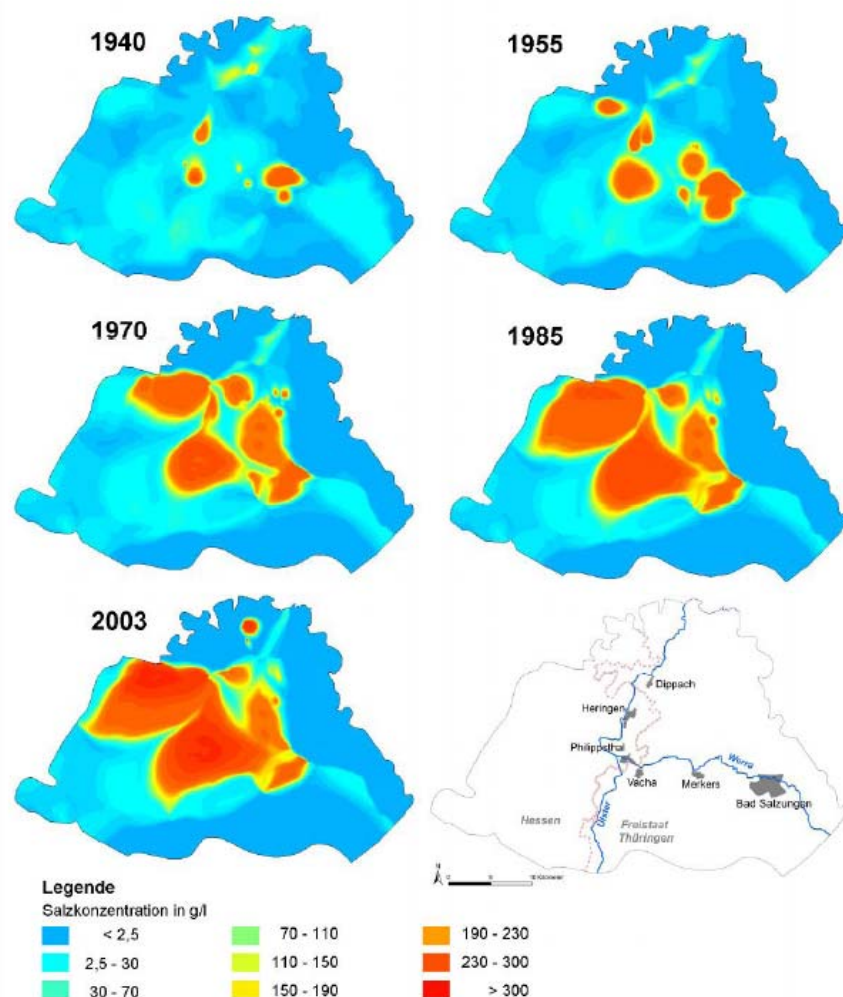
**Legende**

- Plattendolomit-Messstelle
- Grundwassergleiche Plattendolomit in m NN
- Grundwasserscheide
- Plattendolomit-Ausbiss
- Strömungsrichtung
- Bereich mit Piezometerhöhen > 300 m NN
- Entlastungsgebiet

Im Hinblick auf die Praxis der Versenkung von Salzabwasser, wie sie in der Vergangenheit praktiziert wurde, wurden Plattendolomitgrundwasserleiter und Werratal Buntsandstein jahrzehntelang als "Bewirtschaftungsraum" de facto betrieben. Eine 3D- Ansicht des Bewirtschaftungsraums nach derzeitigem Kenntnisstand ist in Abb. 4 und 5 dargestellt.

Die Fluidbilanz ergibt weitere Aufschlüsse über den Verbleib der versenkten Salzabwässer. Der hessische Anteil des Plattendolomits hat einen Porenraum von etwa 1 Mrd.  $\text{m}^3$  (Plümacher, 2008), wobei hier eine Porosität von ca. 10% angenommen wurde. Eine realistischere Schätzung der effektiven Porosität (s.o.) und unter Berücksichtigung, dass nicht das gesamte Porenvolumen des Plattendolomits auf Grund der speziellen Geometrie und Potentialverteilung für einen Fluidaustausch Formationswasser-Salzabwasser zugänglich ist, dürfte sich das effektive Speichervolumen auf wenige 100 Mio.  $\text{m}^3$  reduzieren. Die Ausbreitung der Salzabwässer im Plattendolomitgrundwasserleiter wird in Abb. 4 gezeigt (Plümacher, 2008).

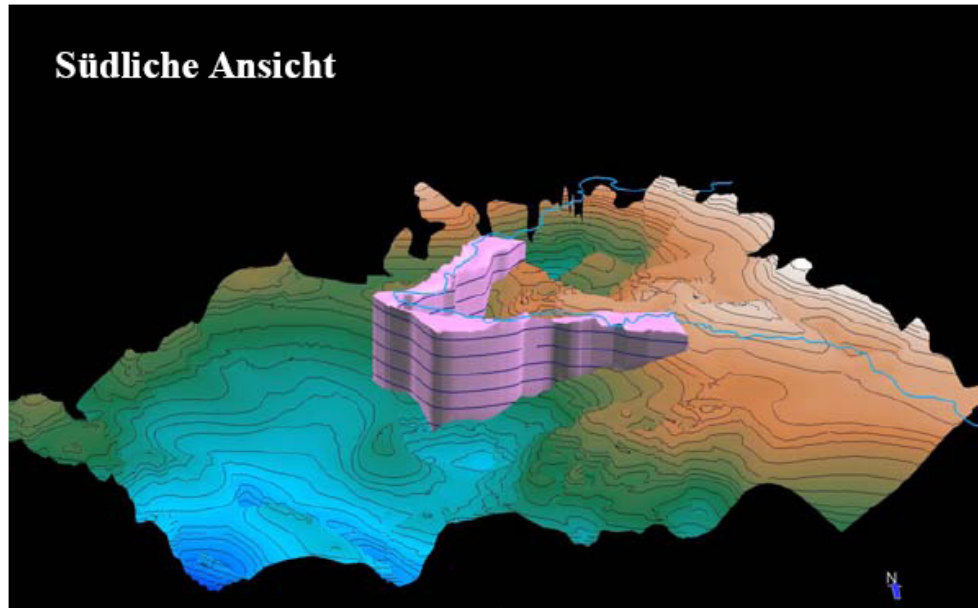
Aus der Chlorid-Bilanz des HLOG und der K+S AG ergibt sich je nach Ansatz (siehe unten: Chlorid Bilanz) für den historischen „diffusen“ Abstrom zwischen 1925 und 2007 in die Werra ein Salzwasservolumen von 190-290  $\text{m}^3$ , d.h. bei einem Gesamtversenkungsvolumen von ca. 960 Mio.  $\text{m}^3$  (HLOG 2008) muss der Verbleib von ca. 670-770 Mio.  $\text{m}^3$  erklärt werden.



**Abb. 4:** Ausbreitung von Salzabwässern im Plattendolomitgrundwasserleiter (nach Grundwassermodell Werra 2008) von 1940 bis 2003 (Plümacher, 2008)

Der von Störungen, d.h. möglichen Aufstiegszonen durchsetzte Bereich des Buntsandstein (BS) im Bereich des Werratales, weist ein Volumen von 12.3 Mrd.  $\text{m}^3$  auf (Abb. 5). Je nach den Annahmen zur Porosität (1-5%) ergeben sich dann Speichervolumina zwischen 123 Mio.  $\text{m}^3$  und 615 Mio.  $\text{m}^3$  (Plümacher et al., 2008). Dies

bedeutet, dass der „Werratal-Buntsandsteingrundwasserleiter“ in den „Bewirtschaftungsraum“ mit einbezogen werden muss. Die Ergebnisse der aerogeophysikalischen Messungen von Siemon et al. (2008) (), die die Verbreitung der Salzabwässer im oberflächennahen Untergrund anzeigen, liefern ebenfalls deutliche Hinweise für diese Einschätzung. Die dort eingesetzten elektromagnetischen Methoden liefern eindeutige Indikation für erhöhte Salzkonzentrationen im oberflächennahen Buntsandstein, meist in der Nähe der Vorfluter. Es ist davon auszugehen, dass im unteren Buntsandstein lokal Störungen existieren, die die erkennbaren Bereiche mit erhöhten Salzkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser mit dem Plattendolomitgrundwasserleiter verbinden. Hier findet ein Salzwasseraufstieg statt.



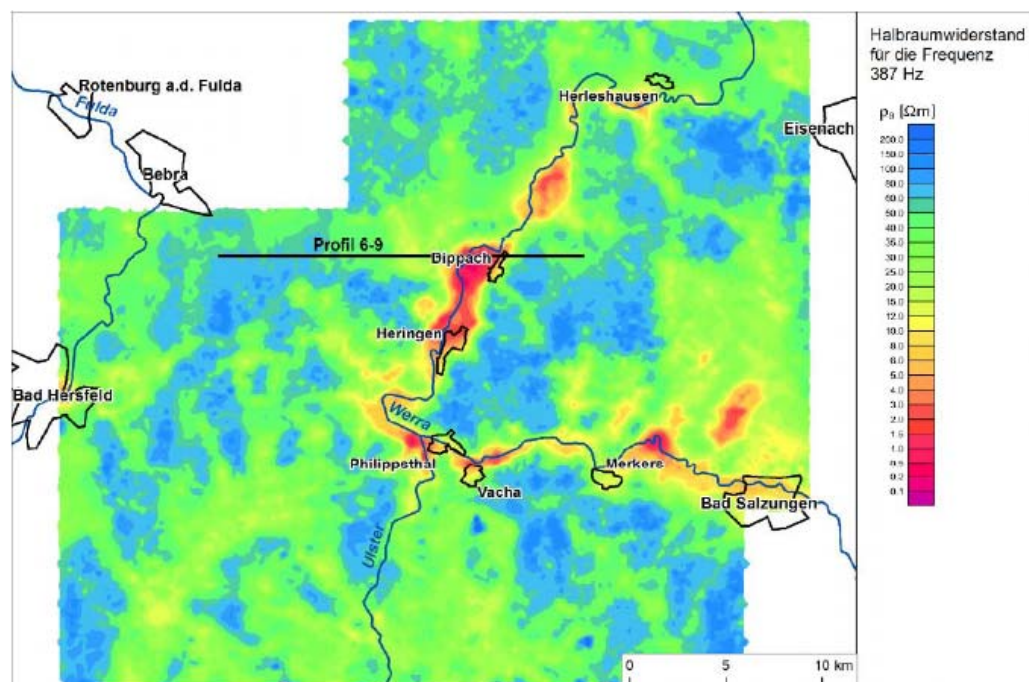
**Abb. 5:** Plattendolomitgrundwasserleiter (2D) und Aufstiegszone aus dem gestörten Plattendolomitgrundwasserleiter (3D) (K+S, 2009)

Eine Eingrenzung des Bewirtschaftungsraums auf Teile des Buntsandsteins, nämlich die Störungzonen im Untergrund der Flussauen und deren näheren Umgebung erlauben die Grundwasseranalysen aus den oberflächennahen Messstellen.

Zusammenfassend können in Bezug auf den Bewirtschaftungsraum folgende Aussagen gemacht werden:

- Der Plattendolomitgrundwasserleiter kann nicht als geschlossener Bewirtschaftungsraum angesehen werden,
- Plattendolomitgrundwasserleiter und „Werratal-Buntsandstein“ wurden bereits jahrzehntelang als „Bewirtschaftungsraum“ de facto betrieben,
- Eine Verbindung über die durchlässigen Bereiche des Buntsandsteingrundwasserleiters mit der Werra war schon vor Salzbergbau und Einleitung gegeben,
- Auch außerhalb der Aufstiegszonen sind Verbindungen des Plattendolomitgrundwasserleiters mit den unteren Bereichen des Buntsandsteins lokal sicherlich vorhanden.





**Abb. 7:** Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit an der Oberfläche (Siemon et al., 2008)

### 3.3. Fluid-Bilanz

Zum besseren Verständnis der hydrogeologischen Situation im Plattendolomit, insbesondere zur Quantifizierung wurde von der K+S AG ein Grundwassermodell erstellt. Der zugehörige Bericht wurde unter der Bezeichnung 'Grundwassermodell Werra 2008' im Juli 2008 präsentiert (Plümacher et al. 2008).

Die hier vorgestellte Diskussion stellt eine erste Plausibilitätsprüfung des Modells dar. Diese ist notwendig, da eine Reihe von weiteren Schlussfolgerungen durch die K+S AG auf diesem Modell basieren.

