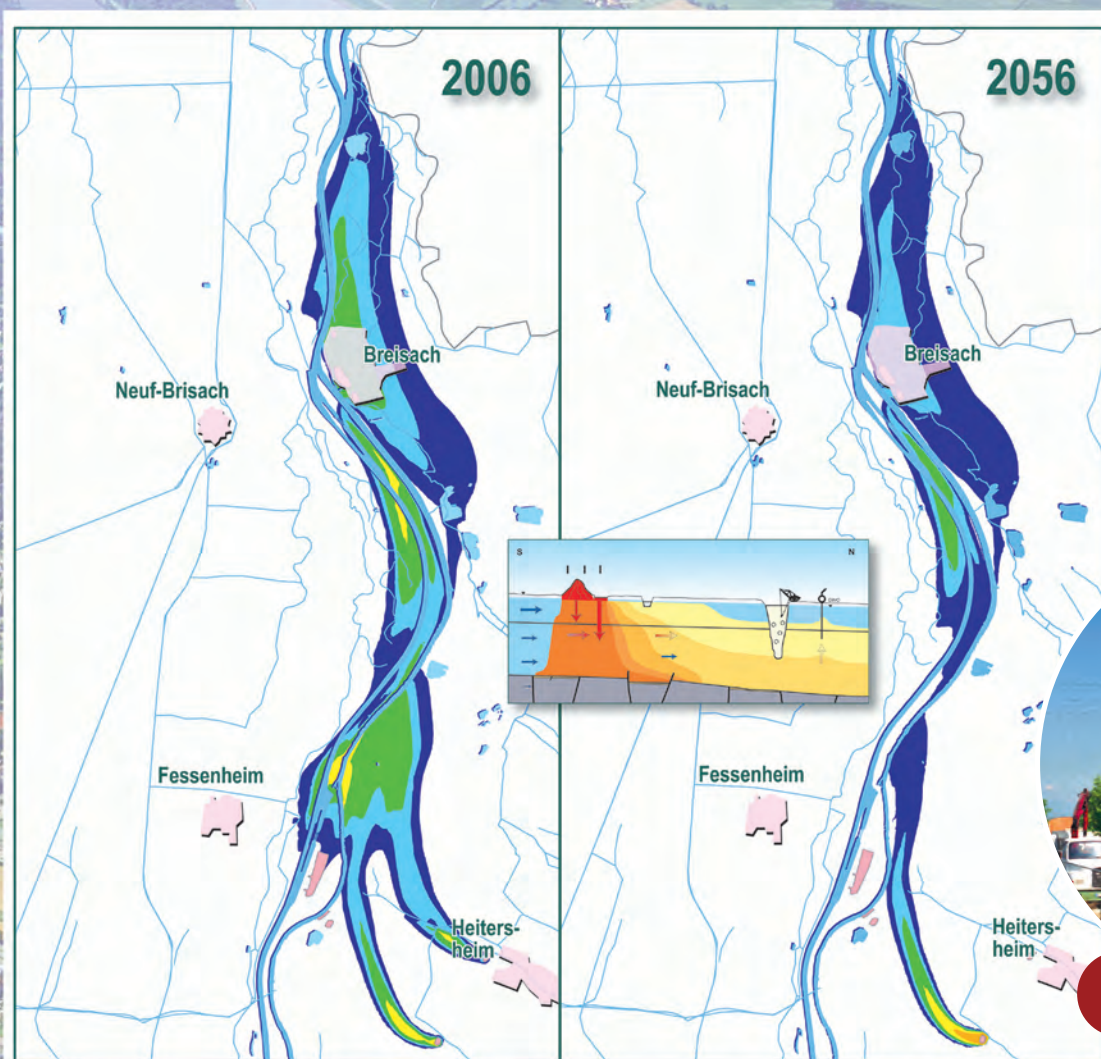


Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim

Outil de gestion transfrontalier
de la pollution saline des eaux souterraines
entre Fessenheim et Burkheim



2006/2007

Regierungspräsidium Freiburg • Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Région Alsace • Agence de l'Eau Rhin-Meuse • DIREN Alsace • BRGM
Gemeinschaftsinitiative • Initiative communautaire INTERREG III



Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne
Dieses Projekt wird von der Europäischen Union Kofinanziert
Programme INTERREG - Fonds européen de développement régional
INTERREG- Programm - Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim

Outil de gestion transfrontalier
de la pollution saline des eaux souterraines
entre Fessenheim et Burkheim

Endbericht

Rapport final

2006/2007

Herausgeber / Publication

Regierungspräsidium Freiburg

79083 Freiburg i. Br.

<http://www.rp-freiburg.de>

Projektträger / Maître d'ouvrage :

Regierungspräsidium Freiburg,

Abteilung 5 Umwelt und Abteilung 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Koordination / Coordination :

Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 5 und Abt. 9

Finanziert durch / Partenaires financiers :

Europäische Union (INTERREG III A Oberrhein Mitte-Süd)

Union européenne (INTERREG III A Rhin supérieur Centre-Sud)

Regierungspräsidium Freiburg (RPF)

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe (LUBW)

Région Alsace, Strasbourg

Agence de l'Eau Rhin-Meuse, Moulines-les-Metz (AERM)

Service Géologique Régional Alsace, Lingolsheim (BRGM)

Direction Régionale de l'Environnement (DIREN Alsace)

Bearbeitung / Avec le concours de :

A. Durach (Kobus und Partner), Dr. P. Elsass (BRGM), T. Gudera (LUBW), M. Haas (RPF),

Dr. Ch. König (delta h), Dr. U. Lang (Kobus und Partner), J. Mair (RPF), Dr. G. Wirsing (RPF)

Grafik und Satz / Maquette : *Ogham* - Harald Mourreau

Druck / Impression : Imprimerie Kocher (Rosheim)

Bezug über / Distribué par

Die Veröffentlichung ist kostenlos erhältlich bei / *La brochure est gratuite et peut être demandée auprès de*

• REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG – Abteilung 9

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)

Albertstraße 5, 79104 Freiburg i. Br.

Telefon: (0761) / 208-3000 – Fax: (0761) / 208-3029 – E-Mail: abteilung9@rpf.bwl.de

• SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL ALSACE

BRGM, BP 177, Parc-Club des Tanneries, Lingolsheim F-67834 Tanneries Cedex

Tél.: 03 88 77 48 90

• RÉGION ALSACE

1, Place du Wacken, BP 91006, F-67000 Strasbourg Cédex

Tél.: 03 88 15 68 67

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers

unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet

Reproduction - même partielle - autorisée seulement avec mention de l'origine

et mise à disposition des exemplaires justificatifs

Topographische Grundlagen: Topographische Karte 1:50 000, Topographische Karte 1:25 000 -

©Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv.bw.de) vom 29.05.2008. AZ: 2851 1 - A/818.

Fond topographiques utilisés : carte typographique 1:50 000, carte topographique 25 000

©Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv.bw.de) du 29.05.2008. AZ: 2851 1 - A/818.

Regierungspräsidium Freiburg (2008) - INTERREG III A Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim. Endbericht. 138 S., 1 CD-Rom
Outil de gestion transfrontalier de la pollution saline des eaux souterraines entre Fessenheim et Burkheim. Rapport final. 138 p., 1 CD-Rom

Vorwort

Die Belastung des Grundwassers mit Chlorid (Salz) ist am südlichen Oberrhein seit langem bekannt. Sie geht im Wesentlichen auf die ehemalige Versickerung von Salzsole aus den rheinnahen Absetzbecken der deutschen und französischen Kaliindustrie zurück. Die Folgen des in der Vergangenheit allzu sorglosen Umgangs mit dem Reststoff Chlorid für das bedeutende Grundwasservorkommen werden die Region entlang des Rheins zwischen Fessenheim und dem Kaiserstuhl weiterhin beschäftigen.

Die erhöhten Chloridgehalte können bereichsweise die Nutzung der wertvollen Ressource Grundwasser für die Trinkwasserversorgung, die Industrie oder die Landwirtschaft einschränken. Darüber hinaus kann sich die Chloridbelastung auf weitere Vorhaben, wie die Gewinnung von Kies und Sand sowie auf wasserwirtschaftliche Maßnahmen auswirken. Insbesondere hier gilt es frühzeitig auf die weitere Entwicklung reagieren zu können und damit eine unbeabsichtigte Verschlechterung der Ressource, aber auch Fehlinvestitionen für die Nutzer zu vermeiden.

Eine Abschätzung des Gefährdungspotenzials und daraus abgeleitete Bewertungen und Handlungsoptionen können sachgerecht nur bei einer grenzüberschreitenden Betrachtung der Versalzungsproblematik erfolgen. Deshalb haben sich Partner aus Frankreich und aus Baden-Württemberg mit Unterstützung durch das INTERREG IIIA- Programm der EU zusammengetan, um das Problem gemeinsam anzugehen und ein hierzu geeignetes Prognosewerkzeug zu entwickeln. Durch das Projekt *“Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim”* (kurz *“Chloridmodellierung”*) wird erstmals ein grenzüberschreitendes Grundwassermodell bereitgestellt, das die derzeitige Verbreitung der Salzfahren im Untergrund nachzeichnet und Aussagen zu deren weiterer Entwicklung ermöglicht. Die Ergebnisse der Prognoseberechnungen zeigen, dass die hohen Belastungen aus der Vergangenheit noch lange nachwirken. Das erstellte Modell ermöglicht es, die Grundwasserbewirtschaftung auf eine fachlich fundierte Basis zu stellen. Darüber hinaus dient es der Umsetzung der EU- Wasserrahmenrichtlinie.

Wesentliche Grundlagen wurden im vorausgegangenen INTERREG-II- Projekt *“Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters*

Avant-propos

La pollution saline des eaux souterraines par les chlorures est connue depuis longtemps dans la partie méridionale du Fossé rhénan. Au niveau du Rhin elle provient essentiellement des infiltrations de saumure dans les anciens bassins de stockage de l'industrie de la potasse française et allemande. Du point de vue de la protection des eaux souterraines, les séquelles d'une gestion autrefois trop insouciance des résidus salins n'ont pas fini de poser problème dans la bande rhénane entre Fessenheim et le Kaiserstuhl.

Des teneurs élevées en chlorures peuvent restreindre l'utilisation de nos précieuses ressources en eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable, l'industrie ou l'agriculture. La pollution saline peut par ailleurs poser problème pour d'autres activités comme l'extraction de granulats dans les gravières, mais aussi pour l'aménagement des cours d'eau. Une intervention précoce est un gage d'efficacité pour prévenir une éventuelle dégradation de la ressource mais aussi de mauvais investissements de la part des usagers.

L'évaluation des risques potentiels ainsi que l'examen d'éventuelles mesures de dépollution nécessitent une étude transfrontalière de la problématique de la salure. C'est pourquoi les partenaires de France et du Bade-Wurtemberg se sont associés dans le cadre du programme INTERREG IIIA pour aborder le problème en commun et pour développer un outil de prévision adapté. Le projet *“Outil de gestion transfrontalier de la pollution saline des eaux souterraines entre Fessenheim et Burkheim”* (en abrégé : *“modélisation des chlorures”*) a permis pour la première fois de concevoir un modèle hydrodynamique transfrontalier pour simuler les panaches actuels de chlorures dans la nappe profonde et de prévoir leur évolution future. Les résultats démontrent la persistance à long terme des fortes concentrations historiques. Le modèle constitue une base de travail solide pour la gestion des eaux souterraines, notamment pour répondre aux objectifs fixés par la Directive Cadre sur l'Eau.

Le projet s'est appuyé sur les acquis du précédent projet Interreg-II de *“Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre*

zwischen Fessenheim und Breisach" erarbeitet. Es bestand der gemeinsame politische Wille die Arbeiten zur Chloridbelastung fortzuführen. Das hier präsentierte Projekt reiht sich somit in eine Serie gemeinsamer grenzüberschreitender Projekte zum Schutz des Grundwassers am Oberrhein ein, wie sie vom Deutsch-Französischen Umweltrat als vordringliche Zielrichtung empfohlen wurden.

Durch die breite Basis der von den Akteuren am Oberrhein bisher erfolgreich durchgeführten Projekte zu einem nachhaltigen Grundwasserschutz konnten in einem hohen Maße Synergieeffekte genutzt werden, die wesentlich dazu beigetragen haben, dass unter der Federführung des Regierungspräsidiums Freiburg dieses Projekt realisiert werden konnte.

Wir danken allen am Projekt Beteiligten und wünschen, dass das bereitgestellte Werkzeug auch künftig zum Wohle der Bürger der Region für einen verantwortungsvollen Umgang mit der Ressource Grundwasser genutzt wird.

Fessenheim et Breisach". Il existait de part et d'autre du Rhin une volonté politique commune pour continuer ces travaux sur la pollution par les chlorures. Le présent projet perpétue en cela une lignée de projets transfrontaliers pour la protection de la nappe phréatique du Rhin supérieur, conformément aux recommandations du Conseil Rhénan franco-allemand.

C'est grâce à l'important volume des connaissances acquises et à la bonne synergie entre les travaux transfrontaliers réalisés avec succès pour la protection des eaux souterraines par les différents acteurs de la vallée du Rhin supérieur que ce nouveau projet a pu être mené à bien sous la maîtrise d'ouvrage du *Regierungspräsidium* Freiburg.

Nous remercions l'ensemble des partenaires du projet et souhaitons que la gestion raisonnée des ressources en eaux souterraines rendue possible par ce nouvel outil contribue au bien-être des habitants de la région.



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



Région Alsace
Adrien Zeller
Président du Conseil Régional

Inhaltsverzeichnis / Sommaire

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	17
1.1 Anlass und Hintergrund des Projekts	17
1.2 Zielsetzungen	21
2 Geologisch-hydrogeologischer Rahmen	23
3 Erkundungsmaßnahmen	29
3.1 Geoelektrische Messungen	30
3.1.1 Messverfahren, Auswertung	30
3.1.2 Ergebnisse	34
3.2 Errichtung von Grundwassermessstellen und begleitende Maßnahmen	39
3.2.1 Grundwassermessstelle Faule Waag	42
3.2.2 Grundwassermessstelle Geiswasser tief (GWM 1)	43
3.2.3 Grundwassermessstelle Geiswasser flach (GWM 2)	48
3.3 Überarbeitung der Aquiferbasisgeometrie	53
3.4 Hydrochemische und isotonenhydrologische Untersuchungen	58
3.4.1 Hydrochemische und isotonenhydrologische Untersuchungen	58
3.4.1.1 Grundwasserkomponenten	58
3.4.1.2 Unterscheidung von Grundwässern mit Chlorid geogener und anthropogener Herkunft	67
3.4.1.3 Zusammenfassende Bewertung	73
3.4.2 Flächenhafte tiefendifferenzierte Darstellung der Chloridverteilung	75
3.4.2.1 Tiefenstufe 0 – 30 m u. GOK	77
3.4.2.2 Tiefenstufe 30 – 70 m u. GOK	81
3.4.2.3 Tiefenstufe 70 – 100 m u. GOK	85
3.4.2.4 Tiefenstufe über 100 m u. GOK	87

Sommaire

Avant-propos	3
Synthèse	9
1 Introduction	17
1.1 Motivation et contexte du projet	17
1.2 Objectifs	21
2 Cadre géologique et hydrogéologique	23
3 Travaux de reconnaissance	29
3.1 Campagnes géophysiques	30
3.1.1 Méthode et interprétation	30
3.1.2 Résultats	34
3.2 Mise en place de piézomètres et travaux associés	39
3.2.1 Piézomètre de Faule Waag	42
3.2.2 Piézomètre Geiswasser profond (GWM 1)	43
3.2.3 Piézomètre Geiswasser superficiel (GWM 2)	48
3.3 Révision de la carte du substratum	53
3.4 Etudes chimiques et isotopiques des eaux	58
3.4.1 Caractérisation chimique et isotopique des eaux	58
3.4.1.1 Composantes des eaux souterraines	58
3.4.1.2 Distinction entre chlorures d'origine naturelle et anthropique dans les eaux souterraines	67
3.4.1.3 Conclusions générales	73
3.4.2 Cartographie des chlorures par tranche de profondeur	75
3.4.2.1 Tranche de profondeur 0 à 30 m	77
3.4.2.2 Tranche de profondeur de 30 à 70 m	81
3.4.2.3 Tranche de profondeur 70 à 100 m	85
3.4.2.4 Tranche au-dessous de 100 m	87

4 Grundwasser- strömungs- und Salztransportmodell

4.1 Ziel und Vorgehensweise	89
4.2 Modellaufbau	90
4.3 Modellkalibrierung	92
4.3.1 Stationäre Kalibrierung für den Stichtag 20.10.1986	96
4.3.2 Instationäre Strömung zwischen 1986 und 2005 (Kalibrierungszeitraum)	98
4.3.3 Instationäre Strömung zwischen 1956 und 1986 (Validierungszeitraum)	99
4.4 Salztransportmodellierung zwischen 1956 und 2005	99
4.5 Prognose der Salzverteilung	109
4.6 Szenarienbetrachtungen zum Salztransport	109
4.6.1 Abwehrbrunnen südlich von Breisach	110
4.6.2 Sanierungsbrunnen im Bereich hoher Salzkonzentrationen	112
4.6.3 Absenkung des Wasserspiegels im Baggersee Hartheim	115
4.6.4 Einfluss der Flutung des Retentionsraumes Kulturwehr Breisach	115

5 Bewertung und Ausblick

5.1 Bewertung	121
5.1.1 Chloridverteilung 2006, aktuelle Gefährdungen für Nutzungen	122
5.1.2 Prognose der Entwicklung bis 2056 und künftige Auswirkungen auf bestehende Nutzungen	123
5.2 Sanierungs- und Sicherungsszenarien	124
5.3 Einfluss des Retentionsraums Kulturwehr Breisach	125
5.4 Ausblick	125

Literatur	128
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	130
Beilage 1 CD-Rom	137

4 Modélisation des écoulements et du transport de sel

4.1 Objectifs et démarche	89
4.2 La construction du modèle	90
4.3 L'étalonnage du modèle	92
4.3.1 Etalonnage en régime permanent de la situation de référence du 20.10.1986	96
4.3.2 Ecoulement transitoire pendant la période d'étalonnage entre 1986 et 2005	98
4.3.3 Hydrodynamique en régime transitoire entre 1956 et 1986 (période de validation)	99
4.4 Modélisation du transport de l'eau salée entre 1956 et 2005	99
4.5 Prévision de l'évolution des concentrations en sel	109
4.6 Scénarios concernant le transport de l'eau salée	109
4.6.1 Puits de fixation au Sud de Breisach	110
4.6.2 Puits de dépollution dans la zone à forte concentrations	112
4.6.3 Baisse de la surface libre de la gravière d'Hartheim	115
4.6.4 Influence de l'inondation du polder près du barrage de Breisach	115

5 Conclusions et perspectives

5.1 Conclusions	121
5.1.1 Répartition des chlorures en 2006, impacts avérés pour les utilisateurs	122
5.1.2 Prévision de l'évolution jusqu'en 2056 et impact futur sur les usages	123
5.2 Scénarios de remédiation et de prévention	124
5.3 Influence du polder du barrage agricole de Breisach	125
5.4 Perspectives	125

Bibliographie	128
Liste des illustrations et des tableaux	130
Annexes 1 CD-Rom	137

Zusammenfassung

Ausgangssituation

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 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”* (Région Alsace Hrsg. 2000) war 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 machen zu können, waren deshalb weiterführende Untersuchungen erforderlich. Das INTERREG-II-Projekt *“Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinischen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach”*, (RPF 2002) verbesserte den Kenntnisstand über die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet beiderseits des Rheins. Damit wurden die Grundlagen für die Beurteilung der Ausbreitung und Entwicklung der insbesondere im tiefen Grundwasser festgestellten sehr hohen Chloridkonzentrationen geschaffen. Hierzu wurden die Morphologie der Aquiferbasis, die Durchlässigkeiten in den tieferen Aquiferabschnitten, die Grundwasserbeschaffenheit und die Wechselwirkungen mit den oberirdischen Gewässern weiter erkundet. Mit den neu gewonnenen Daten wurde ein erstes detailliertes grenzüberschreitendes dreidimensionales numerisches Strömungs- und Transportmodell erstellt.

Ziel und Durchführung des Projektes

Mit dem INTERREG-III-Projekt *“Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grund-*

Synthèse

Contexte

Les infiltrations de sel des bassins de dé-cantation et des terrils de l'industrie française et allemande de la potasse qui, bien que pratiquement stoppées aujourd'hui, ont duré pendant de longues années, sont à l'origine de concentrations élevées en chlorures dans la nappe, de plusieurs grammes par litre, notamment à grande profondeur, dans le secteur étudié. Cette salure peut avoir un impact négatif sur les aménagements hydrauliques, l'exploitation des gravières et surtout sur l'approvisionnement en eau potable de la région. Côté allemand un premier état des lieux de l'extension de cette pollution saline avait été fait en 1997 par le Service géologique de l'époque dans le rapport *“Etat des lieux sur la pollution saline de la nappe dans la plaine du Rhin supérieur au Sud du Kaiserstuhl”*.

Dans le cadre du précédent projet INTERREG-II *“Inventaire transfrontalier de la qualité des eaux souterraines de la plaine du Rhin supérieur”* (Région Alsace 2000) un dôme du substratum, jusque là inconnu, avait été découvert en rive ouest du Rhin près de Balgau (F), en aval de l'île de Fessenheim ; ce dôme pouvait avoir une influence déterminante sur la propagation de la salure de la nappe dans ce secteur.

Des études complémentaires étaient dès lors nécessaires pour mieux comprendre les écoulements des eaux souterraines salées de ce secteur. Le projet INTERREG-II suivant de *“Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach”* (RPF 2002) a permis d'améliorer les connaissances géologiques et hydrogéologiques sur ce secteur des deux côtés du Rhin. Les bases de connaissance indispensables étaient alors réunies pour pouvoir étudier l'extension et la propagation de la pollution saline et particulièrement le devenir des eaux profondes de la nappe très chargées en chlorures. Ces connaissances portaient sur la morphologie du substratum constituant la base de l'aquifère, les perméabilités dans les alluvions profondes, la qualité chimique des eaux souterraines et les échanges avec les cours d'eau de surface. Grâce à ces nouvelles données un premier modèle hydrodynamique détaillé en trois dimensions était bâti pour reproduire les écoulements des eaux souterraines et le transport des chlorures.

Objectifs et déroulement du projet

Le projet INTERREG-III *“Outil de gestion transfrontalier de la pollution saline des eaux souterraines entre*

wasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim" wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Bewertung und Prognose der Ausbreitung der Chloridbelastung.
- Folgeabschätzung der Auswirkungen der Chloridbelastung auf die Qualität der Ressource, bestehende und geplante Maßnahmen und auf Wassernutzungen (Öffentliche Wasserversorgung, Feldberegnung, Kiesabbau, Hochwasserrückhaltung am Rhein).
- Bereitstellung eines grenzüberschreitenden Bewirtschaftungsmodells zur Maßnahmenplanung bzw. als Entscheidungshilfe im Rahmen von Genehmigungsverfahren.

Folgende Maßnahmen wurden durchgeführt:

- Erkundung der Chloridfahnen und des Grundwasserleiters durch innovative geophysikalische Verfahren.
- Einrichtung von 3 tiefen Grundwassermessstellen.
- Hydrochemische und isotopehydrologische Untersuchungen in ca. 40 Messstellen.
- Erstellung eines prognosefähigen Grundwassermodells im Hinblick auf die Chloridbelastung im Untersuchungsgebiet.

Geologisch-hydrogeologischer Rahmen

Der Grundwasserleiter wird im Untersuchungsgebiet von der quartären Grabenfüllung aus sandigen Kiesen mit unterschiedlichen Schluffgehalten gebildet. An ihrer Basis liegen gering durchlässige altquartäre und tertiäre Sedimente. Die Breisgau-Formation (ältere Kiese) bildet den Unteren, die Neuenburg-Formation (jüngere Kiese) den Oberen Grundwasserleiter. Über größere Flächen verbreitete hydraulisch wirksame tonigschluffige Trennschichten fehlen im Untersuchungsgebiet.

Die *Breisgau-Formation* ist im zentralen Untersuchungsgebiet mit Ausnahme des Breisacher Münsterberges, eines schmalen Saumes entlang des Westrandes des Kaiserstuhls und im Bereich einer Aufragung des tertiären Festgesteins südöstlich von Bremgarten überall verbreitet. Die Mächtigkeit der Breisgau-Formation liegt in Rheinnähe östlich von Geiswasser bis südlich von Burkheim zwischen 90 und 100 m. Im Becken von Geiswasser werden Mächtigkeiten von über 190 m erreicht. Über dem Balgauer Dom südlich von Namsheim ist die Breisgau-Formation nur 55 m mächtig.

Die *Neuenburg-Formation* ist im gesamten Untersuchungsgebiet verbreitet. Die Mächtigkeit der Neuenburg-Formation liegt im zentralen Bereich des Bearbeitungsgebietes zwischen Fessenheim und Burkheim

Fessenheim et Burkheim" s'était donné les objectifs suivants :

- Evaluation et prévision de la propagation de la salure,
- Evaluation de l'impact de la pollution saline sur la qualité de la ressource, sur les aménagements actuels et prévus et sur les usages (alimentation en eau potable, irrigation, exploitation de gravières, mesures de rétention des crues du Rhin),
- Mise au point d'un modèle de gestion transfrontalier pour la planification d'aménagements hydrauliques et d'aide à la décision dans le cadre de procédures d'autorisation.

Les travaux suivants ont été menés :

- reconnaissance des langues salées et de l'aquifère par des méthodes géophysiques innovantes,
- forage de 3 piézomètres profonds,
- études géochimiques et isotopiques des eaux souterraines sur 40 points de mesure,
- construction d'un modèle hydrodynamique pouvant simuler la pollution saline dans le secteur d'étude.

