

Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen
rheinnahen Grundwasserleiters
zwischen Fessenheim und Breisach

Reconnaissance transfrontalière
de l'aquifère profond dans la bande rhénane
entre Fessenheim et Breisach

Endbericht
Rapport final

1999/2001

Vorwort

Das Grundwasser in den quartären Kiesen und Sanden des Oberrheingrabens südlich des Kaiserstuhls ist Teil eines der bedeutendsten Grundwasservorkommen Europas. Es ist für die Sicherstellung der Wasserversorgung der Region beiderseits des Rheins von großer Bedeutung. Diese wertvolle Ressource ist neben der gebietsweise im Oberrheingraben vorhandenen diffusen Belastung des Grundwassers durch Nitrat und Pflanzenschutzmittel einer besonderen Gefährdung durch Chlorid ausgesetzt, die stark im Blickpunkt des regionalen öffentlichen Interesses steht.

In Folge des langjährigen, inzwischen stellenweise nahezu abgeschlossenen, Salzaustrages aus den Absetzbecken und Abraumhalden der deutschen und französischen Kaliindustrie weist das Grundwasser insbesondere in größeren Tiefen in Rheinnahe im Bereich Fessenheim-Hartheim stark erhöhte Chloridkonzentrationen auf. Dies kann Auswirkungen auf wasserwirtschaftliche Maßnahmen sowie den Rohstoffabbau haben und insbesondere zu einer Gefährdung der öffentlichen Wasserversorgung führen. Angesichts des Gefährdungspotenzials besteht die Notwendigkeit, die Chloridbelastung im derzeitigen Zustand zu erfassen, um die Ausdehnung und Verlagerung der Belastung prognostizieren zu können.

Das Projekt "Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters' zwischen Fessenheim und Breisach" wurde auf Anregung des Regierungspräsidiums Freiburg zusammen mit sieben mitfinanzierenden Partnern durchgeführt. Das im Rahmen der Gemeinschaftsinitiative INTERREG II kofinanzierte Projekt ist ein Folgeprojekt des grenzüberschreitenden Projekts "Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben", das 1996 von der Region Alsace initiiert und von der Expertengruppe "Wasserressourcen der Oberrheinkonferenz" geleitet wurde. Die bestehenden guten ländereübergreifenden Kontakte haben sich erneut bewahrt und wesentlich zum Gelingen des Projekts beigetragen.

Das hier präsentierte Erkundungsprojekt in einem besonders belasteten Gebiet des Rheinaquifers, das ebenfalls von der Expertengruppe "Wasserressourcen" begleitet wurde, stellt eine konsequente Fortführung der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit zur Erkundung und Modellierung des Grundwassers in

Avant-propos

La nappe phréatique des alluvions quaternaires du Fossé rhénan supérieur au Sud du Kaiserstuhl fait partie de l'une des ressources en eaux souterraines les plus importantes d'Europe. Elle est d'une importance majeure pour l'alimentation en eau potable sur les deux rives du Rhin. Cette précieuse ressource est très exposée aux pollutions diffuses en nitrates et en produits phytosanitaires, fréquentes dans la vallée du Rhin supérieur. Elle est toutefois également affectée par une pollution en chlorures dont l'existence constitue une très forte problématique au niveau régional.

En effet les eaux de la nappe phréatique présentent localement des teneurs en chlorures très élevées dans l'aquifère profond de la bande rhénane dans le secteur de Fessenheim-Hartheim, en raison notamment des importantes infiltrations d'eau salée qui ont eu lieu, dans le passé, au niveau des bassins-tampers et des terrils des industries française et allemande d'exploitation de la potasse. Cette salure profonde de la nappe rhénane, qui doit être prise en compte désormais dans les projets d'aménagement hydraulique ou d'exploitation de graviers, constitue surtout un risque important pour l'alimentation publique en eau potable. Il est donc nécessaire de dresser un état des lieux afin de connaître l'ampleur de la contamination et d'en prévoir l'évolution.

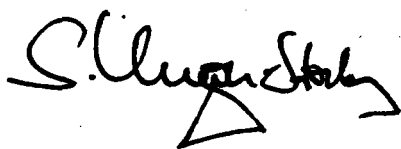
L'opération de "Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach" a été montée à l'initiative du Régions-présidium de Freiburg en collaboration avec sept partenaires financiers. Cofinancée dans le cadre du programme communautaire INTERREG II, elle fait suite aux résultats de l'action transfrontalière d'"Inventaire de la qualité des eaux souterraines de la vallée du Rhin supérieur" engagée en 1996 par la Région Alsace et pilotée par le Groupe d'experts "Ressources en eau" de la Conférence du Rhin Supérieur. Les excellents contacts transfrontaliers qui existaient jusqu'à présent ont à nouveau fait leurs preuves et ont grandement contribué à la réussite du projet.

La présente opération de reconnaissance profonde de l'aquifère rhénan sur un secteur particulièrement menacé, également pilotée par le groupe d'experts "Ressources en eau", s'inscrit dans le droit fil des travaux de coopération transfrontalière sur la connaissance et la modélisation de la nappe de la vallée du

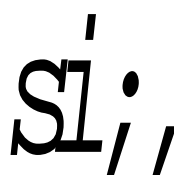
der Oberrheinebene dar, wie sie vom Deutsch-Französischen Umweltrat als vordringliche Zielrichtung empfohlen und schon im Rahmen der Gemeinschaftsinitiativen INTERREG und LIFE begonnen wurde. Eine grenzüberschreitende Zusammenarbeit ist deshalb Voraussetzung für einen nachhaltigen Grundwasserschutz, weil an der Oberfläche auf den ersten Blick sichtbare Grenzen, wie der Rhein, für das tiefe Grundwasser kein Hindernis sind.

Der vorliegende Abschlussbericht liefert wichtige Grundlagen für die Beurteilung der Ausbreitung chloridhaltiger Grundwasser in der Region am südlichen Oberrhein. Mit den neu erarbeiteten hydrogeologischen Erkenntnissen konnte ein detailliertes grenzüberschreitendes Grundwasserstromungs- und Transportmodell für das Untersuchungsgebiet erstellt werden. Dieses Modell gilt es fortzuschreiben, um auf der Basis von Prognoseberechnungen zur zukünftigen Verlagerung der Chloridfahnen im Grundwasser eine bessere Gefährdungsabschätzung und Grundwasserbewirtschaftung durchführen zu können.

Wir danken allen am Projekt Beteiligten. Die erarbeiteten Karten und Modellgrundlagen liefern einen wichtigen Baustein für die Entwicklung von Strategien für wasserwirtschaftliche Maßnahmen zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Grundwassers in unserer Region am südlichen Oberrhein.



Land Baden-Württemberg
Dr. Sven von Ungern-Sternberg
Regierungspräsident



Région Alsace
Adrien Zeller
Président du Conseil Régional

Rhin supérieur déjà réalisés dans le cadre des programmes communautaires INTERREG et LIFE, tels que recommandés par le Conseil franco-allemand de l'environnement. Une gestion durable des eaux souterraines de la vallée du Rhin n'a de sens que si elle est fondée sur une collaboration dépassant les frontières, car des limites comme le Rhin, bien que très visibles en surface, ne constituent pas d'obstacle pour l'écoulement des eaux souterraines profondes.

Le présent rapport final fournit les données indispensables à l'état des lieux de la saturation et à la prévision de sa propagation dans les eaux souterraines profondes au Sud du Fossé rhénan supérieur. Grâce aux nouvelles données hydrogéologiques ainsi acquises, un modèle hydrodynamique très détaillé a été élaboré afin de permettre la simulation des transports de chlorures dans le secteur d'étude. Il reste à affiner ce modèle pour mieux évaluer les risques et établir un programme de gestion des eaux souterraines dans ce secteur particulier, sur la base des résultats des simulations qui seront effectuées.

Nous remercions tous les acteurs du projet. Les documents cartographiques et les données de modélisation produits dans le cadre de cette action constitueront une base indispensable pour le développement de stratégies d'actions pour la protection et la gestion des eaux souterraines dans notre région, au Sud du Fossé rhénan supérieur.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	
Zusammenfassung	
1. Einleitung	15
1.1 Veranlassung	15
1.2 Untersuchungsgebiet	16
1.3 Fragestellungen und Zielsetzungen	18
1.4 Durchgeführte Untersuchungen	19

2. Geologie und hydrogeologische Verhältnisse

2.1 Geologischer Überblick	23
2.2 Geologisch-hydrogeologischer Kenntnisstand zu Projektbeginn	25
2.3 Ergebnisse der geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen in den neuen Bohrungen Hartheim und Nambenheim	28
2.3.1 Lage der Bohrungen	28
2.3.2 Geologische Untersuchungsergebnisse	31
2.3.3 Schichtbeschreibung und Ergebnisse der Schwermineralogischen Untersuchungsergebnisse	31
2.3.4 Hydrogeologische Untersuchungsergebnisse	35
2.4 Geologisch-hydrogeologischer Bau des Untersuchungsgebietes	52
2.4.1 Gliederung der Lockergesteinsfüllung im Untersuchungsgebiet	53
2.4.2 Beschreibung der geologisch-hydrogeologischen Einheiten	55
2.4.3 Aktualisierte Karte der Aquiferbasis	61

3. Ergebnisse geophysikalischer Untersuchungen

3.1. Einleitung	65
3.2. Untersuchungsgebiet	68
3.3. Geoelektrische Untersuchungen	68
3.3.1 Durchführung der geoelektrischen Messungen	68

Sommaire

Avant-propos	3
Résumé	9
1. Contexte	15
1.1 Contexte	15
1.2 Le secteur d'étude	16
1.3 Problématique et objectifs	18
1.4 Travaux réalisés	19