Das Modellgebiet umfasst den Plattendolomitgrundwasserleiter vom Richelsdorfer Gebirge im Norden, den Ausläufern von Vorder- und Kuppenrhön im Süden, dem Thüringer Wald im Osten und der Hochfläche zur Fulda im Westen.

Das Modell ist instationär, d.h. es berücksichtigt die zeitliche Variabilität (Dynamik des Systems) von Strömung und Stofftransport. Simuliert wurde der gesamte Zeitraum der Versenkung von 1925 bis 2003. Zur Bestimmung des Anfangszustands, der die natürlichen Verhältnisse, d.h. ohne Beeinflussung durch die Versenkung, repräsentiert, wurde ein stationärer Modelllauf vorgeschaltet.

Das Modell wurde mit dem Programmpaket FEFLOW erstellt. FEFLOW (FEFLOW 2010) ist ein etabliertes kommerzielles Software-Produkt, das von der Firma DHI-WASY vertrieben wird. Es ist nach der Methode der Finiten Elemente implementiert. Wie bei Modellierprogrammen üblich, liegt der Strömungsmodellierung eine Differentialgleichung zugrunde, die sich aus dem Darcy-Gesetz sowie dem Prinzip der Massenerhaltung für das Fluid ableitet. Die Transport-Modellierung beruht auf dem Prinzip der Massenerhaltung für die chemische Komponente und dem Dispersionsansatz nach Bear-Scheidegger (Diersch, 1996).

Dichteeffekte, in denen eine Rückwirkung des Transports auf die Strömung zum Tragen kommt, werden im Modell nicht berücksichtigt (was mit dem Programm FEFLOW möglich wäre (Diersch & Kolditz, 1998)). Aufgrund der hohen Salinität der

eingespeisten Wässer spielen Dichteeffekte im betrachteten Gebiet mit Sicherheit eine gewisse Rolle. Es ist allerdings zu erwarten, dass diese in erster Linie den lokalen Bereich an der Front zwischen Fluiden unterschiedlicher Salinität betreffen. Da die Berücksichtigung solcher Effekte allerdings einen erheblichen Mehraufwand an Computerressourcen verlangt, ist der verwendete 2D Ansatz als erste Näherung begründet. Dichteeffekte können hier nur in einem 3D Modell erfasst werden, d.h. durch Berücksichtigung mehrerer Tiefenschichten im Plattendolomit.

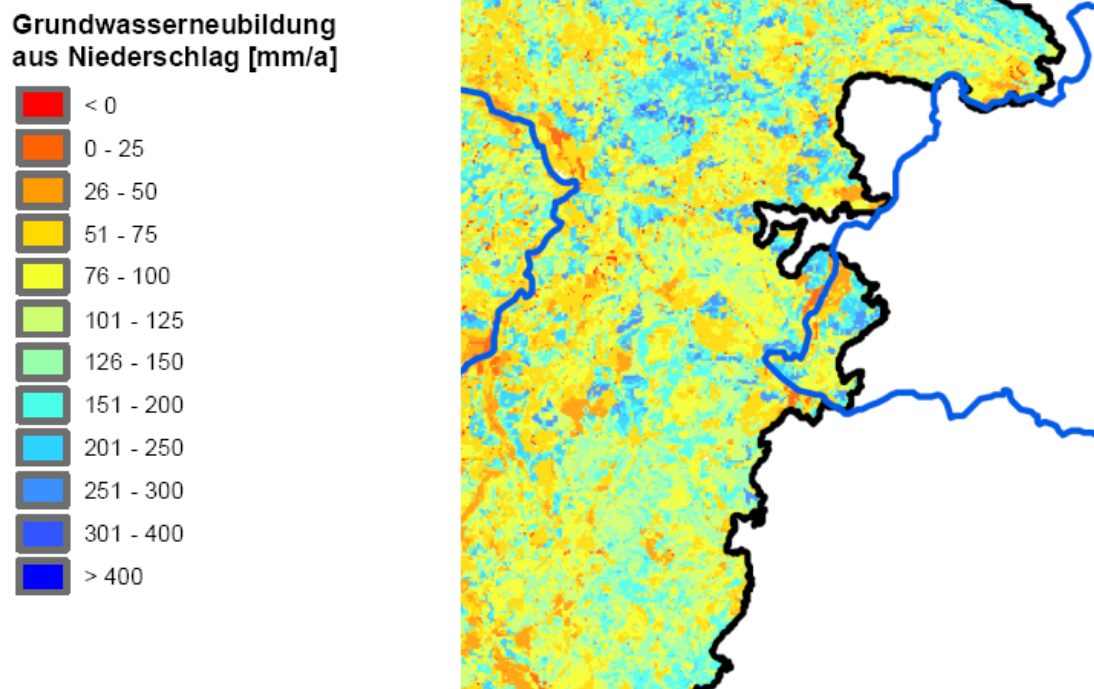
Im Werra Modell wurden als Randbedingung Festpotential-Bedingungen an den Zustromrändern im Norden (Richelsdorfer Gebirge), im Süden (Vorder-/Kuppenrhön) sowie im Osten (Thüringer Wald) angenommen. Im Westen wurde eine Wasserscheide zur Fulda, d.h. eine hydraulische dichte Grenze angenommen. Eine spezielle Randbedingung (3. Art) wurde in einem kleineren Bereich verwendet, an dem der Modellrand mit einem Oberflächengewässer zusammenfällt.

Die Ergebnisse eines Grundwassermodells sind zumeist sehr sensitiv bzgl. der Randbedingungen. Das gilt auch für das vorliegende Modell. Was die Lage der Ränder betrifft, so ist die Position der Wasserscheide zur Fulda als Modellrand im Westen nur unzureichend bekannt, und stellt daher eine Unsicherheit dar. Auch die Ausdehnung des Plattendolomits nach Südwesten ist nicht gesichert. Zudem muss die Übernahme der Festpotentialrandbedingungen vom stationären in das instationäre Modell als problematisch gesehen werden. Es werden dadurch im instationären Modell erhöhte Zustromraten an den Rändern induziert. Die vom Modell an den genannten Rändern ermittelten Einstromraten erscheinen zu hoch, wenn man berücksichtigt, dass hohe Zustromraten jenseits (vom Modellgebiet gesehen) der Ränder ein entsprechend großes Einzugsgebiet mit entsprechenden Neubildungsraten erfordern.

Aus Gründen der Eichung der Flussbilanz wurden in einigen Teilbereichen des Modellgebiets sog. „Leakage Werte“ (vertikale „hydraulische Widerstände“) angesetzt, die nicht auf Messwerten basieren, z.B. im Bereich der Flussaue der Ulster. Dies führt zu erheblichen Abweichungen zwischen modellierten und gemessenen Piezometerhöhen (siehe z.B. Messstelle 702).

Im stationären Grundwassermodell (ohne Versenkung) von Plümacher (2008) wird die Gesamtfuidbilanz mit  $44435 \text{ m}^3/\text{d}$  berechnet, d.h.  $16.2 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ . Diese teilen sich auf die offenen Modellränder in unterschiedlichen Richtungen auf, zuzüglich eines Anteils durch Leakage-Abstrom. Bei einer Grundwasserneubildung von ca.  $150 \text{ mm}$  pro Jahr wäre eine Fläche von  $100 \text{ km}^2$  erforderlich, um diesen Flussterm zu erzeugen. Diese Fläche müsste jenseits (vom Modellgebiet aus gesehen) der offenen Ränder des Grundwassermodells, d.h. im Thüringer Wald, Richelsdorfer Gebirge, sowie Vorder-/Kuppenrhön zur Neubildung zur Verfügung stehen. Eine noch größere Fläche müsste zur Verfügung stehen, wenn die Grundwasserneubildung nicht den genannten hohen Wert von  $150 \text{ mm/a}$  erreicht. Letzteres trifft für die meisten Teilgebiete Hessens zu (siehe Abb. 8).

Nach Angaben der K+S AG betrugen die Versenkraten teilweise mehr als  $20 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ , in den letzten Jahren allerdings nur noch  $5\text{-}7 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  (Plümacher, 2008). Wenn in den kommenden 40 Jahren jährlich  $2.5 \text{ Mio. m}^3$  hartes Salzwasser, wie im NIS – Konzept geplant, verpresst werden, beträgt das Gesamtvolumen des zusätzlich verpressten Salzabwassers weitere  $100 \text{ Mio. m}^3$ ; d.h. etwa 10% des gesamten Plattendolomit-Grundwasserleiters wären von der zukünftigen Einleitung betroffen. Je nach Konfiguration der Galerien der Injektionsbrunnen könnte auch ein Teil der eingeleiteten harten Salzabwasser in die Aufstiegszonen des gestörten Buntsandsteins und damit auch in die Oberflächengewässer abströmen. Die Annahme ist konservativ insofern, als im NIS Konzept vorgesehen ist, bei geeigneten Abflussbedingungen der Werra auch wieder harte Wässer rückzufördern.



**Abb. 8:** Karte der Grundwasserneubildung in Hessen, Ausschnitt (HLUG, 2009, unveröffentlicht)

### 3.4. Chlorid Bilanz

Zur Klärung des Verbleibs der versenkten Salzabwässer wurde von der K+S AG und der HLUG nach unterschiedlichen Ansätzen der historische Austrag von Salzabwässern in die Werra ermittelt. An dieser Stelle sollen die beiden Ansätze, auf Grund der Bedeutung im Zusammenhang mit der Gesamtvolumenbilanz, nachvollzogen und deren Plausibilität geprüft werden.

Nach dem Referenzmodell von Plümacher (2008) (S.41) ergibt sich für den Gesamteintrag von Chlorid in den Plattendolomitgrundwasserleiter über Versenkungen im Zeitraum von 1935-2003 eine Chloridmasse von 155 Mio. t. Dem steht ein Gesamtaustrag aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter an Leakageknöten in Buntsandstein und Vorfluter in Höhe von 93 Mio. t gegenüber. Dies bedeutet eine Speicherung im Plattendolomitgrundwasserleiter im Umfang von 62 Mio. t. Die Werte sind in der 2. Spalte von Tabelle 1 nochmals zusammengestellt. In der 3. Spalte finden sich die Ergebnisse einer Variationsrechnung, wobei hier eine deutlich höhere Porosität des Grundwasserleiters, d.h. 15% anstelle von 8% angenommen wurde. Das HLUG gibt aus eigenen Berechnungen, die auf Abflussbilanzen und Verdünnungsrechnungen beruhen, andere Prozentzahlen an (HLUG, 2008), die in der vierten Spalte angegeben wurden.

Die Zahlenwerte in den beiden mittleren Spalten sind dem zitierten Bericht über das Grundwassermodell Werra entnommen. Vom Modell berechnet wurde dabei der Gesamtaustrag aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter (3. Zeile der Tabelle). Wenn man davon den Wert von 46 Mio. t (Ursprung der Annahme aus unseren Unterlagen nicht nachprüfbar) als Austrag in die Werra subtrahiert, wie es im Modellbericht gemacht wird, verbleibt als Restgröße der Bilanz die Speicherung in den Aufstiegszonen des Buntsandsteins.



**Tabelle 1:** Chloridbilanz, Vergleich verschiedener Quellen

<b>Bilanzterm Chlorid</b>	Plümacher, 2008, Ref.	Plümacher, 2008, Variante	HLUG, 2008
Eintrag [Mio. t]	155	155	
Austrag PT [Mio. t] (%)	93 (60)	83 (54)	(57)
Speicherung PT [Mio. t] (%)	62 (40)	72 (46)	(43)
Speicherung BS [Mio. t] (%)	47 (30)	37 (24)	(37)
Diffuser Austrag Werra [Mio. t] (%)	46 (30)	46 (30)	(20)

Ein Vergleich der von K+S AG ermittelten Schätzung mit internen Ergebnissen des HLUG wurde in einem Vortrag des HLUG im November 2008 erstmals vorgestellt (HLUG, 2008). Die dort angegebenen Prozentzahlen entsprechen denjenigen in den Spalten 2 und 4 der obigen Tabelle. Der Gesamtaustrag aus dem Plattendolomit, als Summe der Speicherung im Buntsandstein und des diffusen Austrags in die Werra, wurde von unserer Seite hinzugefügt.