Cadre géologique et hydrogéologique

L'aquifère est constitué dans le secteur étudié par le remplissage alluvial quaternaire de sables et de graviers avec des proportions variables de silts. A sa base on trouve des sédiments peu perméables d'âge quaternaire ancien à pliocène. La formation de Breisgau (*alluvions anciennes*) à la base et la formation de Neuenburg (*alluvions récentes*) au sommet constituent les aquifères inférieur et supérieur. Il n'existe pas dans le secteur d'intercalaires peu perméables suffisamment continus pour constituer une séparation hydraulique.

La *formation de Breisgau* est représentée dans tout le secteur d'étude, à l'exception du Münsterberg à Breisach, d'une étroite bande le long de la bordure ouest du Kaiserstuhl et d'un dôme de socle tertiaire au SE de Bremgarten. L'épaisseur de la formation de Breisgau est de 90 à 100 m dans la bande rhénane depuis l'Est de Geiswasser jusqu'au Sud de Burkheim. Dans la "fosse" de Geiswasser l'épaisseur atteint plus de 190 m, tandis qu'elle est réduite à 55 m sur le dôme de Balgau au Sud de Namsheim.

La *formation de Neuenburg* est représentée dans tout le secteur étudié. Son épaisseur varie de 20 à 50 m dans la partie centrale du secteur entre Fessenheim et Burkheim. A l'Ouest de Grezhausen les épaisseurs

zwischen 20 und 50 m. Östlich von Grezhausen steigen die Mächtigkeiten auf 75 m an.

Das Grundwasser strömt in den quartären Kiesen generell vom Schwarzwaldrand in nordwestliche und von den Vogesen in nordöstliche Richtung dem Rhein zu. In Rheinnähe biegt die Fließrichtung um und verläuft annähernd rheinparallel von Süden nach Norden.

Die oberirdischen Gewässer stehen in einer engen Wechselbeziehung zum Grundwasser. Im Süden bildet der Rhein die Vorflut für das Grundwasser. Ab der Stauwurzel des Kulturwehres Breisach, etwa auf Höhe der Domäne Rothaus, infiltriert er in das Grundwasser. Die Baggerseen, die im Untersuchungsgebiet liegen, werden derzeit alle betrieben. Sie sind hydraulisch an das Grundwasser angeschlossen. Die Schwarzwaldtälerbäche infiltrieren auf ihrem Weg zum Rhein in das Grundwasser. Die Möhlin durchfließt den Baggersee Uhl. Sie wird nördlich des Sees am Möhlinwehr aufgestaut. Im Unterwasser des Wehres wirkt die Möhlin für das Grundwasser als Vorflut und nimmt bis zum Rhein bedeutende Mengen an Grundwasser auf.

Nördlich von Breisach ist der Flurabstand des Grundwassers sehr gering. Die oberirdischen Gewässer nehmen in diesem Gebiet Grundwasser auf.

Die Durchlässigkeit im oberen Abschnitt der Breisgau-Formation ist im Untersuchungsgebiet auf baden-württembergischer Seite in Rheinnähe am höchsten. Sie liegt hier in der Größenordnung von $k_f = 8-10 \cdot 10^{-3}$ m/s. Für den unteren Abschnitt der Breisgau-Formation liegen im Untersuchungsgebiet nur wenige Werte vor.

Im oberen Abschnitt der Neuenburg-Formation (obere 20 Meter) liegen die höchsten Durchlässigkeiten in einer breiten Zone auf elsässischem Gebiet sowie in einer schmalen rinnenartigen Struktur unter dem Rhein.

Im unteren Abschnitt der Neuenburg-Formation (Restmächtigkeit bis zur Breisgau-Formation) sind die Durchlässigkeiten geringer als in der darüber liegenden Abfolge, die Durchlässigkeitsunterschiede sind innerhalb des unteren Abschnittes weniger stark ausgebildet.

Erkundungsmaßnahmen

Die durchgeführten Erkundungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet hatten hauptsächlich folgende Zielsetzungen:

- Verbesserung des Verständnisses für die Transportmechanismen der chloridhaltigen Lösungen.

augmentent jusqu'à 75 m.

La nappe libre s'écoule globalement dans les alluvions en direction du Rhin, du piémont de la Forêt-noire vers le NW et du piémont des Vosges vers le NE. A proximité du Rhin l'écoulement tourne en direction du Nord pour suivre approximativement la direction d'écoulement du Rhin du S vers le N.

Les eaux superficielles sont en liaison étroite avec les eaux souterraines. Au Sud le Rhin est en position de drainage de la nappe. A partir du pied du barrage agricole de Breisach, approximativement à la hauteur du domaine Rothaus, le Rhin s'infiltré dans la nappe. Les gravières en eau situées dans le secteur d'étude sont toutes en activité. Elles en communication hydraulique avec la nappe. Les ruisseaux de la Forêt-noire s'infiltré dans la nappe le long de leur cours jusqu'au Rhin. La Möhlin traverse la gravière Uhl. Elle est arrêtée par le barrage de la Möhlin au Nord de la gravière. En aval de ce barrage la Möhlin draine la nappe et collecte des quantités importantes d'eau souterraine jusqu'à sa confluence avec le Rhin.

Au Nord de Breisach le niveau de la nappe est très proche de la surface. Les cours d'eau superficiels sont en position de drainage de la nappe.

Dans la partie badoise du secteur d'étude, la perméabilité de la partie supérieure de la formation de Breisgau est plus élevée à proximité du Rhin. Elle se trouve dans une fourchette de $8 \text{ à } 10 \cdot 10^{-3}$ m/s. Nous avons peu de données en ce qui concerne les perméabilités de la partie inférieure de la formation de Breisgau.

Dans la partie supérieure de la formation de Neuenburg (les premiers 20 m) les perméabilités sont les plus élevées dans une large zone côté alsacien ainsi que dans une étroite bande rappelant un chenal en-dessous du Rhin.

Dans la partie inférieure de la formation de Neuenburg (de 20 m de profondeur à la formation de Breisgau), les perméabilités sont plus basses que dans la partie supérieure. Il semble y avoir moins de contrastes de perméabilité dans cette partie inférieure.

Travaux de reconnaissance

Les travaux de reconnaissance complémentaires menés dans la zone d'étude avaient pour objectifs principaux :

- Une amélioration de la compréhension des mécanismes de transport des eaux salées,

- Tiefendifferenzierte Erfassung und Darstellung der Chloridverbreitung.
- Hydrochemische und isopenhydrologische Charakterisierung der Grund- und Oberflächenwässer.

Im Rahmen des INTERREG-III-Projektes wurde das Verfahren der Gleichstrom-Geoelektrik eingesetzt. Es liefert entlang der gemessenen Profillinien zweidimensionale Informationen über den Untergrund. Die geoelektrische Erkundung diente zur Klärung der Tiefenlage der Aquiferbasis, der Salzgehalte im Grundwasser sowie der Optimierung der Bohransatzpunkte. Die Messungen wurden durch das BRGM Orléans durchgeführt. Das Verfahren wurde bereits früher vielfach im elsässischen Kalibecken eingesetzt und hat sich dort bei der Abgrenzung der Salzfahren im Abstrom der Kalihalden bewährt.

Zu Erkundung der Untergrundverhältnisse sowie der hydrochemischen Beschaffenheit des Grundwassers wurden drei Bohrungen abgeteuft und zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Darin wurden Pumpversuche, bohrlochgeophysikalische Messungen und Grundwasseruntersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse wurden zur Eichung der geoelektrischen Messungen, zur Überarbeitung der Aquiferbasiskarte und zur hydrochemischen Interpretation herangezogen.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden drei hydrochemische und isopenhydrologische Messkampagnen durchgeführt. Die Interpretation der Hauptinhaltsstoffe, der Spurenstoffe und der Isotopengehalte in den Grundwässern des Untersuchungsgebietes sowie in den Ausgangsgesteinen zeigt, dass nur die vergleichende Auswertung mehrerer Parameter Hinweise auf die Herkunft der Salzgehalte im Grundwasser liefern kann. Eindeutige Marker konnten trotz des im Vergleich zu früheren Untersuchungen deutlich ausgeweiteten Parameterumfanges nicht identifiziert werden. Die Unterscheidung zwischen einer geogenen und einer anthropogenen Herkunft des Chlorids anhand der Hauptinhaltsstoffe ist nicht möglich. Einen aussichtsreichen Ansatz zur Unterscheidung bilden die Konzentrationen der Spurenstoffe Rubidium und Strontium in Kombination mit den Befunden der Isotopenmessungen.

Im Untersuchungsgebiet sind die hohen Chloridkonzentrationen im Grundwasser in der Neuenburg- und Breisgau-Formation überwiegend anthropogenen Ursprungs. Sie stammen aus den versickerten Salzlaugen der Kaliindustrie. Bei Messstellen im

- La localisation des langues salées tant dans leur extension surfacique que dans leur position en profondeur dans l'aquifère,
- Une caractérisation des eaux souterraines et des eaux de surface du point de vue géochimique et isotopique.

Dans le cadre du projet Interreg III on a employé la méthode des panneaux électriques qui utilise du courant continu. Cette méthode permet d'obtenir des informations sur des profils 2D du sous-sol. La reconnaissance géophysique avait pour objectifs la localisation du substratum de l'aquifère, l'emplacement des langues salées en profondeur, et l'optimisation de l'emplacement des piézomètres. Les mesures ont été réalisées par une équipe du BRGM Orléans. La méthode avait déjà été employée plusieurs fois avec succès dans le Bassin potassique pour localiser les langues salées en aval des terrils des mines de potasse

Trois forages ont été forés et équipés en piézomètres dans le but de reconnaître la lithologie de l'aquifère ainsi que la composition chimique des eaux souterraines. On y a effectué des essais de pompage, des diagraphies et des analyses des eaux souterraines. Les résultats de ces travaux ont été utilisés pour recalculer les profils géophysiques, pour réviser la carte du substratum et pour l'interprétation de la chimie des eaux.

Trois campagnes de prélèvements et d'analyses chimiques et isotopiques des eaux souterraines ont été menées dans le cadre du projet Interreg III. L'examen des éléments majeurs, des éléments traces et des isotopes des eaux souterraines du secteur étudié ainsi que des roches impliquées montre qu'il est nécessaire de croiser plusieurs paramètres pour pouvoir interpréter l'origine du contenu en sels des eaux souterraines. Il n'a pas été possible de trouver des marqueurs non ambigus malgré la prise en compte de beaucoup plus de paramètres que dans les études précédentes. La distinction entre une origine géologique et une origine anthropique des chlorures n'est pas possible d'après les éléments majeurs. Par contre des éléments intéressants pour cette distinction sont apportés par les concentrations des éléments traces rubidium et strontium en combinaison avec les résultats des études isotopiques.

Les fortes concentrations en chlorures des eaux des alluvions des formations de Neuenburg et de Breisgau sont essentiellement d'origine anthropique dans le secteur d'étude, et proviennent des infiltrations des saumures de l'industrie de la potasse. Les

Tertiär und in der Iffezheim-Formation ist vermutlich eine geogene Komponente beteiligt.

Grundwasserströmungs- und Transportmodell

Mit dem numerischen Grundwassermodell wurde die bisherige Ausbreitung der Salzfahnen im Raum Fessenheim/Burkheim nachgebildet, die weitere Entwicklung prognostiziert und Szenarienbetrachtungen zu wasserwirtschaftlichen Maßnahmen sowie zu Sanierungs- bzw. Sicherungsmöglichkeiten durchgeführt.

Das Modell wurde auf der Basis der aktuellsten geologischen und hydrogeologischen Erkenntnissen und der Parameter des INTERREG-III Modellierungsvorhaben "MoNit" aufgebaut. Zur Modellierung der Strömung und des Transports wurde die Software *Spring* der Fa. Delta-h verwendet, die mit finiten Elementen arbeitet.

Nach dem Modellaufbau wurde das Strömungsmodell stationär und instationär über die Periode 1956 – 2005 kalibriert. Dies erfolgte durch Variation der Durchlässigkeiten, der Leakagekoeffizienten an den oberirdischen Gewässern und der Speicherkoeffizienten bis eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen vorlag.

Im Anschluss an die Strömungskalibrierung wurde das Modell zur Nachbildung der dichtebehafteten Salztransportprozesse erweitert. In einer Sensitivitätsstudie wurde die erforderliche vertikale Netzverfeinerung im Bereich der Salzfahne ermittelt und der Salzeintrag über die vorhandenen Informationen abgeschätzt. In einer umfassenden Kalibrierung des Salztransportmodells wurden der durchflusswirksame Hohlraumanteil und insbesondere die Durchlässigkeiten in der Breisgau-Formation bestimmt, so dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Salzkonzentrationen und deren zeitlicher Entwicklung vorlag. In diesem Zusammenhang war wichtig, die derzeitige gemessene Chloridverteilung dreidimensional nachzubilden, die zeitliche Entwicklung der hoch konzentrierten Salzlauge nach der Inbetriebnahme der Absetzbecken zu simulieren und die in den letzten 10 Jahren gemessenen Effekte im Raum Breisach, wie z.B. die Auswirkungen durch den Abstau des Möhlinwehres im Jahr 2003, nachzuvollziehen.

Mit dem kalibrierten Salztransportmodell lassen sich die derzeitige Salzverteilung numerisch beschreiben

piézomètres crépinés dans le Tertiaire et dans la formation d'Iffezheim portent probablement une part d'eaux profondes.

Modélisation hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique a permis de reproduire la répartition actuelle des langues salées dans le secteur de Fessenheim à Burkheim, de simuler leur évolution future et de tester des scénarios impliquant des aménagements hydrauliques ainsi que des opérations éventuelles de remédiation ou de prévention.

Le modèle a été construit sur la base des connaissances géologiques et hydrogéologiques les plus récentes et des paramètres issus du programme INTERREG-III "MoNit" de modélisation de la pollution par les nitrates dans la vallée du Rhin supérieur. Le logiciel utilisé pour modéliser l'hydrodynamique et le transport est le logiciel *Spring* de Delta-h utilisant les éléments finis.

Après la construction du modèle, ce dernier a fait l'objet d'un calage en régime permanent et en régime transitoire de 1956 à 2005. Ce calage a été effectué en faisant varier les perméabilités, les coefficients d'échange avec les cours d'eau superficiels et les coefficients d'emmagasinement jusqu'à obtenir une correspondance optimale entre les hauteurs piézométriques observées et calculées.

Le modèle hydrodynamique une fois calé a ensuite été utilisé pour modéliser les processus d'écoulement des saumures avec prise en compte de l'effet densitaire. Une étude de sensibilité a été menée pour définir le découpage vertical dans la zone de la langue salée et estimer les infiltrations de saumure sur la base des informations disponibles. Le modèle de transport a été recalé en ajustant la porosité efficace et surtout les perméabilités de la formation de Breisgau afin d'obtenir une correspondance acceptable entre les concentrations en chlorures observées et calculées et leur évolution dans le temps. Dans ce contexte il était important de représenter la répartition actuelle des chlorures en trois dimensions, de simuler la propagation des saumures concentrées depuis la mise en service des bassins-tampons et de reproduire les effets observés sur les 10 dernières années dans le secteur de Breisach, comme par exemple l'impact de la mise en eau du barrage de la Möhlin en 2003.

Le modèle hydrodynamique de transport ainsi calé permet de décrire numériquement la répartition

und Prognosen hinsichtlich der weiteren Entwicklung der Salzfahne durchführen. Das kalibrierte Salztransportmodell ermöglicht Szenarienrechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen von veränderten Grundwasserentnahmen, der Flutung von Retentionsräumen oder der Veränderung von Baggerseegeometrien. Darüber hinaus können mögliche Sanierungs- bzw. Sicherungsszenarien exemplarisch untersucht werden.

Der Schwerpunkt der Bearbeitung lag auf der Nachbildung einer plausiblen zeitlichen Entwicklung und der möglichst genauen räumlichen Verteilung der Chloridbelastung, wie sie insbesondere für die jüngere Vergangenheit auf Grundlage verschiedener Untersuchungen bekannt ist. Aufgrund der Unsicherheiten beim Chlorideintrag, bei der Interpretation der komplexen hydrogeologischen Verhältnisse (Verteilung der Aquiferkenngößen) und der lokalen Verhältnisse an den Messstellen bezüglich der Chloridmessungen ist eine exakte Nachbildung sämtlicher gemessener Chloridgehalte in den Grundwassermessstellen und Brunnen dennoch nur mit gewissen Einschränkungen möglich. Mit dem Grundwassermodell können belastbare Aussagen zur Herkunft und Verbreitung der Salzfahnen getroffen werden. Es wurden Prognoseberechnungen bis in das Jahr 2056 durchgeführt. Nach den Modellberechnungen wird sich die Chloridfahne nicht mehr weiter nach Norden ausdehnen. Die hohen Chloridkonzentrationen über 5 g/l im Belastungsschwerpunkt im tiefen Bereich nördlich der Fessenheimer Insel halten jedoch noch jahrzehntelang an. Im oberflächennahen und mittleren Tiefenbereich ist zu erwarten, dass die Chloridkonzentrationen zurückgehen, wobei sich die Chloridfahnen in ihrer Lage kaum verändern. Es ist daher nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zu erwarten, dass weitere Nutzungen gefährdet sind. Insbesondere ergeben sich im Gebiet der Wasserversorgungen von Breisach und Vogtsburg keine Anzeichen eines steigenden Trends. Die betrachteten Sanierungs- und Sicherungsszenarien ergaben, dass sie auf Grund der erforderlichen hohen Investitionskosten, der sehr hohen Pumpraten über Jahrzehnte hinweg, sowie der damit verbundenen großräumigen Grundwasserspiegelabsenkungen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Verhältnismäßigkeit derzeit nicht vertretbar sind.

Mit diesem Modell liegt jetzt ein Planungswerkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid im rheinischen Gebiet zwischen Fessenheim und Burkheim vor. Das Modell soll weiterhin für das Monitoring des gefährdeten Grundwasserkörpers im Sinne der Wasserrah-

aktuelle de la salure et de faire des prévisions sur l'évolution future des langues salées. Le modèle permet aussi de simuler des scénarios pour évaluer l'impact de modifications de pompages, de mise en eau de polders et l'extension ou l'approfondissement de gravières. De plus il permet d'évaluer et de comparer des projets éventuels de remédiation ou des mesures de prévention.

Le point principal du travail de modélisation était de pouvoir reproduire une évolution dans le temps plausible et une répartition spatiale aussi précise que possible de la pollution saline, telle qu'elle apparaît d'après les données disponibles, surtout dans la période récente. En raison des incertitudes sur les apports en chlorures, des difficultés d'interprétation d'un environnement hydrogéologique complexe (répartition des paramètres hydrodynamiques) et des conditions locales au niveau des points de prélèvement des analyses de chlorures, il n'est possible de reproduire les concentrations en chlorures mesurées dans tous les piézomètres et puits de captage que de façon approximative. Pourtant le modèle hydrodynamique permet de donner des réponses fiables sur l'origine et l'évolution des panaches d'eaux salées. Des prévisions d'évolution étaient calculées jusqu'en 2056. D'après les simulations le panache salé ne devrait pas s'étendre plus en aval dans l'avenir. Par contre les concentrations très élevées de plus de 5g/l de la pollution principale au Nord de l'île de Fessenheim seront encore présentes dans des dizaines d'années. On peut s'attendre à ce que les concentrations en chlorures baissent dans les tranches superficielles et moyenne de la nappe, mais avec peu de changements sur la localisation des panaches. Ceci implique que d'autres captages AEP ne devraient pas être touchés. En particulier il n'y a pas d'indication d'une tendance à l'augmentation dans les secteurs de captages AEP de Breisach et Vogtsburg. L'évaluation des scénarios de remédiation et de prévention étudiés montre que les coûts en investissement et en pompage à fort débit avec un rabattement de la nappe pendent des dizaines d'années représenteraient un effort financier énorme, de sorte que la faisabilité économique et l'adéquation d'une telle opération sont actuellement non justifiables (coût disproportionné)

Avec ce modèle on dispose d'un outil de gestion pour l'évaluation et la prévision de la pollution saline dans la bande rhénane entre Fessenheim et Burkheim. Ce modèle devrait pouvoir être utilisé dans l'avenir pour la surveillance de cette masse d'eau à risque au sens de la Directive cadre sur l'eau et pour l'aide à la déci-

menrichtlinie und als Entscheidungshilfe für Genehmigungsbehörden Verwendung finden. Für die kontinuierliche weitere Nutzung und Weiterentwicklung des Werkzeuges ist die Einrichtung einer gemeinsamen grenzüberschreitenden Plattform am Oberrhein für die Weiterführung von solchen Modellsystemen wünschenswert.

sion aux autorités chargées de la gestion des eaux souterraines. Pour cela il serait utile qu'une plateforme transfrontalière soit créée au niveau du Rhin supérieur pour la maintenance et l'utilisation de tels outils de modélisation.

1 Einleitung

1.1 Anlass und Hintergrund des Projekts

Das Grundwasser im südlichen Oberrheingraben ist für die Versorgung der Region mit Trink- und Brauchwasser von herausragender Bedeutung. Nordwestlich von Heitersheim und Buggingen sowie beiderseits des Rheins zwischen Fessenheim im Süden und Burkheim am Kaiserstuhl im Norden weist das Grundwasser bereichsweise hohe Chloridgehalte auf (Abb. 1.1). Die Grundwassernutzungen sind hierdurch gefährdet. An zahlreichen Messstellen, insbesondere in größeren Tiefen wird das Qualitätsziel der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) für das Grundwasser von 250 mg Chlorid/l überschritten. Auf deutscher Seite wurde deswegen ein ca. 32 km² großes Gebiet als sogenannter gefährdeter Grundwasserkörper abgegrenzt, der das Ziel des guten chemischen Zustands gemäß WRRL nicht erreicht und somit weitere Maßnahmen erfordert. Zudem besteht in der Region aufgrund der Ungewissheit über die weitere Ausbreitung der Grundwasserbelastung die Besorgnis künftiger weiterer nachteiliger Auswirkungen für die Wassernutzer. Bereits heute kann die Wasserversorgung der Stadt Breisach nur durch eine eingeschränkte Nutzung des neuen Tiefbrunnens bis in eine Tiefe von 16 m sicher betrieben werden. Erhöhte Chloridkonzentrationen sind aus gesundheitlicher Sicht zwar eher unbedenklich, Gehalte über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 250 mg/l verleihen dem Trinkwasser aber einen salzigen Geschmack, Konzentrationen über 500 mg/l werden als unangenehm empfunden. Erhöhte Chloridkonzentrationen haben aber noch andere nachteilige Folgen. Sie können korrosionsfördernd wirken und am Lochfraß im Leitungsnetz maßgeblich beteiligt sein. Außerdem wirken sie sich in der Feldberegnung bei bestimmten Kulturarten nachteilig aus. Dies kann insbesondere für das Gebiet nördlich von Breisach von Bedeutung sein. Aussagen über die künftige Entwicklung der Grundwasserbelastung und damit zu möglichen weiteren Einschränkungen für die Nutzer oder zu Abwehrmaßnahmen konnten bislang nicht getroffen werden.

Die Chloridbelastung ist hauptsächlich die Folge der Reststoffentsorgung des ehemaligen Kalibergbaus in der Region. Die Rückstandssalze wurden entweder auf Halden verbracht, als Laugen wieder untertage versetzt oder – teilweise nach einer Zwischenlagerung in Absetzbecken – in den Rhein eingeleitet.

1 Introduction

1.1 Motivation et contexte du projet

Les eaux souterraines de la nappe rhénane sont d'une importance primordiale pour l'alimentation en eau potable et industrielle dans le Sud du Fossé rhénan supérieur. Cependant elles présentent localement des concentrations trop élevées en chlorures au NW de Heitersheim et de Buggingen ainsi que dans la bande rhénane entre Fessenheim au Sud et Burkheim près du Kaiserstuhl au Nord (fig. 1.1). L'usage des eaux souterraines en est affecté. Dans de nombreux piézomètres, en particulier dans les plus profonds, la limite de qualité de 250 mg/L en chlorures fixée par la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE) est dépassée. Une zone de 32 km² environ a été définie côté allemand comme masse d'eau à risque de ne pas atteindre le bon état prescrit par la DCE et par conséquent nécessitant de prendre des mesures particulières. En outre les usagers des eaux souterraines de la région concernée sont inquiets du fait de l'incertitude sur l'évolution future de cette pollution et sur la possibilité de son extension qui pourrait avoir un impact négatif pour eux. Actuellement l'alimentation en eau potable de la Ville de Breisach est déjà affectée et ne peut être assurée qu'en pompant l'eau à moins de 16 m de profondeur dans le nouveau puits de captage profond. Il est clair que des concentrations un peu élevées en chlorures ne posent pas de problème majeur pour la santé. Des concentrations supérieures à la CMA pour l'eau potable de 250 mg/L donnent à l'eau un goût salé et la rendent désagréable à boire au-delà de 500 mg/L. Des concentrations en chlorures trop élevées ont par contre d'autres conséquences négatives. Elles peuvent activer la corrosion et ainsi participer à l'augmentation des fuites des réseaux de distribution. Par ailleurs elles interdisent l'irrigation de certains types de plantes. Ceci peut représenter un problème important au Nord de Breisach. Jusqu'à présent il n'a pas été possible de faire des prévisions sur l'extension de la pollution saline et son impact potentiel sur les usagers ni de prendre de quelconques mesures de prévention.

La pollution saline est principalement due aux séquelles des rejets de l'industrie minière de la potasse dans la région. Les sels sous-produits du traitement du minerai ont été soit entassés sur des terrils, soit pompés sous forme de saumure dans les travaux souterrains ou rejetés au Rhin, parfois après un passage dans des bassins de décantation.