2. Contexte géologique

2.1 Géologie régionale	23
2.2 Etat des connaissances géologiques et hydrogéologiques au début du projet	25
2.3 Résultats des études géologiques et hydrogéologiques des nouveaux forages de Hartheim et de Nambenheim	28
2.3.1 Situation	28
2.3.2 Résultats des études géologiques	31
2.3.3 Description lithologique et résultats des études de minéraux lourds	31
2.3.4 Résultats des études hydrogéologiques	35
2.4 Structuration géologique et hydrogéologique du secteur d'étude	52
2.4.1 Succession sédimentaire dans la zone d'étude	53
2.4.2 Description des unités hydrogéologiques	55
2.4.3 Carte actualisée du substratum	61

3. Résultats des études géophysiques

3.1 Introduction	65
3.2 Secteur étudié	68
3.3 Campagne de sondages électriques	68
3.3.1 Travaux réalisés	68

3.3.2 Ergebnisse	3.3.2 Résultats	69
3.3.2.1 Vertikalschnitte	3.3.2.1 Coupes verticales	69
3.3.2.2 Isolinienplane	3.3.2.2 Cartes en isolignes	71
3.4 Reflexionsseismische Messungen	3.4 Prélèvements	76
3.4.1 Durchführung	3.4.1 Travaux réalisés	76
3.4.2 Ergebnisse der Reflexionsseismik	3.4.2 Résultats de la sismique réflexion	77
3.4.2.1 Zeitsektionen	3.4.2.1 Coupes-temps	77
3.4.2.2 Tiefensektionen	3.4.2.2 Coupes-profondeur	79
3.5 Bohrlochgeophysik	3.5 Diagraphies	
4, Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen	4, Etudes geochemiques et isotopiques des eaux souterraines	85
4.1 Fragenstellungen und Zielsetzungen	4.1 Problématique et objectifs	85
4.2 Durchgeführte Untersuchungen	4.2 Travaux réalisés	86
4.3 Allgemeine Vorbemerkungen zur Isotopenhydrologie	4.3 Remarques générales sur les études isotopiques	a7
4.4 Aussagen der Isotopenchemie zu Hydrodynamik und Grundwasserneubildung	4.4 Indications des traceurs isotopiques sur les flux et la recharge de la nappe	89
4.4.1 Isotopenchemie der Oberflächenwasser	4.4.1 Caractérisation isotopique des eaux de surface	89
4.4.2 Grundwasserkomponenten	4.4.2 Les composantes de recharge de la nappe	91
4.4.3 Zeitliche Variationen der Isotopenzusammensetzung des Grundwassers	4.4.3 Variations temporelles de la composition isotopique dans la nappe	95
4.4.4 Mittlere Grundwasserverweildauer	4.4.4 Temps de résidence des eaux souterraines	95
4.5 Herkunft der gelösten Inhalstoffe	4.5 Origine de la minéralisation des eaux	102
4.5.1 Grundwasserchemie	4.5.1 Chimisme des eaux	102
4.5.2 $\delta^{34}\text{S}$ und PO-Weite der gelösten Sulfate	4.5.2 Isotopes du S et O des sulfates dissous	106
4.5.3 Bor-Isotope	4.5.3 Isotopes du bore	108
4.5.4 Strontium-Isotope	4.5.4 Isotopes du strontium	109
4.6 Zusammenfassung und Ausblick	4.6 Conclusion et perspectives	111
5. Grundwasserströmungs- und-transportmodell	5. Modélisation hydrodynamique	(115)
5.1 Aufgabenstellung	5.1 La problématique	115
5.2 Ziel	5.2 Objectif	115
5.3 Vorgehensweise	5.3 La démarche	116

5.4 Hydrogeologische und hydraulische Verhältnisse im Untersuchungsraum	5.4 Conditions hydrogéologiques et hydrauliques	117
5.4.1 Hydrogeologie	5.4.1 Hydrogéologie	117
5.4.2 Salzeintragsstellen	5.4.2 Zone d'infiltration du sel	119
5.5 Modellaufbau	5.5 Construction du modèle	120
5.5.1 Übersicht	5.5.1 Généralités	120
5.5.2 Modellgebiet und Randbedingungen	5.5.2 Domaine à modéliser et conditions aux limites	122
5.6 Eichung und Validierung für Grundwasserströmungsverhältnisse	5.6 Calage et validation pour diverses situations de la nappe	122
5.6.1 Übersicht	5.6.1 Aperçu	122
5.6.2 Ergebnisse der stationären Eichung	5.6.2 Résultats du calage en régime permanent	124
5.6.3 Modellvalidierung	5.6.3 Validation du modèle	124
5.7 Erste Salztransportberechnungen	5.7 Premiers calculs du transport du sel	130
5.7.1 Übersicht	5.7.1 Aperçu général	130
5.7.2 Vergleichsgrößen	5.7.2 Grandeurs comparatives	131
5.7.3 Ergebnisse	5.7.3 Résultats	135
6. Bewertung und Ausblick	6- Conclusions et perspectives	(143)
Literatur	Bibliographie	149
Ab~ildungsverzeichnis	Liste des illustrations	155
Anhang	Annexes	163

Auagangssituation

In Folge des langjährigen, inzwischen weitgehend abgeschlossenen Salzaustrages aus den Absetzbecken und Abraumhalden der deutschen und französischen Kaliindustrie weist das Grundwasser im Untersuchungsgebiet insbesondere in größeren Tiefen bereichsweise stark erhöhte Chloridkonzentrationen von mehreren Gramm pro Liter auf. Dies kann Auswirkungen auf wasserwirtschaftliche Maßnahmen sowie den Rohstoffabbau haben und insbesondere zu einer Gefährdung der öffentlichen Wasserversorgung führen. Auf deutscher Seite wurde der Kenntnisstand über das Ausmaß der Grundwasserversalzung zuletzt 1997 vom damaligen Geologischen Landesamt im "Sachstandsbericht zur Grundwasserversalzung in der Oberrheinebene südlich des Kaiserstuhls" dokumentiert. Im Rahmen des vorausgegangenen INTERREG-II-Projektes "Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben westlich des Rheins bei Balgau (F), im Abstrom der Fessenheimer Insel, eine bislang unbekannte Hochlage der Aquiferbasis entdeckt worden, von der anzunehmen war, dass sie sich möglicherweise auf die Ausbreitung der Salzbelastung auswirkt. Um gesicherte Aussagen über das Strömungs- und Transportverhalten des belasteten Grundwassers im Arbeitsgebiet machen zu können, waren deshalb weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Ziele und Durchführung des Projekts

Das Projekt "Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwassereiters zwischen Fessenheim und Breisach" hatte das Ziel, den Kenntnisstand über die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet beiderseits des Rheins zu verbessern. Damit sollten die Grundlagen für die Beurteilung der Ausbreitung und Entwicklung der insbesondere im tiefen Grundwasser festgestellten sehr hohen Chloridkonzentrationen geschaffen werden. Hierzu wurden die Morphologie der Aquiferbasis, die Durchlässigkeiten in den tieferen Aquiferabschnitten, die Grundwasserbeschaffenheit und die Wechselwirkungen mit den oberirdischen Gewässern erkundet. Mit den neu gewonnenen Daten wurde ein detailliertes grenzüberschreitendes, dreidimensionales Strömungs- und Transportmodell erstellt.

Das Projekt wurde von 1999 bis 2001 mit finanzieller Unterstützung durch die Europäische Union im Rahmen des INTERREG-II-Programms Oberrhein Mitte-Süd unter der Projektverantwortung der Gewässerdirektion

Contexte

Suite aux infiltrations de sel à partir des bassins-tampons et des terrils de l'industrie de la potasse côté allemand et côté français qui, bien que pratiquement stoppées aujourd'hui, ont duré pendant de longues années, l'eau de la nappe présente dans certaines parties du secteur étudié, et particulièrement à grande profondeur, une teneur en chlorures extrêmement élevée de plusieurs grammes par litre. Ceci peut avoir un impact sur les aménagements hydrauliques ainsi que sur l'exploitation de matériaux, et surtout mettre en danger la distribution publique d'eau potable. Côté allemand le point des connaissances sur l'importance de la salure de la nappe a été fait en dernier lieu en 1997 avec le rapport du Service géologique du Bade-Wurtemberg "Etat des lieux sur la salure de la nappe dans le Fossé rhénan supérieur au Sud du Kaiserstuhl". Dans le cadre de l'opération INTERREG II précédente, "Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur", un dôme du substratum, jusque là inconnu, avait été découvert en rive gauche du Rhin près de Balgau (F). Ce dôme, situé à l'aval hydraulique de Fessenheim, devait nécessairement avoir une influence déterminante sur les écoulements de saumures. Des travaux complémentaires étaient dès lors nécessaires pour pouvoir déterminer l'écoulement des eaux profondes salées dans le secteur d'étude.

Objectifs et réalisation du projet

Le projet de "Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach" avait pour objectif d'améliorer l'état des connaissances sur les structures géologiques et hydrogéologiques dans le secteur étudié, de part et d'autre du Rhin, afin d'obtenir les données nécessaires à une évaluation de l'extension et de l'évolution des fortes concentrations en chlorures dans la nappe, et plus particulièrement en profondeur. A cette fin, ont été étudiés la morphologie du substratum, les perméabilités des couches profondes de l'aquifère ainsi que la composition des eaux de la nappe et les échanges avec les cours d'eau superficiels. Grâce à ces nouvelles données, un modèle hydrodynamique tridimensionnel transfrontalier d'écoulement et de transport très détaillé a été mis au point.