Es ist zu beachten, dass es sich beim Grundwassermodell Werra um eine Chloridbilanz handelt, während die entsprechende Tabelle des HLUG mit Verbleib der versenkten Salzabwässer überschrieben ist. Um lediglich die Größenordnung der Prozentzahlen abschätzen zu können ist die unterschiedliche chemische Charakterisierung sicherlich nicht entscheidend, da Chlorid als repräsentativer Inhaltsstoff zur Bilanzierung herangezogen werden kann.

Beim Vergleich der Zahlen zeigt sich, dass diese relativ nahe beieinander liegen, wenn man in Betracht zieht, dass in Gesprächen am Runden Tisch in der Vergangenheit teilweise davon ausgegangen wurde, dass lediglich der Plattendolomit, nicht aber der Buntsandsteingrundwasserleiter durch die bisherige Versenkpraxis bewirtschaftet wurde.

Insgesamt ist aber jede Aussage zur Nähe zweier verglichener Zahlen relativ. Ein Unterschied von 10 Prozentpunkten in den diffusen Austrägen (zwischen K+S und HLUG) bedeutet zum Beispiel keineswegs Übereinstimmung. Dies bedeutet 33% Abweichung, wenn der K+S-Wert als Referenzgröße gewählt wird, sogar 50%, wenn der HLUG-Wert als Bezugspunkt gesetzt wird.

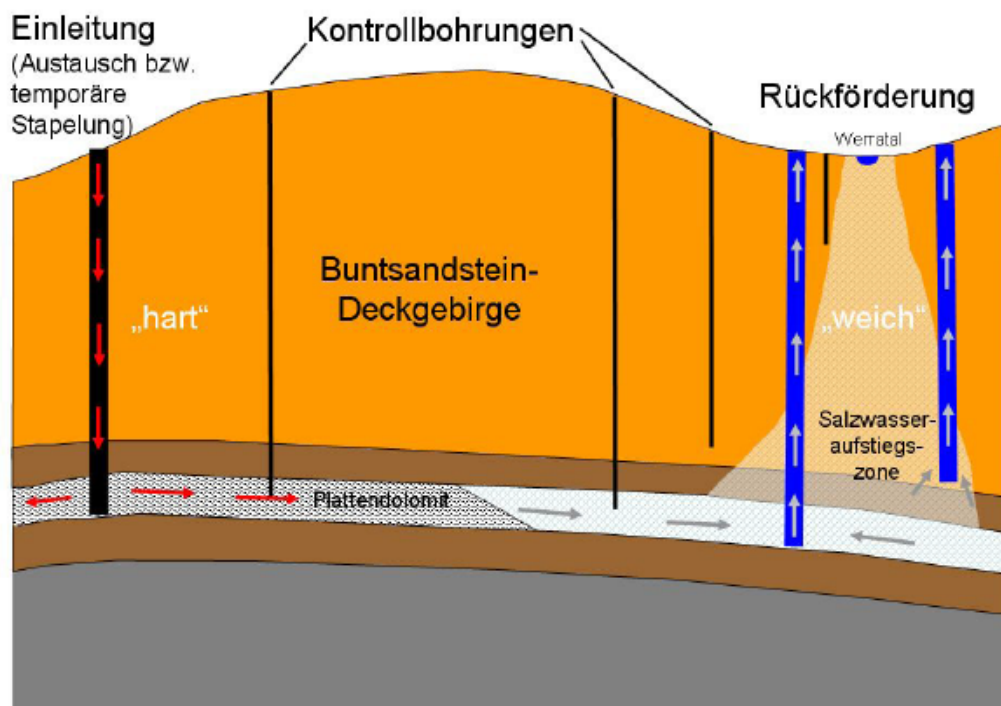
Für den Plattendolomitgrundwasserleiter liegen die HLUG - Werte zwischen den beiden Modellvarianten der K+S AG. Der wesentliche Unterschied zwischen HLUG und K+S besteht in der Abschätzung des „diffusen“ Abstroms in die Werra, woraus sich dann die Unterschiede bzgl. der Speicherung im Buntsandstein als resultierende Größen ergeben.

## 4. Die 'Neue Integrierte Salzabwassersteuerung'(NIS)

### 4.1. Konzept

Im Rahmen der Diskussion um der zukünftige Entsorgung der Salzabwässer im Kalirevier wurde von K+S ein 'Integriertes Maßnahmenkonzept für das hessisch-thüringische Kalirevier' vorgestellt (K+S, 2009). Das Maßnahmenkonzept umfasst u.a. die Herstellung eines länderübergreifenden Salzwasserverbunds und Aufbau einer länderübergreifenden Neuen Integrierten Salzwassersteuerung (NIS). Die NIS beinhaltet als integralen und wesentlichen Bestandteil die Bewirtschaftung des Plattendolomit-Buntsandstein-Grundwasserleitersystems, d.h. im Einzelnen die folgenden Maßnahmen:

- Ausbau der Rückförderkapazität aus dem Untergrund im Werratal,
- Ein Austausch, dem bei kalium- und magnesiumreiche („harte“) Salzabwässer in den Plattendolomitgrundwasserleiter eingeleitet werden und gleichzeitig kalium- und magnesiumarme, dafür natriumreiche („weiche“) Salzabwässer aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter zurückgeführt werden,
- Bewirtschaftung des Untergrundes im Werratal durch temporäre „Stapelung“ von Salzabwasser in Zeiten mit niedrigen Abflüssen in der Werra und Rückförderung und Einleitung dieser Salzabwässer während Zeiten hoher Wasserführung der Werra,
- Ein umfangreiches Grundwassermonitoring.



**Abb. 9:** Prinzipskizze zur Neuen Integrierten Salzwassersteuerung (NIS) (K+S, 2009)

Das Prinzip der NIS ist in Abb. 8 als Vertikalschnitt durch das Plattendolomit-Buntsandstein-Grundwasserleitersystem schematisch dargestellt. Das harte Salzwasser wird über Schluckbrunnen in den Plattendolomitgrundwasserleiter eingeleitet.

Dort verdrängt es das im Plattendolomitgrundwasserleiter vorhandene „weiche“ Wasser. Zur Druckentlastung des Grundwasserleiters werden Rückförderbrunnen, bevorzugt in Vorfluternähe, eingerichtet, in denen weiches Wasser gefördert und in das Oberflächengewässer eingeleitet werden soll.

Dieses Maßnahmenpaket basiert auf der Überlegung, dass bei Einleitung von Salzwasser in die Werra hohe Chloridgehalte, d.h. ein höherer Anteil an „weichem“, natriumdominierten Wassers ein geringeres Problem darstellen als hohe Magnesium- und Kalziumkonzentrationen des harten Wassers (K+S, 2009). Die Konzentrationsgrenzwerte für Magnesium und Calcium in der Werra sind für Niedrigwasserverhältnisse vielfach erreicht und erlauben keine weitere Einleitung von „harten“ Salzabwässern. Wässer mit einem  $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}$  Konzentrationsverhältnis größer als 7 werden als „weich“, solche mit einem Verhältnis kleiner als 7 als „hart“ bezeichnet. Die Einleitung in das Oberflächenwasser erfolgt, grenzwertgesteuert, nach einem festzulegenden Schema, das wesentlich von der Wasserführung der Werra abhängt: Einleitungen erfolgen nur dann, wenn die Salzfracht im Oberwasser aufgrund hoher Wasserführung geringer ist.

Als Nebeneffekt der Maßnahmen der NIS erreicht man eine gewisse Kontrolle des bisher unkontrollierten „diffusen“ Zustroms von Salzabwasser in die Werra. Die Salzfracht, die zur Zeit aus den oberflächennahen Grundwasserleitern in die Werra gelangt, wird reduziert (Näheres dazu unten). Die Salzfracht im Vorfluter reduziert sich dadurch nicht, da im NIS - Konzept die eingeleitete Fracht aus dem geförderten weichen Wassers als neuer Eintragspfad hinzukommt. Der Eintrag kann allerdings durch Ein- bzw. Abschalten der Förderung von weichem Wasser besser kontrolliert werden, da die chemische Zusammensetzung des Wassers bestimmt werden kann.

## **4.2. Methoden**

### **4.2.1. Allgemein**

Das mit der NIS vorgeschlagene Konzept ist nachvollziehbar. Durch die Einleitung von harten Wässern in den Untergrund kann insgesamt ein größerer Teil des Salzabwassers in die Oberflächengewässer eingeleitet werden, ohne die derzeit zulässigen Grenz- bzw. Richtwerte zu überschreiten. Inwieweit zukünftig eine Absenkung der Grenz- und Richtwerte möglich ist hängt von den durch die NIS erreichbaren Volumen- und Frachtverminderungen ab. Diese Potentiale sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht detaillierter bekannt.

Die Oberflächengewässer werden durch die vorgeschlagenen Maßnahmen jedoch nicht entlastet, vielmehr wird die Ausnutzung der durch die Grenzwerte vorgegebenen Maximalkonzentrationen über die Zeit optimiert. Der Plattendolomit als Grundwasserleiter wird in Bezug auf das Gesamtabwasservolumen entlastet, jedoch in Bezug auf „harte“ Salzabwässer stärker belastet.

Die Ziele der NIS sind im Prinzip erreichbar. Die Umsetzung in die Praxis erfordert allerdings ein sorgfältiges und geplantes Vorgehen, bei dem Modellierung und Monitoring eine wichtige Rolle spielen müssen.

Die Heterogenität der relevanten hydraulischen Parameter wird letztendlich bei der Umsetzung entscheidend sein (siehe Abschnitt 3).

Wie das NIS-Konzept im Detail umgesetzt werden kann, wird jedoch im K+S Bericht (K+S, 2009) nicht dargelegt. Im folgenden sollen einige der kritischen Aspekte angesprochen werden.

Abwasserinjektion in geeignete unterirdische Formationen erfolgt in der Regel über Injektions- und Förderbrunnen. Im Allgemeinen wird eine Galerie derartiger Brunnen

den Anforderungen und Gegebenheiten entsprechend angeordnet. Die Anordnung des technischen Systems und die Pumpraten, sowohl der Infiltration wie der Förderung, sind an den lokalen Gegebenheiten auszurichten.

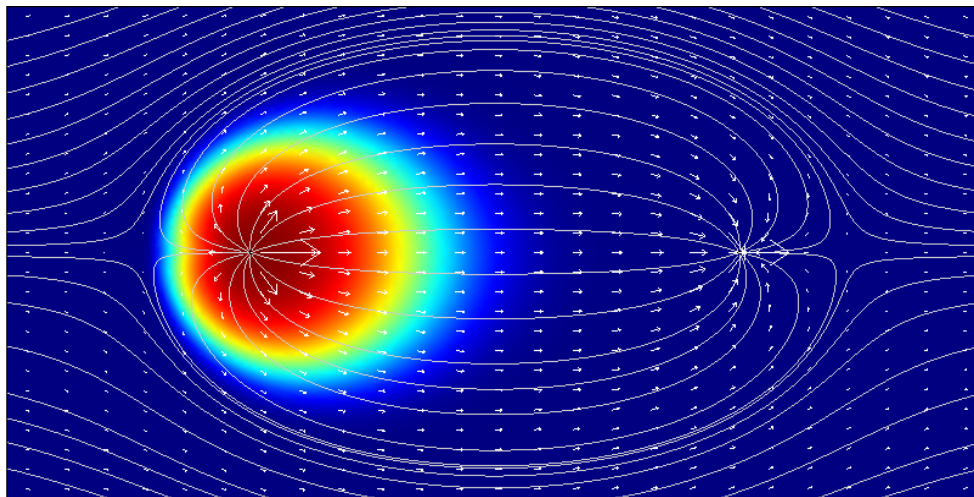
#### 4.2.2. Kontrollmethoden

Das einfachste und gängigste System, das eine gewisse *Kontrolle* des hydraulischen Systems und damit das unkontrollierte Abströmen von Salzwasser in die Oberflächengewässer und für Trinkwasser genutzte Grundwasserleiter minimiert, ist die Brunnendoublette. Die prinzipielle Funktionsweise und einige wesentliche Charakteristika sind in folgendem Kasten zusammengestellt. So spielt beispielsweise die regionale Grundströmung, sowohl von Betrag und Richtung eine Rolle (Weiteres dazu unten, im Kasten: Doublettensysteme).

##### Doublette

Die Doublette ist eine Anordnung von zwei Brunnen, die in vielen geo- bzw. umwelttechnischen Anlagen zu verschiedenen Zwecken eingesetzt wird, z.B. bei der Erdölförderung, bei Sanierungsmassnahmen für Grundwasserleiter und in der Geothermie. Im typischen Fall werden ein Entnahme- und ein Injektionsbrunnen stationär mit konstanter Pumprate betrieben. Dadurch wird eine Strömung induziert, die die beiden Brunnen miteinander hydraulisch verbindet.