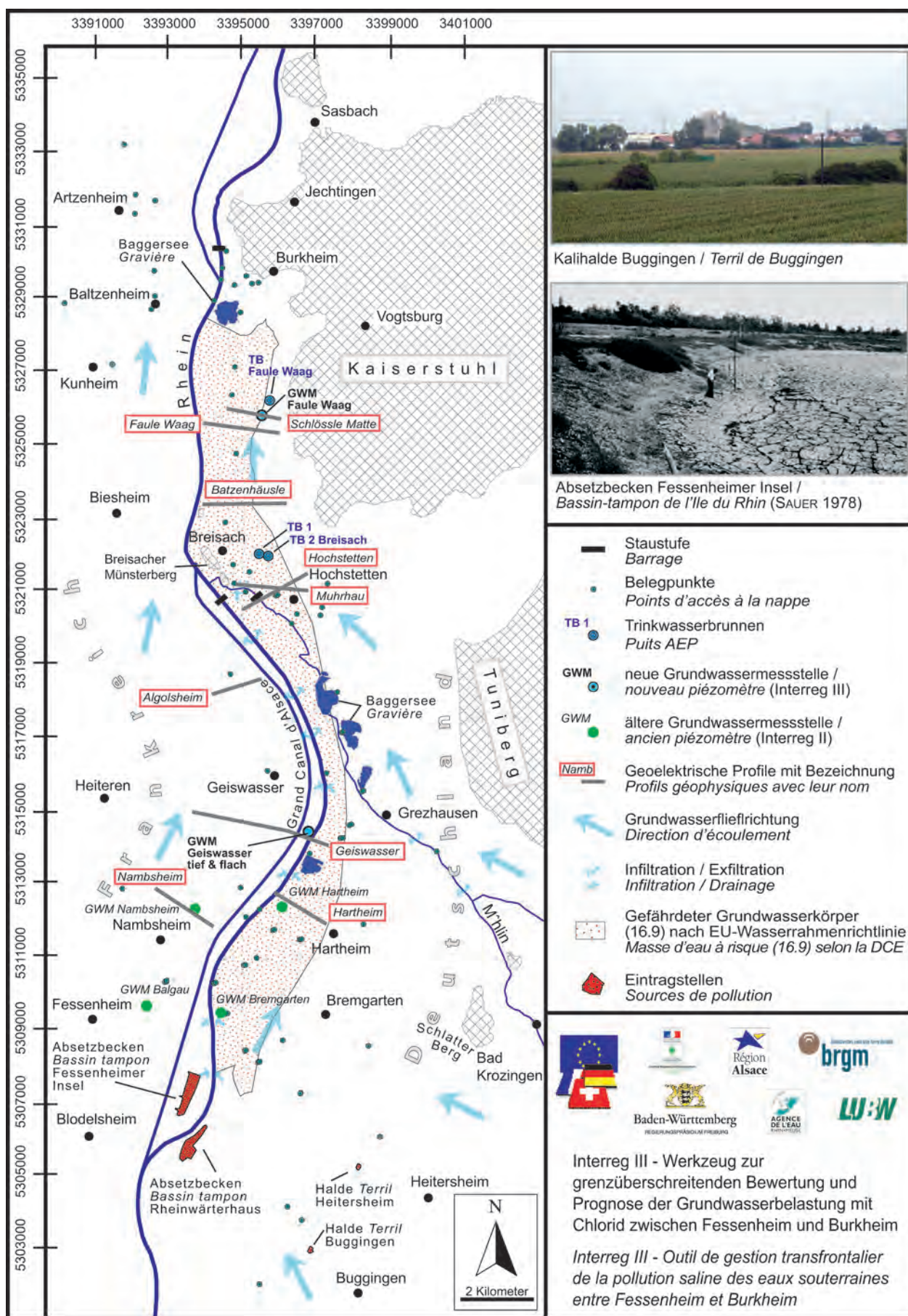


Abbildung 1.1: Übersichtslageplan des Untersuchungsgebietes.

Figure 1.1 : Carte d'ensemble du secteur étudié.

Ein geringer Teil der Grundwasserbelastung stammt aus den inzwischen teilweise abgedeckten Halden auf der badischen Seite, aus denen das versickernde Niederschlagswasser Salzurückstände auswusch und in das Grundwasser transportierte. Die Absetzbecken auf deutscher Seite dienten zum Absetzen von salzigen Schlammrückständen. Zum überwiegenden Teil geht das Chlorid auf die Versickerung von hochkonzentrierter Salzlösung aus nicht abgedichteten Absetzbecken zurück, die bis Mitte der 1970er Jahre von der elsässischen Kaliindustrie betrieben wurden. Sie liegen auf der Fessenheimer Insel zwischen dem Altrhein und dem Grand Canal d'Alsace (Abb. 1.1). Die bei der Kalidüngerproduktion als Reststoff anfallende Sole aus dem Kalibergbaurevier nördlich von Mulhouse wurde in einem offenen Kanal (saumoduc) bei ausreichender Wasserführung direkt in den Rhein eingeleitet. Bei zu geringer Wasserführung des Rheins wurde die Sole in den Becken zwischengespeichert, um sie anschließend dosiert in den Rhein zu leiten. So wurden die für das Rheinwasser vorgegebenen maximalen Salzkonzentrationen eingehalten. Ein Teil der Sole gelangte aus den nicht abgedichteten Becken in den Untergrund und breitet sich bis heute als Chloridfahne in verschiedenen Tiefen und mit unterschiedlichen Konzentrationen in Fließrichtung des Grundwassers nach Norden aus. Grundwasser, in dem viel Salz gelöst ist, ist spezifisch schwerer als "normales" Grundwasser. Deshalb sinkt es nach unten und reichert sich an der Basis der Grundwasser führenden Kiese an (Abb. 1.2).

Der Chlorideintrag in den Untergrund betrug auf deutscher Seite nur einen geringen Prozentsatz vom Eintrag im Elsass. Dies liegt daran, dass die elsässische Kaliproduktion etwa um das 20-fache über der badischen lag und auf elsässischer Seite kein Rückstandssalz in aufgelassene Grubenbereiche verbracht werden konnte. Außerdem erfolgte die Entlastung der Absetzbecken auf elsässischer Seite nur zu etwa 50 % in den Rhein, der Rest versickerte in den Untergrund. Die Lage der Eintragstellen kann der Abb. 1.1 entnommen werden.

Eine erste zusammenfassende Darstellung der Gesamtsituation erfolgte im *"Sachstandsbericht zur Grundwasserversalzung in der Oberrheinebene südlich des Kaiserstuhls"* des damaligen Geologischen Landesamts Baden-Württemberg (GLA 1997). Die Grundwasserbelastung durch Chlorid wurde auch im Rahmen der grenzüberschreitenden Bestandsaufnahmen der Qualität des Grundwassers im Oberrheingraben 1997 (INTERREG-Projekt) und 2003 belegt (Région Alsace 2000, 2005).

Une faible partie de la pollution saline provient des terrils du côté badois, aujourd'hui en partie étanchés, qui sont lessivés par les eaux de pluie qui s'infiltrent et transportent le sel jusqu'à la nappe. Les bassins côté badois servaient à la décantation des résidus de boues contenant du sel. La plus grande partie des chlorures a pour origine les infiltrations de saumures dans les bassins de décantation mal étanchéifiés, qui ont été utilisés comme bassins-tampons jusqu'au milieu des années 1970 par les mines de potasse d'Alsace. Ces bassins se trouvent sur l'île de Fessenheim entre le Vieux Rhin et le Grand Canal d'Alsace. (fig. 1.1) La saumure résiduelle obtenue après la production d'engrais potassique dans les fabriques du bassin potassique alsacien au Nord de Mulhouse étaient évacuées par un canal à ciel ouvert, le saumoduc, jusqu'au Rhin ; lorsque le Rhin était à l'étiage, les saumures étaient temporairement stockées dans les bassins avant rejet pour éviter que le fleuve n'affiche une concentration trop élevée en chlorures. Une partie de cette saumure s'infiltrait dans le sous-sol des bassins insuffisamment étanches et gagnait la nappe, où elle forme encore aujourd'hui une langue d'eau salée à différentes profondeurs et différentes concentrations, qui s'étend vers le Nord avec l'écoulement général des eaux souterraines. Une eau souterraine chargée en sel est plus dense qu'une eau normale, c'est pourquoi elle a tendance à plonger dans la nappe et à se stocker à la base de l'aquifère (fig. 1.2).

La production de potasse côté alsacien était environ 20 fois plus importante que la production badoise, de plus côté français on ne pouvait pas remblayer les travaux miniers avec le sel résiduel. Les saumures stockées dans les bassins-tampons n'étaient rejetées qu'à 50 % environ dans le Rhin, le reste s'infiltrant dans la nappe. Ceci explique pourquoi les rejets miniers ont été beaucoup plus importants côté français, et que les infiltrations de chlorures côté allemand ne représentent qu'un faible pourcentage des infiltrations côté alsacien. La localisation des points d'infiltration est récapitulée dans la figure 1.1.

Une première présentation d'ensemble de la situation avait été présentée dans le rapport *"Sachstandsbericht zur Grundwasserversalzung in der Oberrheinebene südlich des Kaiserstuhls"* préparé par le service géologique du Bade-Wurtemberg (GLA 1997). La pollution des eaux souterraines par les chlorures a également été examinée au cours des inventaires transfrontaliers de la qualité de la nappe du Rhin supérieur de 1997 (projet Interreg) et 2003 menés par la Région Alsace (Région Alsace 2000, 2005).

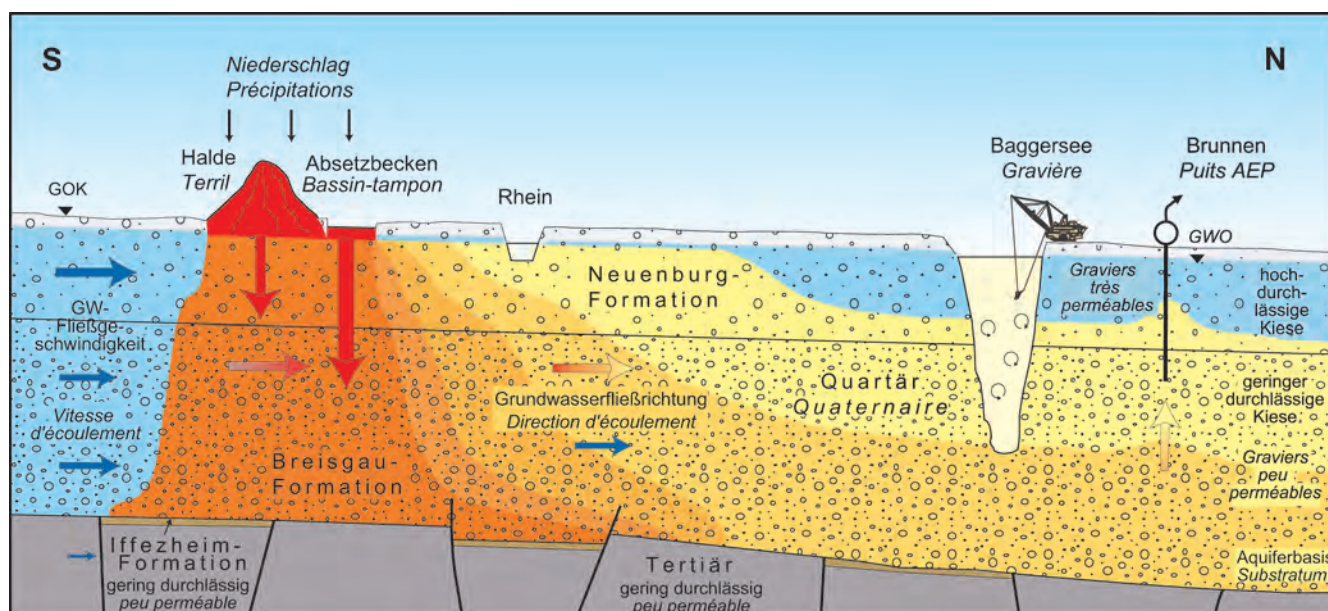


Abbildung 1.2: Prinzipskizze zur Ausbreitung hoch konzentrierter Chloridlösungen im Untergrund.
Figure 1.2 : Schéma de principe de la propagation d'une saumure concentrée dans la nappe.

Die detaillierte Ermittlung der geologischen und hydrogeologischen Grundlagen zur Chloridausbreitung sowie zu den Transportmechanismen der hoch konzentrierten Chloridlösungen zwischen Fessenheim und Breisach erfolgte im Zeitraum zwischen 1999 und 2001 im INTERREG II – Projekt *“Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach”* (RPF 2002).

Auf diesen Ergebnissen baut das im Folgenden vorgestellte INTERREG IIIA – Projekt Nr. 3c.12 *“Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim”* auf.

Es wurde unter der Projekträgerschaft des Regierungspräsidiums Freiburg in der Zeit von April 2006 bis Dezember 2007 durchgeführt. Das Projekt wurde zu 50% durch die Europäische Union im Rahmen des Programms INTERREG IIIA unterstützt.

Projektkofinanzierer auf französischer Seite waren

- die Région Alsace
- die Agence de l'Eau Rhin-Meuse (*AERM*)
- die Direction Régionale de l'Environnement d'Alsace (*DIREN*)
- die Service Géologique Régional Alsace (*BRGM*)

Projektkofinanzierer auf deutscher Seite waren

- das Regierungspräsidium Freiburg (Abt. 5 Umwelt und Abt. 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (*LGRB*))
- die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (*LUBW*)

Daneben waren als Projektpartner das Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald sowie die Städte Breisach und Vogtsburg beteiligt.

1.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Werkzeugs zur Prognose der Ausbreitung der Chloridbelastung im Untergrund und zur Bewertung möglicher Auswirkungen auf wasserwirtschaftliche Maßnahmen. Mit Hilfe dieses Werkzeugs kann frühzeitig auf die weitere Entwicklung reagiert werden. Hierdurch können Verschlechterungen der Ressource und Fehlinvestitionen vermieden werden. Darüber hinaus kann durch das Grundwassermodell im Einzelfall der Umfang der erforderlichen Erkundungsmaßnahmen reduziert bzw. optimal an die jeweilige Fragestellung angepasst werden. Außerdem stellt es Grundlagen für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie zum Monitoring des

Une étude détaillée des conditions géologiques et hydrogéologiques du secteur affecté par la salure ainsi que des mécanismes de transport des saumures dans la nappe a été menée sur la période 1999-2001 dans le cadre du projet Interreg-II de *“Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach”* sous maîtrise d'ouvrage allemande (*Regierungspräsidium Freiburg RPF 2002*).

C'est sur la base de toutes ces connaissances qu'a été développé le projet présenté ici, Projet Interreg IIIA N°3c.12 *“Outil de gestion transfrontalier de la pollution saline des eaux souterraines entre Fessenheim et Burkheim”*.

Il a été mené sous maîtrise d'ouvrage du *Regierungspräsidium Freiburg* sur la période entre avril 2006 et décembre 2007. Le projet a été financé à 50 % par l'Union européenne dans le cadre du programme InterregIIIA.

Les cofinanceurs du projet côté français étaient :

- La Région Alsace,
- L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (*AERM*),
- La Direction Régionale de l'Environnement d'Alsace (*DIREN*),
- Le Service Géologique Régional Alsace (*BRGM*).

Côté allemand les cofinanceurs du projet étaient :

- le Regierungspräsidium Freiburg (Abt. 5 Umwelt et Abt. 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (*LGRB*)),
- le Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (*LUBW*).

Les autres partenaires du projet étaient le Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald ainsi que les Villes de Breisach et de Vogtsburg.

1.2 Objectifs

L'objectif du projet était le développement d'un outil de prévision de l'évolution de la pollution saline dans la nappe et d'évaluation de l'impact possible sur la gestion des eaux. A l'aide de cet outil il devait être possible de réagir à temps aux évolutions futures, afin d'éviter une dégradation de la ressource et des investissements mal placés. En outre le modèle hydrodynamique devait permettre de placer et de dimensionner au mieux les opérations de reconnaissance pour qu'elles répondent de façon optimale aux problèmes posés. Ce modèle doit de plus constituer une base de travail pour la mise en œuvre de la Directive-cadre européenne sur l'eau et notamment du réseau de contrôle opérationnel à mettre en

“gefährdeten Grundwasserkörpers Chlorid” bereit.

Das entwickelte Grundwassermodell soll insbesondere zur Beantwortung folgender Fragen Grundlagen liefern:

- Herkunft und Ausbreitungsverhalten des Chlorids
- Zukünftige Ausbreitung der Chloridfahne
- Langfristige Auswirkungen auf die Grundwasserqualität
- Nachteilige Folgen für Grundwassernutzungen (öffentliche Wasserversorgung, Beregnung)
- Auswirkungen z. B. auf Kiesabbau
- Geeignete Gegenmaßnahmen

Daraus ergeben sich folgende Zielsetzungen für das Projekt:

- Bewertung und Prognose der Ausbreitung der Chloridbelastung
- Abschätzung der Auswirkungen der Chloridbelastung auf die Grundwasserqualität und auf bestehende und geplante Maßnahmen und Grundwassernutzungen (öffentliche Wasserversorgung, Feldberegnung, Kiesabbau, Hochwasserrückhaltung am Rhein)
- Bereitstellung eines grenzüberschreitenden Bewirtschaftungsmodells, das Entscheidungshilfen für bestehende und geplante Maßnahmen liefern kann (z.B. für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie oder bei Genehmigungsverfahren)
- Abschätzungen zur Machbarkeit von Sanierungs-/ Sicherungsvarianten.

place sur les masses d'eau à risque du fait des chlorures.

Le modèle hydrodynamique mis au point doit notamment pouvoir apporter des éléments de réponse aux interrogations suivantes :

- Origine et mode de propagation des chlorures,
- Evolution et extension future de la langue salée,
- Effets à long terme sur la qualité des eaux souterraines,
- Impact potentiel sur les usages (AEP, irrigation),
- Conséquences sur l'exploitation des gravières,
- Mesures de remédiation envisageables.

Il en résulte les objectifs suivants pour le projet :

- Evaluation et prévision de la propagation des langues salées,
- Evaluation des effets de la pollution saline sur la qualité des eaux souterraines et sur les aménagements actuels ou prévus ainsi que sur les usages (AEP, irrigation, gravières, mesures de rétention des crues du Rhin),
- Mise au point d'un modèle de gestion transfrontalier, destiné à fournir une aide à la décision pour des mesures existantes ou prévues (par exemple pour la mise en œuvre de la Directive-cadre européenne sur l'eau ou dans le cadre de procédures d'autorisation),
- Evaluation de la faisabilité de variantes de mesures de remédiation ou de prévention.

2 Geologisch-hydrogeologischer Rahmen

Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im südlichen Oberrheingraben zwischen Fessenheim im Süden und Lahr im Norden sind in mehreren Veröffentlichungen ausführlich dargelegt (GLA 1997, RPF 2002, LUBW 2006, RPF/LGRB 2007). Sie werden im Folgenden zusammenfassend beschrieben. Die Lagebeziehungen der hydrogeologischen Einheiten und ihre Mächtigkeiten sind in einem hydrogeologischen Längsschnitt dargestellt, der etwa entlang des Rheins von Weil am Rhein bis nach Rust verläuft (Abb. 2.1).

Grundwasserleiter

Der Grundwasserleiter wird im Untersuchungsgebiet von der quartären Grabenfüllung aus sandigen Kiesen mit unterschiedlichen Schluffgehalten gebildet. An ihrer Basis liegen gering durchlässige altquartäre und tertiäre Sedimente (Iffezheim-Formation, oligozäne Tonmergelsteine, Kap. 3.3). Die sandig-kiesige Grabenfüllung lässt sich aufgrund lithologischer Unterschiede (Unterschiede im Sand- und Schluffgehalt), der Herkunft des Materials (Alpen bzw. Schwarzwald und Vogesen) und des Zersetzungsgrades der Gerölle in die Breisgau-Formation und die Neuenburg-Formation unterteilen. Die Breisgau-Formation bildet den Unteren, die Neuenburg-Formation den Oberen Grundwasserleiter. Über größere Flächen verbreitete hydraulisch wirksame tonig schluffige Trennschichten fehlen im Untersuchungsgebiet.

Grundwasserverhältnisse

Das Grundwasser strömt in den quartären Kiesen generell vom Schwarzwaldrand in nordwestliche und von den Vogesen in nordöstliche Fließrichtung dem Rhein zu. In Rheinnähe biegt die Fließrichtung um und verläuft annähernd rheinparallel von Süden nach Norden (Abb. 1.1).

Die oberirdischen Gewässer stehen in einer engen Wechselbeziehung zum Grundwasser. Im Süden bildet der Rhein die Vorflut für das Grundwasser. Ab der Stauwurzel des Kulturwehres Breisach, die etwa auf Höhe der Domäne Rothaus liegt, infiltriert er in das Grundwasser. Der Rheinseitenkanal ist weitgehend abgedichtet und steht mit dem Grundwasser nicht in direktem hydraulischem Kontakt. Er wird vom Grundwasser unterströmt.

Die Baggerseen, die im Untersuchungsgebiet liegen, werden derzeit alle betrieben. Sie sind hydraulisch an das Grundwasser angeschlossen.

2 Cadre géologique et hydrogéologique

Le cadre géologique et hydrogéologique de la partie méridionale du Fossé rhénan supérieur entre Fessenheim au Sud et Lahr au Nord a déjà été présenté en détail dans plusieurs publications (GLA 1997, RPF 2002, LUBW 2006, RPF/LGRB 2007). Nous en ferons ici une description résumée. La disposition des unités hydrogéologiques et leur épaisseur sont représentées sur un profil hydrogéologique longitudinal, passant approximativement le long du Rhin de Weil am Rhein jusqu'à Rust (fig. 2.1).

L'aquifère

L'aquifère est constitué dans le secteur étudié par le remplissage alluvial quaternaire de sables et de graviers avec des proportions variables de silts. A sa base on trouve des sédiments peu perméables d'âge quaternaire ancien à pliocène (Formation d'Iffezheim ou Pliocène final, marnes argileuses oligocènes, cf. Chap. 3.3). On distingue dans le remplissage d'alluvions différentes unités sur des critères de lithologie (proportion de sables et de silts), d'origine des matériaux (matériel alpin, vosgien, ou de Forêt-noire) et de degré d'altération des galets : la formation de Breisgau (alluvions anciennes) à la base et la formation de Neuenburg (alluvions récentes) au sommet, qui constituent les aquifères inférieur et supérieur. Il n'existe pas dans le secteur d'intercalaires peu perméables suffisamment continus pour constituer une séparation hydraulique.

La nappe

La nappe libre s'écoule globalement dans les alluvions en direction du Rhin, du piémont de la Forêt-noire vers le NW et du piémont des Vosges vers le NE. A proximité du Rhin l'écoulement tourne en direction du Nord pour suivre approximativement la direction d'écoulement du Rhin du S vers le N (fig. 1.1).

Les cours d'eau superficiels ont d'étroites relations d'échange avec la nappe. Au Sud le Rhin draine les eaux souterraines. A partir du pied du barrage agricole de Breisach, qui se situe à peu près au niveau du domaine Rothaus, il s'infiltré dans la nappe. Le Grand Canal d'Alsace est largement étanche et n'a pas de relation hydraulique directe avec la nappe qui s'écoule en-dessous de lui.

Les gravières en eau situées dans la zone d'étude sont actuellement toutes en fonctionnement. Elles sont reliées hydrauliquement aux eaux souterraines.

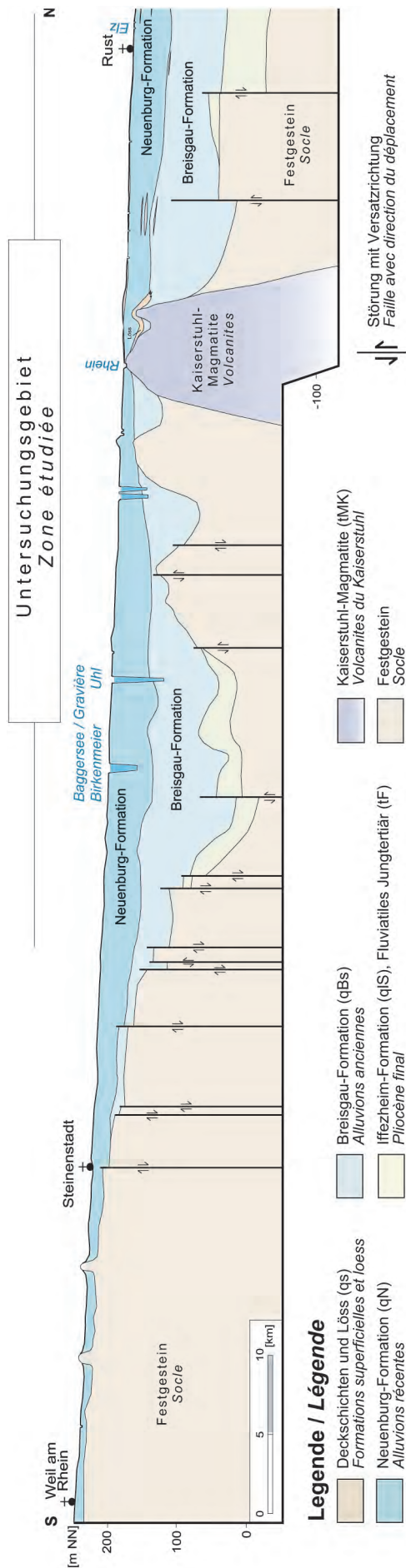


Abbildung 2.1: Hydrogeologischer Längsschnitt zwischen Weil a. Rhein und Rust (Schnittverlauf ungefähr entlang des Rheins, verändert nach RPF/LGRB 2007).
Figure 2.1 : Coupe hydrogéologique entre Weil a. Rhein et Rust (le profil suit approximativement le cours du Rhin, modifié d'après RPF/LGRB 2007).

Die Schwarzwaldbäche infiltrieren auf ihrem Weg zum Rhein in das Grundwasser. Bei Niedrigwasserführung können sie vollständig versickern. Die Möhlin durchfließt den Baggersee Uhl. Sie wird nördlich des Sees am Möhlinwehr westlich von Hochstetten aufgestaut. Im Unterwasser des Wehrs wirkt die Möhlin für das Grundwasser als Vorflut und nimmt bis zum Rhein bedeutende Mengen an Grundwasser auf.