Le projet a été réalisé grâce à l'aide financière de l'Union Européenne, dans le cadre du programme INTERREG II Rhin supérieur Centre-Sud, sous la maîtrise d'ouvrage de la Gewässerdirektion (Direction

Südlicher Oberrhein/Hochrhein -Bereich Waldshut-Tiengen durchgeführt. Die Gesamtkosten des Projekts betragen rund 900.000 Euro. Kofinanzierende Partner waren auf deutscher Seite das Land Baden-Württemberg, -vertreten durch das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), die Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) und das Regierungspräsidium Freiburg- sowie das Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben GGA Hannover, und auf französischer Seite die Région Alsace, die Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM) und das Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Geologische und hydrogeologische Untersuchungen

Zur Erkundung insbesondere des tieferen Abschnittes des Grundwasserleiters südlich des Kaiserstuhls wurden die drei Bohrungen Hartheim (D) und Namsheim flach und tief (F) abgeteuft und zu Grundwassermessstellen (GWM) ausgebaut. Die Bohrungen Namsheim tief und Hartheim reichen bis in den tertiären Festgesteinsuntergrund. Die Bohransatzpunkte wurden entsprechend den Berechnungsergebnissen des neu erstellten Grundwassermodells am vermuteten nördlichen Ende der derzeitigen Salzfahne festgelegt. Die Endteufe der Bohrung Hartheim beträgt 259 m, die der Bohrung Namsheim tief 221,2 m. Die Basis des Grundwasserleiters (Basis der Breisgauseichten) liegt bei 198 m (Hartheim) bzw. 173 m (Namsheim) unter der Geländeoberkante (GOK). Damit wurde in der Bohrung Hartheim die bisher größte Kiesmächtigkeit südlich des Kaiserstuhls auf deutschem Gebiet erbohrt.

Hydrochemische Untersuchungen an Grundwasserproben aus den neuen Grundwassermessstellen erbrachten für die GWM Namsheim mit der Tiefe zunehmende Chloridgehalte von 56,5 mg/l bei 57 m u. GOK über 271 mg/l bei 113 m u. GOK auf 747 mg/l in 165 m u. GOK. In der tieferen Grundwassermessstelle Hartheim nahm der Chloridgehalt von 13400 mg/l in 160 m u. GOK auf 19300 mg/l in 198 m u. GOK zu. Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung, der bei 200 mg/l (F) bzw. 250 mg/l (D) liegt wird damit im tieferen Abschnitt des Aquifers deutlich überschritten. Mit den neu gewonnenen Erkenntnissen wurden drei grenzüberschreitende hydrogeologische Profilschnitte für den zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes und eine überarbeitete Karte der Aquiferbasis erstellt. Im Vergleich zu früheren Bearbeitungen wurde als wesentliches neues Element eine von Storungen begrenzte Tiefscholle zwischen dem Balgauer Dom im Westen und Hartheim nachgewiesen, die dort eine

des Eaux) du secteur Südlicher Oberrhein/Hochrhein de Waldshut-Tiengen. Le coût total du projet était d'environ 900 000 euros. Il a été cofinancé par le Land Baden-Württemberg représenté par le Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), la Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) et le Regierungspräsidium Freiburg, ainsi que par l'Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben GGA Hannover, côté allemand, et par la Région Alsace, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), côté français.

Etudes géologiques et hydrogéologiques

Afin de mieux connaître les couches profondes de l'aquifère au Sud du Kaiserstuhl, trois forages ont été réalisés et équipés en piézomètres (Hartheim en Allemagne, Namsheim superficiel et Namsheim profond en France). Les forages de Namsheim profond et de Hartheim ont été poussés jusqu'au substratum tertiaire. Les emplacements des forages ont été choisis, en se fondant sur les résultats des simulations du modèle hydrodynamique, afin de reconnaître l'extrémité nord supposée de la langue salée actuelle. Le forage de Hartheim atteint 259 m de profondeur, tandis que le forage de Namsheim atteint 221,2 m. Le substratum de l'aquifère (la base des Couches de Breisgau) se situe à 198 m de profondeur à Hartheim et à 173 m à Namsheim. Le forage de Hartheim a ainsi traversé la plus grande épaisseur de graviers jamais rencontrée au Sud du Kaiserstuhl, côté allemand.

Les analyses chimiques d'échantillons prélevés dans les forages, équipés en piézomètres multiples, ont donné pour l'ouvrage de Namsheim des teneurs en chlorures croissant de 56,5 mg/l à 57 m de profondeur à 271 mg/l à 113 m, et jusqu'à 747 mg/l à 165 m de profondeur. Dans le piézomètre le plus profond de Hartheim, la teneur en chlorures passe de 13400 mg/l à 160 m jusqu'à 19300 mg/l à 198 m de profondeur. La concentration maximale admissible pour l'eau potable, de 200 mg/l (F) et de 250 mg/l (D), est donc nettement dépassée dans les niveaux profonds des forages. Grâce aux nouvelles données ainsi obtenues, trois profils transfrontaliers des unités hydrogéologiques ont été établis, ainsi qu'une carte détaillée du substratum de l'aquifère, pour la partie centrale du secteur d'étude. La mise en évidence entre le dôme de Balgau à l'Ouest et Hartheim à l'Est d'un fossé d'effondrement limité par des failles constitue la donnée la plus importante de la nouvel-

Tiefelage der Aquiferbasis zur Folge hat. Salzlosungen, die in den Bereich dieser Tiefscholle gelangen, strömen aufgrund ihres dichtegesteuerten Transportverhaltens in dieser Struktur in nordwestliche Richtung ab.

Die kombinierte Interpretation der durchgeführten geoelektrischen und reflexionsseismischen Messungen zeigt an der Basis des Grundwasserleiters deutlich eine Kiesrinne, die im wesentlichen dem heutigen Rheinverlauf folgt. Nach den Interpretationsergebnissen der Geoelektrik erreichen die Kiese ihre größte Mächtigkeit von bis zu 270 m westlich von Geiswasser. Im Osten, am Rande des Kaiserstuhls und des Schwarzwalds, steigt die Kiesbasis steil an. Die sehr niedrigen spezifischen Widerstände im basalen Bereich der geoelektrischen Messprofile deuten im Süden des Messgebietes, um Fessenheim und Bremgarten, auf hochkonzentrierte Salzlosungen an der Aquiferbasis hin. Die Salzbelastung nimmt in nördliche Richtung ab. Die reflexionsseismischen Untersuchungen lieferten sehr gute Ergebnisse zur Tiefenlage der Basis der Lockergesteinsfüllung und erbrachten bis in die Erkundungstiefe von ca. 500 m unter Gelände keine Hinweise auf mächtigere Salzkörper im tertiären Festgesteinsuntergrund.

Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen

Die Isotopenuntersuchungen (O- und H-Isotope des Wassers, Tritium, $A^{14}C$, $\delta^{13}C$, P S und $\delta^{18}O$ der Sulfate, P B, $^{87}Sr/^{86}Sr$) und die Untersuchung des Grundwasserchemismus haben zu einem besseren Verständnis der Wechselwirkungen zwischen oberirdischen Gewässern und dem Grundwasser, der Grundwasserbeschaffenheit und der Versalzungsmechanismen zwischen Fessenheim und Breisach geführt. Hierzu trugen insbesondere die neu gewonnenen Kenntnisse über die einzelnen Komponenten bei, die an der Zusammensetzung des Grundwassers beteiligt sind. Es handelt sich dabei um eine aus lokalem Niederschlag neu gebildete Komponente, Rhein-Uferfiltrat, Mohlin-Uferfiltrat und eine pleistozäne Komponente von mengenmäßig untergeordneter Bedeutung. Der Anteil des Rhein-Uferfiltrats im Grundwasser wurde kartographisch dargestellt. In den Bereichen Breisach/Hochstetten sowie Fessenheim-Neuf-Breisach trägt infiltrierendes Rheinwasser mit bis zu 90% zur Grundwasserneubildung bei. Das Uferfiltrat reicht bis zur Aquiferbasis in über 100 m Tiefe, wobei die Verweildauer mit der Tiefe zunimmt. Im Bereich Bremgarten enthält das tiefe Grundwasser einiger Grundwassermessstellen eine Komponente sehr alten (pleistozänen) Wassers, die

le carte du substratum. Les saumures profondes qui atteignent ce fossé s'écoulent dans cette structure en direction du Nord-Ouest par écoulement gravitaire du fait de leur densité élevée.

Grâce à l'utilisation combinée de plusieurs méthodes géophysiques, un chenal de graviers entaillant les terrains tertiaires et suivant approximativement le cours du Rhin actuel peut être mis en évidence à la base de l'aquifère. D'après les données de géophysique électrique, les alluvions atteignent leur épaisseur maximale de 270 m à l'Ouest de Geiswasser. A l'Est, en bordure du Kaiserstuhl et de la Forêt-Noire, le substratum de l'aquifère s'élève de façon abrupte. Les isocontours de résistivité électrique de la base de l'aquifère indiquent l'existence, au Sud du secteur autour de Fessenheim et de Bremgarten, de saumures très concentrées à la base de l'aquifère. La pollution saline diminue vers le Nord. Les campagnes de sismique réflexion ont donné d'excellentes images de la position du substratum de l'aquifère et n'ont pas révélé l'existence de corps de sel massif de taille significative dans les terrains tertiaires, jusqu'à une profondeur d'environ 500 m.

Etudes géochimiques et isotopiques

Les analyses isotopiques (isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau, tritium, $A^{14}C$, $\delta^{13}C$, $\delta^{34}S$ et $\delta^{18}O$ des sulfates, $\delta^{11}B$, $^{87}Sr/^{86}Sr$) et l'analyse du chimisme de l'eau de la nappe ont conduit à une meilleure compréhension des échanges entre les eaux superficielles et celles de la nappe, de la composition de l'eau de la nappe et des processus de salure entre Fessenheim et Breisach. Dans ce domaine, les connaissances acquises sur les différentes composantes de la recharge de l'eau de la nappe ont été très utiles : on distingue une composante de recharge locale par la pluie, les infiltrations du Rhin et de la Mohlin, et une composante pléistocène peu importante quantitativement. La proportion des infiltrations du Rhin a été représentée sur une carte. Dans les secteurs de Breisach/Hochstetten et de Fessenheim/Neuf-Breisach, l'eau du Rhin infiltrée contribue de façon dominante, jusqu'à 90%, à la recharge de l'eau de la nappe. Les infiltrations du Rhin atteignent la base de l'aquifère jusqu'à 100 m de profondeur tandis que les temps de séjour augmentent avec la profondeur. Dans le secteur de Bremgarten, l'aquifère profond contient une composante d'eau très ancienne (pléistocène) dans quelques piézomètres, ce qui indique un renouvelle-

auf einen geringen Grundwasseraustausch in den tiefen Aquiferbereichen hindeutet

Die hydrochemischen Daten belegen, dass im unmittelbaren Abstrombereich der Fessenheimer Insel bei Bremgarten ein Chlorideintrag über Restlaugen der elsassischen Kaliminen erfolgte. Ausgehend von diesen Eintragsstellen verändert sich in Grundwasserfließrichtung nach Norden die ursprüngliche chemische Zusammensetzung des Grundwassers als Folge von Kationenaustauschprozessen.