Abb. 10 zeigt den Grundwasserleiter, im vorliegenden Fall den Plattendolomit im Horizontalschnitt. In der Abbildung ist die induzierte Strömung durch helle Stromlinien und durch ein Geschwindigkeitsvektorfeld dargestellt: der Injektionsbrunnen befindet sich links, der Pumpbrunnen rechts. Deutlich ist der nahezu elliptische Bereich zu erkennen, der von der in diesem Beispiel von der von links kommenden regionalen Grundströmung umflossen wird.

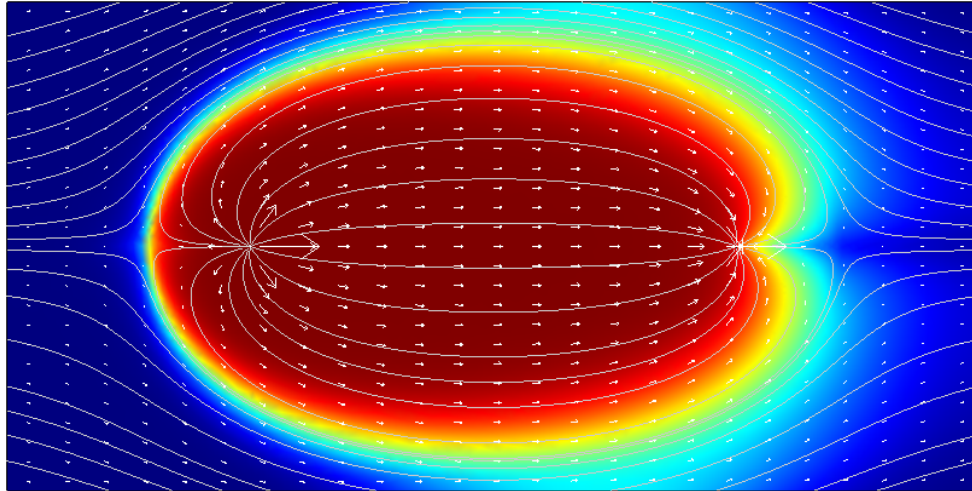


**Abb. 10:** Strömungs- und Transportprozesse in einer typischen Doublette zu einem Betriebszeitpunkt (s. Text)

Die Prozesse des Transports der Wasserinhaltsstoffe im Strömungsfeld sind in Abb. 10 dargestellt. Rot entspricht dem injizierten harten Wasser, das im Infiltrationsbrunnen eingespeist wird. Blau repräsentiert das im Grundwasserleiter vorhandene „weiche“ Wasser. Andere Farben repräsentieren Mischkonzentrationen. Das Bild zeigt eine typische Konzentrationsverteilung im Betriebszustand.

Der Anfangszustand im gesamten Grundwasserleiter ist durch ‚weiche‘ Wässer, charakterisiert. Am Injektionsbrunnen beginnt die Einspeisung des ‚harten‘ Wassers. Zunächst ist davon lediglich die unmittelbare Umgebung des Injektionsbrunnens beeinflusst. Mit längerer Betriebszeit wird der (rote) Bereich mit hartem Wasser ständig wachsen und sich in Richtung Entnahmebrunnen ausdehnen.

Mit der Zeit wird der mit hartem Wasser erfüllte Bereich immer größer, bis sich schließlich die in Abb. 11 dargestellte Situation einstellt. Zu diesem Zeitpunkt wird im Entnahmebrunnen beinahe ausschließlich hartes Wasser gefördert, und die Kapazität der Doublette ist damit erschöpft, d.h. der gesamte, von der Doublette erfasste Bereich ist mit „hartem“ Salzwasser erfüllt. Man erricht dann von einem Durch-

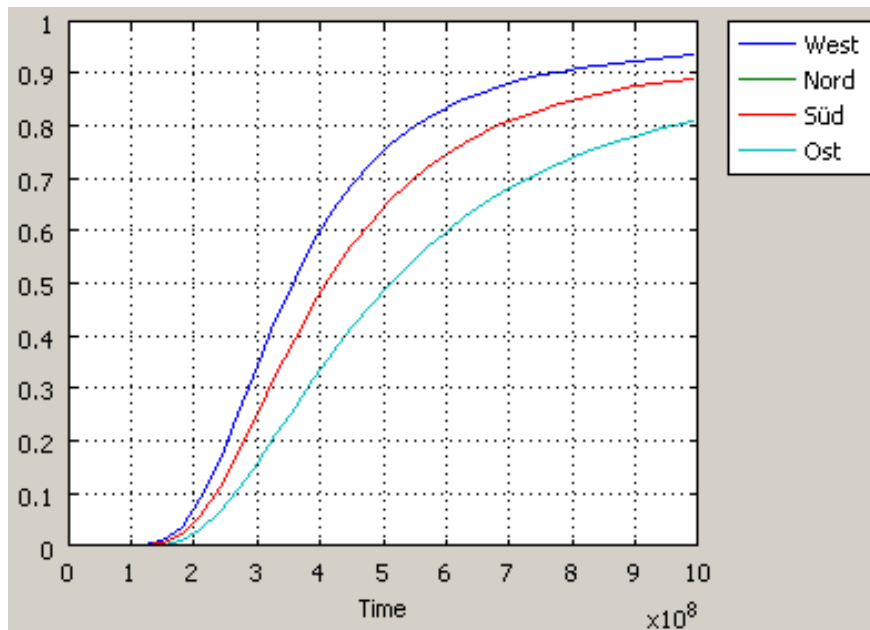


**Abb. 11:** Strömungs- und Transportprozesse in einer ideal-typischen Doublette; Durchbruch (s. Text)

In Abb. 11 ist der Durchbruch der Konzentrationsfront am Förderbrunnen von verschiedenen Seiten dargestellt. Der Durchbruch erfolgt auf der westlichen Seite, im Bild links, zuerst, und auf der, der Infiltration abgewandten, Seite (Ost, rechts) zuletzt. Die Konzentration ,0' auf der Ordinate entspricht der Förderung von weichem Wasser, ,1' entspricht dem Zustand der Förderung ausschließlich hartem Wasser. Die Ankunftszeit an den im rechten Winkel gelegenen Positionen (Nord und Süd) ist in dieser mathematischen Simulation identisch, d.h. die grüne Kurve wird durch die rote komplett überdeckt.

Doubletten haben daher eine „Lebensdauer“, d.h. nach bestimmter Zeit erfolgt der Durchbruch des injizierten Wassers. In diesem Fall muss dann eine neue Doublette installiert werden. Der in Abb. 11 gezeigte Zustand ist jedoch nicht stationär. Die in diesem Fall noch relevanten Transportvorgänge der Diffusion und der transversalen Dispersion haben jedoch eine deutliche langsamere Zeitcharakteristik, so dass sich nach Einstellen des Zirkulationsbetriebs die räumliche Verteilung nur noch wenig und langsam ändert.

Das in Abb. 9. und Abb. 11 gezeigte Strömungsmuster ergibt sich für den Fall, dass der Injektionsbrunnen oberstromig und der Pumpbrunnen unterstromig in der vorhandenen Grundströmung angelegt sind. Der Winkel zwischen Doublettenachse und Grundströmung ist eine wichtige Kenngröße für den Betrieb einer Doublette. Neben der Lage der Doublette ist die Pumprate (in Relation zur Grundströmung) die entscheidende Größe, die die genaue Form des induzierten Strömungsmusters bestimmt (Holzbecher & Sauter 2010).



**Abb. 12:** Durchbruchkurven am Pumpbrunnen, für das von unterschiedlichen Seiten zuströmende Wasser (s. Text)

Die Doublette ist die einfachste Konstellation einer umwelttechnischen Installation im Geobereich. An ihr lässt sich das Funktionsprinzip und die Entwicklung einer Maßnahme am besten studieren. Im realen Fall muss dieses Prinzip den Bedingungen des Standorts entsprechend variiert werden. Es können beispielsweise mehrere Doubletten zeitlich parallel oder versetzt betrieben werden. Auch Kombinationen mit ungleichen Anzahlen von Förder- und Injektionsbrunnen können sich möglicherweise als sinnvoller erweisen, als einfache Doublettensysteme.

Bei der praktischen Umsetzung müssen außerdem berücksichtigt werden, dass das System bzgl. seiner hydraulischen Kennwerte unterbestimmt ist, d.h. erhebliche Unsicherheiten in der Prognose der Ausbreitung der Salzabwässer auf Grund der hohen Variabilität der hydraulischen Eigenschaften im Plattendolomit- und dem Buntsandsteingrundwasserleiter, bestehen. Diese Kennwerte können nur durch aufwendige und teure Erkundungsmaßnahmen, i.d.R. über Aufschlussbohrungen, bestimmt werden. Über die Variation der Mächtigkeit, die in die Transmissivität als hydraulische Charakteristik des gespannten Grundwasserleiters eingeht, liegen belastbare Daten vor (Plümacher 2008).

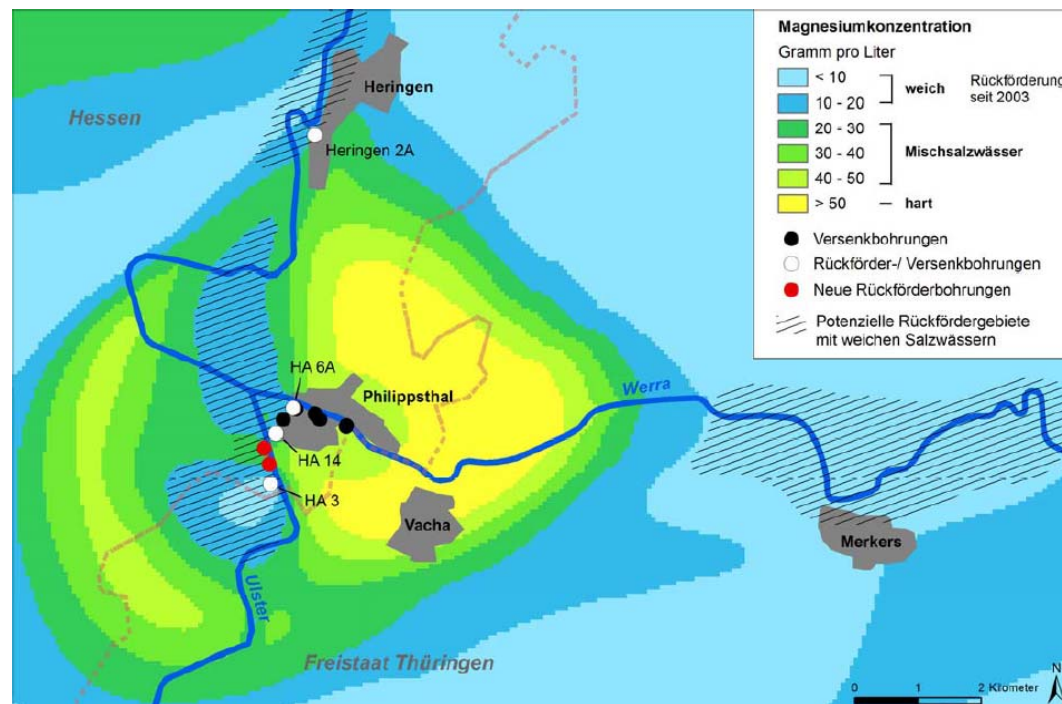
Als weitere Unsicherheit kommt hinzu, dass Wässer aus gewissen Teilbereichen des Aquifers gefördert werden sollen, oder nicht gefördert werden dürfen. In nicht unerheblichen Teilbereichen des Plattendolomits sind harte Wässer bereits vorhanden, wie z.B. in Abb. 12 dargestellt. Dieser Bereich soll bei der Bewirtschaftung durch Injektions- und Förderbrunnen ausgespart werden. Das im Rahmen der NIS zu erstellende Brunnen-System muss so konfiguriert werden, dass möglichst wenig hartes Wasser in den Förderbrunnen wieder entnommen wird. Nicht nur das im Rahmen der NIS eingespeiste Wasser soll möglichst im Untergrund verbleiben,



sondern auch das zuvor schon im Grundwasserleiter historisch versenkte „harte“ Wasser.

Sämtliche der genannten Unsicherheiten gestalten die Umsetzung des NIS-Konzepts in der Praxis bedeutend komplexer, als in Abb. 9 dargestellt.