Nördlich von Breisach ist der Flurabstand des Grundwassers sehr gering. Die oberirdischen Gewässer nehmen in diesem Gebiet Grundwasser auf.

Hydraulische Durchlässigkeiten

Die hydraulischen Durchlässigkeiten der Neuenburg-Formation (unterteilt in oberen und unteren Abschnitt) und des oberen Abschnitts der Breisgau-Formation (nur baden-württembergischer Teil des Bearbeitungsgebietes) sind in LUBW (2006) flächenhaft dargestellt und ausführlich beschrieben.

Die Durchlässigkeit im oberen Abschnitt der Breisgau-Formation ist im Untersuchungsgebiet auf baden-württembergischer Seite in Rheinnähe am höchsten. Sie liegt in der Größenordnung von $k_f = 8 - 10 \cdot 10^{-3}$ m/s. Nördlich des Kaiserstuhls steigt sie auf über $k_f = 10 \cdot 10^{-3}$ m/s an. Zum östlichen Grabenrand nimmt die Durchlässigkeit wieder auf Werte zwischen $k_f = 2 \cdot 10^{-3}$ m/s und $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s ab (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007).

Für den unteren Abschnitt der Breisgau-Formation liegen im Untersuchungsgebiet nur wenige Werte vor. In der GWM3 Nambshiem (LGRB-Nr. 8011/494) wurde eine Durchlässigkeit von $k_f = 1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, in der GWM 1 Hartheim (LGRB-Nr. 8011/492) ein Wert von $k_f = 3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s bestimmt (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007). Die Durchlässigkeit in der neu gebohrten GWM Geiswasser tief beträgt $k_f = 1,84 \cdot 10^{-4}$ m/s (Kap. 3.2.2).

Im oberen Abschnitt der Neuenburg-Formation (obere 20 Meter) liegen die höchsten Durchlässigkeiten in einer breiten Zone auf elsässischem Gebiet sowie in einer schmalen rinnenartigen Struktur unter dem Rhein (Abb. 2.2 links). Diese teilt sich südlich des Kaiserstuhls in eine Rinne, die zwischen dem Breisacher Münsterberg und dem Kaiserstuhl verläuft und in eine zweite Rinne, die sich nach Nordosten zwischen dem Kaiserstuhl und dem Tuniberg fortsetzt. Sie geht in die hochdurchlässigen Kiese der Ostrheinrinne über.

Im unteren Abschnitt der Neuenburg-Formation (Restmächtigkeit bis zur Breisgau-Formation) sind die Durchlässigkeiten geringer als in der darüber liegenden

Les ruisseaux issus de la Forêt-noire s'infiltrant le long de leur cours jusqu'au Rhin. En situation de basses-eaux ils peuvent s'infiltrer en totalité. La Möhlin traverse la gravière Uhl. Un peu au Nord de la gravière, elle est arrêtée par le barrage de la Möhlin situé à l'Ouest de Hochstetten. En aval du barrage, la Möhlin draine la nappe et entraîne des quantités importantes d'eau souterraine jusqu'au Rhin.

Au Nord de Breisach la nappe est très peu profonde par rapport au sol. Les cours d'eau drainent les eaux souterraines de ce secteur.

Les perméabilités

Les perméabilités hydrauliques de la formation de Neuenburg (alluvions récentes dont on distingue la partie supérieure et la partie inférieure) et de la partie supérieure de la formation de Breisgau (alluvions anciennes) sont cartographiées et décrites en détail pour la partie badoise du secteur d'étude dans le rapport LUBW (2006).

Dans la partie badoise du secteur d'étude, la perméabilité de la partie supérieure de la formation de Breisgau est plus élevée à proximité du Rhin. Elle se trouve dans une fourchette de 8 à $10 \cdot 10^{-3}$ m/s. Au Nord du Kaiserstuhl elle dépasse $10 \cdot 10^{-3}$ m/s. Vers la bordure Est du Fossé elle revient à des valeurs entre 2 et $5 \cdot 10^{-3}$ m/s (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007).

Nous avons peu de données en ce qui concerne les perméabilités de la partie inférieure de la formation de Breisgau. Dans le piézomètre profond de Nambshiem (indice BSS 03795X0107) on a évalué la perméabilité à $1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s et dans celui de Hartheim (numéro LGRB 8011/492) à $3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007). La perméabilité dans le nouveau piézomètre profond de Geiswasser est de $1,84 \cdot 10^{-4}$ m/s (cf. chap. 3.2.2).

Dans la partie supérieure de la formation de Neuenburg (les premiers 20 m) les perméabilités sont les plus élevées dans une large zone côté alsacien ainsi que dans une étroite bande rappelant un chenal en-dessous du Rhin (fig. 2.2 à gauche). Ce chenal se dédouble à l'approche du Kaiserstuhl en un chenal passant entre le Münsterberg de Breisach et le Kaiserstuhl, et en un deuxième chenal se dirigeant vers le NE entre le Kaiserstuhl et le Tuniberg, pour rejoindre le chenal de graviers très perméable connu à l'Est du Kaiserstuhl.

Dans la partie inférieure de la formation de Neuenburg (de 20 m de profondeur à la formation de Breisgau), les perméabilités sont plus basses que dans la partie

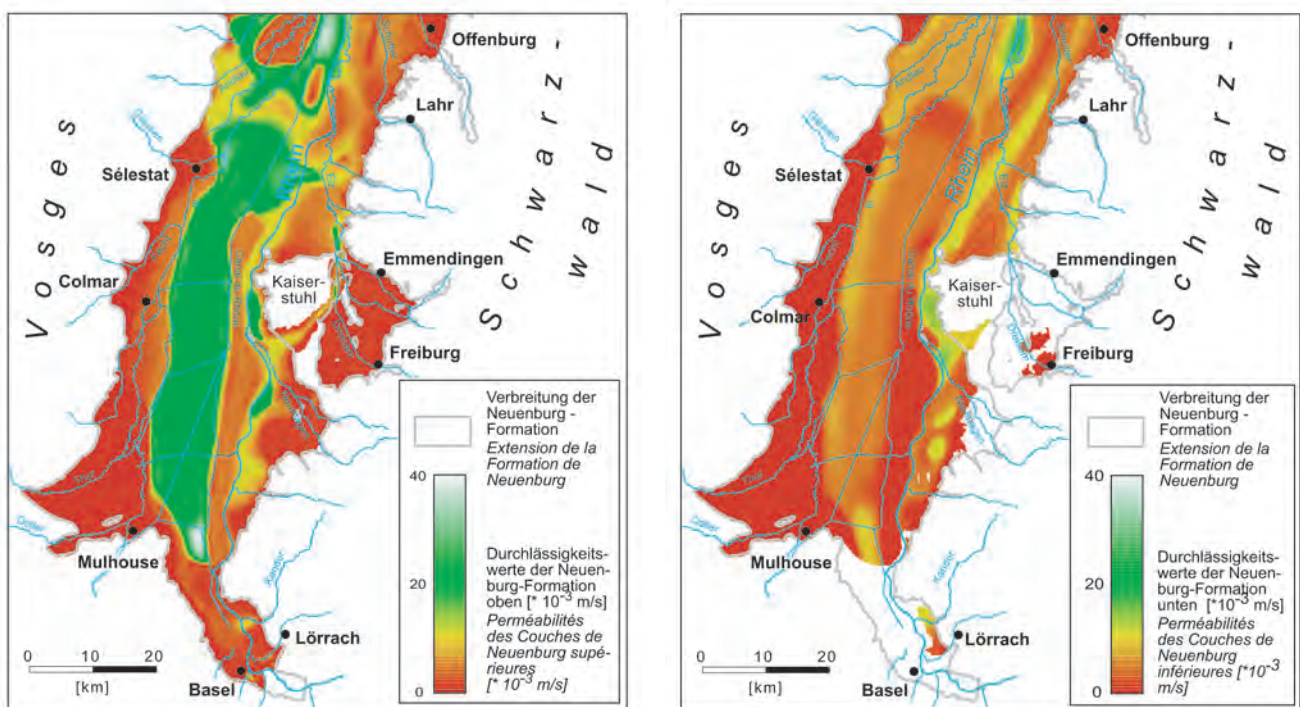


Abbildung 2.2 links: Räumliche Verteilung der Durchlässigkeit im oberen Abschnitt der Neuenburg-Formation (Tiefenstufe 0 – 20 m, verändert nach LUBW 2006).

Abbildung 2.2 rechts: Räumliche Verteilung der Durchlässigkeit im unteren Abschnitt der Neuenburg-Formation (verändert nach LUBW 2006).

Figure 2.2 à gauche : Cartographie des perméabilités de la partie supérieure de la formation de Neuenburg (alluvions récentes, tranche de 0 à 20 m, modifié d'après LUBW 2006).

Figure 2.2 à droite : Cartographie des perméabilités de la partie inférieure de la formation de Neuenburg (modifié d'après LUBW 2006).

Abfolge. Die Durchlässigkeitsunterschiede sind innerhalb des unteren Abschnittes weniger stark ausgebildet (Abb. 2.2 rechts). Die Zonen erhöhter Durchlässigkeit, die sich im oberen Abschnitt abgezeichnet haben, kommen im unteren Abschnitt im Elsass nur noch schwach zum Ausdruck, die rinnenartige Struktur unter dem heutigen Rhein-verlauf zeichnet sich erst östlich von Geiswasser ab. Bei Bremgarten-Hartheim und östlich von Grifflheim sind inselartig zwei Bereiche erhöhter Durchlässigkeit ausgebildet.

Grundwassernutzungen

Das Grundwasser wird im Untersuchungsgebiet als Trink- und Brauchwasser (landwirtschaftliche Beregnung, Industrie) genutzt.

Der Trinkwasserbrunnen TB1 Breisach (Breisach alt, LGRB-Nr. 7911/124) wurde vermutlich im Jahr 1954 gebaut. Er ist 22,5 m tief. Die Filterstrecke reicht von 5,5 – 21,5 m u. GOK, darunter folgt ein ein Meter langes Sumpfrohr. Am 5.11.1955 wurden im Brunnen 9 mg/l Chlorid gemessen. In der nächsten vorliegenden Messung vom 13.01.1970 war die Chloridkonzentration bereits auf 90 mg/l gestiegen. Zwischen 1982 und 1987 schwankte sie zwischen 50 und 60 mg/l. In der Folgezeit nahmen die Chloridkonzentrationen kontinuierlich zu. Am 01.06.2006 lag der Wert bei 201 mg/l (Abb. 2.3).

Der Trinkwasserbrunnen TB2 Breisach (Breisach neu, LGRB-Nr. 7911/122) wurde im Jahr 1991 gebaut. Er ist 34 m tief. Die vier durch Vollrohrabschnitte voneinander getrennten Filterstrecken liegen bei 10,0 – 16,0 m, 21,0 – 23,5, 26,0 – 28,0 und 30,0 – 34,0 m u. GOK. Ringraumabdichtungen wurden zwischen 4,5 und 6 m sowie zwischen 17,3 und 19,8 m u. GOK eingebracht. Wegen der erhöhten Chloridkonzentration im unteren Filterabschnitt wurde dauerhaft ein Packer eingebaut. Die Chloridkonzentration beträgt unterhalb des Packers (eingebaut bei 20 m u. GOK) zwischen 322 mg/l (März 2007) und 320 mg/l (Okt. 2007), oberhalb davon 161 mg/l (März 2007). Die Trinkwassergewinnung erfolgt aus dem oberen Brunnenabschnitt. Der Bau des Tiefbehälters durch die Stadt Breisach im Jahr 2005 ermöglicht seitdem eine Entnahme des Trinkwassers mit einer konstant niedrigen Entnahmerate über einen längeren Zeitraum. Dies führte zu einer weiteren Senkung des Chloridgehaltes im abgegebenen Trinkwasser auf 147 mg/l (26.09.2007).

Der Trinkwasserbrunnen TB Faule Waag der Stadt Vogtsburg (LGRB-Nr. 7911/1) wurde im Jahr 1984 gebaut. Er ist 39 m tief, die Filterstrecke reicht von 19,9 – 34,8 m u. GOK. Die Chloridkonzentration liegt

supérieure. Il semble y avoir moins de contrastes de perméabilité dans cette partie inférieure (cf. fig. 2.2 à droite). Les zones de forte perméabilité observées dans la partie supérieure côté alsacien ne se retrouvent que faiblement dans la partie inférieure, tandis que le chenal observé sous le Rhin actuel n'apparaît qu'à partir de l'Est de Geiswasser. Vers Bremgarten-Hartheim et à l'Est de Grissheim on observe deux zones de perméabilités plus élevées en forme d'îlots.

Usages

L'eau de la nappe est utilisée dans le secteur étudié pour l'eau potable ainsi que pour l'irrigation et l'industrie.

Le puits AEP TB1 de Breisach (Breisach alt, LGRB-Nr. 7911/124) a été créé vers 1954. Il a 22,5 m de profondeur. La crépine est située entre 5,5 et 21,5 m de profondeur, et est prolongée jusqu'au fond par un tube décanteur d'un mètre de long. Le 5 novembre 1955 on y a mesuré 9 mg/L de chlorures. La mesure suivante dont nous disposons date du 13 janvier 1970 et atteint déjà 90 mg/L. Entre 1982 et 1987 les valeurs variaient entre 50 et 60 mg/L. Elles ont ensuite augmenté de façon continue. Le 1^{er} juin 2006 la valeur de la concentration en chlorures atteignait 201 mg/L (fig. 2.3).

Le puits AEP TB2 de Breisach (Breisach neu, LGRB-Nr. 7911/122) a été implanté en 1991. Il fait 34 m de profondeur. Il dispose de plusieurs crépines séparées par des tubes plein : de 10,0 à 16,0 m, de 21,0 à 23,5 m, de 26,0 à 28,0 m et de 30,0 à 34,0 m de profondeur. Des bouchons étanches ont été mis en place dans l'annulaire entre 4,5 et 6 m ainsi qu'entre 17,3 et 19,8 m. Au vu des concentrations en chlorures très élevées dans les crépines inférieures, un *packer* (obturation du tubage) a été mis en place de façon durable pour les isoler. La concentration en chlorures en-dessous du *packer* (mis en place à 20 m de profondeur) varie entre 322 mg/l en mars 2007 et 320 mg/L en octobre 2007, tandis qu'elle est de 161 mg/L au-dessus du *packer* (mars 2007). L'alimentation en eau potable se fait donc à partir de la section supérieure du puits. La construction d'un réservoir de stockage par la Ville de Breisach en 2005 permet de pomper l'eau en continu avec un débit plus faible qu'auparavant. Ceci a fait baisser la concentration en chlorures de l'eau distribuée à 147 mg/l (septembre 2007).

Le puits AEP TB Faule Waag de la Ville de Vogtsburg (LGRB-Nr. 7911/1) a été construit en 1984. Il a 39 m de profondeur, la crépine est installée entre 19,9 et 34,8 m de profondeur. La concentration en chlorures

im Bereich der Hintergrundwerte der Region. Sie schwankten im Zeitraum 28.03.2000 bis 07.03.2007 zwischen 33,8 und 39,4 mg/l.

Der Tiefbrunnen des Zweckverbandes Sasbach/Endingen (LGRB-Nr. 7811/121) wurde im Jahr 1992 gebaut. Er ist 54,0 m tief, die Filterstrecken liegen zwischen 18,0 und 21,0 m, 23,7 und 32,7 m und 48,2 und 50,7 m u. GOK. Die Chloridkonzentration im Tiefbrunnen lag in den Jahren 2002 bis 2006 zwischen 42,2 und 48,6 mg/l. Hydrochemisch entspricht das im Brunnen geförderte Grundwasser zum größten Teil Rheinuferfiltrat, das nach einer mittleren Fließzeit von etwa einem Jahr zum Brunnen gelangt.

Auf französischer Seite sind keine öffentlichen Wasserversorgungen betroffen.

est de l'ordre de grandeur du fond géochimique régional. Elle a varié entre 33,8 et 39,4 mg/L sur la période du 28 mars 2000 au 7 mars 2007.

Le puits AEP du syndicat de Sasbach/Endingen (LGRB-Nr. 7811/121) a été construit en 1992. Il fait 54 m de profondeur, les crépines sont placées de 18,0 à 21,0 m, de 23,7 à 32,7 m et de 48,2 à 50,7 m de profondeur. La concentration en chlorures du puits a varié entre 42,2 et 48,6 mg/L sur la période de 2002 à 2006. Du point de vue hydrochimique, l'eau pompée correspond essentiellement à de l'eau d'infiltration du Rhin qui met environ un an en moyenne à atteindre le captage.

Côté *français* il n'y a pas d'AEP touchés.

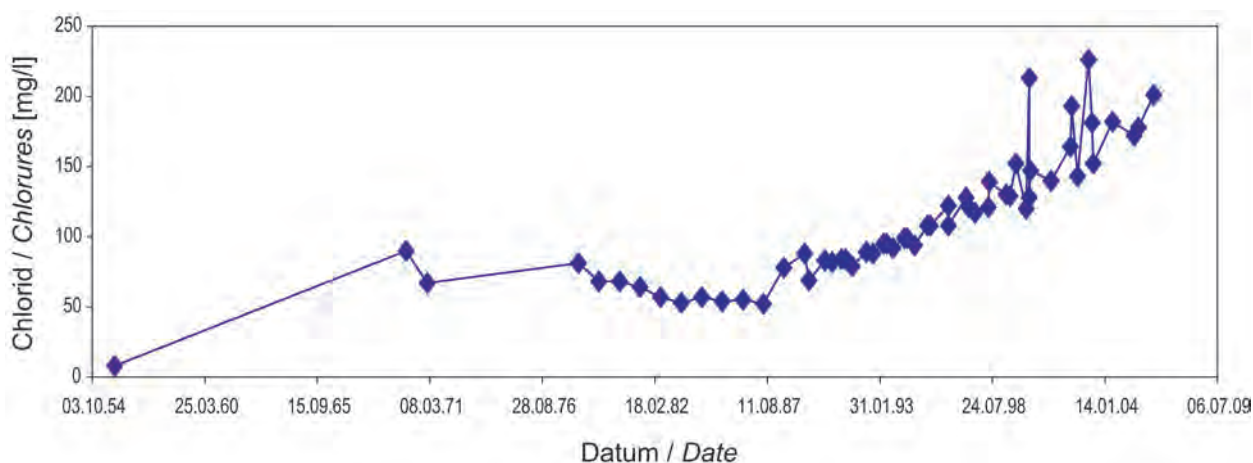


Abbildung 2.3: Zeitliche Entwicklung der Chloridkonzentration im TB 1 (alt) Breisach.
Figure 2.3 : Historique de la concentration en chlorures du puits AEP TB1 de Breisach.

3 Erkundungsmaßnahmen

Neben dem Grundwasserströmungs- und transportmodell, das den Bearbeitungsschwerpunkt des Projektes darstellt, wurden weitere Erkundungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Sie hatten hauptsächlich folgende Zielsetzungen:

- Verbesserung des Verständnisses für die Transportmechanismen der chloridhaltigen Lösungen
- Tiefendifferenzierte Erfassung und Darstellung der Chloridverbreitung
- Hydrochemische und isotopehydrologische Charakterisierung der Grund- und Oberflächenwässer

Die Untersuchungen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden, sind in der Tab. 3.1 zusammengestellt. Sämtliche Ergebnisse sind in das Grundwassermodell eingeflossen.

3 Travaux de reconnaissance

En plus de la modélisation hydrodynamique, qui représentait l'axe principal du projet, des travaux de reconnaissance complémentaires ont été menés dans la zone d'étude. Ces travaux avaient pour objectifs principaux :

- Une amélioration de la compréhension des mécanismes de transport des eaux salées,
- La localisation des langues salées tant dans leur extension surfacique que dans leur position en profondeur dans l'aquifère,
- Une caractérisation des eaux souterraines et des eaux de surface du point de vue géochimique et isotopique.

Les travaux menés dans le cadre du projet sont récapitulés dans le tableau 3.1. Tous les résultats obtenus ont pu être utilisés dans le cadre de la modélisation.

Zeitraum / Période	Maßnahme	Travaux réalisés
April-Mai/avril-mai 2006	Geoelektrische Messungen	Campagne de géophysique électrique
Juni/juin 2006	Hydrochemische Untersuchungen	Campagne de géochimie des eaux souterraines
Februar/février 2007	Geoelektrische Messungen	Campagne de géophysique électrique
Februar/février 2007	Hydrochemische Untersuchungen	Campagne de géochimie des eaux souterraines
August-September/août-septembre 2007	Bau von Grundwassermessstellen	Forage de piézomètres
Oktober/octobre 2007	Hydrochemische und isotopehydrologische Untersuchungen	Analyses géochimique et isotopiques
5.-7. November/novembre 2007	Pumpversuche	Essais de pompage
28. November/novembre 2007	Bohrlochgeophysikalische Messungen	Diagraphies dans les piézomètres

Tabelle 3.1: Im Projektzeitraum durchgeführte Erkundungsmaßnahmen.
Tableau 3.1: Travaux de reconnaissance réalisés dans le cadre du projet.

3.1 Geoelektrische Messungen

Geophysikalische Methoden sind indirekte, zerstörungsfreie Erkundungsverfahren, die in der Regel auf der Messung physikalischer Parameter des Untergrundes basieren. Die Messungen werden von der Erdoberfläche aus (Oberflächengeophysik) oder im Bohrloch (Bohrlochgeophysik) durchgeführt. Die Interpretation der Messergebnisse erfolgt durch Kalibrierung an Bohrungen und unter Einbeziehung der geologischen und hydrogeologischen Informationen über das Untersuchungsgebiet.

Im Rahmen des INTERREG III Projektes wurde das Verfahren der Gleichstromgeoelektrik eingesetzt. Es liefert entlang der gemessenen Profillinien zweidimensionale Informationen über den Untergrund.

Die geoelektrische Erkundung hatte folgende Zielsetzungen

- Erkundung der Tiefenlage der Aquiferbasis
- Erkundung der Salzgehalte im Grundwasser
- Optimierung der Bohransatzpunkte

Die Messungen wurden durch das BRGM Orléans durchgeführt. Das Verfahren wurde bereits früher vielfach im elsässischen Kalibecken eingesetzt und hat sich dort bei der Abgrenzung der Salzfahren im Abstrom der Kalihalden bewährt (z.B. MIEHÉ 2003, MIEHÉ 2004).

Die Durchführung der Messungen, die Messergebnisse und ihre Interpretation sind im Bericht des BRGM (MIEHÉ 2007) ausführlich beschrieben (siehe beigefügte CD-ROM).

3.1.1 Messverfahren, Auswertung Messverfahren

Bei der Gleichstromgeoelektrik wird dem Untergrund über zwei Elektroden von der Erdoberfläche aus ein elektrischer Strom zugeführt. In Abhängigkeit von der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund baut sich ein Potenzialfeld auf. Die dadurch hervorgerufenen Potenzialdifferenzen werden an der Erdoberfläche mit zwei Messelektroden registriert. Aus den beiden Messgrößen Spannung und Strom wird der scheinbare spezifische Widerstand des erfassten Gesteinsvolumens berechnet. Mit zunehmendem Abstand der Messelektroden wird ein immer tiefer reichender Abschnitt des Untergrundes vom System erfasst.

Messkampagne

Die Messungen wurden in der Zeit vom 18. April bis 9. Juni 2006 durchgeführt. Es wurden insgesamt 9 Profile vermessen. Ihre Lage und Bezeichnung sind in der *Abb. 1.1* dargestellt. Im Frühjahr 2007 wurde

3.1 Campagnes géophysiques

Les méthodes géophysiques sont des méthodes de reconnaissance du sous-sol indirectes et non destructives, qui se basent en général sur la mesure de paramètres physiques des terrains. Les mesures sont faites en surface ou dans des forages (diagraphies). Les résultats des mesures sont interprétés en se calant sur des sondages connus et d'après les connaissances géologiques et hydrogéologiques sur la région considérée.

Dans le cadre du projet Interreg III on a employé la méthode des panneaux électriques qui utilise du courant continu. Cette méthode permet d'obtenir des informations sur des profils 2D du sous-sol.

La reconnaissance géophysique avait les objectifs suivants :

- Localisation du substratum de l'aquifère,
- Localisation des langues salées en profondeur,
- Optimisation des emplacements des piézomètres.

Les mesures ont été réalisées par une équipe du BRGM Orléans. La méthode avait déjà été employée plusieurs fois avec succès dans le Bassin potassique où elle était utilisée pour localiser les langues salées en aval des terrils des mines de potasse (cf. MIEHE 2003, MIEHE 2004).

Le déroulement des campagnes, les résultats des mesures et leur interprétation sont présentés dans le rapport du BRGM (MIEHE 2007) sur le CD-ROM joint.

3.1.1 Méthode et interprétation Méthode

Dans les méthodes géophysiques en courant continu on injecte un courant électrique dans le sol à partir de deux électrodes implantées en surface. Il se crée un champ de potentiel qui est fonction des résistivités électriques spécifiques des terrains. Les différences de potentiel induites sont mesurées à la surface avec deux autres électrodes de mesure. Les mesures de voltage et d'intensité permettent de calculer une résistivité apparente des terrains traversés par le courant. En éloignant progressivement les électrodes de mesure on explore des terrains de plus en plus profonds.

Campagnes de mesure

Les mesures ont été réalisées sur la période du 18 avril au 9 juin 2006. Au total 9 profils ont été mesurés, leur localisation et leur dénomination sont présentés en *fig. 1.1*. Au printemps 2007 le profil Geiswasser a

das Profil Geiswasser nach Osten über die Rheininsel verlängert, da sich bei der Messkampagne des Jahres 2006 eine zunehmende Versalzung des Grundwassers in diese Richtung angedeutet hat. Insgesamt wurden im Jahr 2006 2671 Messungen auf 18400 Profilmeter vermessen (MIEHÉ 2007). Das Profil Geiswasser 2007 ist 1300 Meter lang.