Die kartenmäßige Darstellung der Verbreitung erhöhter Chloridgehalte im Grundwasser zeigt, dass nach derzeitigem Kenntnisstand der Schwerpunkt der Chloridbelastung auf der rechtsrheinischen Seite liegt. Da jedoch auf der linksrheinischen Seite lediglich zwei Grundwassermessstellen existieren, die bis an die Aquiferbasis reichen, kann für diesen Bereich keine flächendeckende Aussage über die Chloridbelastung des tiefen Aquiferabschnittes gemacht werden. Die im Bereich Bremgarten und Balgau bereits früher festgestellte hohe Chloridbelastung an der Aquiferbasis reicht in nordliche Richtung mindestens bis zu den neuen Bohrungen Hartheim (19300 mg Chlorid/l) und Nambshheim (747 mg Chlorid/l). Die Chloridgehalte in Messstellen im mittleren und oberen Aquiferbereich südlich Breisach steigen im mehrjährigen Beobachtungszeitraum an. Dort wurde bzgl. der Salzverfrachtung ein negativer Einfluss eines Baggersees nachgewiesen, der zu einer Verlagerung der Chloridbelastung in oberflächennahere Aquiferabschnitte führt. Nordlich von Breisach zeigt eine erste Übersichtsbeprobung im oberflächennahen Grundwasser ebenfalls erhöhte Chloridkonzentrationen. Hinweise auf erhöhte Chloridkonzentrationen auf französischer Seite geben die beiden tiefen Messstellen Balgau und Nambshheim. Im oberflächennahen Aquiferbereich wurden auf französischer Seite keine deutlich erhöhten Chloridkonzentrationen im Grundwasser festgestellt.

Grundwasserströmungs- und transportmodell

Um die Grundwasserströmungsverhältnisse und die Verlagerung der **Salzwasser**verunreinigung für den quartären Kiesgrundwasserleiter südlich des Kaiserstuhls nachzubilden, wurde ein grenzüberschreitendes numerisches Modell erstellt. Dabei wurde auf die Ergebnisse früherer grenzüberschreitende Untersuchungen aufgebaut, u.a. die Grundwassermodellierung (LfU, 1996) und die Bestandsaufnahme der Qualität des Grundwassers im Oberrheingraben (Région Alsace, 2000). Um mit dem neuen numerischen Modell langfristig mittlere Strömungsverhältnisse nachzubilden, wurde dieses anhand der gemessenen

ment faible des eaux souterraines dans certains secteurs de l'aquifère profond.

L'examen des données géochimiques permet de confirmer que des chlorures en provenance de saumures résiduelles des mines de potasse d'Alsace ont été introduits dans la nappe en aval hydraulique immédiat de l'île de Fessenheim, près de Bremgarten. Au cours de l'écoulement vers le Nord des processus d'échanges de cations modifient la composition originelle de l'eau de la nappe.

La cartographie de la répartition des teneurs élevées en chlorures indique que le centre de gravité de la salure se situe en rive droite du Rhin. Du fait de l'existence en rive gauche du Rhin de seulement deux piézomètres atteignant la base de l'aquifère, il n'est pas possible de se prononcer sur l'extension de la salure dans la partie profonde de l'aquifère de ce secteur. La langue à forte teneur en chlorures déjà observée à la base de l'aquifère, dans les secteurs de Bremgarten et de Balgau a atteint les nouveaux piézomètres de Hartheim (19300 mg/l de chlorures) et de Nambshheim (747 mg/l, de chlorures). Les piézomètres captant l'aquifère moyen et supérieur, au Sud de Breisach, montrent une augmentation des teneurs en chlorures sur une période d'observation de plusieurs années. L'impact négatif d'une gravière sur la salure a également été constaté dans ce secteur : en effet les gravières favorisent la remontée d'eaux salées vers les niveaux superficiels de la nappe. Les mesures effectuées dans la nappe superficielle au Nord de Breisach commencent également à montrer un défaut de contamination en chlorures. Du côté français, les piézomètres de Balgau et de Nambshheim présentent des teneurs élevées en chlorures, en profondeur, tandis que dans la partie superficielle de l'aquifère il n'a pas été constaté de concentrations anormales.

Modélisation hydrodynamique

Un modèle hydrodynamique numérique de l'aquifère du Fossé rhénan au Sud du Kaiserstuhl a été mis au point afin de reproduire les écoulements souterrains et la propagation des pollutions salines. Ce modèle a été construit sur la base des acquis des études transfrontalières précédentes, notamment la modélisation hydrodynamique de la nappe (LfU, 1996) et l'inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur (Région Alsace, 2000). Afin de pouvoir simuler une situation moyenne sur de longues durées, le modèle a été calé en régime permanent sur la piézométrie mesurée pour la situation

Piezometerhohen vom 20.10.1986 stationar geeicht und anschließend zu dessen Validierung für erste instationäre Stromungsberechnungen erweitert. Anhand von Transportberechnungen, bei denen das Rheinuferfiltrat markiert wurde und die Berechnungsergebnisse qualitativ mit den Isotopen-Messwerten verglichen wurden, erfolgte eine grobe Überprüfung des numerischen Modells. Hier zeigte sich eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung, insbesondere nördlich der Fessenheimer Insel und im Bereich Breisach.

Mit dem numerischen Modell erfolgten dann erste Salztransportrechnungen. Dabei wurde der Salztransport infolge der Versickerung von Salzwasser aus den Kalihalden bei Buggingen und Heitersheim, deren Belastungsfahnen sich mit dem Grundwasserabstrom nördlich der Fessenheimer Insel vereinigen, sowie infolge der Versickerung durch die Absatzbecken auf der Fessenheimer Insel über die letzten 40 Jahre nachgebildet. Die berechneten Chloridkonzentrationen wurden dargestellt und mit den vorhandenen Messdaten verglichen. Die Modellergebnisse bilden die typische Charakteristik der einzelnen Chloridganglinien gut nach.

Die modellgestützte Interpretation der aktuellen Chloridverteilung zeigt das "Poolen" einer hochkonzentrierten Salzladung an der Aquiferbasis nördlich der Absatzbecken von Fessenheim. Aufgrund der regionalen Grundwasserströmung und der geringen Durchlässigkeiten an der Aquiferbasis bewegt sich die hochkonzentrierte Salzfahne vergleichsweise langsam in nördliche Richtung. Nach Westen und Osten wird die Ausbreitung durch die in der Aquiferbasis festgestellten Störungen und Versätze behindert. Ob sich die hochkonzentrierte Salzfahne gemäß der Neigung der Aquiferbasis in Richtung des Tiefpunktes der Aquiferbasis südlich von Neuf-Breisach (Becken von Geiswasser) bewegt, ist noch unklar.

Oberflächennah findet in den jüngeren Aquiferabschnitten ein rheinparalleler, durch Dispersions-effekte beeinflusster Abstrom einer "niedriger" konzentrierten Salzfahne in Richtung Breisach statt. Dieser berechnete Abstrom stimmt mit den Befunden im Raum Breisach überein. Dort wurden erhöhte Chloridkonzentrationen z.B. in den Breisacher Trinkwasserbrunnen nachgewiesen. In rheinnahen Bereichen werden die Salzkonzentrationen im Grundwasser durch den hohen Uferfiltratanteil verdünnt.

du 20 octobre 1986, puis validé par un calage en régime transitoire. Un contrôle qualitatif du modèle hydrodynamique a été effectué à l'aide de simulations de transport, où ont été marquées les eaux du Rhin qui s'infiltreraient dans l'aquifère. Les résultats ont été comparés de manière qualitative aux résultats des analyses isotopiques des eaux. La cohérence entre les données de géochimie et les résultats de modélisation s'est révélée relativement bonne, notamment au Nord de l'île de Fessenheim et dans le secteur de Breisach.

De premières simulations du transport du sel ont été réalisées à l'aide du modèle numérique. Ces simulations ont été conduites sur une période couvrant les 40 dernières années. On a pris en compte les infiltrations à partir des terrils de Buggingen et de Heitersheim, dont les panaches de pollution rejoignent les écoulements à l'aval de l'île de Fessenheim, ainsi que l'infiltration au niveau des bassins-tampons situés sur l'île. Les concentrations en chlorures ainsi calculées ont été comparées aux données disponibles. Malgré quelques incertitudes, l'évolution des chroniques de concentrations en chlorures est assez bien reproduite.

Les résultats de modélisation indiquent que la répartition actuelle de la salinité est due à une accumulation de saumure à la base de l'aquifère au Nord des bassins-tampons de Fessenheim. La langue de saumure concentrée se déplace en direction du Nord en suivant l'écoulement de la nappe, mais relativement lentement en raison de la faible perméabilité à la base de l'aquifère. Son écoulement vers l'Est et l'Ouest est limité par les failles affectant le substratum. Il n'est pas encore possible de savoir si la langue de saumure va se diriger par gravité vers le point le plus bas de l'aquifère, au Sud de Neuf-Breisach (la fosse de Geiswasser).

Près de la surface du sol, l'écoulement dans la tranche d'alluvions récentes est parallèle au Rhin et entraîne vers Breisach une langue salée relativement peu concentrée, diluée par les phénomènes de dispersion. Cet écoulement, mis en évidence par la modélisation, explique les concentrations anormales en chlorures observées dans le secteur de Breisach, notamment dans les puits AEP de Breisach. Dans la bande rhénane où les infiltrations du Rhin sont très importantes cette langue salée subit une dilution.