Kap. 4.3.3 geht im Detail auf die Risiken im Zusammenhang mit der Umsetzung der NIS ein. Dabei spielt insbesondere die Kapazität des Plattendolomits für die Aufnahme von harten Wässern eine sehr wichtige Rolle (Abb. 15).



**Abb. 13:** Verteilung der Magnesiumkonzentration im Bereich des Versenkgebiets Hattorf (K+S, 2009) (S 90)

### 4.3. Spezifische Fragestellungen

Im folgenden soll auf einige spezifische Fragen, die vom Runden Tisch im Zusammenhang mit der NIS an die Autoren gestellt wurden, eingegangen werden.

#### 4.3.1. Was bedeutet NIS für die höheren Grundwasserstockwerke im Buntsandstein unter Berücksichtigung der geogenen Störungszonen?

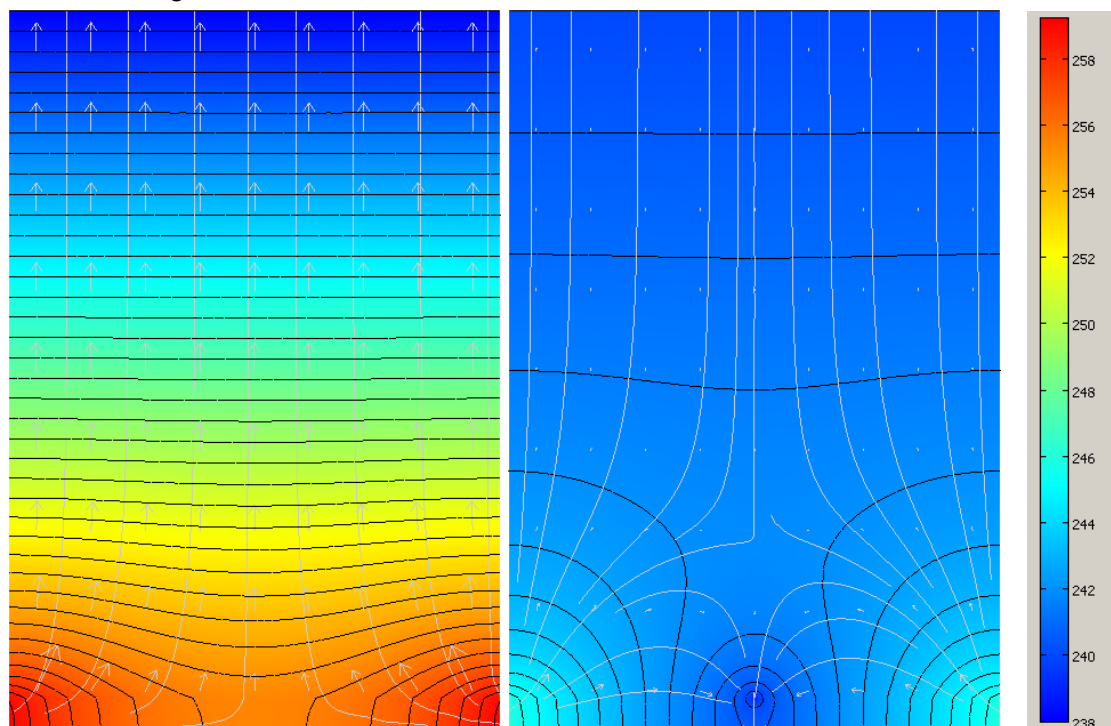
Wenn im Bereich der Flussaue Rückförderbrunnen eingerichtet werden, kommt es im Untergrund im Umfeld der Filterstrecke des Brunnens zu einer Druckentlastung. Es ist zu erwarten, dass sich die relative Druckabnahme, abhängig von der Position des Brunnens und den hydraulischen Kenngrößen, nicht nur innerhalb des Plattendolomits, sondern auch in die Störungszonen innerhalb des Buntsandsteingrundwasserleiters ausbreitet. Der Aufstieg von Salzabwasser aus dem Buntsandstein wird dadurch teilweise reduziert. Das Salzabwasser wird über den Brunnen kontrolliert zur Erdoberfläche gefördert. In der weiteren Umgebung des Förderbrunnens kommt es ferner zu einer Abnahme des hydraulischen Gradienten und damit zu einem reduzierten Salzabwasserstrom.

Das folgende Beispiel veranschaulicht die Änderung der Druck- und Strömungsverhältnisse in der Aufstiegszone des „Werra-Buntsandsteins“ bei Installation eines Förderbrunnens am Übergang zum Plattendolomit. In dieser Beispielrechnung wurde der Brunnen in der Mitte der Störungszone positioniert.

Abb. 13 zeigt die Veränderung der hydraulischen Verhältnisse im Buntsandstein oberhalb des Plattendolomits nach Einrichtung eines Entnahmebrunnens. Im linken Teilbild ist die Piezometerhöhenverteilung in einem Vertikalschnitt zu sehen, die den Zustrom aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter im unteren Teil des Bildes und den Aufstieg des Grundwassers im Plattendolomitgrundwasserleiter bis zur Werra zeigt. Die Verteilung, die Größe und Richtung der Grundwasserströmung bestimmt, wird durch Farbverteilung und Äquipotentiallinien (in Schwarz) dargestellt. Stromlinien sind grau dargestellt, Pfeile zeigen die Fliessrichtung an.

Das zweite Teilbild zeigt die Veränderung nach der Inbetriebnahme eines Förderbrunnens in der Mitte des Modellgebiets am Übergang zwischen Buntsandstein und Plattendolomit. Darstellung von Farbskala, Äquipotentiallinien, Stromlinien und Geschwindigkeiten entsprechen denen der ersten Graphik. Im unteren Teil wird nun ein Großteil des Wassers aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter vom Förderbrunnen erfasst. Dadurch reduzieren sich im oberen oberflächennahen Bereich die Gradienten der Piezometerhöhe, erkennbar durch den größeren Abstand zwischen den Äquipotentiallinien, sowie die Grundwasserfließgeschwindigkeiten.

Am oberen Rand hat der hydraulische Gradient im Referenzfall ohne Entnahme einen Wert von  $\nabla h = 4 \cdot 10^{-2}$ , und reduziert sich in diesem Beispiel durch die Einbindung des Brunnens auf einen Wert von  $\nabla h = 6.6 \cdot 10^{-3}$ . Entsprechend reduziert sich die Geschwindigkeit und damit der relative Volumenstrom der diffusen Einträge in die Oberflächengewässer.



**Abb. 14:** Änderung der hydraulischen Verhältnisse im Buntsandstein bei Rückförderung

Die vorgestellte Modellierung ist lediglich eine Veranschaulichung der zugrundeliegenden Prozesse. Zahlenwerte wurden, soweit möglich, an die gegebenen Verhält-

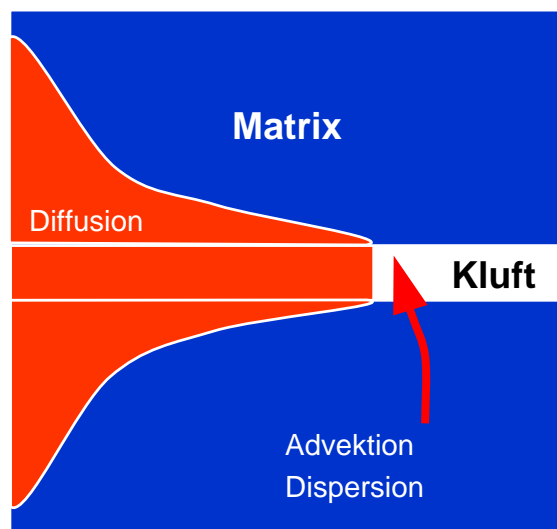


nisse angepasst. Alle Eingabeparameter, die Durchlässigkeiten der geologischen Einheiten, Grundströmung und Förderrate, sowie auch die Längendimensionen lassen sich aber nach dem derzeitigen Stand nur schwer enger eingrenzen. Zudem ist die Vereinfachung der realen 3D-Verhältnisse auf den 2D-Fall nicht ohne Einschränkungen möglich.

Es ist zu erwarten, dass durch die den Untergrund betreffenden Maßnahmen der NIS der Grundwasserleiter in der Buntsandstein-Störungszone entlastet wird. Insgesamt wirken dabei mehrere unterschiedliche Faktoren zusammen:

- die (teilweise) Rückförderung von Salzabwasser aus dem Buntsandstein,
- die reduzierten Einträge aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter in den Buntsandstein,
- die höhere Verdünnung durch unbelastete junge meteorische Wässer in den oberen Lagen des Buntsandsteins.

Der Prozess der Matrixdiffusion dürfte jedoch, neben den rein hydraulischen Prozessen ebenfalls einen Einfluss auf die zeitliche Verteilung der Salzkonzentration der aufsteigenden Wässer haben, d.h. die genannte Erholung damit noch deutlich verzögern.



**Abb. 14:** Prinzipskizze zur Matrix-Diffusion

Einen wesentlichen Einfluss auf den Austrag von Salzwasser, sowohl dessen zeitliche Verteilung als auch die Konzentrationsverteilung dürften die hohe Matrixporosität innerhalb der Buntsandsteinformation, d.h. der Prozess der Matrixdiffusion haben. Ausgehend von einer fast ausschließlichen Kluftströmung innerhalb des Buntsandsteins (Matrixdurchlässigkeit i.d.R. sehr gering) findet ein Massenaustauschprozess zwischen den in den Klüften zirkulierenden Salzlösungen und den geringkonzentrierten Matrixporenwässern statt. Triebkraft ist der hohe Konzentrationsunterschied zwischen gering konzentrierten Matrixwässern und hochkonzentrierten aufsteigenden Wässern in den Buntsandsteinklüften. Die Folge ist eine Abnahme der Salzkonzentration im Kluftwasser. Dieser Prozess ist so lange aktiv bis der Konzentrationsunterschied ausgeglichen ist. Abb. 14 illustriert den beschriebenen Prozess. Sollten zu einem späteren Zeitpunkt geringer konzentrierte Kluftwässer nachströmen, setzt der Prozess der Rückdiffusion ein und bewirkt damit eine Konzentrationserhöhung im Kluftwasser. Der resultierende Effekt der Matrixdiffusion ist damit eine zeitliche und räumliche Dämpfung des Salzwasserdurchbruchs.

#### **4.3.2. Kann erwartet werden, dass bei einem volumenmindernden, aber frachtneutralen Salzlauгенаustausch eine Entlastung des Grundwasserkörpers eintritt?**

Der Plattendolomit als Grundwasserleiter wird bei der Umsetzung der NIS nicht entlastet. Letztlich zielt die NIS darauf ab, das im Grundwasserleiter vorhandene weiche Wasser durch hartes Wasser zu ersetzen und das weiche Wasser, je nach Wasserführung und damit Verdünnungsgrad, in die Werra einzuleiten. Die entsprechenden Bedingungen werden durch die Wasserzusammensetzung und die Konzentration in der Werra bestimmt. Bezogen auf das Grundwasser gelten andere Regelungen und Bestimmungen. Wenn man für das Tiefengrundwasser dieselben Regelungen ansetzen würde wie für das Oberflächenwasser, müsste festgestellt werden, dass der Grundwasserleiter durch die NIS-Maßnahmen stärker belastet wird. Eine solche Aussage greift aber zu kurz, da für die Qualität von Grundwasser und Oberflächenwasser zu Recht unterschiedliche Maßgaben gelten.

Es ist von vorneherein nicht das Ziel der NIS, den Tiefengrundwasserleiter zu entlasten: der Plattendolomitgrundwasserleiter wird bei Umsetzung der NIS nicht entlastet. Für den Buntsandstein im Umfeld des Entnahmebrunnens ist jedoch eine Entlastung zu erwarten (Abb. 13). Was die oberflächennahen Grundwasserleiter oberhalb des Buntsandsteins betrifft, so ist eine massive Beeinträchtigung durch die jahrzehntelange Einspeisung von Salzwasser in den Plattendolomitgrundwasserleiter bisher ausgeblieben.