Auswertung

Bei den Messungen wird ein integraler, d.h. ein von der Geländeoberfläche bis in einen bestimmten Tiefenbereich gemittelter elektrischer Widerstand bestimmt (scheinbarer spezifischer Widerstand). Um den tatsächlichen elektrischen Widerstand für einzelne Tiefenabschnitte zu ermitteln, ist eine Inversion der Messdaten durch numerische, tomographische Auswertemethoden über einen mathematischen Rekonstruktionsalgorithmus notwendig. Hierzu wurden als Eingangsdaten die Inversionsparameter eingesetzt, die auch bei der Erkundung der Salzfahnen im Elsass verwendet wurden. Das Ergebnis der geoelektrischen Inversion ist ein Tomogramm (Schichtaufnahme), das die tiefenorientierte Verteilung des elektrischen Widerstandes im Untergrund entlang des Profils darstellt.

Der vertikale geologische Aufbau des Untergrundes im Untersuchungsgebiet fließt in die Auswertung mit ein. Er ist in Kapitel 2 beschrieben.

Die Festlegung der Bandbreiten der spezifischen Widerstände für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten erfolgte an den Profilen der Bohrungen Nambshheim (LGRB-Nr. 8011/494) (Abb. 3.3) und der Grundwassermessstelle Faule Waag (LGRB-Nr. 7911/641, Abb. 3.5). Zusätzlich wurden Informationen über die Tiefenlage der Kiesbasis aus dem Aquifermodell der Lockergesteinsfüllung übernommen (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007).

Daraus ergibt sich folgende Zuordnung:

- Spez. Widerstände zwischen 70 und 1000 Ωm : quartäre Kiese und Sande (trocken bzw. grundwassererfüllt); Neuenburg-Formation und Breisgau-Formation
- Spez. Widerstände zwischen ca. 15 und 70 Ωm : Tone, Schluffe und Sande; Iffezheim-Formation
- Spez. Widerstände unter ca. 15 Ωm : Mergel- und Tonmergelsteine des tertiären Festgesteinsuntergrundes (Oligozän)

Anhand der bekannten Verteilung der Chloridkonzentrationen im Grundwasser der Messstellen Nambshheim (flach und tief), weiterer auf den geoelektrischen Profilen gelegener Grundwassermess-

été prolongé vers l'Est à travers l'île du Rhin et au-delà, pour vérifier la présence d'un conducteur pouvant indiquer une langue salée.

Au total en 2007 ce sont 2671 mesures qui ont été pratiquées sur 18400 m de profils (MIEHÉ 2007). Le profil Geiswasser mesuré en 2007 fait 1300 m de longueur.

Interprétation

Les mesures obtenues représentent une résistivité électrique moyenne (la résistivité apparente des terrains) sur l'intégralité d'une coupe verticale depuis la surface jusqu'à une profondeur donnée. Pour obtenir la résistivité réelle des différents terrains traversés à différentes profondeurs, il est nécessaire d'effectuer une inversion des données par des méthodes de tomographie numérique à partir d'algorithmes de calcul mathématique. Ce travail a été effectué en se basant sur les paramètres d'inversion régulièrement utilisés en Alsace pour la reconnaissance des langues salées. Le résultat de l'inversion des résistivités apparentes est un tomogramme (une coupe verticale) qui représente la répartition en profondeur des résistivités électriques spécifiques le long d'un profil.

L'interprétation est basée sur la connaissance de la géologie des terrains du secteur décrite dans le chapitre 2.

La définition des fourchettes de résistivité spécifique des différentes unités hydrogéologiques du secteur a été réalisée d'après le profil des forages de Nambshheim (numéro LGRB 8011/494, *fig. 3.3*) et du piézomètre Faule Waag (numéro LGRB 7911/641, *fig. 3.5*). On s'est également basé sur la cartographie du substratum de l'aquifère dérivée de la modélisation géométrique des alluvions (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007).

Les valeurs suivantes ont ainsi été obtenues :

- Résistivités entre 70 et 1000 Ωm : alluvions quaternaires, graviers et sables (de secs à saturés d'eau) ; formations de Neuenburg et de Breisgau ;
- Résistivités entre 15 et 70 Ωm : argiles, silts et sables ; formation d'Iffezheim ;
- Résistivités inférieures à 15 Ωm : marnes et argiles du substratum tertiaire (oligocène).

Une corrélation entre les résistivités spécifiques des alluvions et la concentration en chlorures des eaux souterraines qu'ils contiennent a été établie depuis longtemps d'après l'expérience acquise dans le

stellen sowie den Erfahrungen aus den Messungen im elsässischen Kalibecken wurde eine Beziehung zwischen den spezifischen Widerständen innerhalb der quartären Kiese und Sande und den Chloridkonzentrationen des Grundwassers hergestellt. Dieser Korrelation liegt die Annahme zu Grunde, dass sich der speicherwirksame Hohlraumanteil innerhalb der Abfolge nicht signifikant ändert. Die Korrelation ist in Abb. 3.1 dargestellt.

Für die einzelnen Profile wurden vom BRGM für eine Auswahl von Stationen und Tiefenstufen die spezifischen Widerstände in Tabellenform bereitgestellt. Diese Widerstandswerte wurden entsprechend der Korrelation in Abb. 3.1 in Chloridkonzentrationen umgerechnet.

Die so abgeleiteten Informationen über den Chloridgehalt des Grundwassers wurden bei der tiefendifferenzierten Kartierung der Chloridgehalte des Grundwassers berücksichtigt (Kap. 3.4.2).

Bassin potassique ; elle a été vérifiée sur le profil Nambenheim d'après les concentrations en chlorures mesurées dans les piézomètres de Nambenheim (superficiel et profond) ainsi que celles d'autres ouvrages situés sur des profils géophysiques. Cette corrélation est basée sur l'hypothèse que la porosité efficace des alluvions ne change pas de façon significative dans la série des alluvions. Le graphe de la corrélation est représenté en fig. 3.1.

Le BRGM a aussi fourni les résistivités spécifiques modélisées sous forme de tableaux de valeurs pour différentes profondeurs à chaque station de mesure. Ces résistivités ont été converties en concentrations en chlorures d'après la corrélation de la fig. 3.1.

Les concentrations en chlorures ainsi obtenues ont été utilisées pour établir des cartes des chlorures dans les eaux souterraines à différentes profondeurs (chapitre 3.4.2).

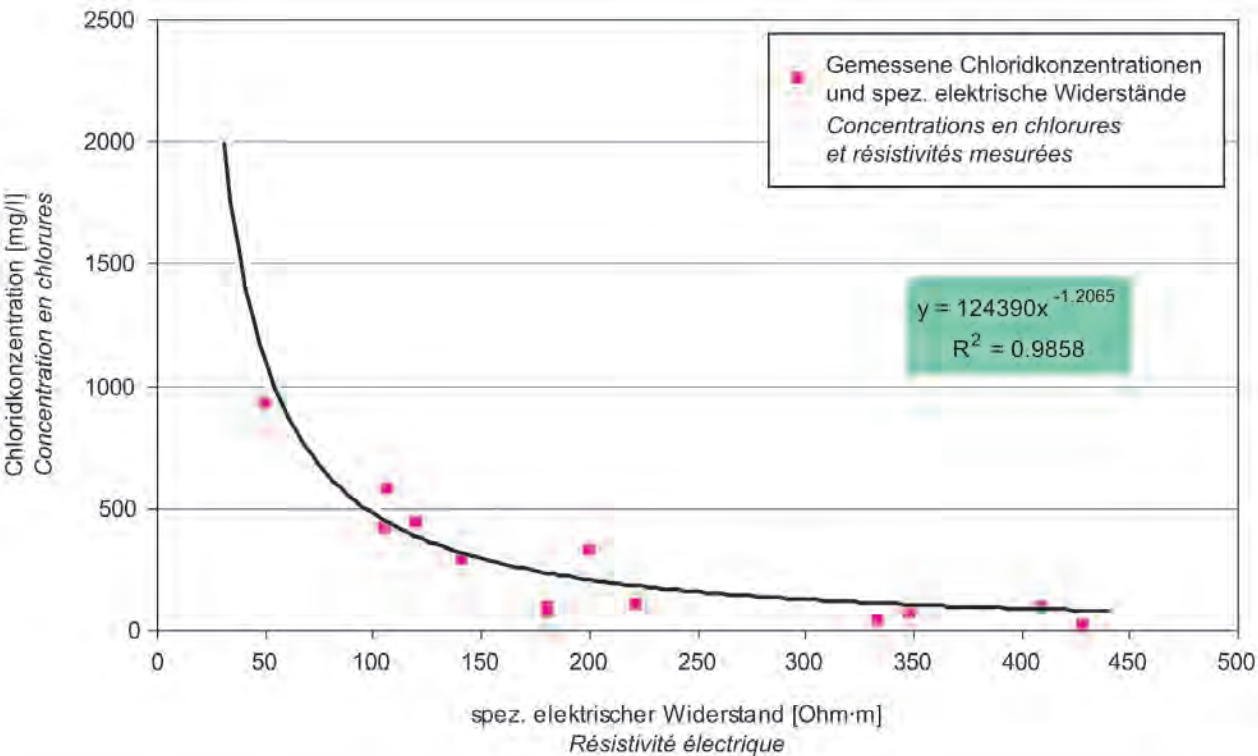


Abbildung 3.1: Korrelation zwischen dem spezifischen Widerstand der grundwassererfüllten Kiese (mit unterschiedlichem Elektrolytgehalt) und der Chloridkonzentration des Grundwassers.

Figure 3.1 : Corrélation entre la résistivité spécifique de graviers saturés en eau (pour différentes salinités) et la concentration en chlorures de l'eau souterraine.

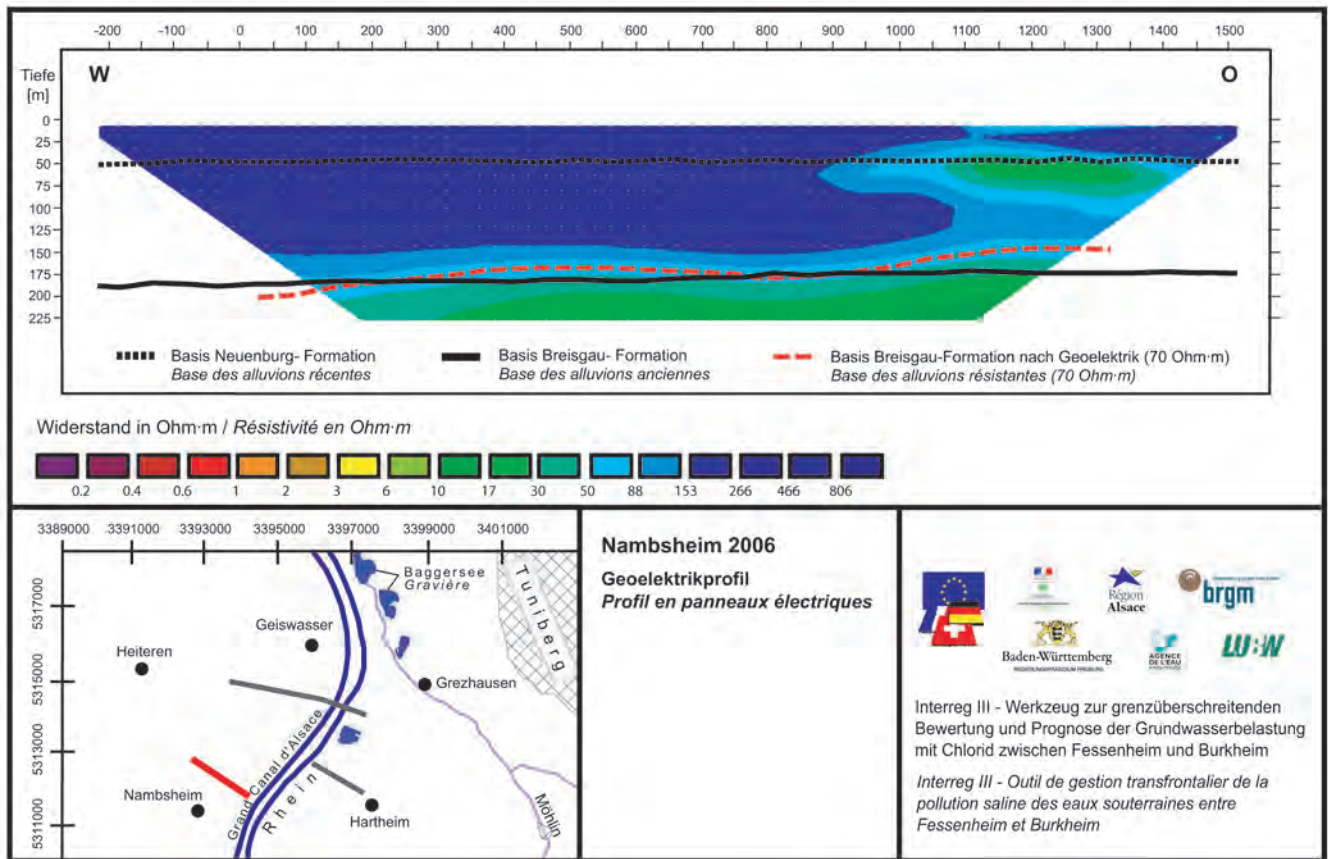


Abbildung 3.2: Geoelektrikprofil Namsheim.
Figure 3.2 : Profil géophysique Namsheim.

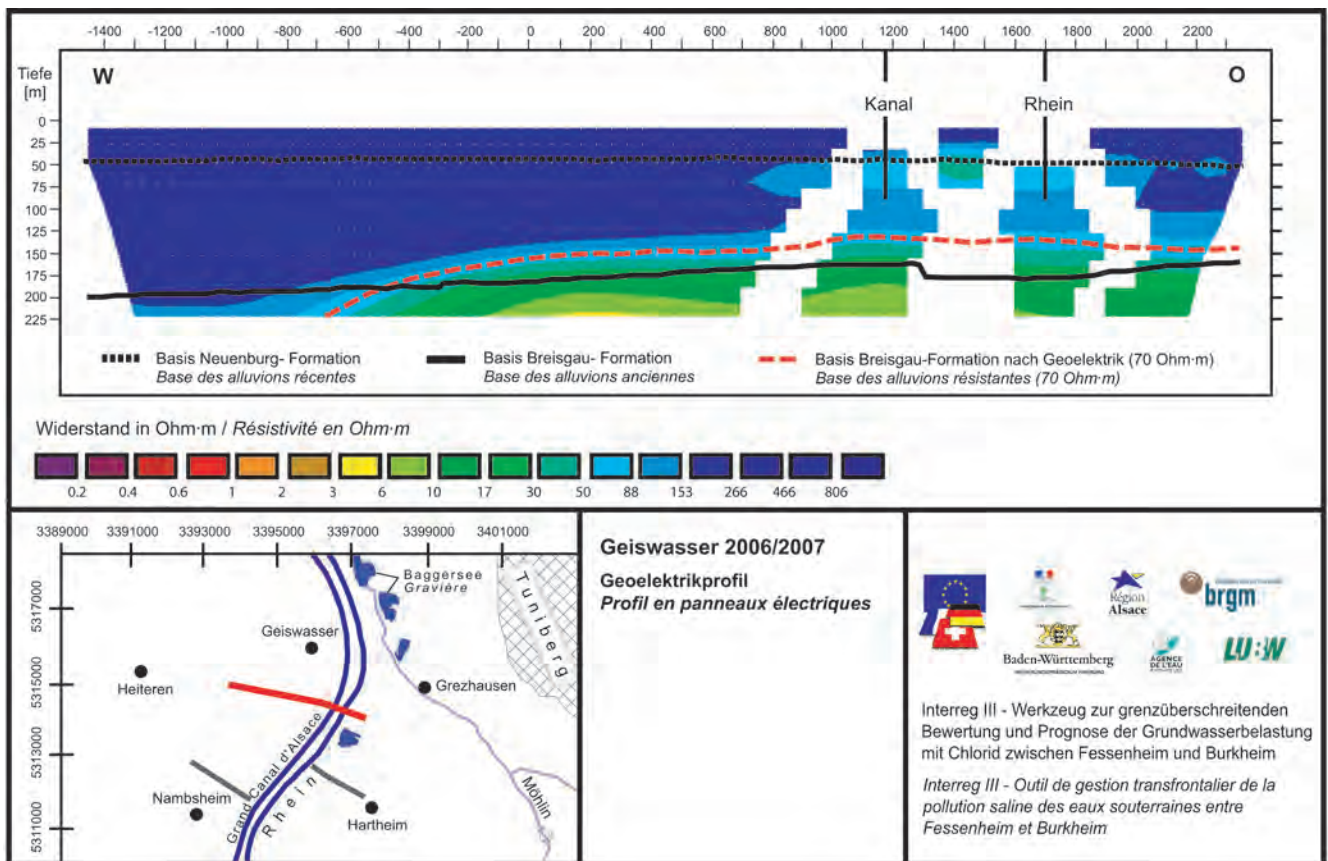


Abbildung 3.3: Geoelektrikprofil Geiswasser (2006) mit Erweiterung nach Osten (2007).
Figure 3.3 : Profil géophysique Geiswasser (2006) avec extension vers l'Est (2007).

3.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen und der Auswertung werden als Widerstandsprofile dargestellt. Sie zeigen den wahren spezifischen Widerstand im Untergrund in Abhängigkeit von der Tiefe (*Abb. 3.2 bis 3.5*).

Die Widerstandsprofile werden bei MIEHÉ (2007) ausführlich diskutiert. Vier dieser Profile werden im Folgenden exemplarisch beschrieben. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass niederohmige Bereiche mehrdeutig sind. Es kann sich um niederohmige Gesteine (Schluff, Ton) handeln oder um Kies / Sand mit chloridhaltigem Grundwasser. Eine Unterscheidung ist anhand der geologischen Befunde aus Bohrungen möglich.

In den Profilen ist die Basis der quartären Kiese und Sande aus dem Aquifermodell (ermittelt aus Bohrungen und seismischen Messungen, LUBW 2006, RPF/LGRB 2007) als schwarze Linie eingetragen. Die rote Linie markiert die Grenze zwischen 70 und 80 Ωm . Sofern im Grundwasser der überlagernden Kiesen keine erhöhten Salzgehalte vorliegen, werden diese spezifischen Widerstände als Grenze zwischen den Kiesen und der unterlagernden Iffezheim-Formation bzw. dem Präquartär interpretiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die lithologische Zusammensetzung der Kiese lateral nicht wesentlich ändert. Beide Linien sollten in diesem Fall nicht signifikant voneinander abweichen. Allerdings ist die Grenze des Aquifermodells wegen der wenigen Stützstellen unsicher.

Liegt die Grenze zwischen 70 und 80 Ωm deutlich über der Aquiferbasis des hydrogeologischen Modells, ist dies ein Hinweis auf eine Versalzung des Grundwassers an der Kiesbasis.

Schließlich kann die Linie der Widerstandsänderung tiefer liegen als die bisher angenommene Lage der Aquiferbasis. In diesem Fall muss die Lage der Aquiferbasis entsprechend korrigiert werden.

Profile Namsheim und Geiswasser

Die Profile Namsheim (*Abb. 3.2*) und Geiswasser (*Abb. 3.3*) dienen dazu, im weiteren Abstrom der Fessenheimer Insel tiefenbezogen linienhafte Informationen über die Chloridverteilung im Untergrund zu erhalten. Das Profil Geiswasser quert im Osten den Grand Canal d'Alsace sowie den Rhein. Damit sind im Widerstandsprofil Messlücken verbunden (*Abb. 3.3*). Im westlichen Abschnitt des Profils Namsheim

3.1.2 Résultats

Les résultats des mesures géophysiques après inversion ont été représentés sous forme de profils de résistivité. Ces profils donnent la résistivité spécifique calculée pour les terrains en fonction de la profondeur (*figs. 3.2 à 3.5*).

Les profils de résistivité sont discutés en détail dans MIEHÉ (2007). Quatre d'entre eux sont donnés ci-après à titre d'exemple. Dans leur interprétation il faut bien prendre en compte le fait que des résistivités basses sont ambiguës. Il peut s'agir de terrains à faible résistivité (silts et argiles) ou de sables et graviers contenant de l'eau salée. L'interprétation est alors faite en se basant sur les connaissances géologiques obtenues par forage.

Sur les profils on a ainsi représenté par une ligne noire le substratum, c'est-à-dire la base des alluvions du modèle géologique telle qu'elle est tracée à partir de forages et de profils sismiques (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007). La ligne rouge marque la limite entre 70 et 80 Ωm . Cette limite correspond en effet au contact entre le substratum sablo-argileux (formation d'Iffezheim) ou marneux (tertiaire) et les graviers quaternaires lorsque ces derniers ne contiennent pas d'eau salée. Ceci bien sûr en admettant qu'il n'y a pas de variation latérale de faciès importante dans les graviers. En l'absence de salure, les deux lignes devraient se superposer approximativement. Il faut cependant bien prendre en compte le fait que la limite noire du modèle géologique est tracée avec une certaine incertitude en raison du nombre limité d'informations disponibles.

Lorsque la limite rouge entre 70 et 80 Ωm est disposée nettement au-dessus de la limite noire du substratum, cela indique avec une forte probabilité la présence de salure à la base de l'aquifère.

Lorsque la limite rouge est plus basse que la limite noire du substratum, cela indique que le substratum est plus bas que ne l'interprète le modèle géologique. Dans ce cas il faut corriger la carte du substratum.

Profils Namsheim et Geiswasser

Les profils Namsheim (*fig. 3.2*) et Geiswasser (*fig. 3.3*) étaient destinés à rechercher la localisation des langues salées en profondeur en aval lointain des bassins-tampons de l'île de Fessenheim. Le profil Geiswasser traverse à l'Est le Grand Canal d'Alsace et même le Rhin. Ceci explique les lacunes de mesures correspondantes sur le profil (*fig. 3.3*).

(Abb. 3.2, Station 100 bis 950) sowie im zentralen und östlichen Abschnitt des Profils Geiswasser (Abb. 3.4, Station -450 bis 800) zeichnen sich keine markanten Unterschiede in der Tiefenlage der beiden Grenzflächen (Geoelektrik und Aquifermodell) ab. Dagegen wird im Osten des Profils Nambsheim (Station 950 bis 1250) der Unterschied in der Tiefenlage der Grenzflächen von ca. 25 Meter als ein Hinweis auf eine Versalzung im basalen Bereich der Kiese interpretiert (siehe auch Kap. 3.4.2).

Im Westen des Profils Geiswasser (Station -400 bis -1100) taucht die 70 Ω m – Grenze in größere Tiefen ab, die Grenze nach dem Aquifermodell bleibt dagegen im Niveau zwischen 200 und 210 m u. GOK. In diesem Bereich wurde die Grenze im Aquifermodell an die Ergebnisse der Geoelektrik angepasst (Kap. 3.3).

Im oberen Abschnitt der Widerstandsprofile, der den quartären Kiesen und Sanden entspricht, wurden im Westen flächenhaft spezifische Widerstände gemessen, die für grundwassergesättigte Kiese mit normalem Elektrolytgehalt typisch sind (Abb. 3.2 und 3.3). Bereiche mit geringfügig niedrigeren spez. Widerständen können auf geringfügig höhere Salzgehalte im Grundwasser hindeuten, stehen aber möglicherweise auch mit dem Übergang von der Neuenburg-Formation zur darunter folgenden Breisgau-Formation im Zusammenhang. Dagegen fallen im Osten der beiden Profile niedrigere spezifische Widerstände auf, die auf einen erhöhten Salzgehalt in der Porenlösung hindeuten. Diese Zone niedrigerer spezifischer Widerstände liegt im Profil Nambsheim (Abb. 3.2) zwischen den Stationen 900 und 1450 in Tiefenabschnitt zwischen 20 und 80 m u. GOK. Die niedrigsten spez. Widerstände treten dabei zwischen 35 und 55 m u. GOK auf. Im Profil Geiswasser liegt die Zone in einer Tiefe von 25 bis 130 m u. GOK zwischen den Stationen 700 und 2000 (evtl. bis 2300). Die niedrigsten spezifischen Widerstände wurden hier in einer Tiefe zwischen 35 und 55 m u. GOK registriert. Interessanterweise sind unterhalb dieser Zonen die Widerstände wieder geringfügig höher, in größerer Tiefe fallen sie am Übergang zur Iffezheim-Formation wieder auf 70 Ω m und niedrigere Werte ab.

Die niedrigeren spez. Widerstände innerhalb der Kiesabfolge werden als Versalzungsbereiche im Grundwasser gedeutet (siehe Kap. 3.4.2). Aufgrund der Ergebnisse des Profils Geiswasser wurden im Bereich der Stationen 1563 - 1588 eine flache (LGRB-Nr. 8011/569, Filterstrecke 35 – 55 m u. GOK) und eine tiefe Grundwassermessstelle (LGRB-Nr. 8011/570, Filterstrecke 165 – 177 m und 186 – 208 m u. GOK) eingerichtet (Kap. 3.2).

Sur la partie ouest du profil Nambsheim (fig 3.2, stations 100 à 950) ainsi que sur les parties centrales et est des profils Geiswasser (fig. 3.4, stations -450 à 800) on n'observe pas de différence marquante entre les deux limites (substratum et résistivité). Par contre à l'Est du profil Nambsheim (stations 950 à 1250) la différence entre les deux limites est de l'ordre de 25 m et indique la présence de salure à la base de l'aquifère alluvionnaire (voir aussi chapitre 3.4.2).

A l'Ouest du profil Geiswasser (stations -400 à -1100) la limite de résistivité à 70 Ω m plonge à grande profondeur tandis que la limite du substratum d'après le modèle se situe vers 200 – 210 m de profondeur. Dans ce secteur il a fallu corriger le modèle géométrique en fonction des résultats de géophysique (chap. 3.3).