Das Grundwasservorkommen in den quartären Kiesen und Sanden des Oberrheingrabens südlich des Kaiserstuhls ist für die Versorgung der Raumschaft mit Trinkwasser von großer Bedeutung und stellt für die Deckung des zukünftigen Bedarfs eine überregionale Reserve dar. Neben mehreren Wasserversorgungsanlagen (z.B. Wasserwerk Hausen der Badenova – früher Freiburger Energie- und Wasserversorgungs-AG (FEW), Brunnen der Stadt Breisach) liegen im Bearbeitungsgebiet zahlreiche Brauchwasserbrunnen für industrielle und landwirtschaftliche Nutzungen. In den Grundwasserkörper wird durch mehrere Kiesgewinnungsstätten, an denen Kies und Sand im Nassabbau gewonnen wird, eingegriffen.

Neben der gebietsweise vorhandenen Belastung durch Nitrat weist das Grundwasser im Untersuchungsgebiet zwischen Fessenheim und Breisach verbreitet erhöhte Chloridkonzentrationen auf. Die "Grundwasser- versalzung" ist die Folge des Salzaustrages aus den unzureichend abgedichteten Absetzbecken der deutschen und französischen Kaliindustrie ("Absetzbecken Fessenheimer Insel" (F) und "Autobahnkiesgrube" sowie "Absetzbecken Rheinwartherhaus" (D)) sowie aus den Abraumhalden bei Buggingen und Heitersheim (D). Der Chlorideintrag in das Grundwasser aus den französischen und deutschen Absetzbecken nahm seit ihrer Stilllegung im Jahr 1976 kontinuierlich ab und ist heute weitgehend abgeschlossen. Dagegen sind die deutschen Kalihalden bei Heitersheim und Buggingen noch nicht vollständig ausgelaugt. Dort wird auch derzeit noch Chlorid durch Niederschläge ausgewaschen und in das Grundwasser eingetragen. Derzeit sind intensive Bestrebungen im Gange, diesen Chlorideintrag durch geeignete technische Maßnahmen auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Als weitere mögliche Herkunft des Chlorids im quartären Kiesaquifer kommt der direkte Eintrag durch Aufstieg chloridhaltiger Tiefenwasser aus dem tertiären Festgesteinsuntergrund in Frage, der jedoch für die Gesamtbelastung des Grundwassers mit Chlorid von eher untergeordneter Bedeutung sein dürfte.

Der quartäre Kiesaquifer war zu Projektbeginn in Rheinnahe zwischen Fessenheim und Breisach insbesondere auf französischer Seite nur lückenhaft erkundet. Nach den Ergebnissen der wenigen Kalibohrungen, die dort in den 30er Jahren abgeteuft wurden, ist die Lockergesteinsfüllung bei Geiswasser/Heitersheim ca. 250 m mächtig, daher der Begriff

Les ressources en eaux souterraines dans les alluvions quaternaires du Fossé rhénan au Sud du Kaiserstuhl constituent un élément majeur pour l'alimentation en eau potable du secteur et représentent une réserve pour les besoins futurs à l'échelle régionale. Outre des captages d'alimentation en eau potable (tels que la station de captage de Badenova – anciennement FEW, société des eaux et de l'énergie de Freiburg- à Hausen, les puits de la ville de Breisach) il existe dans la zone d'étude de nombreux puits d'alimentation en eau industrielle ou agricole. L'aquifère est par ailleurs exploité pour l'extraction de sable et graviers dans plusieurs gravières en eau.

Cependant la nappe rhénane est affectée, non seulement par des langues de pollution diffuse par les nitrates, mais aussi par des teneurs élevées en chlorures dans le secteur d'étude, entre Fessenheim et Breisach. Cette "salure" des eaux souterraines est due en grande partie aux infiltrations de saumures provenant des bassins de stockage insuffisamment étanches de l'industrie minière de la potasse française et allemande ("bassins-tampon de Ille de Fessenheim" (F), "gravière de l'autoroute" et "bassin-tampon du Rheinwartherhaus" (D)) ainsi qu'au lessivage des terrils de Buggingen et Heitersheim (D). Les infiltrations dans la nappe à partir des bassins de stockage français et allemands ont fortement diminué depuis l'arrêt de leur utilisation en 1976 et sont aujourd'hui pratiquement terminées. Les terrils de Heitersheim et Buggingen côté allemand par contre ne sont pas encore complètement lessivés. Les chlorures sont toujours entraînés dans la nappe par les pluies. Des efforts sont actuellement en cours pour essayer de réduire ces infiltrations de chlorures à un minimum par des mesures techniques adaptées. Une autre source possible pour les chlorures rencontrés dans la nappe des alluvions quaternaires est l'intrusion d'eaux profondes salées en provenance du substratum tertiaire, mais l'importance quantitative de ce phénomène est probablement relativement réduite.

L'aquifère des alluvions quaternaires était assez mal connu dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach, notamment du côté français. D'après les quelques sondages de recherche de potasse forés dans le secteur dans les années 30, on savait que les alluvions atteignent une épaisseur de près de 250 m à Geiswasser/Heitersheim d'où le nom de "fosse

“Becken von Geiswasser”. In dem schon zitierten grenzüberschreitenden Projekt “Bestandsaufnahme der Grundwasser-qualität im Oberrheingraben” wurde bei Balgau eine Hochposition der Aquiferbasis entdeckt (der so genannte “Balgauer Dom”), die möglicherweise auf salztektonische Bewegungen im tertiären Festgesteinsuntergrund zurückzuführen ist. Um gesicherte Aussagen über das Strömungs- und Transportverhalten des Grundwassers im Arbeitsgebiet machen zu können, waren weiterführende geologische und hydrogeologische Untersuchungen erforderlich. Mit Hilfe eines numerischen Grundwassermodells sollten die Auswirkungen von eventuellen Grundwasserverunreinigungen wie z. B. erhöhten Chloridgehalten insbesondere im basalen Bereich des Aquifers abgeschätzt und Hinweise für die Bewirtschaftung des grenzüberschreitenden Grundwasservorkommens in Rheinnahe geliefert werden.

Das Projekt wurde von 1999 bis 2001 unter der Koordination des Regierungspräsidiums Freiburg und der Projektverantwortung der Gewässerdirektion Südlicher Oberrhein/Hochrhein -Bereich Waldshut-Tiengen durchgeführt. Die Gesamtkosten des Projekts betragen rund 900.000 Euro und wurden finanziell unterstützt durch die Europäische Union im Rahmen des INTERREG-II-Programms Oberrhein Mitte-Süd.

Die Kofinanzierer waren folgende Institutionen, auf deutscher Seite:

- das Regierungspräsidium Freiburg (RPF),
- die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU),
- das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB),
- das Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben GGA Hannover,

und auf französischer Seite

- die Région Alsace,
- die Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM),
- der geologische Dienst Frankreichs (BRGM).

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der ausführlichen Fachberichte zusammen, die zu den einzelnen Detailuntersuchungen erstellt wurden. Die Fachberichte sind auf der beigefügten CD-ROM enthalten.

Das Arbeitsgebiet liegt im baden-württembergischen und elsassischen Teil des südlichen Oberrheingrabens. Die nördliche Begrenzung verläuft auf der Höhe von Colmar (F) in Ost-West-Richtung, im Süden reicht es bis südlich von Müllheim (D) (Abbildung 1.1). Die östliche Begrenzung bildet der Westrand des Kaiserstuhls sowie der Westrand des Schwarz-

de Geiswasser”. Au cours de l'opération transfrontalière précédemment citée d'“Inventaire de la qualité de la nappe de la vallée du Rhin supérieur” a été découvert le “dôme de Balgau”, une remontée du substratum probablement liée à des mouvements diapiriques (dômes de sel) dans le socle tertiaire. Des études géologiques et hydrogéologiques complémentaires apparaissaient dès lors nécessaires pour pouvoir déterminer les écoulements souterrains de la nappe dans le secteur d'étude. Le comportement de polluants éventuels tels que les langues de salure devait pouvoir être évalué à l'aide d'un modèle hydrodynamique, en particulier dans les couches profondes de l'aquifère, afin de pouvoir apporter une aide à la gestion des ressources en eau transfrontalières dans la bande rhénane.

Le projet s'est déroulé de 1999 à 2001 sous la coordination du Regierungspräsidium de Freiburg et la maîtrise d'ouvrage de la Gewässerdirektion südlicher Oberrhein/Hochrhein - Bereich Waldshut-Tiengen. L'opération, d'un montant total de près de 900 000 euros, a été soutenue par l'Union européenne dans le cadre de l'initiative communautaire INTERREG II Rhin supérieur Centre-Sud.

Les cofinancements ont été apportés par les organismes suivants, du côté allemand :

- le Regierungspräsidium de Freiburg (RPF),
- la Direction de l'environnement du Bade-Wurtemberg (LfU),
- le Service de la géologie, des matériaux et des mines du Bade-Wurtemberg (LGRB),
- l'Institut Leibnitz de géophysique de Hanovre (GGA)

et pour le côté français

- la Région Alsace,
- l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM),
- le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

Le présent rapport résume les résultats des rapports techniques plus complets qui détaillent les études réalisées dans les différents domaines d'investigation. Ces rapports techniques sont fournis dans le CD-ROM joint.