#### **4.3.3. Limitierungen der Neuen Integrierten Salzabwassersteuerung (NIS)**

Mit den in der NIS zusammengefassten Maßnahmen können, bei geeigneter praktischer Umsetzung, die formulierten Ziele erreicht werden. Allerdings bleibt, wie bei allen technischen Einrichtungen in natürlichen Systemen, eine Restunsicherheit. Eingriffe jeglicher Art in geologischen Systemen sind standortbestimmt. Unsicherheiten über die genauen Verhältnisse am Standort bleiben auch nach intensiven Voruntersuchungen bestehen und können die Wirksamkeit einer geplanten Maßnahme maßgeblich beeinträchtigen. Im folgenden soll auf einige dieser Unsicherheiten im Einzelnen eingegangen werden:

- Parameterunsicherheit: Hydraulische Kennwerte

Die Kennwerte, die das Fließverhalten im Grundwasserleiter bestimmen sind in der Regel nur unzureichend bekannt. Insbesondere handelt es sich um die hydraulische Leitfähigkeit, die Porosität, sowie den Speicherkoeffizienten. Testverfahren, wie Pumpversuche, geben punktuelle Informationen, die aber auch nur für einen gewissen Maßstabsbereich gültig sind. Die Messwertdichte ist in der Regel, auch bei gut untersuchten Systemen, zu klein. Hohe Variabilität und hohe Kontraste der Parameter bedingen eine nie ganz auszuschließende Prognose- und Planungsunsicherheit. Die Injektivität (Aufnahmefähigkeit des Gebirges) bei der Installation eines Schluckbrunnens lässt sich zumeist erst nach der Bohrung mit einer gewissen Sicherheit feststellen.

- Doublettenkonfiguration

Bei einer Doublette, bzw. einem System von Entnahme- und Injektionsbrunnen, ist eine Verbindung nie komplett gegeben. Ein Teil des infiltrierten Wassers wird am Entnahmebrunnen vorbeiströmen. Dies bedeutet zunächst kein Problem, da beim

Durchbruch des infiltrierten harten Wassers die Funktionalität der Doublette nicht mehr weiter gegeben ist, d.h. die Aufnahmefähigkeit erschöpft ist. Es besteht aber ein Problem für den Fall, dass ein größerer Anteil harten Wassers am Entnahmekunnen vorbei in sensitive Bereich gelangt, z.B. in die Aufstiegszonen des Buntsandsteins. Dabei spielen, wie oben gezeigt, neben der Positionierung und dem Ausbau der Bohrlöcher, auch die Pumpraten, sowie die Grundströmung eine Rolle.

- Parameterunsicherheit: Transportparameter

Mit (Massen-) Transport werden all jene Prozesse bezeichnet, die die zeitlich- räumliche Verteilung eines Inhaltsstoffs, also i.d.R. einer chemischen Komponente, bestimmen. Neben dem Strömungsfeld, das oben bereits behandelt wurde, sind das die Prozesse der Advektion, Diffusion und Dispersion. Die zugehörigen Parameter (effektive Porosität, longitudinale und transversale Dispersivität, molekulare Diffusion) sind in der Regel nur mittels einer Testauswertung oder einer inversen Modellierung zu bestimmen. Beide erfordern nicht unerheblichen Messaufwand, um zu einigermaßen gesicherten Ergebnissen zu gelangen. Markierungsversuche, aus denen die effektive Porosität bestimmt werden könnte existieren bis dato nicht. In einem Kluftgrundwasserleiter, wie dem Plattendolomit, ist auf jeden Fall die Matrix-Diffusion zu berücksichtigen. Porosität und Matrixdiffusion bestimmen maßgeblich die zeitliche Dynamik des Transports.

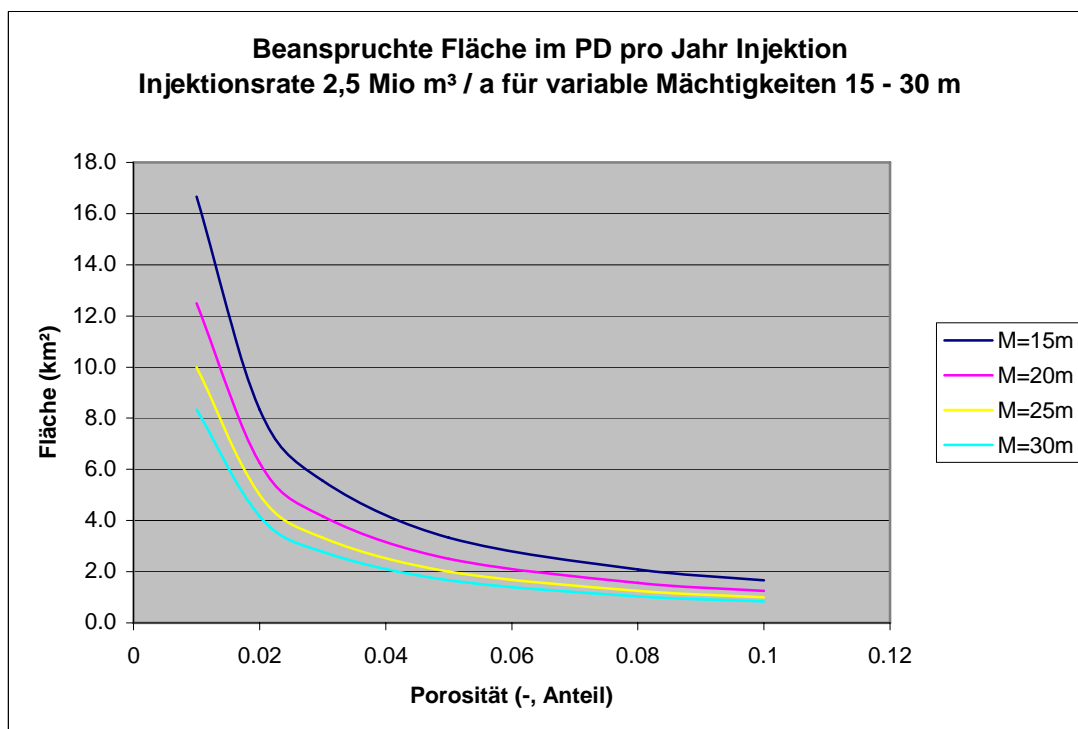
- Milieu- und Parameterunsicherheit: Hydrochemie

Auch die hydrochemischen Verhältnisse im Grundwasserleiter können Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten der harten Wässer haben. Dabei können prinzipiell alle Typen von Reaktionen, chemischen, biochemischen, geochemischen und elektrochemischen, zwischen der Vielzahl der vorhandenen Komponenten im Fluid der Klüfte und der Matrix, sowie im Festgestein selbst, relevant sein. Da das hydrochemische Milieu im Grundwasserleiter nur annähernd bekannt ist, bleibt auch hier eine Restunsicherheit. Auch für hydrochemische Prozesse sind die bestimmenden Parameter im relevanten Maßstab in der Regel nicht bekannt. Üblicherweise besteht eine starke Abhängigkeit der Parameter nicht nur vom umgebenden Milieu, sondern auch von Druck und Temperatur.

- Injektionsfeldgröße

Das Konzept der NIS impliziert, dass im Porenvolumen des Plattendolomits „weiches“ Wasser gegen „hartes“ Wasser durch Pump- und Injektionsmaßnahmen ersetzt wird. Es muss vermieden werden, dass „hartes“ Wasser unkontrolliert in die Werra oder einen anderen Vorfluter abfließt. Zentrale Größe ist dabei das gesamte, speicherfähige, Porenvolumen. Dieses wird maßgeblich bestimmt durch die effektive Porosität des Plattendolomitgrundwasserleiters.

Bei einer mittleren Mächtigkeit in Höhe von 20 m und einer mittleren durchflusswirksamen, effektiven Porosität von 7% und einer Injektionsrate von 2,5 Mio. m<sup>3</sup> / a würden ca. 2 km<sup>2</sup> / a des Plattendolomits für die Speicherung beansprucht werden (bb. 15). Bei einer NIS-Betriebszeit von 50 Jahren würde dies bedeuten, dass ca. 100 km<sup>2</sup> Plattendolomitgrundwasserleiter für die NIS beansprucht würden. Dies setzt voraus, dass die entsprechenden hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten im Plattendolomitgrundwasserleiter vorliegen und der neue Speicherraum nicht schon durch historisch versenkte „harte“ Wässer erfüllt ist. Insbesondere im Bereich der Höhenlagen ist von geringeren hydraulischen Leitfähigkeiten und effektiven Porositäten auszugehen. Ferner liegen nur vereinzelt Tiefenaufschlüsse vor, die den Verbleib historisch verpresster Wässer klären könnten.



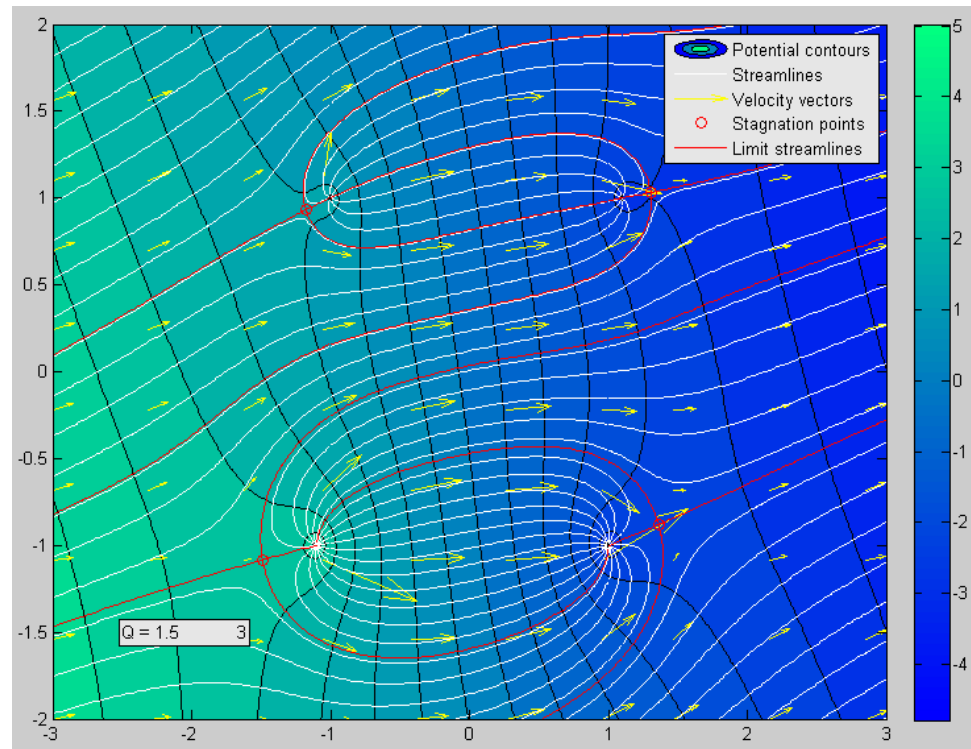
**Abb. 15:** Benötigte Fläche im Plattendolomit, in Abhängigkeit von Mittelwerten der Porosität und Mächtigkeit

Zusammenfassend kann deshalb festgestellt werden, dass erheblicher Erkundungsaufwand betrieben werden muss, um die NIS mit entsprechender Planungssicherheit betreiben zu können. Dieser Erkundungsaufwand besteht hauptsächlich aus einem umfangreichen Bohr- und Testprogramm, das auf Grund der hohen Teufen einen hohen finanziellen Aufwand bedeutet, wobei man damit rechnen muss, dass ein Risiko besteht, dass das Ergebnis dieses Aufwandes negativ sein kann, d.h. ungünstige hydrogeologische Verhältnisse für die weitere Injektion vorliegen.

Sollten günstige hydraulische und hydrogeochemische Bedingungen vorliegen ist für den kontrollierten Betrieb der NIS zu empfehlen, entsprechende Doublettensysteme (oder multiple parallel betriebene Doublettensysteme) vorzusehen. Inwieweit Doublettensysteme kontrolliert betrieben werden können, hängt neben den hydrogeologischen Parametern insbesondere von Größen wie relative Verhältnisse von Förder-/Injektionsraten zum Grundvolumenstrom, Orientierung der Grundströmung zur Ausrichtung der Doublette und der Geometrie der Doublette ab (Abb. und Kas-ten).