Dans la partie supérieure de ces profils, qui correspond aux sables et graviers quaternaires, les résistivités mesurées à l'Ouest correspondent à celles de graviers mouillés par de l'eau souterraine peu salée (figs. 3.2 et 3.3). Les zones de résistivités légèrement inférieure peuvent indiquer la présence de concentrations en sel un peu plus élevées mais peuvent également correspondre au passage entre les graviers à forte porosité de la formation de Neuenburg aux graviers plus silteux de la formation de Breisgau sous-jacente. On observe par contre des résistivités nettement plus faibles à l'Ouest des deux profils, qui indiquent la présence d'une salinité élevée dans les eaux souterraines. Cette zone de faible résistivité se trouve sur le profil Nambsheim (fig. 3.2) entre les stations 900 et 1450 à des profondeurs entre 20 et 80 m, les résistivités les plus faibles étant disposées entre 35 et 55 m de profondeur. Sur le profil Geiswasser la zone de faible résistivité se situe de 25 à 130 m de profondeur entre les stations 700 et 2000 (ou même 2300). Les résistivités les plus faibles sont observées de 35 à 55 m de profondeur. Il est intéressant de noter qu'en dessous de ces zones les résistivités remontent, pour finalement retomber à grande profondeur à 70 Ω m à l'approche du substratum.

Les résistivités plus faibles dans les alluvions graveleuses sont interprétées comme des zones de salinité plus élevée des eaux souterraines (voir chap. 3.4.2). C'est pour contrôler ces zones que sur le profil Geiswasser on a implanté près des stations 1563 – 1588 un piézomètre superficiel crépiné entre 35 et 55 m de profondeur et un piézomètre profond crépiné entre 165 et 177 m de profondeur (cf. chap. 3.2).

Profil Muhrhau

Die Profile Muhrhau (Abb 3.4) und Hochstetten (nicht dargestellt, siehe MIEHÉ 2007) wurden gemessen, um die Grundwassersituation im Umfeld der Möhlin bei Breisach zu untersuchen.

Im Profil Muhrhau liegt die 70 Ω m – Grenze im zentralen Abschnitt (zwischen den Stationen +150 und +850) um bis zu 40 m, im östlichen Abschnitt (zwischen den Stationen +850 und +1400) 10 bis 20 m unter der Basis der quartären Kiese und Sande nach dem Aquifermodell. In der Bohrung Schwimmbad Breisach tief (etwa bei Station -75 in Abb. 3.4) wurde die Basis der Kiese bis zur Endtiefe von 70 m u. GOK nicht angetroffen.

Zwischen den Stationen +175 und +850 liegt die Aquiferbasis nach der Geoelektrik deutlich tiefer als nach dem früheren Modell der Aquifergeometrie. Sie wurde im überarbeiteten Aquifermodell an die Ergebnisse der Geoelektrik angepasst (Kap. 3.3).

Profil Muhrhau

Les profils Muhrhau (fig. 3.4) et Hochstetten (non représenté, voir MIEHÉ 2007) ont été mesurés pour reconnaître les eaux souterraines à proximité de la Möhlin près de Breisach.

Sur le profil Muhrhau la limite à 70 Ω m se situe jusqu'à 40 m plus bas que le substratum du modèle géologique dans la partie centrale (entre les stations 150 et 850), et 10 à 20 m plus bas dans la partie Est du profil (entre les stations 850 et 1400). D'ailleurs le forage de la Piscine de Breisach (situé vers la station -75 sur la fig. 3.4) n'a pas atteint le substratum à sa profondeur finale de 70 m.

Entre les stations 175 et 850 le substratum se situe ainsi nettement plus profond que d'après l'ancien modèle géométrique des alluvions. Le modèle a donc été révisé en tenant compte des résultats de la géophysique (chap. 3.3).

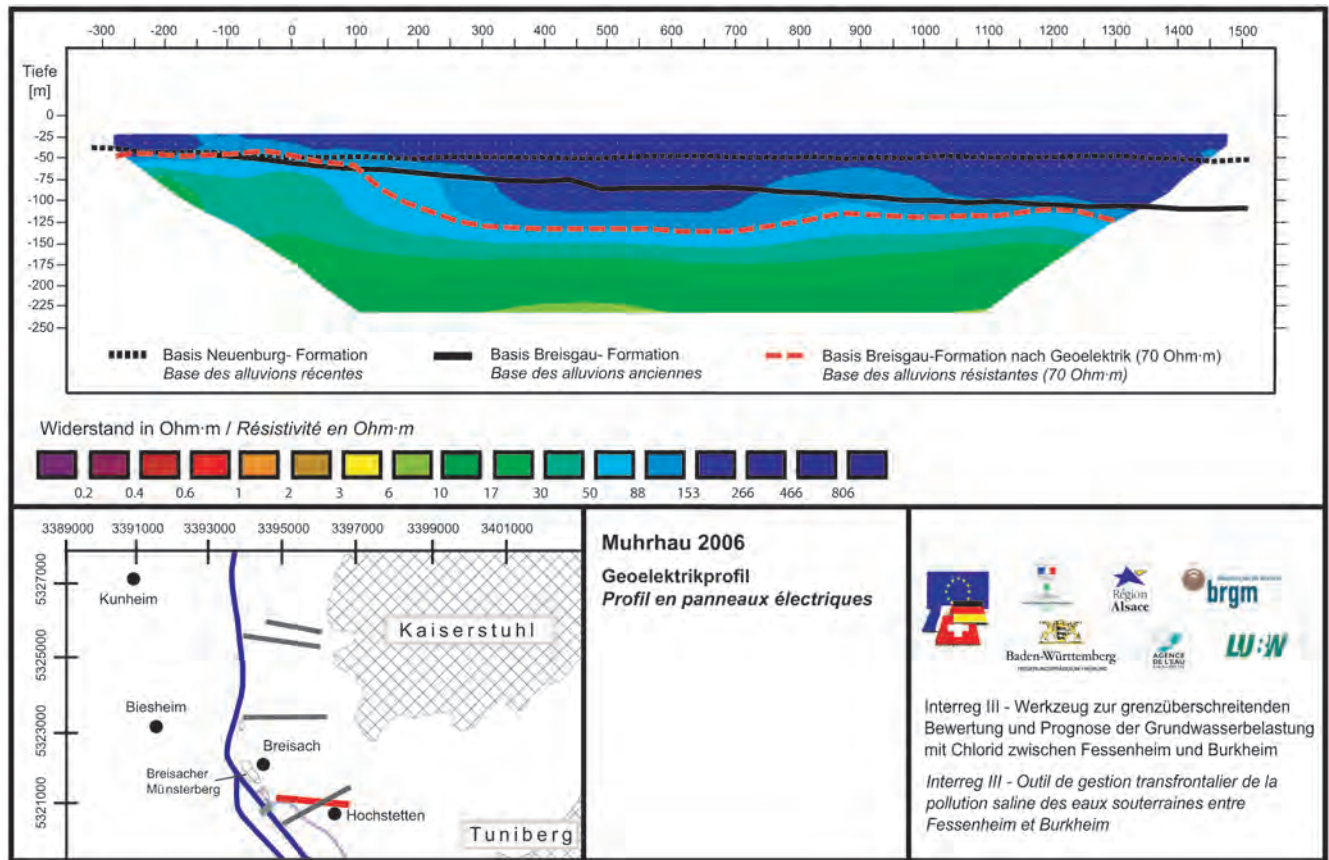


Abbildung 3.4: Geoelektrikprofil Muhrhau.
Figure 3.4 : Profil géophysique Muhrhau.

Im mittleren und östlichen Profilabschnitt sind in den grundwassererfüllten Kiesen die für "normalen" Elektrolytgehalt typischen spezifischen Widerstände nur im obersten Bereich vorhanden. Im Westen und im tieferen Abschnitt ist eine deutliche Abnahme der spezifischen Widerstände zu erkennen. Insbesondere im Westen (Stationen -250 bis +150) und im Osten (Stationen +700 bis +1150) reicht diese Zone bis nahe an die Geländeoberfläche bzw. in höhere Profilabschnitte. Die Widerstandswerte im Westen deuten auf eine Versalzungszone im Grundwasser mit Chloridgehalten bis 1 g/l hin, die bis 70 Meter Tiefe reicht. In der Bohrung Schwimmbad Breisach (Lage auf das Geoelektrikprofil projiziert, etwa bei Station -75, in Abb. 3. 4) wurden in der Wasserprobe, die aus der Bohrschale beim Abteufen der Bohrung in 41 m u. GOK entnommen wurde, eine Chloridkonzentration von 769 mg/l analysiert (HYDROISOTOP 2007a). Ein Leitfähigkeitsmaximum (3590 $\mu\text{S}/\text{cm}$) wurde in einer Tiefe von 56 m u. GOK gemessen (Anl. 4, HYDROISOTOP 2007a). Diese Befunde bestätigen die Interpretation der Geoelektrikmessungen.

Analog dazu werden auch die niedrigeren spezifischen Widerstände zwischen den Stationen +700 und +1150 auf erhöhte Chloridkonzentrationen im Grundwasser des Kiesaquifers zurückgeführt.

Die niedrigen spezifischen Widerstände (70 Ωm) oberhalb der Aquiferbasis zwischen den Stationen +1250 und +1425 deuten ebenfalls auf erhöhte Chloridkonzentrationen im Grundwasser hin.

Profil Schlössle Matte

Die Profile Schlössle Matte (Abb 3.5) und Faule Waag (nicht dargestellt, siehe MIEHÉ 2007: Abb. 12) wurden zur optimierten Platzierung einer Grundwassermessstelle im Vorfeld des Brunnens Faule Waag der Stadt Vogtsburg gemessen. Die Bohrung wurde auf dem Profil bei der Station -175 angesetzt (siehe Kap. 3.2). Sie traf bis in 45,30 m u. GOK sandige Kiese der Neuenburg- und der Breisgau-Formation an, darunter wurden bis zur Endtiefe von 60 m Tone und Schluffe erbohrt. Die Kiesbasis fällt am Bohransatzpunkt mit der 70 Ωm – Grenze zusammen, die hier der Aquiferbasis entspricht. Nach Westen fällt diese Grenze im Geoelektrik-Profil auf ca. 75 m u. GOK bei der Station -750 ab. Weiter westlich steigt sie wieder geringfügig an. Das überarbeitete Aquifermodell wurde an die Ergebnisse der Geoelektrik angepasst (Kap. 3.3).

Im mittleren und westlichen Profilabschnitt sind die spezifischen Widerstände in den quartären Kiesen leicht erniedrigt. Zwischen den Stationen -250 und

Sur le profil au milieu et à l'Est les résistivités ne correspondent à des graviers remplis d'eau peu salée que dans la partie la plus proche de la surface. À l'Ouest et en profondeur les résistivités sont nettement plus faibles. À l'Ouest notamment (stations -250 à +150) les résistivités faibles atteignent presque la surface du sol et à l'Est (stations +700 à +1150) elles se rapprochent de la surface. Les résistivités à l'Ouest indiquent la présence dans les eaux souterraines d'une langue salée avec des concentrations jusqu'à 1 g/l et ceci jusqu'à 70 m de profondeur. Dans le forage de la Piscine de Breisach (dont l'emplacement se projette sur le profil géophysique vers la station -75) la concentration en chlorures du prélèvement effectué pendant le forage à 41 m de profondeur a été analysée à 769 mg/l (HYDROISOTOP 2007a). Le maximum de conductivité observé (3590 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a été mesuré à la profondeur de 56 m sous la surface du sol (ann. 4, HYDROISOTOP 2007a). Ces résultats confortent l'interprétation faite des résultats de la géophysique.

On peut de même attribuer les faibles résistivités du profil entre les stations +700 et +1150 à des concentrations élevées en chlorures dans les eaux souterraines des alluvions.

Les faibles résistivités (70 Ωm) mesurées au-dessus du substratum entre les stations 1250 et +1425 indiquent également la présence de salure à la base de l'aquifère alluvionnaire.

Profil Schlössle Matte

Les profils Schlössle Matte (*fig. 3.5*) et Faule Waag (non représenté, voir MIEHÉ 2007, *fig. 12*) ont été mesurés pour optimiser l'emplacement d'un piézomètre d'alerte en amont du puits AEP Faule Waag de la Ville de Vogtsburg. Le forage a été implanté sur le profil près de la station -175 (*voir chap. 3.2*). Ce forage a recoupé jusqu'à 45,30 m les graviers sableux de la formation de Neuenburg, puis jusqu'à la profondeur finale de 60 m des argiles et des silts. Le substratum au niveau du forage correspond à la limite à 70 Ωm du profil de résistivité qui correspond ici à la base des alluvions. Vers l'Ouest cette limite géophysique s'approfondit jusqu'à environ 75 m de profondeur au niveau de la station -750. Plus à l'Ouest elle remonte légèrement. Le modèle géologique a été révisé en tenant compte des résultats de la géophysique (*chap. 3.3*).

Dans les parties centrale et ouest du profil, il apparaît des résistivités légèrement plus basses dans les graviers quaternaires. Entre les stations -250 et -600

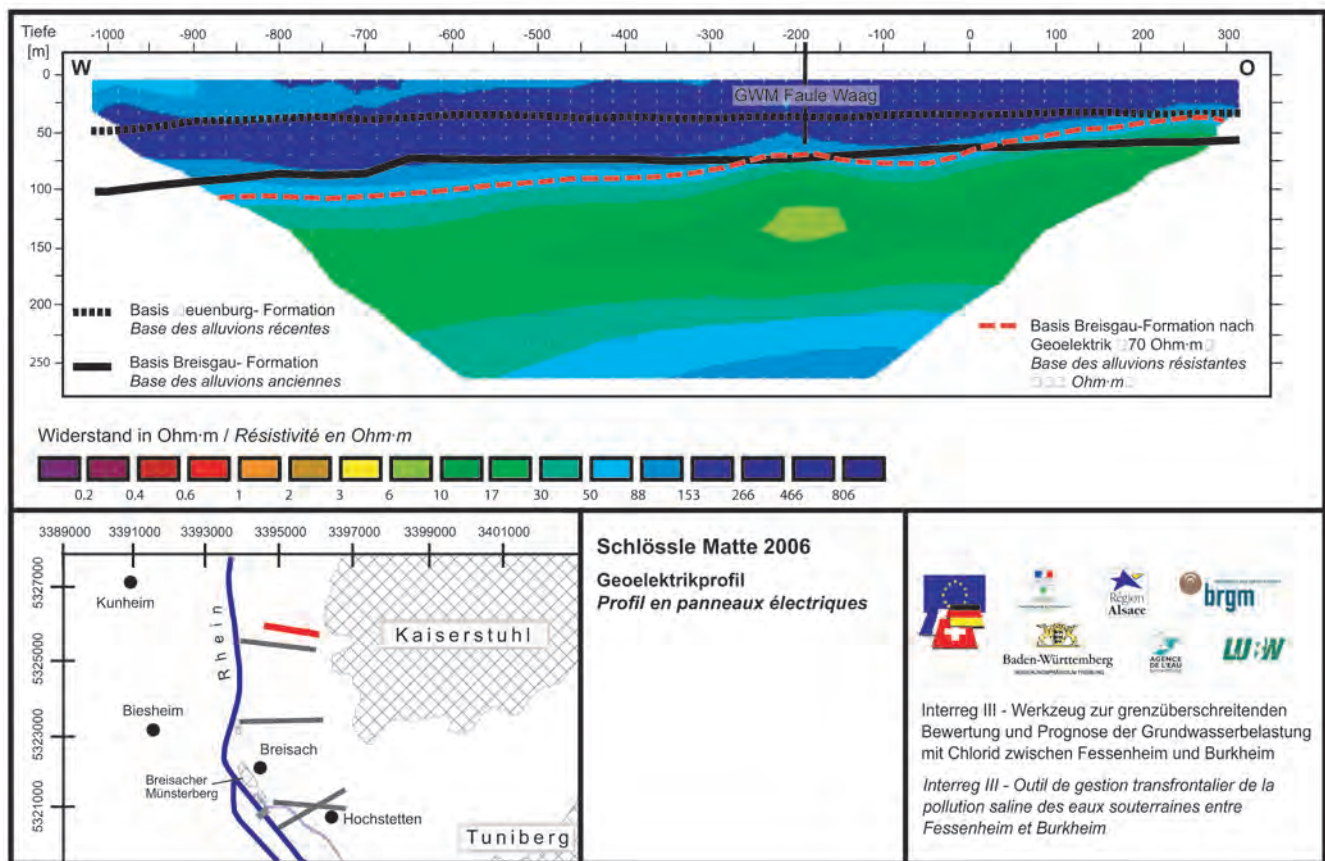


Abbildung 3.5: Geoelektrikprofil Schlössle Matte
Figure 3.5 : Profil géophysique Schlössle Matte.

-600 ist diese Zone nur oberflächennah vorhanden, nach Westen fällt sie bis 60 m u. GOK ab (Abb. 3.5). Dabei sind die spezifischen Widerstände nahe der Geländeoberfläche niedriger als im tieferen Untergrund. Diese spezifischen Widerstände werden auf erhöhte Chloridkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser zurückgeführt. Diese Interpretation stimmt gut mit den Ergebnissen der hydrochemischen Beprobung überein (Kap. 3.4).

ces résistivités basses sont proches de la surface, vers l'Ouest elles s'enfoncent jusqu'à une profondeur de 60 m (fig. 3.5). On note que les résistivités proches de la surface sont plus basses que celles situées plus profond. On les interprète comme la présence d'une salinité plus élevée dans la nappe peu profonde. Cette interprétation est confirmée par les résultats des campagnes de prélèvements et d'analyse de surface (chap. 3.4).

3.2 Errichtung von Grundwassermessstellen und begleitende Maßnahmen

Zu Erkundung der Untergrundverhältnisse sowie der hydrochemischen und isotopischen Beschaffenheit des Grundwassers wurden drei Bohrungen abgeteuft und zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Darin wurden Pumpversuche, bohrlochgeophysikalische Messungen und Grundwasseruntersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse wurden zur Eichung der geoelektrischen Messungen (Kap. 3.1), zur Überarbeitung der Aquiferbasiskarte (Kap. 3.3) und zur hydrochemischen Interpretation (Kap. 3.4) herangezogen. Die Lage der Bohrungen ist im Übersichtsplan (Abb. 1.1) dargestellt, wichtige Angaben zu den Grundwassermessstellen sind in Tab. 3.2 zusammengefasst.

Die Durchführung und die Ergebnisse der Bohrarbeiten sowie des Baus der Grundwassermessstellen sind im Bericht des Büros Neumann, Lebede, Schweizer vom

3.2 Mise en place de piézomètres et travaux associés

Trois forages ont été forés et équipés en piézomètres dans le but de reconnaître la lithologie de l'aquifère ainsi que la composition chimique et isotopique des eaux souterraines. On y a effectué des essais de pompage, des diagraphies et des analyses des eaux souterraines. Les résultats de ces travaux ont été utilisés pour recalculer les profils géophysiques (*cf. chap. 3.1*), pour réviser la carte du substratum (*chap. 3.3*) et pour l'interprétation de la chimie des eaux. La localisation des forages est représentée sur la carte d'ensemble du secteur d'étude (*fig. 1.1*), les données principales sur les ouvrages sont récapitulées dans le tableau 3.2.

L'exécution et les résultats des travaux de forage ainsi que l'équipement en piézomètres ont décrits en détail dans le rapport du bureau d'études Neumann,

	GWM01/07 Faule Waag	GWM flach Geiswasser Piézomètre superficiel	GWM tief Geiswasser Piézomètre profond
LGRB- Archivnummer (D) Numéro LGRB (D)	Bo 7911/641	Bo 8011/569	Bo 8011/570
GW-Nummer (D) Numéro de piézomètre (D)	8504/019-2	8506/020-2	8508/020-3
BSS-Archivnummer (F) Indice national BSS (F)	03435X0151/GWM	03795X0111/GWM2	03795X0112/GWM1
R-Wert Abscisse Gauss-Krüger 3	³³ 95432,2	³³ 96578,9	³³ 96574,9
H-Wert Ordonnée Gauss-Krüger 3	⁵³ 26294,1	⁵³ 14691,3	⁵³ 14687,0
Rohroberkante [m NN] Altitude du repère (D)	186,154	198,448	198,323
Geländeoberkante [m NN] Altitude du sol (D)	185,40	197,40	197,30
Geländeoberkante [m NGF] (F) Altitude du sol (NGF)	185,95	197,95	197,85
Ausbaudurchmesser [mm] Diamètre intérieur [mm]	125	125	125
Abdichtung von ...bis [m u. GOK] Bouchons de... à [m de profondeur]	24,20 - 24,80 30,90 - 33,90	26,80 - 32,80 (Zementation/cimentation)	29,0 - 39,0 79,0 - 89,0 119,0 - 129,0 147,0 - 157,0 178,0 - 183,0
Filterstrecke von...bis [m u. GOK] Crépiné de... à [m de profondeur]	35,3 - 45,3	35,0 - 55,0	165,0 - 177,0 186,0 - 208,0

Tabelle 3.2: Angaben zu den Grundwassermessstellen Faule Waag sowie Geiswasser flach und tief.
Tableau 3.2: Données des piézomètres Faule Waag et Geiswasser superficiel et profond.

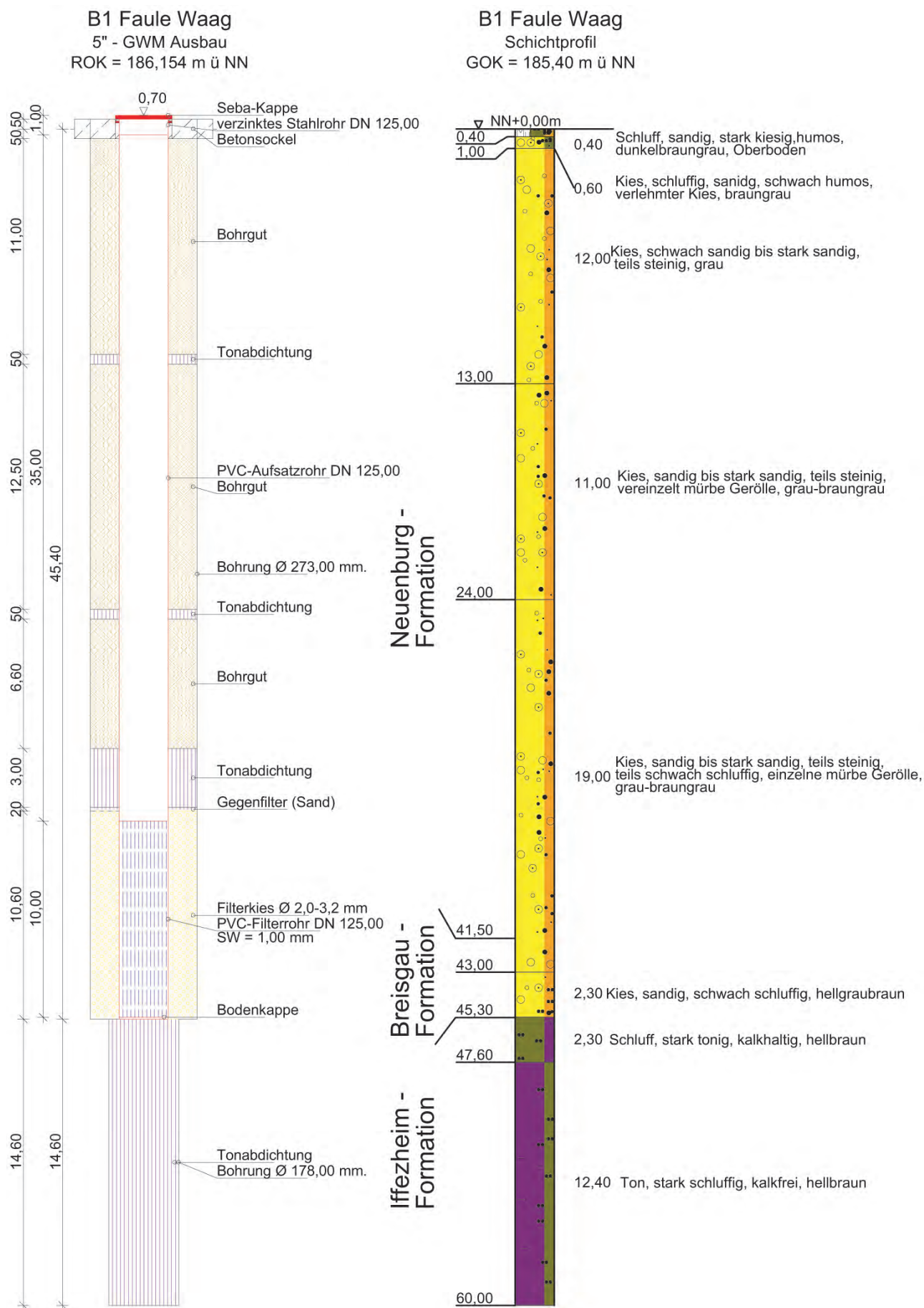


Abbildung 3.6: Schichtenfolge, Ausbauplan und bohrlochgeophysikalische Messungen in der GWM Faule Waag.