Le secteur d'étude est situé dans la partie sud du Fossé rhénan supérieur, du côté alsacien et du côté badois du Rhin. Il s'arrête au Nord sur une limite Est-Ouest à la hauteur de Colmar (F), et au Sud à la hauteur de Müllheim (D) (figure 1.1). Il est limité à l'Est par les contreforts ouest du Kaiserstuhl puis par le piémont de la Forêt Noire de Fribourg en Briçgau jus-

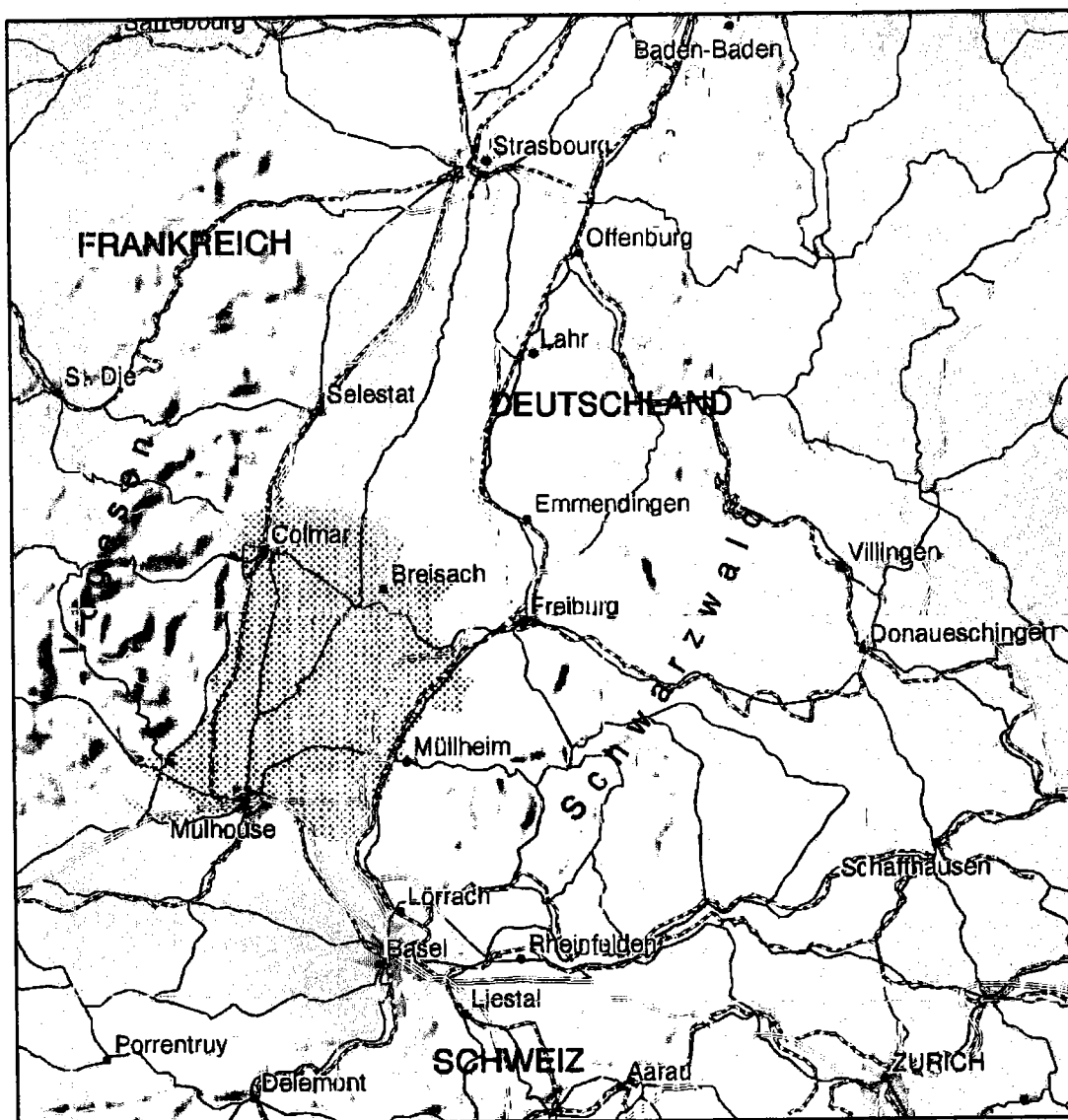


Abbildung 1.1: Lage des Untersuchungsgebietes im südlichen Oberrheingraben.
 Figure 1.1 : Situation du secteur d'étude dans le Sud du Fossé rhénan supérieur.

waldes südlich von Freiburg im Breisgau bis Müllheim. Im Nordosten liegt zwischen dem Kaiserstuhl und dem Schwarzwald die so genannte Mengener Brücke, in deren Verbreitungsgebiet kein nennenswerter Grundwasserkörper ausgebildet ist. Die westliche Grenze des Untersuchungsgebietes bildet der Vogesenrand.

Morphologisch gliedert sich das Arbeitsgebiet in die Colmar-Neuenburger Rheinebene mit der Niederterrasse und der Rheinaue, die durch die Terrassenkante voneinander getrennt werden (Mackel, 1992). Die Niederterrasse besteht im rheinnahen Bereich aus Kies mit Gerollen überwiegend alpiner Herkunft. Nach Osten und Westen zum Schwarzwaldrand bzw. zu den Vogesen hin nimmt der Anteil an Gerollen aus

qu'à Müllheim. Au Nord-Est, le Kaiserstuhl est relié à la Forêt Noire par le "pont de Mengen", une zone haute pratiquement dénuée de ressources en eaux souterraines. La limite ouest du secteur est constituée par le piémont des Vosges.

Du point de vue géomorphologique le secteur d'étude appartient à la plaine du Rhin entre Colmar (F) et Neuenburg (D), que l'on subdivise en bande rhénane et basse-terrasse séparées par le talus de la basse-terrasse (Mackel, 1992). La basse-terrasse est constituée près du Rhin de graviers à galets d'origine essentiellement alpine. En allant vers l'Est et l'Ouest en direction respectivement de la Forêt

diesen beiden Liefergebieten deutlich zu. Die Rheinaue umfasst das ehemals regelmäßig überschwemmte Flussgebiet des Rheins, dessen obere 3-5 Meter im Holozän umgelagert wurden.

Ostlich schließt an das Untersuchungsgebiet das Markgrafler Hügelland mit Vorbergzone und westlich vorgelagerten LoBhügelländern an. Im Westen endet das Untersuchungsgebiet zwischen Colmar im Norden und Cernay (Sennenheim) im Süden an der Vorbergzone der Vogesen, deren Randschollen eine vielfältige Lithologie aufweisen. Südlich von Cernay wird die Morphologie von den Schwemmfächern der Thür und der Doller geprägt, die aus den Thanner bzw. Masevaux (Maasmünster) Talern ausmünden.

1.2.1.2. Geologische Grundlagen

Infolge der Entdeckung des "Balgauer Doms" im Rahmen des vorherigen INTERREG II-Projekts "*Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben*" wurden ergänzende geologische und hydrogeologische Untersuchungen des tieferen Abschnittes der quartären Rheingrabenfüllung durchgeführt. Diese neu erarbeiteten Grundlagen sind wichtige Eingangsparameter für die Entwicklung und Eichung eines detaillierten, grenzüberschreitenden, tiefendifferenzierten numerischen Stromungs- und Transportmodells in Rheinnahe zwischen Fessenheim (F) im Süden und Breisach (D) im Norden.

Das aktuelle Projekt "*Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen quartären Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach*" hatte folgende Zielsetzungen:

- Untersuchung des geologisch- hydrogeologischen Aufbaus der Lockergesteinsfüllung des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim
- Erarbeitung eines aktualisierten geologisch/hydrogeologischen Modells für das Untersuchungsgebiet
- Erarbeitung von Grundlagen zur Beurteilung der Ausbreitung chloridhaltiger Grundwasser im tieferen Abschnitt des quartären Kiesaquifers
- Klärung der Wechselbeziehungen zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser im Untersuchungsgebiet

Beschreibung der hydrochemischen und isotopehydrologischen Eigenschaften des Grundwassers im Untersuchungsgebiet

Noire ou des Vosges, la proportion de galets originaires de ces zones d'alimentation augmente. La bande rhénane représente la zone inondable du Rhin, autrefois régulièrement inondée, et constituée de matériel remanié à l'Holocène sur 3 à 5 m d'épaisseur.

A l'Est la zone d'étude jouxte les collines du Markgraflerland qui comprennent le piémont de la Forêt Noire et les collines de loess qui le précèdent. **A** l'Ouest la zone d'étude s'arrête entre Colmar au Nord et Cernay au Sud sur les collines sous-vosgiennes à la lithologie très variée, qui correspondent aux champs de fractures du piémont du socle vosgien. Au Sud de Cernay, la morphologie est dominée par les cônes de déjection de la Thur (débouché de la vallée de Thann) et de la Doller (débouché de la vallée de Masevaux).

1.2.1.3. Objectifs du projet

C'est à la suite de la mise en évidence du "dôme de Balgau" au cours du projet INTERREG II précédent "*Inventaire de la qualité de la nappe de la vallée du Rhin supérieur*" qu'il est apparu nécessaire de mener des études géologiques et hydrogéologiques complémentaires des parties profondes de l'aquifère quaternaire. Les nouvelles connaissances ainsi acquises devraient permettre de mettre au point et de caler un modèle hydrodynamique multicouche transfrontalier d'écoulement et de transport de la bande rhénane entre Fessenheim (F) au Sud et Breisach (D) au Nord.

Les objectifs suivants avaient été fixés au présent projet de "*Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach*" :

- Reconnaissance et étude de la structuration géologique et hydrogéologique des alluvions dans la partie sud du Fossé rhénan supérieur entre les localités de Fessenheim et Breisach ;

Conception d'un modèle géologique et hydrogéologique actualisé du secteur d'étude ;

- Collecte de données de base permettant d'évaluer la répartition des eaux souterraines salées dans la partie profonde de l'aquifère quaternaire ;

Examen des échanges entre les cours d'eau superficiels et les eaux souterraines dans le secteur d'étude ;

- Description des caractéristiques géochimiques et isotopiques des eaux souterraines du secteur d'étude ;

Erstellung eines detaillierten Grundwasserstromungsmodells für das Untersuchungsgebiet mit ersten grooraumigen Transportberechnungen zur dichtegetriebenen Salzverlagerung.