### Doubletten- Systeme

Die folgende Abbildung, ein Horizontalschnitt durch einen relativ geringmächtigen Grundwasserleiter, wie z.B. den Plattendolomit, zeigt die Strömung in einem System, bestehend aus zwei Doubletten in einer Grundströmung, deren Richtung nicht exakt mit der Doublettenachse übereinstimmt. Die obere Doublette pumpst mit der halben Entnahmerate der unteren Doublette



**Abb. 16:** Doubletten Strömungsmuster bei einem System von zwei schräg angeströmten Doubletten

In Abb. 16 sind die Isohypsen (Grundwassergleichen) als schwarze Linien dargestellt. Sie repräsentieren die Verteilung der Piezometerhöhe (von der die Grundwasserströmung bestimmt wird), ebenso wie das Farbmuster (grün: hohe Werte, blau: niedrige Werte). Stromlinien sind als helle Linien dargestellt, und das Geschwindigkeitsfeld durch Pfeile. Zwischen den Stromlinien fließt jeweils die gleiche Fluidmenge. Dadurch lassen sich die Geschwindigkeiten ablesen: eng beieinanderliegende Stromlinien weisen auf hohe Geschwindigkeiten, weiter auseinanderliegende auf geringere Geschwindigkeiten hin.

Das Strömungsregime wird durch die Grenzstromlinien angezeigt, die in rot dargestellt sind. Rote Kreise zeigen die Stagnationspunkte. Das Bild zeigt deutlich, dass in der gezeigten Konfiguration ein Teil des infiltrierten Wassers an den Förderbrunnen vorbeifließt, und so den abstromig gelegenen Bereich belastet. Aus der Zahl der Stromlinien ist ersichtlich, dass die Hälfte des infiltrierten Wassers der oberen Doublette am Förderbrunnen vorbeiströmt, während es bei der unteren Doublette etwa ein Drittel ist.

Die relevanten Größen für das Strömungsmuster und die Einzugsgebiete sind:

1. Förderraten;
2. Position von Schluck- und Förderbrunnen;
3. Grundströmung (Stärke und Richtung),

Die Entfernung von Versenk- und Förderbrunnen ist eine entscheidende Größe, die den Zeitraum bis zum Durchbruch der Konzentrationsfront bestimmt. Je weiter die Brunnen auseinanderliegen, desto später erfolgt, unter sonst gleichen Bedingungen der Durchbruch, d.h. desto länger kann die Doublette betrieben werden, und desto mehr hartes Wasser kann eingespeist werden. Bei der in Abb. 16 gezeigten Konfiguration liegen die Brunnen auf relativ engem Raum zusammen und es besteht daher die Gefahr eines schnellen Durchbruchs von hartem Wasser.

#### **4.3.4. Auswirkungen von NIS auf Salzeinträge in die Werra**

Die Frage des Runden Tisches an die Gutachter konzentriert sich im Wesentlichen darauf, wie sich die diffusen Salzausträge aus dem Plattendolomit, über den Buntsandstein in die Werra entwickeln werden.

Die diffusen Salzeinträge in die Werra werden sich voraussichtlich relativ kurzfristig reduzieren, durch:

- Verringerung der Fluidmenge, aufgrund der Umkehrung der Potentialverhältnisse (in Teilbereichen während der Förderung), bzw. Verminderung des Potentialgradienten, im Bereich der Störungszonen,
- die (teilweise) Rückförderung von salinem Fluid aus dem Buntsandstein,
- die reduzierten Einträge aus dem Plattendolomitgrundwasserleiter in den Buntsandsteingrundwasserleiter,
- die höhere Verdünnung durch unbelastete junge meteorische Wässer in den oberen Lagen des Buntsandstein,
- durch direkte Förderung über Brunnen ist ferner die Wasserqualität kontrollierbar, da bei Förderung harten Wassers, dieses gezielt zwischengespeichert werden kann. Die Qualität der „diffus“ zuströmenden Salzabwässer ist nicht kontrollierbar.

Die absolute Salzfracht der Oberflächengewässer wird sich dadurch jedoch nicht verringern. Langfristig wird sich jedoch auf Grund von Matrixdiffusionseffekten ein „Tailing“, d.h. nur langsames Abklingen der Konzentration zeigen

Rechnerisch ergibt sich die Salzfracht aus diffusen Quellen als Produkt aus der dem Oberflächenwasser zuströmender Fluidmenge und der Salzkonzentration. Durch die NIS werden beide Faktoren dieses Produkts betroffen. Die Fluidmenge, die vom hydraulischen Gradienten bestimmt wird, reduziert sich durch die Installation von Förderbrunnen im Untergrund der Flussauen. Die Konzentration reduziert sich durch die stärkere Zumischung von unbelastetem meteorischen Wasser, sowie durch reduzierte Salzeinträge vom Plattendolomitgrundwasserleiter in die Aufstiegsbereiche. Diese Prognose ist abhängig von einer geeigneten Umsetzung des NIS-Konzepts in die Praxis.

#### **4.3.5. Auswirkungen hydrochemischer Prozesse**

Im Zusammenhang mit der Beschreibung des hydrogeochemischen Systems werden die Prozesse der Dolomitisierung und des Ionenaustauschs (Kationen- Anionenaustausch) diskutiert. Obwohl Dolomitisierung, d.h. der teilweise Ersatz von Calciumionen im Calcitkristallgitter, in der geologischen Vergangenheit in umfangreicher Weise stattgefunden haben muss, so wird die Dolomitbildung rezent nicht beobachtet (außer in extrem salinen Sabkha-Umgebungen). Obwohl sich nach vielen thermodynamischen Berechnungen Dolomit als feste Mineralphase bilden sollte, so wurde diese bisher im Labor nicht beobachtet.

Eine Reihe verschiedener Erklärungen werden herangezogen, z.B. die Geometrie des Magnesium-Ions im hydratisierten Zustand, etc.. Dolomitisierung im festen Zustand ist jedenfalls unwahrscheinlich.

Verschiedentlich wurde der Prozess des Kationenaustauschs für die Änderung der chemischen Zusammensetzung von Grundwässern, insbesondere in Salzwassermilieu im küstennahen Bereichen, in die Diskussion eingebracht. Bei diesem Prozess handelt es sich um einen Austausch von Kationen auf negativ geladenen Oberflächen, in geologischen Milieus, z.B. Tone und Tongesteine.

Tone sind Kationentauscher und könnten sich bei günstigen Konzentrationsverhältnissen im injizierten Wasser auf die Wasserhärte positiv auswirken, d.h. Ionen mit höherer Affinität für den Austausch (höhere Ladungsdichte der Kationen), verdrängen Kationen mit geringerer Affinität vom Austauscher. So würden sich z.B. mehrwertige Kationen (Mg, Ca) präferentiell auf dem Austauscher anlagern und damit zu einer Aussüßung des Porenwassers führen. Neben der relativen Affinität der Ionen spielt jedoch auch die relative Konzentration der Kationen im zirkulierenden Wasser eine Rolle.

Es hängt deshalb davon ab, ob der Austauscher im karbonatischen Milieu des Plattendolomits bereits von 2-wertigen Kationen belegt war, oder ob das geogene Formationswasser entsprechend hohe Natriumgehalte aufwies und damit bevorzugt vom Austauscher aufgenommen wurde.

Letztendlich dürften beide Prozesse im vorliegenden Fall quantitativ nur eine untergeordnete Rolle spielen. Tone sind nämlich Grundwassergeringleiter, d.h. die Kontaktfläche zum injizierten Wasser dürfte sehr klein sein, was deren Effektivität für eine Aussüßung reduziert. Insgesamt ist die Kationenaustauschkapazität des Plattendolomitgrundwasserleiters gering (Skowronek, 1999), was die Effektivität für Kationenaustausch weiter reduziert.

Die, im hydraulischen Kontakt mit dem zirkulierenden Wasser befindlichen Karbonate selbst sind vorwiegend Anionentauscher und spielen damit für das Natrium/Magnesiumverhältnis keine Rolle.

#### **4.3.6. Auswirkungen der NIS auf die Standsicherheit der Gruben**

Vom Runden Tisch wurde noch kurzfristig die Frage an die Gutachter gestellt, ob aus bergsicherheitlicher Sicht negative Auswirkungen für die Standsicherheit des Grubengebäudes infolge der Rückförderung ungesättigter Salzlösungen und den damit verbundenen Lösungsprozessen der Salzlagerstätte ausgeschlossen werden können.

Den Gutachtern stand für die Beantwortung dieser Frage nur wenig Zeit zur Verfügung. Zur fundierten Beantwortung sollten ferner noch spezifische Gefährdungsszenarien formuliert werden, die bergbautypisch sind, d.h. die Geometrie des Systems, die Geometrie der Doubletten, relativ zum Bergbau, Position der leicht löslichen Edelsalze, etc.. Die Gutachter sind in diesem Bereich nicht ausgewiesen. An dieser Stelle sollen jedoch einige allgemeine Aussagen zu relevanten Faktoren und deren möglichen Einfluss am Standort zusammengefasst werden.

Bei dem, im Rahmen des NIS, vorgeschlagenen Konzept sollen hochsaline hoch Magnesium führende Salzabwässer, die jedoch noch untersättigt sind bezüglich der vorliegenden Magnesium- und Kalium-Edelsalze, in den Plattendolomitgrundwasserleiter injiziert werden. Es besteht möglicherweise die Befürchtung, dass im Bereich von Störungszonen diese Salzabwässer auf Grund des hohen Injektionsdrucks in das Salzlager eindringen können und dort evtl. unkontrolliert stabilitätsrelevante Pfeiler anlost und damit die Standsicherheit des Grubengebäudes gefährden könnte.

Die vorgesehenen Doubletten sollen ausschließlich im Plattendolomitgrundwasserleiter und als geschlossenes System symmetrisch betrieben werden. Durch asymmetrischen Betrieb können lokal, besonders in Kluffgrundwasserleitern, nicht kontrollierbare Volumenströme entstehen.

Die aufgebauten Injektionsdrucke (2,5 Mio. m<sup>3</sup>/a injiziertes Volumen, im Vergleich zur bis zu 20 Mio. m<sup>3</sup>/a in der Vergangenheit) sind im Vergleich zu den historisch beobachteten jedoch deutlich geringer, was sich direkt auf einen verringerten Volumenstrom und damit auf mögliche Salzausträge aus dem Salzlager auswirkt. Es ist

deshalb im Vergleich zur historischen Versenkung, von einer deutlich geringeren Gefährdung durch den NIS Betrieb auszugehen.

Detailliertere Aussagen sind jedoch nur bei Vorliegen von Informationen zu möglichen Gefährdungsszenarien zu machen.

#### **4.4. Kontrolle der NIS – Monitoring**

Die Maßnahmen der NIS sollen durch ein umfangreiches Monitoring begleitet und überwacht werden. Es sollte ein dichtes räumliches Beobachtungsnetzwerk (Grundwassermessstellen) eingerichtet werden. Die Salzwasserzusammensetzung und der Grundwasserstand muss in engen zeitlichen Intervallen, räumlich verteilt, bestimmt werden. Automatisch aufzeichnende Geräte erlauben die Registrierung von kurzfristig auftretenden Änderungen (z.B. des Druckes) und damit evtl. wichtige Zusammenhänge zwischen Injektionsdruckänderungen und hydraulischer Reaktion des Gesamtsystems. Die hydraulischen Reaktionen reichen in gespannten Grundwasserleitern sehr weit, da die hydraulischen Diffusivitäten ( $T/S$ ) hoch sind. Sie liefern damit Informationen über regionale hydraulische Verbindungen. Die hydraulischen Verbindungen decken sich jedoch nicht notwendigerweise mit Transportverbindungen, d.h. geben nicht notwendigerweise die Fließbewegungen des injizierten Salzwassers wider. Letztere können nur über natürliche oder künstlich eingesetzte Markierungsstoffe bestimmt werden.

Insbesondere sollte auch die Messung der vertikalen Änderung des hydraulischen Potentials durch z.B. dedizierte Messstellen vorgesehen werden, um so die Vertikalströmungskomponente, z.B. in den Buntsandsteingrundwasserleiter, abschätzen zu können.

Die Messungen dienen der Kontrolle der NIS. Änderungen der Piezometerhöhe geben Anhaltspunkte über Strömungsrichtung und Volumenströme im Grundwasserleiter. Die Änderungen der Zusammensetzung des Wassers sind von besonderem Interesse für die Überwachung und die Abschätzung der Betriebsdauer einer spezifischen Doublette. An dieser Stelle ist zu beachten, dass die Salinität (gemessen in der Regel als elektrische Leitfähigkeit), kein geeigneter Indikator zur Unterscheidung zwischen hartem und weichem Wasser ist. Hier muss die Magnesiumkonzentration selbst bestimmt werden.