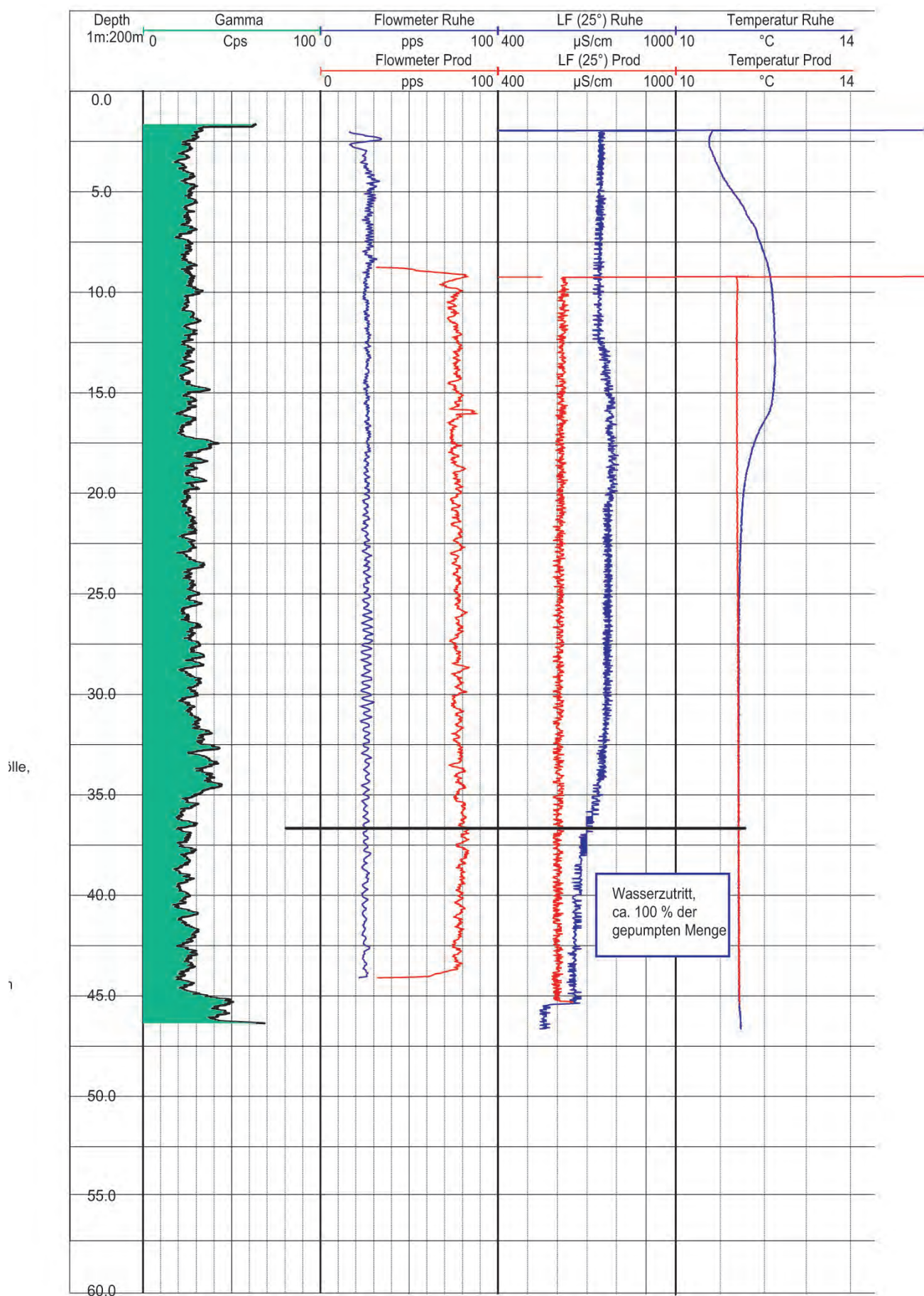


Figure 3.6 : Lithologie, équipement et diagraphies dans le piézomètre Faule Waag.

21.12.2007 (Neumann, Lebede, Schweizer 2007), die Ergebnisse der Pumpversuche im Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007 (FUNK 2007), die der Bohrlochgeophysik im Bericht der Fa. Terratec, Heitersheim vom 5.12.2007 (TERRATEC 2007) dokumentiert. Die Berichte sind auf der beigefügten CD-ROM enthalten.

3.2.1 Grundwassermessstelle Faule Waag

Die Grundwassermessstelle Faule Waag wurde in der Zeit vom 13.08. bis 30.08.2007 im Vorfeld des Brunnens Faule Waag der Wasserversorgung Vogtsburg errichtet. Sie liegt ca. 430 m südwestlich des Brunnens, dessen Filterstrecke zwischen 19,3 und 34 m u. GOK bis zur Basis der Kiesabfolge reicht. Darunter folgen feinkörnige Sedimente, die die Aquiferbasis bilden. Die Bohrung zur GWM Faule Waag wurde bis 10,0 m u. GOK im Trockenrammkernverfahren, darunter bis zur Endteufe im Rammkernverfahren mit Verwendung von Kunststofflinern abgeteuft. Ihr Standort wurde so gewählt, dass sich in ihr möglicherweise auftretende Veränderungen in der Chloridverbreitung bemerkbar machen, bevor sie den Brunnen Faule Waag erreichen (Vorfeldmessstelle).

Schichtenfolge

Die Bohrung zur Grundwassermessstelle Faule Waag ist 60 m tief (Abb. 3.6). Bis 45,3 m u. GOK wurde Fein- und Grobkies mit unterschiedlichen Sandanteilen angetroffen, darunter bis zur Endtiefe tonige Schluffe bis schluffige Tone. Dabei handelt es sich vermutlich um Feinsedimente der Iffezheim-Formation. Die Bohrung wurde ca. 15 m in die Feinsedimente abgeteuft. Hiermit wurde untersucht, ob unter dem oberen Grundwasserleiter ein weiterer Kieskörper mit möglicherweise erhöhten Chloridkonzentrationen folgt. Dies konnte ausgeschlossen werden. Der tertiäre Festgesteinsuntergrund wurde nicht erreicht.

Die Bohrung wird stratigraphisch wie folgt gegliedert:

- 0,0 – 41,5 m: Neuenburg-Formation
(ältere Kiese)
- 41,5 – 45,3 m: Breisgau-Formation
(jüngere Kiese)
- 45,3 – 60,0 m: Iffezheim-Formation (?)
(jüngeres Pliozän)

Der Ausbauplan ist in Abb. 3.6 dargestellt. Die GWM wurde am 18.10.2007 klargespült.

Pumpversuch

Der Ablauf des Pumpversuches in der Grundwassermessstelle Faule Waag ist in Tab. 3.3 wiedergegeben.

Lebede, Schweizer daté du 21 décembre 2007 (Neumann, Lebede, Schweizer 2007). Les résultats des pompages d'essai sont présentés dans le rapport du bureau d'études Funk du 13 novembre 2007 (FUNK 2007), les diagraphies dans le rapport Terratec, Heitersheim du 5 décembre 2007 (TERRATEC 2007). Tous ces rapports sont disponibles sur le CD-ROM joint au rapport.

3.2.1 Piézomètre de Faule Waag

Le piézomètre de Faule Waag a été mis en place du 13 au 30 août 2007 en amont du puits AEP Faule Waag de la Ville de Vogtsburg. Il est situé environ 430 m au SW du puits, qui est crépiné de 19,3 à 34 m jusqu'à la base des graviers. Les graviers surmontent ici des sédiments fins qui constituent le substratum de l'aquifère. Le forage a été effectué jusqu'à 10 m de profondeur au carottier battu à sec, puis continué jusqu'à sa profondeur finale au carottier battu protégé par un casing en plastique. L'emplacement a été choisi pour pouvoir détecter des changements dans l'extension de la langue salée avant qu'elle n'atteigne le puits AEP Faule Waag (piézomètre d'alerte).

Lithologie rencontrée

Le forage du piézomètre Faule Waag a atteint 60 m de profondeur (Fig. 3.6). Jusqu'à 45,3 m il a traversé des graviers fins à grossiers avec une proportion plus ou moins importante de sable, puis jusqu'à sa profondeur finale des limons argileux et des argiles silteuses. Il s'agit là probablement de sédiments fins appartenant à la formation d'Iffezheim. Le forage a été poussé environ 15 m dans les sédiments fins. Il s'agissait en effet de vérifier s'il n'y avait pas une deuxième séquence de graviers plus profonde portant des eaux plus salées. Ceci apparaît maintenant exclu. Les terrains tertiaires indurés (marnes oligocènes ou autres) n'ont pas été atteints par le forage.

La coupe stratigraphique du forage est la suivante :

- 0,0 – 41,5 m : formation de Neuenburg
(alluvions récentes)
- 41,5 – 45,3 m : formation de Breisgau
(alluvions anciennes)
- 45,3 – 60,0 m : formation d'Iffezheim (?)
(Pliocène final)

L'équipement de l'ouvrage est représenté fig. 3.6. Le piézomètre a été purgé le 18 octobre 2007.

Essai de pompage

Le déroulement de l'essai de pompage dans le piézomètre est décrit en table 3.3. L'interprétation de la

Die Auswertung der Absenkungsphase des Pumpversuches liefert eine Transmissivität von $T = 2,09 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Bei einer Filterlänge von $H = 10 \text{ m}$ ergibt sich daraus der Quotient $T/H = 2,09 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Bohrlochgeophysikalische Messungen

Am 28.11.2007 wurden in der GWM Faule Waag folgende bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt:

- Leitfähigkeitslog (Ruhe und Pumpbetrieb)
- Temperaturlog (Ruhe und Pumpbetrieb)
- Flowmeter (Ruhe und Pumpbetrieb)
- Gammalog

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der Abb. 3.6 dargestellt.

Die elektrische Leitfähigkeit nimmt im Ruhezustand im Filterbereich von ca. $760 \mu\text{S}$ bei 35 m Tiefe auf ca. $660 \mu\text{S/cm}$ an der Basis der Filterstrecke (45,3 m u. GOK) ab. Bei Pumpbetrieb nimmt die elektrische Leitfähigkeit nur geringfügig mit der Tiefe auf $600 \mu\text{S/cm}$ in 45,3 m Tiefe ab.

Die Flowmetermessung im Ruhezustand erbrachte keinen Hinweis auf eine Vertikalströmung in der GWM. Der Wasserzutritt in die GWM erfolgt zwischen 45,3 m u. GOK (Basis der Filterstrecke) und ca. 36,7 m u. GOK.

Hydrochemische Untersuchungen

In der GWM Faule Waag wurde am 09.11. 2007 eine Grundwasserprobe entnommen und auf die Hauptinhaltsstoffe sowie auf die Isotope Sauerstoff ^{18}O , Deuterium und Tritium sowie auf SF_6 untersucht. Für die Probe aus 43 m Tiefe wurden 51 mg/l Chlorid bestimmt. Auffällig sind die deutlich erhöhten Nitratgehalte von 76,8 mg/l. Die Isotopengehalte deuten auf ein junges Grundwasser (Tritium: 13,9 TU) mit einem geringen Anteil an Rheinuferfiltrat (<30%), möglicherweise mit Beteiligung von Möhlinuferfiltrat hin (HYDROISOTOP 2007b). Die hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungsergebnisse sind vollständig in der Tabelle 1 auf der CD-ROM wiedergegeben.

3.2.2 Grundwassermessstelle Geiswasser tief (GWM 1)

Die GWM 1 Geiswasser tief wurde in der Zeit vom 27.08. bis 19.09.2007 auf der Rheininsel ca. 1,7 km südöstlich von Geiswasser errichtet. Die Bohrung wurde bis 18,0 m u. GOK im Trockenrammkernverfahren, darunter bis zur Endteufe im Druckspülbohrverfahren mit Rollenmeißeln und einer Benthonit-gestützten Bohrspülung abgeteuft (Abb. 3.7).

phase de rabattement donne une transmissivité de $2,09 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Avec une hauteur de crépine de 10 m cela correspond à une perméabilité de $2,09 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Diagraphies

Les diagraphies suivantes ont été réalisées dans le piézomètre Faule Waag le 28 novembre 2007 :

- Log de résistivité (au repos et en pompage)
- Log de température (au repos et en pompage)
- Micromoulinet (au repos et en pompage)
- Log gamma ray

Les résultats sont représentés en fig. 3.6.

La résistivité au repos diminue le long de la crépine de $760 \mu\text{S}$ à 35 m à $660 \mu\text{S}$ à la base (45,3 m). En pompage la résistivité diminue très légèrement avec la profondeur pour atteindre $600 \mu\text{S/cm}$ à 45,3 m.

Les mesures de débit par micromoulinet ne montrent pas de flux vertical au repos dans le piézomètre. Les arrivées d'eau en pompage se font entre la base de la crépine à 45,3 m et environ 36,7 m de profondeur.

Chimie des eaux

Un prélèvement a été effectué dans le piézomètre Faule Waag le 9 novembre 2007 et a été analysé pour les paramètres chimiques principaux et pour les isotopes oxygène 18, deutérium et tritium ainsi que pour le SF_6 . Le prélèvement à 43 m de profondeur a donné 51 mg/L de chlorures. La concentration en nitrates est très élevée avec 76,8 mg/L. Les teneurs en isotopes indiquent qu'il s'agit d'une eau récente (tritium : 13,9 TU) avec une faible composante d'eau d'infiltration du Rhin (< 30 %) et peut-être une part d'eau d'infiltration de la Möhlin (HYDROISOTOP 2007b). Les résultats des analyses chimiques et isotopiques complets sont donnés dans le tableau 1 du CD-ROM joint au rapport.

3.2.2 Piézomètre Geiswasser profond (GWM 1)

Le piézomètre profond de Geiswasser GWM 1 a été mis en place du 27 août au 19 septembre 2007 sur l'île du Rhin environ 1,7 km au SE de Geiswasser. Le forage a été exécuté jusqu'à 18 m de profondeur au carottier battu à sec, puis continué jusqu'à sa profondeur finale au tricône à la boue sous pression en utilisant une boue à la bentonite pour stabiliser le trou (fig. 3.7).

Phase	Datum, Uhrzeit Date, heure	Dauer/Durée Std : Min : Sek h : min : sec	Wasserspiegel [m u. POK] Niveau d'eau [m/repère]	Absenkung [m] Rabatement [m]	Fördermenge [l/s] Débit [L/s]
Ruhewasserspiegel Niveau d'eau initial	05.11.07 11:15	00 :05	2,03		
Beginn des Pumpversuchs Début du pompage	05.11.07 11:20		2,03		4,93
Ende des Pumpversuchs Beginn des Wiederanstiegs Fin du pompage, début de la remontée	05.11.07 18:55	07:35	5,77	3,74	
Ende des Wiederanstiegs Fin de la remontée	05.11.07 19:09	00:14	2,02		

Tabelle 3.3: Pumpversuch in der GWM Faule Waag (aus dem Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007).
Tableau 3.3: Essai de pompage dans le piézomètre Faule Waag (d'après le rapport Funk du 13.11.2007).

Die Bohrung ist 209 m tief. Bis 168 m u. GOK wurde Fein- bis Grobkies mit unterschiedlichen Sandanteilen angetroffen. Bei 52 m u. GOK wechselt die Farbe der Kiese von grau zu braungrau. Darunter traten in den Kiesen bereichsweise erhöhte Schluffgehalte auf. Von 168 bis 181 m u. GOK schließen hellbraune Kiese und Schluffe an. Darunter folgen erneut sandig-schluffige Kiese. Der tertiäre Festgesteinsuntergrund wurde vermutlich bei 208 m u. GOK erreicht. Aufgrund des destruktiven Bohrverfahrens sind die detaillierte Ansprache der Bohrproben sowie ihre stratigraphische Interpretation erschwert.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse der bohrlochgeophysikalischen Messungen (s.u.) wird die Bohrung stratigraphisch wie folgt gegliedert:

- 0 – 52 m: Neuenburg-Formation
(ältere Kiese)
- 52 – (181?) 194 m: Breisgau-Formation
(jüngere Kiese)
- 194 (181?) – 208 m: Iffezheim-Formation
(jüngeres Pliozän)
- 208 – 209 m: Älteres Tertiär

Die Bohrung wurde als Grundwassermessstelle 1 Geiswasser tief ausgebaut. Der Ausbauplan ist in *Abb. 3.8* dargestellt. Die GWM wurde am 30./31.10.2007 klargespült.

Pumpversuch

Der Ablauf des Pumpversuches in der Grundwassermessstelle Geiswasser tief ist in *Tab. 3.4* wiedergegeben. Die Auswertung der Absenkungsphase des Pumpversuches liefert eine Transmissivität von $T = 6,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Bei einer Filterlänge von $H = 34 \text{ m}$ ergibt sich daraus der Quotient $T/H = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Le forage a atteint 209 m de profondeur. Jusqu'à 168 m il a traversé des graviers fins à grossiers avec une proportion plus ou moins importante de sable. Vers 52 m on note un changement de couleur de gris à gris-brun. Ensuite on rencontre des séquences de graviers très silteux. De 168 à 181 m on rencontre des graviers et des limons brun clair, puis à nouveau des graviers sableux et silteux. Le socle tertiaire a probablement été atteint à 208 m de profondeur. La méthode de forage destructive rend difficile la description détaillée des échantillons et l'interprétation stratigraphique.

En tenant compte des résultats des diagraphies (cf. plus loin) on peut donner la coupe suivante :

- 0 – 52 m : formation de Neuenburg
(alluvions récentes)
- 52 – (181 ?) 194 m : formation de Breisgau
(alluvions anciennes)
- 194 (ou 181) – 208 m : formation d'Iffezheim
(Pliocène final)
- 208 – 209 m : Tertiaire induré

Le forage a été équipé en piézomètre profond. L'équipement est représenté en *fig. 3.8*. Le piézomètre a été purgé les 30/31 octobre 2007.

Pompage d'essai

Le déroulement de l'essai de pompage dans le piézomètre est décrit en *table 3.4*. L'interprétation de la phase de rabattement donne une transmissivité de $6,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Avec une hauteur de crépine de 34 m cela correspond à une perméabilité de $1,84 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Nach der Flowmetermessung treten im oberen Filterabschnitt 22 % der gesamten Wassermenge zu. Daraus errechnet sich die Transmissivität im oberen Filterabschnitt zu $T = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, die im unteren zu $T = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Bei der Filterlänge von $H = 12 \text{ m}$ im oberen Filterabschnitt ergibt sich daraus $T/H = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$, bei der Filterlänge von 24 m im unteren Abschnitt $T/H = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

Bohrlochgeophysikalische Messungen

Am 28.11.2007 wurden in der GWM 1 Geiswasser tief folgende bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt:

- Leitfähigkeitslog (Ruhe und bei Pumpbetrieb)
- Temperaturlog (Ruhe und bei Pumpbetrieb)
- Flowmeterlog (Ruhe und bei Pumpbetrieb)
- Gammalog

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der Abb. 3.7 dargestellt.

Nach früheren Messungen (RPF 2002) entspricht die Zählrate von ca. 25 Cps (bis in ca. 175 m u. GOK) im Gammalog den sandigen Kiesen der Neuenburg- und der Breisgau-Formation. Die Grenze zwischen der Neuenburg- und der Breisgau-Formation macht sich im Gammalog nicht durch veränderte Zählraten bemerkbar. Die deutlich erhöhten Zählraten ab ca. 194 m u. GOK sind typisch für die Iffezheim-Formation. Inwieweit bereits der Abschnitt mit erhöhten Zählraten unterhalb von 183 m zur Iffezheim-Formation gehört, ist unklar. Gegen diese Annahme spricht der hohe Grundwasserzufluss im Filterabschnitt oberhalb 194 m u. GOK (s.u.).

Die elektrische Leitfähigkeit nimmt im Ruhezustand im oberen Filterbereich von ca. 11280 μS bei 164,7 m u. GOK geringfügig auf ca. 11240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ an der Basis der Filterstrecke ab. Im unteren Filterabschnitt liegt die elektrische Leitfähigkeit in 190 m Tiefe bei 11130 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Zur Tiefe hin nimmt sie bis 198 m u. GOK auf 8990 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ab und steigt von da bis zur Basis der Filterstrecke wieder auf 11130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ an. Bei Pumpbetrieb liegt die elektrische Leitfähigkeit oberhalb von 190 m u. GOK etwa um ca. 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ über der in Ruhe.

Im Ruhezustand ist aus der Flowmetermessung eine schwache Aufwärtsströmung mit einem Grundwasserzutritt zwischen 187 und 197 m u. GOK und einem Grundwasseraustritt zwischen 165 und 173 m u. GOK zu erkennen. Bei Pumpbetrieb treten zwischen 165 und 173 m u. GOK ca. 22 % und zwischen 187 und 194 m ca. 78 % der gepumpten Wassermenge zu.

D'après les résultats obtenus au micromoulinet 22 % du débit provient de la crépine supérieure. On en déduit que la transmissivité de la crépine supérieure est de $0,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, et celle de la crépine inférieure de $1,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Avec une hauteur crépinée de 12 m pour la crépine supérieure la perméabilité calculée est de $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$, contre $6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ pour la crépine inférieure de 24 m.

Diagraphies

Les diagraphies suivantes ont été réalisées le 28 novembre 2007 dans le piézomètre Geiswasser profond :

- Log de résistivité (au repos et en pompage)
- Log de température (au repos et en pompage)
- Micromoulinet (au repos et en pompage)
- Log gamma ray

Les résultats de ces mesures sont représentés en figure 3.7.

En comparant ces résultats avec ceux obtenus précédemment dans d'autres forages (RPF 2002) l'intensité du log gamma-ray de 25 Cps jusqu'à environ 175 m de profondeur correspond aux graviers sableux des formations de Neuenburg et de Breisgau. La limite entre les deux formations n'est pas visible sur le log gamma-ray. Par contre les intensités nettement plus élevées mesurées à partir de 194 m de profondeur environ sont typiques de la formation d'Iffezheim. A partir de 183 m on observe déjà des intensités élevées, mais il n'est pas certain que cette section appartient aussi à la formation d'Iffezheim, en raison des fortes venues d'eau observées dans la crépine au-dessus de 194 m (cf. plus loin).

La résistivité électrique au niveau de la crépine supérieure augmente légèrement au repos de 11280 μS à 164,7 m jusqu'à 11240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la base de la crépine. Au niveau de la crépine inférieure la résistivité est de 11130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 190 m. Elle diminue avec la profondeur jusqu'à 198 m (8990 $\mu\text{S}/\text{cm}$) pour augmenter à nouveau jusqu'à la base de la crépine à 11130 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En pompage la résistivité est supérieure d'environ 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à celle au repos au-dessus de 190 m de profondeur.

Au repos le micromoulinet montre un léger débit vertical vers le haut avec une arrivée d'eau entre 187 et 197 m de profondeur et entre 165 et 173 m de profondeur. Au pompage on mesure environ 22 % du débit entrant entre 165 et 173 m de profondeur et environ 78 % entre 187 et 194 m de profondeur.

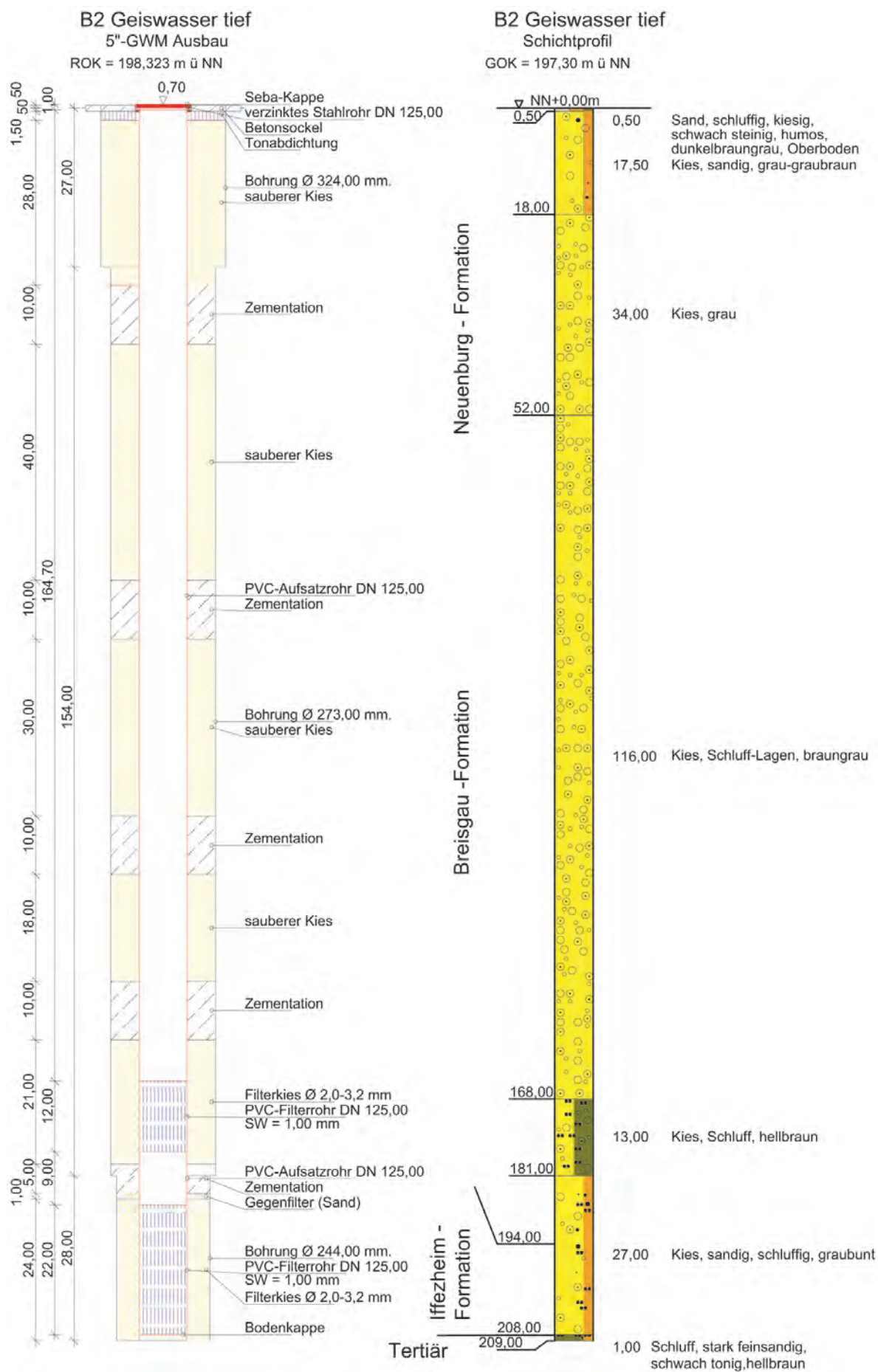


Abbildung 3.7: Schichtenfolge, Ausbauplan und bohrlochgeophysikalische Messungen in der GWM Geiswasser tief.