In einem anschließend geplanten Projekt (INTERREG Iii) soll das Grundwassermodell zu einem detaillierten Transportmodell weiterentwickelt werden. Dieses Modell soll dazu dienen, Aussagen über die künftige Entwicklung der Grundwasserqualität sowie über Auswirkungen bestehender bzw. geplanter Maßnahmen (z.B. Kiesabbau Oder Grundwasserentnahmen) zu machen.

Zur Klärung der oben genannten Fragen wurden im Rahmen des aktuellen Projektes "Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen quartären Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach" zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die in der Tabelle 1.7 zusammengestellt sind. Die Lage der Seismikprofile sowie die Standorte der Bohrungen, die in den Jahren 1997 bis 2001 durchgeführt wurden, sind in der Abbildung 1.2 dargestellt.

Mise au point d'un modèle hydrodynamique détaillé des écoulements des eaux souterraines dans le secteur d'étude, prenant en compte les effets densitaires dans l'écoulement des eaux salées.

Une poursuite des études de modélisation est envisagée dans un prochain projet transfrontalier dans le cadre du programme INTERREG III, afin de pouvoir simuler de façon détaillée le transport des solutés. Ce modèle plus évolué permettra de faire des prévisions sur l'évolution future de la qualité des eaux souterraines ainsi que sur l'impact d'aménagements hydrauliques, tels que l'implantation de gravières en eau ou de stations de captage.

Un grand nombre de tâches ont été nécessaires pour aboutir aux objectifs fixés dans le présent projet de "Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach". Elles sont listées dans le tableau 1.7. La situation des profils de géophysique sismique ainsi que les emplacements des forages réalisés sur la période entre 1997 et 2001 sont reportés sur la carte de la figure 1.2.

Zeitraum Période	Durchgeführte Maßnahme Travaux réalisés	Zielsetzung Objectif
1999-2001	Reflexionsseismische Messungen Campagnes de sismique réflexion	Erkundung der Aquifergeometrie Reconnaissance de la géométrie de l'aquifère
1999	Geoelektrische Tiefensondierung Sondages électriques à grande profondeur	Erkundung der Verbreitung çalzhaltiger Grundwaççer Reconnaissance de la repartition de la salinité des eaux souterraines
09/05-14/11/2001	Abteufen von drei Bohrungen und Auçbau zu Grundwaççermeççstellen Forage de 3 sondages et équipement en piézomètres	Differenzierte geol ogi çç/hydrogeol ogi sche Beçchreibung des Untergrundes, Grundwaççerbeprobung Reconnaissance de la succession des alluvions et définition des unités hydrogéologiques, prélèvements des eaux souterraines pour analyses
23/08/2001 (GWM Nambenheim B1) (Piézomètre de Nambenheim) 11/10/2001 (GWM Hattheim) (Piézomètre de Hattheim)	Gammalog-Messungen in den beiden neuen Bohrungen <i>Diagraphies gamma-ray dans les 2 nouveaux sondages</i>	Vertikale Gliederung der Sedimentabfolge <i>Identification des séquences sédimentaires</i> dans les alluvions
08/11/2001	Lithofazieslogs und schwermineralogische Untersuchungen Levé <i>lithologique</i> et prélevements pour études des minéraux lourds	Petrographische Gliederung der Lockergeçteinsabfolge, Auçsagen zur Ablagerungsdynamik Description de <i>la</i> séquence sédimentoilogique de dépôt des alluvions
1999-2001	Modellierung der Grundwasserströmung und des Transportes <i>Modélisation hydrodynamique</i>	Beurteilung der transportrelevanten Strömungs- bedingungen und Aquifer-Eigenschaften <i>Évaluation des conditions d'écoulement et de</i> transport et des caractéristiques de <i>l'aquifère</i>
1999-2001	Isotopenhydrologische und hydrochemische Untersuchungen <i>Études géochimiques et isotopiques des eaux</i>	Isotopenhydrologische und hydrochemische Charakterisierung des Grundwassers Caractérisation géochimique et isotopique des eaux souterraines
10/2001	Durchführung von Pumpversuchen in den beiden neuen Grundwaççermeççstellen <i>Pompages d'essai dans les 2 nouveaux piézomètres</i>	Ermittlung hydraulischer Parameter Evaluation des paramètres hydmdynamiques
14/11/2001 (GWM Nambenheim) (Piézomètre de Nambenheim) 22/11/2001 (GWM Hattheim) (Piézomètre de Hattheim)	Leitfähigkeitslogs In den neuen Grundwassermessstellen <i>Diagraphies de conductivité</i> dans les nouveaux piézomètres	Vertikale Chloridiretellung im Untergrund Mesure de la répartition des concentrations en chlorures avec la profondeur dans les eaux souterraines
11/2001	Tiefenorientierte Probenahme und hydrochemische Untersuchungen in den neuen Grundwassermessstellen Prélèvements à différentes profondeurs et analyses des eaux dans les nouveaux piézomètres	Ermittlung der vertikalen hydrochemischen Zonierung im Grundwaççerleiter étude de la variation de la qualité des eaux avec la profondeur dans les eaux souterraines

Tabelle 1.1: Im Rahmen des aktuellen Projekts durchgeführte Maßnahmen.

Tableau 1.1 : Travaux réalisés dans le cadre du présent projet.

6. Bewertung und Ausblick

Mit den durchgeführten grenzüberschreitenden Untersuchungen konnten die bisherigen Erkenntnisse über den geologischen/hydrogeologischen Aufbau der Lockergesteinsfüllung des südlichen Oberrheingrabens zwischen Fessenheim und Breisach überarbeitet werden. Als wesentlich neues Element in der Aquiferbasis zwischen dem Balgauer Dom im Westen und Hartheim im Osten wurde durch die Bohrungen Hartheim (D) und Namsheim (F) eine von Störungen begrenzte Tiefscholle nachgewiesen. Dort wurde im Grundwasser die höchste Chloridbelastung von 19 300 mg/l in der tieferen Bohrung Hartheim auf deutscher Seite gemessen. Im Bereich der ca. 20 m hoher liegenden Aquiferbasis in der Bohrung Namsheim wurden lediglich 747 mg/l Chlorid festgestellt. Somit hat sich die hochkonzentrierte Salzlosung, die sich aufgrund ihrer hohen Dichte mit dem Gefälle der Aquiferbasis ausbreitet, an der Aquiferbasis im rheinischen rechtsrheinischen Bereich unterhalb der Absatzbecken bereits ca. 5 km nach Norden ausgedehnt. Da auf der linksrheinischen Seite lediglich zwei Grundwassermessstellen existieren, die bis an die Aquiferbasis reichen, kann für diesen Bereich keine flächenhafte Aussage über die Chloridbelastung des tiefen Aquiferabschnittes gemacht werden. Die beiden tiefen Messstellen Balgau und Namsheim geben jedoch Hinweise auf erhöhte Chloridkonzentrationen auf französischer Seite, deren Herkunft noch nicht vollständig geklärt ist.

Weitere wichtige Kenntnisse zum Aquifer und zur Verbreitung der Salzbelastungen im tieferen Untergrund lieferten geoelektrische und reflexionseismische Messungen. Im Hohenlinienplan der Aquiferbasis zeichnet sich deutlich eine Kiesrinne ab, die im wesentlichen dem heutigen Rheinverlauf folgt und in das Becken von Geiswasser mündet. Dort erreichen die Lockersedimente eine Mächtigkeit von 270 m.

Aus den geophysikalischen Untersuchungen ergaben sich keine Hinweise auf mächtige Salzkörper im Untergrund. Die hydrochemischen und isotope hydrologischen Untersuchungen zeigen den vorherrschenden Einfluss des Uferfiltrats des Rheins für die Grundwasserneubildung bis an die Aquiferbasis. Die Grundwasserchemie ist bestimmt durch Mischungsvorgänge der verschiedenen Neubildungskomponenten mit Salzsolen überwiegend anthropogenen Ursprungs (Restlaugen der Kaliindustrie). Untergeordnet

6, Conclusions et perspectives

Les études transfrontalières menées dans le cadre du projet ont permis d'actualiser les connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le remplissage alluvionnaire du Sud du Fossé rhénan entre Fessenheim et Breisach. En ce qui concerne le substratum de l'aquifère, l'élément nouveau le plus important mis en évidence par les sondages est l'existence d'un graben limité par des failles entre le Dôme de Balgau (F) à l'Ouest et Hartheim (D) à l'Est. C'est là, dans le sondage profond de Hartheim côté allemand, qu'a été observée la plus forte teneur en chlorures, soit 19'300 mg/l. Dans le forage de Namsheim, où le substratum est moins profond de 20 m environ, 747 mg/l de chlorures seulement ont été mesurés. Cela signifie que la saumure très concentrée, qui du fait de sa forte densité s'écoule suivant la pente du substratum, a déjà avancé en rive droite du Rhin d'environ 5 km vers le Nord en aval des bassins-tampon. Du fait que sur la rive gauche il n'existe que deux piézomètres atteignant la base de l'aquifère, il n'est pas possible de se prononcer sur la surface affectée par la salure dans ce secteur. Les deux piézomètres profonds de Balgau et Namsheim donnent cependant des indications sur une concentration élevée en chlorures, dont l'origine n'est pas encore complètement éclaircie.

Les campagnes de mesures géophysiques électriques et sismiques ont fourni des informations nouvelles sur l'aquifère et sur la répartition de la salure en profondeur. La carte révisée du substratum montre très nettement le tracé d'un chenal alluvionnaire qui suit globalement le cours du Rhin actuel pour aboutir à la fosse de Geiswasser côté français où les alluvions atteignent 270 m d'épaisseur.

Les mesures géophysiques réalisées n'indiquent pas la présence de masses de sel importantes en profondeur. Les études géochimiques et isotopiques des eaux souterraines montrent l'influence dominante des infiltrations du Rhin dans la recharge, et ceci jusqu'à la base de l'aquifère. La composition des eaux est déterminée par des processus de mélange entre les eaux de recharge et des saumures d'origine majoritairement anthropique (rejets de l'industrie extractive de la potasse). La participation de sel en

liegen geogene Salzeinträge im Bereich der Bohrungen des Weinstetter Diapirs vor, in der im Tiefenwasser eine alte Grundwasserkomponente vorherrscht.