Es ist erforderlich, dass an allen Brunnenstandorten Daten zur Quantität und Qualität sowohl des versenkten (harten), sowie des gepumpten (weichen) Wassers kontinuierlich erhoben werden. Auch an weiteren Beobachtungspunkten sollten regelmäßig sowohl Piezometerhöhen als auch Salinität und Hauptkomponenten der chemischen Zusammensetzung gemessen werden. Hier kann gegebenenfalls ein längerer Mess-Turnus angesetzt werden, als für die Brunnenstandorte.

Die maximale Betriebsdauer einer Doublette kann abgeschätzt werden, wenn oberstromig im Doubletten-Einzugsgebiet (Vorfeldbrunnen) die tatsächliche Ankunftszeit der Front harten Wassers zu einem frühen Zeitpunkt, d.h. vor dem Durchbruch an der Entnahmebohrung, registriert wird. Die Eingabe spezifischer Markierungsstoffe in die Injektionsbohrung und die Messung in den umgebenden Entnahmebohrungen könnte von großem Vorteil als Frühwarnsystem für die Ankunft des harten Wassers sein und wertvolle Abschätzungen der Reservoirgeometrie und des effektiven Porenvolumens liefern.

Begleitend zu den Monitoringmaßnahmen ist die Erstellung eines mathematischen Strömungs- und Stofftransportmodells erforderlich, das zunächst anhand der historischen Daten kalibriert wird. Dieses Modell ist notwendig zur Beschreibung und Quantifizierung des hydraulischen Verhaltens der Doubletten im natürlichen Grundwassersystem und unterstützt bei der Prognose der Entwicklung des Gesamtsys-



tems. Dieses Modell wird durch die Einbindung kontinuierlich erhobener neuer Daten in seiner Aussagefähigkeit verbessert und unterstützt bei der Planung weiterer Überwachungsmaßnahmen.

Bei der Planung von Überwachungsmaßnahmen in Kluftgrundwasserleitern ist besonders zu beachten, dass die gewonnenen Messdaten meist nur für die Matrix des Grundwasserleiters repräsentativ sind. Das Fließverhalten in Kluftgrundwasserleitern wird jedoch entscheidend durch die Eigenschaften des Kluftsystems bestimmt. Wegen des geringen durchflusswirksamen Porenvolumens des Kluftnetzes wird jedoch statistisch eher die Matrix und nicht das Kluftsystem mit der Bohrung ange-troffen.

## 5. Beurteilung

Es kann festgestellt werden, dass die NIS ein Konzept ist, mit dem prinzipiell die Salzabwasserversenkung auf reduziertem Niveau, d.h. geringeren Versenkraten, kontrolliert weiterbetrieben werden könnte.

Wie alle technischen Installationen in Geosystemen ist auch die NIS und deren mögliche Umsetzung mit hohen Unsicherheiten behaftet. Dies liegt vor allem in der hohen Variabilität der Kenngrößen der Grundwasserleiter begründet. Bedingt durch die geringe Zahl an Aufschlüssen (Grundwassermessstellen) ist das System unterbestimmt, d.h. eine Prognose der Strömung und des Transports des Salzabwassers ist mit großen Fehlern behaftet (Erkundungsproblem). Besonders in den Höhenlagen, wo mit geringen hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten im Plattendolomitgrundwasserleiter zu rechnen ist, liegt nur eine geringe Zahl von Bohrungen vor. Diese Unsicherheiten in der Planung beinhalten entsprechende Risiken.

Aus diesem Grund schlagen wir vor, die NIS zunächst kleinräumig als Pilotphase zu betreiben. Insbesondere würde während der nächsten 4 bis 5 Jahre die Systembeanspruchung auf Grund der noch deutlich höheren Injektionsraten größer sein als die langfristig geplante und damit auch Rückschlüsse für extremere Betriebszustände ermöglichen. Diese Testphase würde ferner Rückschlüsse über die langfristige Machbarkeit des Konzepts erlauben.

Die genannten Risiken bestehen darin, dass

- keine geeigneten Standorte gefunden werden (geringe Durchlässigkeiten, Porositäten des Plattendolomits; Grundwasserleiter bereits von „hartem“ Salzabwasser erfüllt),
- möglicherweise ein schneller Durchbruch „harten“ Wassers an der Entnahmehochbohrung erfolgt (hydraulische Kurzschlüsse und hohe Kontraste in den hydraulischen Parametern in Kluft- und Karstgrundwasserleitern),
- kein „Plan B“ existiert für den Fall eines Scheiterns des NIS-Konzepts (außer der Reduktion der Kali-Produktion),
- hohe Zeitverluste die Folge wären, sollte im Falle eines Scheiterns des NIS-Konzepts verspätet mit der Planung und dem Bau der Salzabwasserleitung begonnen werden.

Das existierende Grundwassermodell sollte erweitert und verbessert werden. Szenarien der NIS-Umsetzung mit Brunnenstandorten und erwarteten Pumpraten sollten am Modell durchgerechnet werden, um die Funktionalität und die Lebensdauer von Einzel-Doubletten und komplexeren Pumpsystemen abschätzen zu können.

Während der Pilottestphase sollten parallel und miteinander verzahnt, die folgenden Aufgaben bearbeitet werden:

- Planung verschiedener Szenarien mit diversen Varianten von Doublettenkonfigurationen zur Umsetzung der NIS
- mathematische Modellierung der Szenarien mit und ohne Doublettenbetrieb, geplanten und/oder bereits realisierten
- Erweiterte Messkampagne durch zeitlich und räumlich hochaufgelöstes Monitoring der Piezometerhöhen und Wasserzusammensetzung

Umgekehrt soll den Planern durch die Modellierung Informationen zur Bewertung und damit auch zur möglichen Korrektur und Verbesserung der Planung zur Verfügung stellen. Erweiterte Messkampagnen stellen den Modellierern Daten zur besseren Kalibrierung und Validierung der Modelle zur Verfügung. Modellvariationen zur

Parametersensitivität geben andererseits Hinweise, welche Daten überhaupt entscheidend sind, gemessen zu werden.

Ziel der Pilotphase wäre die geeignete Wahl von Versenkstandorten, Rückförderstandorten, sowie von Pumpraten für den gesamten Zeitraum der NIS. Insbesondere sollte diese Phase der Prüfung der Umsetzbarkeit der NIS-Ziele in der Praxis dienen. Wie oben schon erläutert, ist bei Systemen des geplanten Typs der Abstand zwischen Injektions- und Förderbrunnen eine wichtige Größe, die u.a. die Betriebszeit bis zum Durchbruch beeinflusst. Andererseits gibt es, gerade in Kluft- und Karstgrundwasserleitern, Einschränkungen. Die Injektivität des Grundwasserleiters kann zu gering sein. Das ist im betrachteten Gebiet möglicherweise in Teilen des Plattendolomits, besonders unterhalb der Hochflächen außerhalb des Werratales, der Fall. Die Durchlässigkeit, bzw. Transmissivität als Produkt aus hydraulischer Durchlässigkeit und Aquifermächtigkeit ist dort in Teilbereichen möglicherweise zu gering, um als Standort für Injektionen im geplanten Ausmaß in Frage zu kommen.

Ein weiteres Problem ist die Konnektivität des Kluftsystems. So ist es durchaus wahrscheinlich, dass zwei Brunnenpositionen im Grundwasserleiter nicht hydraulisch verbunden sind. Dieses System wäre dann als Doublette nicht zu betreiben. Diese Gefahr ist bei großer Entfernung zwischen Injektions- und Entnahmebrunnen höher, als bei kurzen Distanzen.

Bei der Modellierung sind die Prozesse der Strömung und des Transports zu berücksichtigen. Damit ist es nicht nur möglich, den Durchbruch des infiltrierten Wassers zu berechnen, sondern gegebenenfalls auch den Durchbruch des zur Zeit schon im Plattendolomitgrundwasserleiter vorhandenen magnesiumhaltigen Wassers. Ein Durchbruch letzteren Typs begrenzt die Laufzeit der spezifischen Doublette. Wie oben bereits erwähnt, sind beträchtliche Volumina des Plattendolomits bereits mit harten Salzabwässern erfüllt, so dass mit einem Durchbruch historisch verpresster Salzabwässer ebenfalls zu rechnen ist. Während der Pilotphase sollte die Prognosefähigkeit der Modellwerkzeuge getestet werden. Das Monitoring, sowie ergänzende Messungen und Feldversuche dienen zunächst der Modelleichung. Es sollten darüber hinaus Modellläufe zur Modellvalidierung durchgeführt werden. Nach einer ersten Erstellungs- und Kalibrierphase müssen Prognoserechnungen durchgeführt werden und zwar in einer Form, dass ihr Zu- oder Nichtzutreffen durch Beobachtungen an den Monitoringstandorten überprüft werden können.

## Literatur

- Siemon, B., et al. (2008): Technischer Bericht zur Befliegung Heringen (Werra), Mai – Juli 2008
- Clark, J.E., Bonura, D.K., & R.F. Voorhees (2005): An overview of injection well history in the united States of America. In: Tsang, C.-F. & J.A. Apps, 2005, Underground Injection – Science and Technology. Developments in Water Science Bd 52, Elsevier
- Deubel, F. (1954): Zur Frage der unterirdischen Abwässerversenkung in der Kaliindustrie. – Abh. deut. Akad. Wiss., Math.-Nat. Kl., Jg. 1954, H. 3, Berlin.
- Diersch, H.-J. (1996): FEFLOW - Physikalische Modellgrundlagen, WASY GmbH, Berlin
- Diersch H.-J. & Kolditz O., (1998): Coupled groundwater flow and transport: 1. verification of variable density flow and transport models, Adv. In Water Res., Vol. 21, 27-46
- Dyer, J.A., N.C. Scrivner, B.C. Fritzler, D.L. Sparks, S.J. Sanders & P. Trivedi (2005): Predicting Trace Metal Fate in Aqueous Systems using a coupled Equilibrium-Surface-Complexation Dynamic Simulation Model. In: Tsang, C.-F. & J.A. Apps, 2005, Underground Injection – Science and Technology. Developments in Water Science Bd 52, Elsevier
- FEFLOW (2010): Danish Hydraulics Institute, DHI / WASY ('<http://www.feflow.info/>')
- Hecht, G. (2000): Zur Entwicklung der Salzwässerversenkung im Werra-Kaligebiet. Geowiss. Mitt. von Thüringen, Beiheft 9, 125-138.
- Holzbecher E. & Sauter M. (2010): The Wells-Simulator, Geo-Shanghai 2010, Shanghai (China)
- HLUG (2008): Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Abt. Wasser, Grundzüge der Salzabwässerversenkung, Vortrag November
- K+S (2009): Integriertes Maßnahmenkonzept für das hessisch-thüringische Kalirevier, November
- Käbel, H. (1984): Hydrogeologie und Kaliabwässerversenkung im Werra-Kaligebiet der DDR, Bericht Nr. 62/83, ZGI, Berlin, unveröffentlicht.
- Plümacher, J., Beer, W. W., Kluge, S. & Becker, F. (2008): Hydrogeologische Ausarbeitung zur Buntsandsteinbeeinflussung im Werra-Kaligebiet. – K+S KALI GmbH und K+S Aktiengesellschaft.
- Möller, H. (1985): Petrographie und Fazies des Plattendolomits (Leine-Karbonat, Ca<sub>3</sub>) im hessischen Zechstein Becke, Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten, 20, Sept.
- Park, E., Elfeki, A. & Dekking, M. (2005): Characterisation of subsurface heterogeneity: Integration of soft and hard information using multidimensional coupled Markov Chain approach. In: Tsang, C.-F. & J.A. Apps, 2005, Underground Injection – Science and Technology. Developments in Water Science Bd 52, Elsevier
- Plümacher, J. (2008): Grundwassermodell Werra 2008, K+S, Kassel
- Rish, W. R. (2005): A probabilistic risk assessment of Class I hazardous waste injection wells. In: Tsang, C.-F. & Apps, J.A. (2005), Underground Injection – Science and Technology. Developments in Water Science Bd 52, Elsevier
- Skowronek F., Fritsche, J.-G., Aragon, U. & Rambow, D. (1999): Die Versenkung und Ausbreitung von Salzabwasser im Untergrund des Werra Kaligebietes, Geologische Abhandlungen Hessen, Bd 105. 83 Seiten, 23 Abb., 12 Tab., Wiesbaden.

Koordinierungsausschuß Salzabwasser Hessen/Thüringen (1994): Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra, Sonderbericht

Tsang, C.-F. & Apps, J.A. (eds.) (2005): Underground Injection – Science and Technology. Developments in Water Science Bd 52, Elsevier