Die geochemischen und isotopehydrologischen Untersuchungen lieferten ergänzende Erkenntnisse zum Verständnis der Grundwasserfließverhältnisse, insbesondere zu den Austauschprozessen mit den oberirdischen Gewässern und somit auch zu den Versalzungsmechanismen. Während des Abstroms nach Norden verändert sich die Grundwasserchemie durch Kationenaustauschprozesse. Die Isotopen zeigen ein differenzierteres und komplexeres Bild als die chemischen Daten. Demnach reichen einfache Mischungsvorgänge mit den derzeitigen Kaliabwässern nicht aus, um den chemischen und isotopischen Charakter der von Versalzung betroffenen Wasser zu erklären.

Eine weitergehende Charakterisierung der Isotopengehalte der möglichen Versalzungs-komponenten ist für das Verständnis des Systems und für eine bessere Differenzierung der Ursachen der Versalzung erforderlich. Diese Untersuchungen müssen insbesondere die natürlichen Salze des Kalilagers, des Diapirs von Weinstetten, die Salze des Haldenmaterials und die Kaliabwasser betreffen.

Die Isotopenzusammensetzung der Kaliabwasser hat sich möglicherweise im Verlauf der letzten Jahre durch eine Änderung des Extraktionsverfahrens der MDPA geändert. Eine vertiefende Untersuchung der Auswirkungen dieser Änderung auf die Isotopensignatur der Restlaugen bietet möglicherweise einen Ansatz für eine Unterscheidung von geogenem und anthropogenem Salzeintrag.

Wichtigster Baustein zur Beschreibung und Prognose der Verbreitung der Salzbelastung ist das auf der Grundlage der Untersuchungen erstellte grenzüberschreitende dreidimensionale numerische Grundwassermodell. Das Modell wurde stationär geeicht und für instationäre Stromungsprozesse erweitert. Es erfolgten erste Salztransportberechnungen bei denen die Versickerung von Salzwasser durch die Kalihalden Buggingen und Heitersheim sowie durch die Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel nachgebildet wurden. Ein Vergleich der berechneten Chloridkonzentrationen mit vorhandenen Messdaten zeigte, dass die Modellergebnisse die typische Charakteristik der einzelnen Ganglinien vergleichsweise gut nachbilden. Die Berechnung der aktuellen

provenance du substratum reste limitée aux forages situés à proximité du diapir de Weinstetten, où les eaux profondes de la nappe sont marquées par une composante d'eaux anciennes.

Les études géochimiques et isotopiques apportent ainsi des compléments à la compréhension des écoulements des eaux souterraines, en particulier sur les échanges nappe-rivières et les phénomènes de salure. Au cours de l'écoulement de la nappe vers le Nord, la structure chimique originelle des eaux souterraines se modifie par des processus d'échanges cationiques. Les études des isotopes ont fourni une image plus différenciée et plus complexe que les données chimiques, de sorte que de simples processus de mélange avec les saumures rejetées actuellement par l'industrie de la potasse ne suffisent pas pour expliquer le caractère chimique voire isotopique des eaux affectées par une augmentation de la salinité.

Une caractérisation isotopique plus fine des différents apports potentiels de sels dissous dans la nappe s'avère indispensable pour comprendre le fonctionnement du système et différencier les origines de la salinité. Il serait particulièrement intéressant de caractériser les sels naturels du gisement de potasse, le sel du diapir de Weinstetten, les sels des terrils et de la saumure résiduelle du traitement.

La composition isotopique des saumures rejetées a pu varier au cours de ces dernières années suite aux changements des procédés utilisés dans les fabriques des MDPA. Une étude plus détaillée de l'impact des différents procédés sur la composition isotopique de la saumure résiduelle devrait permettre de mieux différencier les apports naturels et anthropiques de sel dans la nappe.

Le modèle hydrodynamique multicouche transfrontalier mis au point dans le cadre du projet, représente une avancée importante dans l'interprétation de la répartition de la salure et dans la prévision de son évolution future. Le modèle a été calé en régime permanent puis utilisé en régime transitoire pour le transport. Il a permis de faire des simulations préliminaires du transport du sel en prenant en compte l'infiltration d'eaux salées à partir des terrils de Buggingen et de Heitersheim ainsi qu'à partir des bassins-tampon de l'île de Fessenheim. La comparaison des concentrations en chlorures calculées par le modèle avec les mesures disponibles montre que les résultats du modèle reproduisent relativement bien les chroniques d'évolution observées. L'interprétation que l'on peut

Chloridverteilung zeigt das "Poolen" einer hochkonzentrierten Salzlosung an der Aquiferbasis nordlich der Absetzbecken von Fessenheim. Diese hochkonzentrierte Salzfahne bewegt sich vergleichsweise langsam in nördliche Richtung. Oberflächennah findet ein rheinparalleler Abstrom einer niedrig konzentrierten Salzfahne statt, die den Bereich nordlich Breisach bereits erreicht hat. Die Ergebnisse, insbesondere auch aus dem Zustrombereich der Wasserversorgung Breisach lassen vermuten, dass das Salz durch Diffusions- und Dispersionseffekte in obere Grundwasserbereiche gelangt. Die bestehenden Wechselwirkungen und Austauschprozesse des Grundwassers mit den Oberirdischen Gewässern, insbesondere mit dem Rhein, können diese Effekte verstärken. Tendenziell ähnliche Wirkungen gehen voraussichtlich von Grundwasserentnahmen und Baggerseen aus, die salzhaltiges Grundwasser in der Tiefe anschnitten. Hier erscheinen qualifizierte Kontrolluntersuchungen ratsam zu sein. Gleichzeitig bewirkt die bereichsweise starke Uferfiltration des Rheins eine Verdünnung der Chloridbelastung im oberflächennahen rheinnahen Aquiferbereich.

Da die bisherigen Modellbetrachtungen lediglich vorläufige Ergebnisse zur Salzausbreitung u.a. aufgrund der angenommenen stationären Stromungsrandbedingungen, liefern und detaillierte Aussagen zur Gefährdung einzelner Wasserversorgungen und zur Grundwasserbewirtschaftung nicht zulassen, ist eine weitere Verbesserung des numerischen Modells notwendig. Hierfür sind neben einer besseren Datengrundlage bzgl. der Quantifizierung der Versickerungen aus den Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel weitere Untersuchungen und Bohrungen erforderlich. Wie im Pflichtenheft zu diesem Projekt bereits genannt, sollen im Rahmen einer künftigen Projektphase Prognoseberechnungen zur zukünftigen Verlagerung der Salzfahnen durchgeführt werden. Hierbei ist der Untersuchungsraum grenzüberschreitend nach Norden auszudehnen, um zu Aussagen über die Gefährdung weiterer Wasserversorgungen beiderseits des Rhein zu gelangen. Ein derartig kalibriertes Transportmodell erlaubt auch detaillierte Aussagen zu Auswirkungen geplanter wasserwirtschaftlicher Maßnahmen sowie des Kiesabbaus auf die Grundwasserqualität. Das vorliegende Grundwassermodell soll somit zu einem aussagekräftigen Werkzeug für die Beurteilung von wasserwirtschaftlich relevanten Maßnahmen weiterentwickelt werden. Die erzielten Ergebnisse liefern darüber hinaus zusätzliche grenzüberschreitende Erkenntnisse im Hinblick auf die Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie bzgl. des Grundwassers.

faire de la distribution actuelle de la salure, en se basant sur les simulations du modèle, est que les saumures très concentrées s'étalent à la base de l'aquifère au Nord des bassins-tampon de Fessenheim. Cette langue de chlorures très concentrée s'écoule relativement lentement vers le Nord. Dans les couches superficielles de l'aquifère les écoulements sont parallèles au Rhin et entraînent une langue de chlorures peu concentrés qui ont déjà atteint le Nord de Breisach. Les résultats, en particulier ceux de la zone de captage des puits AEP de Breisach, donnent à penser que le sel atteint les niveaux supérieurs de l'aquifère par des effets de diffusion et de dispersion. Les échanges nappe-rivières, notamment ceux avec le Rhin, peuvent renforcer ces phénomènes. Des effets similaires pourraient également être provoqués par les puits de pompage et par les gravières qui atteignent les eaux salées en profondeur. Des prélèvements de contrôle spécifiques seraient indiqués pour examiner ces questions. Simultanément l'infiltration parfois importante des eaux du Rhin entraîne une dilution de la salinité au niveau de l'aquifère superficiel à proximité du Rhin.

Les travaux de modélisation réalisés dans le cadre du projet sont cependant à considérer comme des travaux préliminaires sur la propagation de la salinité, en raison notamment de la simplification due à la simulation transitoire du transport basée sur un calage en régime permanent, et ne permettent pas de prévisions de détail sur le devenir de captages d'eau potable particuliers ni sur les mesures spécifiques à prendre. Il nous manque pour cela des données plus précises sur les quantités de sel ayant été infiltrées au cours du temps dans les bassins-tampon de l'île de Fessenheim ainsi que des études et forages complémentaires. Comme il l'avait déjà été annoncé dans le cahier des charges du projet, c'est dans une phase ultérieure qu'il conviendra de réaliser des simulations prévisionnelles de l'écoulement des langues salées. Il faudra pour cela étendre la zone d'étude vers le Nord de part et d'autre de la frontière, afin notamment de pouvoir prévoir suffisamment à l'avance les risques potentiels pour les captages d'eau potable de part et d'autre du Rhin. Après un calage adéquat, le futur modèle de transport permettra de faire également des prévisions sur l'effet de nouveaux aménagements tels que l'implantation de nouvelles gravières ou l'approfondissement de gravières existantes sur la qualité des eaux souterraines. Ce modèle pourra ainsi devenir un outil d'aide à la décision dans les procédures d'autorisation d'aménagements ayant un impact sur la nappe. Il apportera de plus des éléments pour la gestion transfrontalière de la qualité