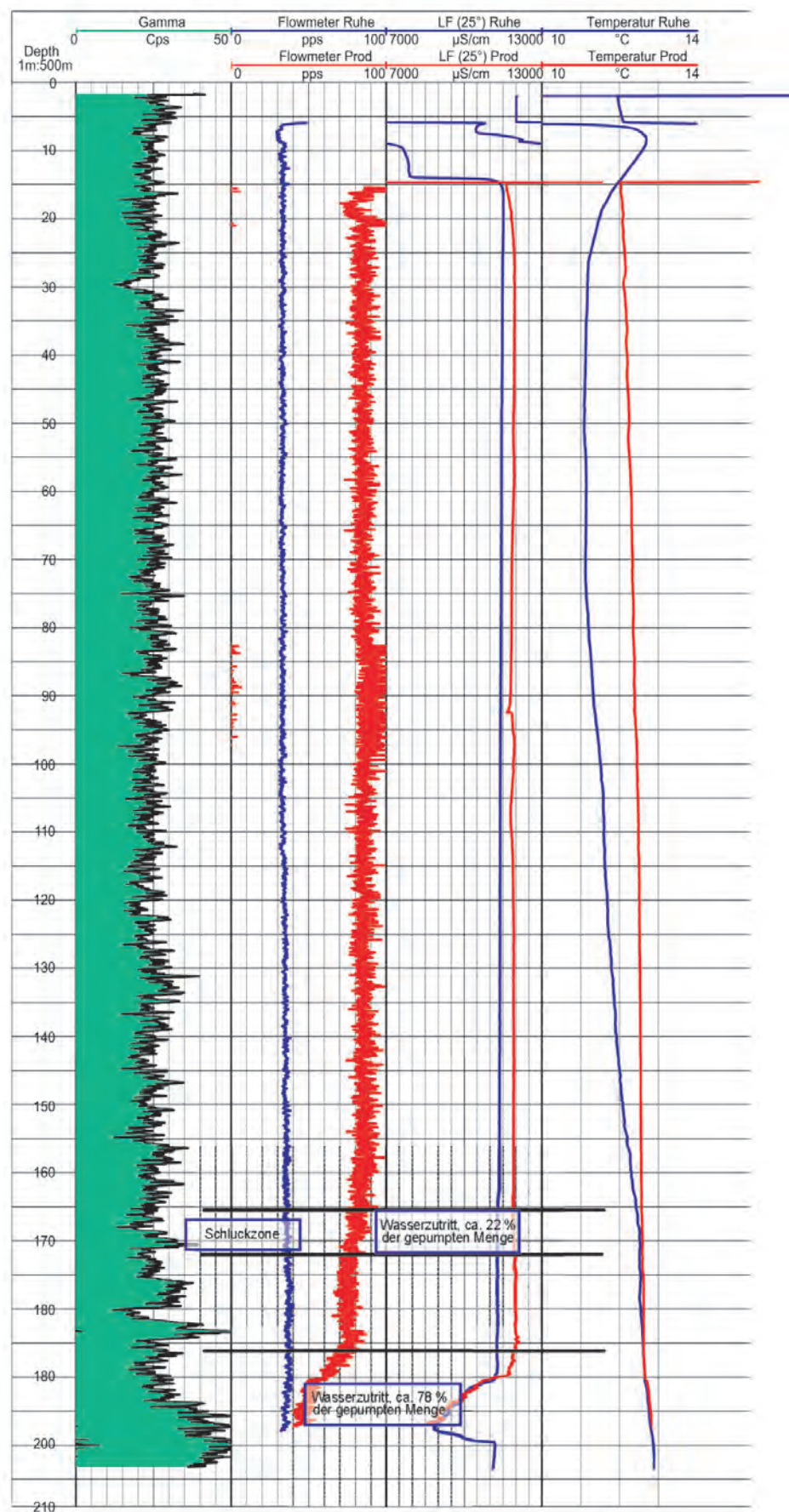


Figure 3.7 : Lithologie, équipement et diagraphies dans le piézomètre Geiswasser profond.

Hydrochemische Untersuchungen

In der GWM Geiswasser tief wurden Grundwasserproben aus mehreren Tiefen orientiert entnommen und auf die Hauptinhaltsstoffe sowie auf die Isotope ^{18}O , Deuterium und Tritium sowie auf SF_6 untersucht. In der Messstelle wurden aus 200 m Tiefe am 25. 10. und am 30. 10. jeweils eine Pumpprobe und am 07.11.2007 eine Schöpfprobe entnommen. Die Chloridkonzentrationen lagen bei 2282 mg/l, 3131 mg/l und 2770 mg/l. Die Schöpfprobe aus 175 m wies einen Chloridgehalt von 3221 mg/l auf.

Die Isotopengehalte deuten auf überwiegend "altes" Grundwasser (Tritium: 1,1 – 1,7 TU) mit geringen (ca. 10 – 20 %) Anteilen einer jungen Grundwasserkomponente hin (HYDROISOTOP 2007b). Diese Alters-einstufung der Wässer legt die Vermutung nahe, dass aufsteigende Tiefenwässer an der Mineralisation beteiligt sind.

Die hydrochemischen und isotopehydrologischen Untersuchungsergebnisse sind vollständig in der Tabelle 1 auf der CD-ROM wiedergegeben.

Etudes géochimiques

Le piézomètre Geiswasser profond a fait l'objet de prélèvements à différentes profondeurs qui ont été analysés pour les paramètres classiques ainsi que pour les isotopes oxygène 18, deutérium et tritium ainsi que pour le SF_6 . Des prélèvements par pompage à 200 m de profondeur ont été réalisés les 25 et 30 octobre 2007 et complétés par un prélèvement à ma bouteille le 7 novembre 2007. Les concentrations en chlorures analysées étaient de 2282, 3131 et 2770 mg/l. Un prélèvement à la bouteille à 175 m de profondeur a donné une concentration de 3221 mg/l.

Les teneurs en isotopes indiquent qu'il s'agit d'une eau "ancienne" (tritium : entre 1,1 et 1,7 TU) avec une faible composante (d'environ 10 à 20 %) d'eau jeune (HYDROISOTOP 2007b). Ces éléments indiquent que des remontées d'eaux profondes participent à la minéralisation.

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques sont présentés dans leur totalité dans le tableau 1 sur le CD-ROM joint.

Phase	Datum, Uhrzeit Date, heure	Dauer/Durée Std : Min : Sek h : min : sec	Wasserspiegel [m u. POK] Niveau d'eau [m/repère]	Absenkung [m] Rabattement [m]	Fördermenge [l/s] Débit [L/s]
Ruhewasserspiegel <i>Niveau d'eau initial</i>	07.11.07 09:26	00:08	6,09		
Beginn des Pumpversuchs <i>Début du pompage</i>	07.11.07 09:34		6,16		5,15
Ende des Pumpversuchs Beginn des Wiederanstiegs <i>Fin du pompage, début de la remontée</i>	07.11.07 17:36	08:02	9,90	3,81	
Ende des Wiederanstiegs <i>Fin de la remontée</i>	07.11.07 20:36	03:00	6,13		

Tabelle 3.4: Pumpversuch in der GWM Geiswasser 1 (tief)

(aus dem Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007, dort als GWM 2 bezeichnet).

Tableau 3.4: Essai de pompage dans le piézomètre Geiswasser profond

(d'après le rapport du bureau d'études Funk du 13 novembre 2007, où il est dénommé GWM 2).

3.2.3 Grundwassermessstelle Geiswasser flach (GWM 2)

Die GWM 2 Geiswasser flach wurde in der Zeit vom 19.09. bis 01.10.2007 ca. 5,9 m neben der GWM Geiswasser tief errichtet. Die Bohrung ist 55 m tief. Die Schichtenfolge entspricht bis in diese Tiefe der der GWM Geiswasser tief.

Der Ausbauplan ist in Abb. 3.8 dargestellt. Die GWM 2 wurde am 19.10.2007 klargespült.

3.2.3 Piézomètre Geiswasser superficiel (GWM 2)

Le piézomètre superficiel de Geiswasser GWM 2 a été mis en place du 19 septembre au 1^{er} octobre 2007 à environ 5,9 m du piézomètre Geiswasser profond. Le forage fait 55 m de profondeur. La coupe est la même que dans le forage profond.

L'équipement est présenté en fig. 3.8. Le piézomètre GWM 2 a été purgé le 19 octobre 2007.

Pumpversuch

Der Ablauf des Pumpversuches in der GWM Geiswasser flach ist in Tab. 3.5 wiedergegeben. Die Auswertung der Absenkungsphase des Pumpversuches liefert eine Transmissivität von $T = 5,13 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Bei einer Filterlänge von $H = 20 \text{ m}$ ergibt sich daraus der Quotient $T/H = 2,57 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Bohrlochgeophysikalische Messungen

Am 28.11.2007 wurden in der GWM Geiswasser flach folgende bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt:

- Leitfähigkeitslog (Ruhe und bei Pumpbetrieb)
- Temperaturlog (Ruhe und bei Pumpbetrieb)
- Flowmeterlog (Ruhe und bei Pumpbetrieb)
- Gammalog

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der Abb. 3.8 dargestellt.

Im Gammalog schwanken die Zählraten bis zur Endtiefe von 55 m u. GOK bei einer Variation von ± 5 Cps meist um den Wert 25 Cps. Diese Werte sind typisch für die sandigen Kiese der Neuenburg- und der Breisgau-Formation mit bereichsweise erhöhten Ton-/ Schluffgehalten.

Die elektrische Leitfähigkeit unterscheidet sich im Pumpbetrieb nur geringfügig von der im Ruhezustand. Sie liegt bis in ca. 50 m Tiefe annähernd konstant bei $3200 \mu\text{S}/\text{cm}$. Im weiteren Verlauf nimmt sie bis 51,6 m (Pumpbetrieb) bzw. 52,5 m Tiefe (Ruhezustand) auf $3100 \mu\text{S}/\text{cm}$, darunter bis in 54 m u. GOK auf $2900 \mu\text{S}/\text{cm}$ ab.

Im Ruhezustand ist aus der Flowmetermessung eine Aufwärtsströmung mit einem Grundwasserzutritt zwischen 43,5 und 50,0 m u. GOK und einem Grundwasseraustritt zwischen 36,5 und 39 m u. GOK zu erkennen. Bei Pumpbetrieb treten zwischen 36,5 und 38,0 m ca. 28 %, zwischen 43,5 m und 50 m ca. 12 % und zwischen 50,0 und 53,3 m u. GOK ca. 60 % der gepumpten Wassermenge zu.

Hydrochemische Untersuchungen

In der GWM 2 Geiswasser flach wurde am 22.10.2007 eine Grundwasserprobe entnommen und auf die Hauptinhaltsstoffe sowie auf die Isotope ^{18}O , Deuterium und Tritium sowie auf SF_6 untersucht. Für die Probe aus 53 m Tiefe wurden 653 mg/l Chlorid bestimmt. Auffällig sind die deutlich erhöhten Nitratgehalte von $56,2 \text{ mg/l}$, obwohl die GWM zwischen dem Rhein und dem Rheinseitenkanal liegt. Die hohen Nitratgehalte sind ein Hinweis auf die Unterströmung des Rheins und exfiltrierende Verhältnisse in diesem Gewässerabschnitt.

Essai de pompage

Le déroulement de l'essai de pompage dans le piézomètre est décrit en table 3.5. L'interprétation de la phase de rabattement donne une transmissivité de $5,13 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Avec une hauteur de crépine de 20 m cela correspond à une perméabilité de $2,57 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Diagraphies

Les diagraphies suivantes ont été réalisées le 28 novembre 2007 dans le piézomètre Geiswasser superficiel :

- Log de résistivité (au repos et en pompage)
- Log de température (au repos et en pompage)
- Micromoulinet (au repos et en pompage)
- Log gamma ray

Les résultats des mesures sont présentés en fig. 3.8.

Les valeurs obtenues par le log gamma-ray varient de ± 5 Cps autour d'une valeur moyenne de 25 Cps. Ces valeurs sont typiques des graviers sableux de la formation de Neuenburg ou de Breisgau qui contiennent par endroit une proportion plus élevée de silts et d'argiles.

La résistivité électrique en pompage est peu différente de celle au repos. Elle est pratiquement constante à $3200 \mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à 50 m de profondeur environ. Elle diminue ensuite à $3100 \mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à 51,6 m (en pompage) et 52,5 m (au repos), puis décroît jusqu'à la profondeur maximale de 54 m pour atteindre $2900 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Au repos on constate avec le micromoulinet un débit vertical vers le haut avec une arrivée d'eau entre 43,5 et 50,0 m et une sortie d'eau entre 36,5 et 39 m de profondeur. En pompage on observe environ 28 % des entrées entre 36,5 et 38,0 m, 12 % entre 43,5 m et 50 m et environ 60 % du débit entre 50,0 et 53,3 m de profondeur.

Etudes géochimiques

Une échantillon a été prélevé dans le piézomètre Geiswasser superficiel GWM 2 et analysé pour les paramètres classiques et les isotopes oxygène 18, deutérium et tritium, ainsi que pour le SF_6 . L'échantillon pris à 53 m de profondeur a donné 653 mg/l de chlorures. On note des teneurs en nitrates élevées également ($56,2 \text{ mg/l}$) bien que l'ouvrage soit situé entre le Rhin et le Grand Canal d'Alsace. Ces teneurs montrent que les eaux souterraines s'écoulent sous le Rhin et confirme que le Rhin ne s'infiltre pas dans ce secteur.

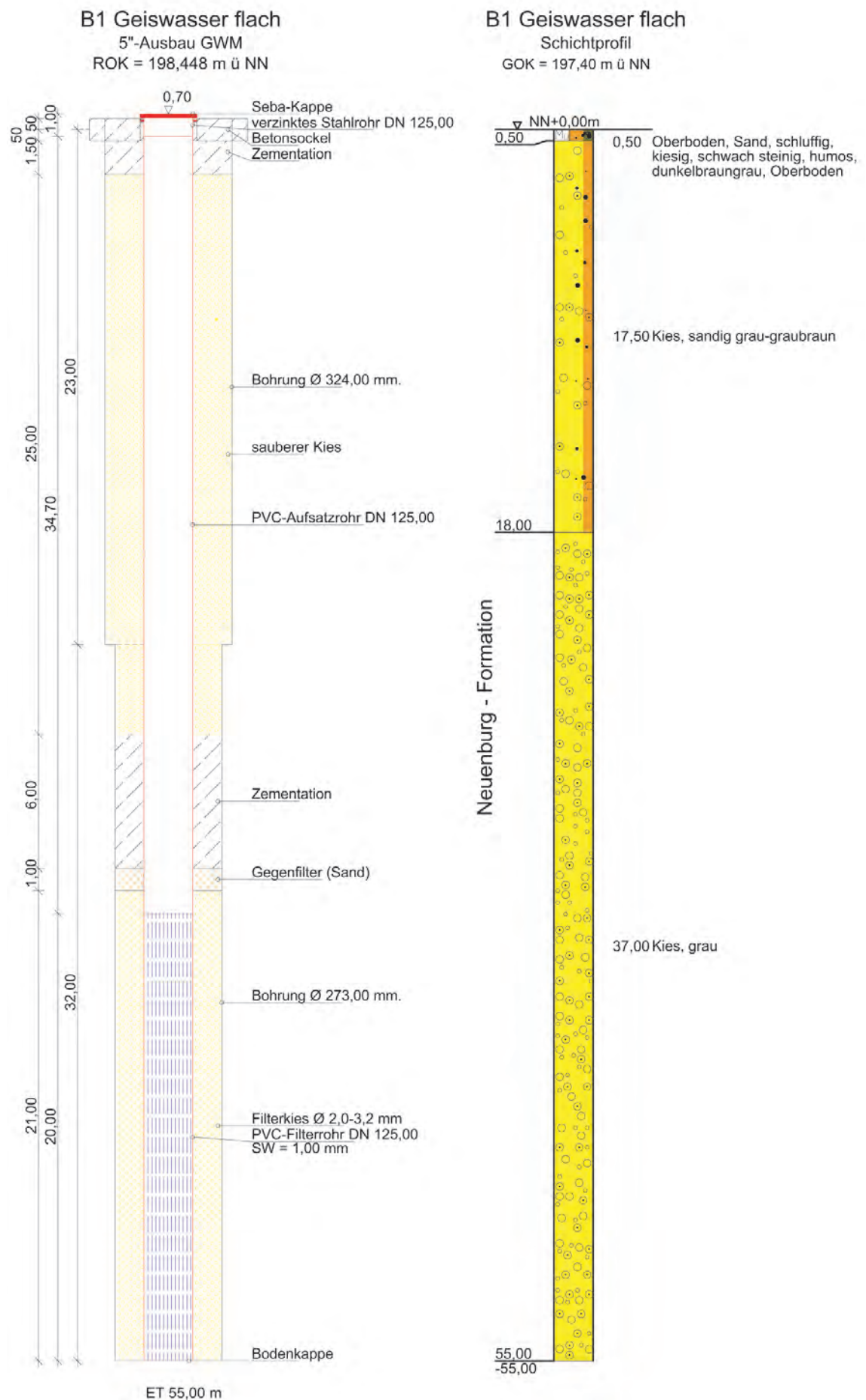


Abbildung 3.8: Schichtenfolge, Ausbauplan und bohrlochgeophysikalische Messungen in der GWM Geiswasser flach.

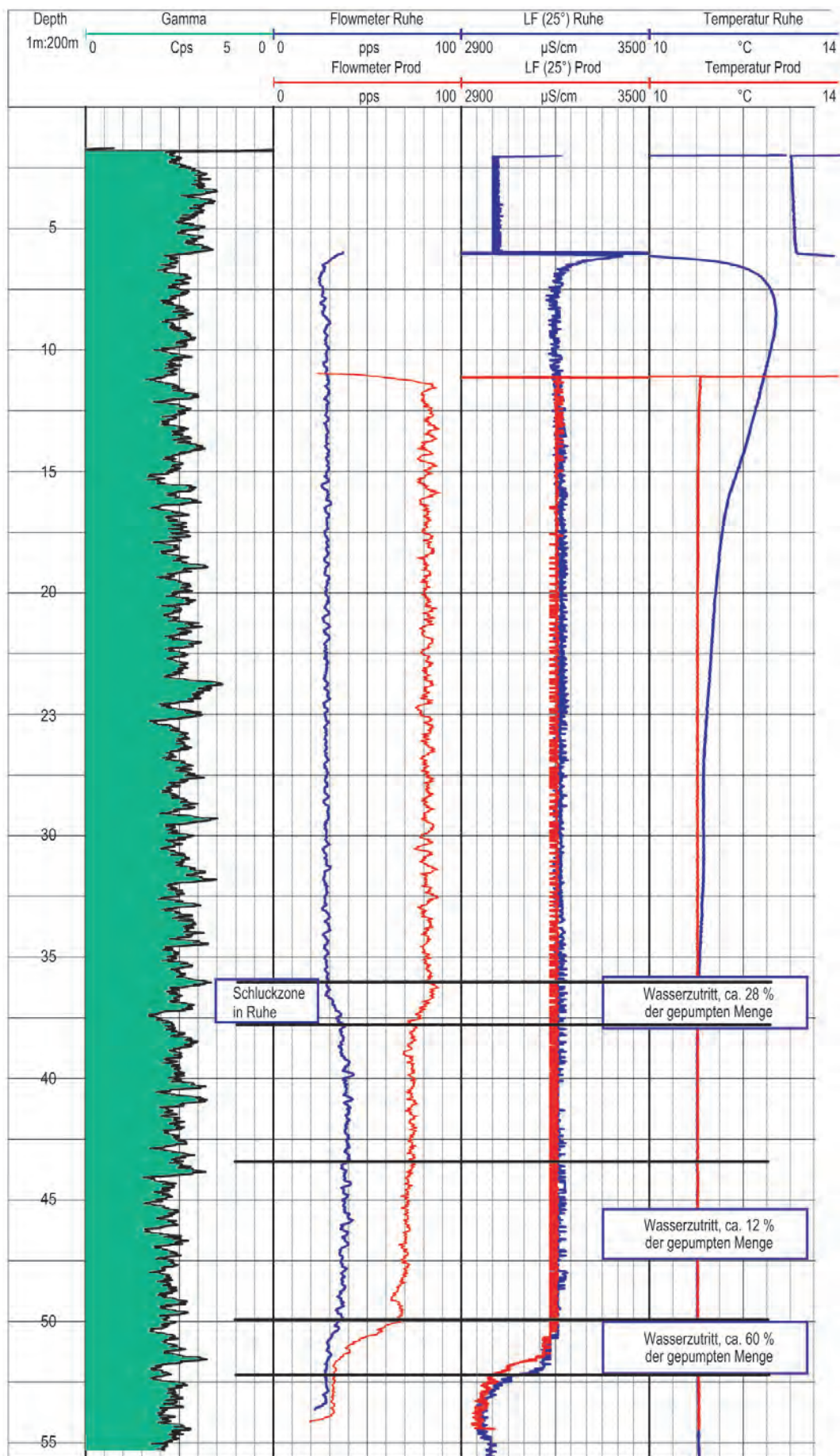


Figure 3.8 : Lithologie, équipement et diagraphies dans le piézomètre Geiswasser superficiel.

Die Isotopengehalte belegen einen hohen Anteil an lokal gebildetem jungem Grundwasser (Tritium: 15,2 TU, HYDROISOTOP 2007b). Die hydrochemischen und isopenhydrologischen Untersuchungsergebnisse sind vollständig in der Tabelle 1 auf der CD-ROM wiedergegeben.

Les concentrations en isotopes indiquent une grande proportion d'eaux jeunes d'origine locale par les précipitations (tritium : 15,2 TU, HYDROISOTOP 2007b). Les résultats des analyses géochimiques et isotopiques sont présentés dans leur totalité dans le tableau 1 sur le CD-ROM joint.

Phase	Datum, Uhrzeit Date, heure	Dauer/Durée Std : Min : Sek h : min : sec	Wasserspiegel [m u. POK] Niveau d'eau [m/repère]	Absenkung [m] Rabattement [m]	Fördermenge [l/s] Débit [L/s]
Ruhewasserspiegel <i>Niveau d'eau initial</i>	06.11.07 11:15	00:28	6,18		
Beginn des Pumpversuchs <i>Début du pompage</i>	06.11.07 11:42		6,17		5,30
Ende des Pumpversuchs Beginn des Wiederanstiegs <i>Fin du pompage, début de la remontée</i>	06.11.07 19:42	08:00	7,07	0,90	
Ende des Wiederanstiegs <i>Fin de la remontée</i>	07.11.07 09:26	13:42	6,18		

Tabelle 3.5: Pumpversuch in der GWM 2 Geiswasser (flach)

(aus dem Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007, dort als GWM 1 bezeichnet).

Tableau 3.5 : Essai de pompage dans le piézomètre Geiswasser superficiel

(d'après le rapport du bureau d'études Funk du 13 novembre 2007, où il est dénommé GWM 1).

3.3 Überarbeitung der Aquiferbasisgeometrie

Die Basis des quartären Kiesgrundwasserleiters wird im Untersuchungsgebiet durch die kalkfreien schluffigen Sande, Tone und dicht gelagerten Kiese der Iffezheim-Formation (älteres Unterpleistozän (?) bis Pliozän) oder durch oligozäne Ton- und Tonmergelsteine gebildet. Die Iffezheim-Formation ist vorwiegend im Bereich grabenartig abgesenkter Tiefschollen in größerer Mächtigkeit erhalten. Entlang des Kaiserstuhls können die oligozänen Ton- und Tonmergelsteine von Tuffen und Tuffiten oder mächtigerem Schwemmlöss überlagert sein.

Die Aquiferbasis fällt vom Schwarzwald- bzw. Kaiserstuhlrand im Osten sowie vom Vogesenrand im Westen zur Grabenmitte hin ein (Abb. 3.9 unten). Sie ist insbesondere südlich des Kaiserstuhls durch zahlreiche Verwerfungen versetzt. Neben der Grabentektonik wird dies vor allem auf salzinduzierte Bewegungen im tertiären Festgesteinsuntergrund zurückgeführt. Am tiefsten (mehr als 240 m u. GOK) liegt die Grenzfläche südwestlich des Kaiserstuhls im so genannten Becken von Geiswasser. Weitere auffällige Strukturen sind der salztektonisch bedingte Balgauer Dom sowie der Blodesheimer Salzrücken südwestlich davon. Ähnliche Aufragungen sind auch südöstlich von Colmar ausgebildet (Hettenschlager Dom). Nordöstlich des Balgauer Doms fällt eine süd-südost – nordnordwest verlaufende Grabenstruktur auf. Unter dem Rhein liegt die Aquiferbasis im Bereich der Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel ca. 130 m u. GOK (ca. 80 m NN), in der nördlich daran anschließenden Grabenstruktur ca. 190 m u. GOK (10 m NN). In der neuen Bohrung Geiswasser wurde sie in 168 m Tiefe (ca. 20 m NN) angetroffen. Zwischen dem Kaiserstuhl und dem Breisacher Münsterberg steigt die Aquiferbasis wieder bis 95 m u. GOK (95 m NN) an.

Die neuen Erkenntnisse aus den Bohrungen und den geoelektrischen Messungen erlauben in einigen Bereichen einen höheren Detaillierungsgrad bei der Darstellung der Aquiferbasis (Abb. 3.9 oben). Da dieser Grenze bei der Ausbreitung der Chloridfahne eine bedeutende Rolle zukommt, wurde sie im Zuge des Projektes entsprechend überarbeitet. Die revidierte Version wurde in das Grundwassermodell übernommen (Kap. 4).

3.3 Révision de la carte du substratum

La base de l'aquifère des alluvions quaternaires est constituée dans le secteur étudié soit par les sables silteux non calcaires, les argiles et les graviers très compacts de la formation d'Iffezheim (d'âge pléistocène ancien à pliocène), soit par les argiles et marnes oligocènes. La formation d'Iffezheim (aussi connue en Alsace sous le nom de Pliocène final) présente ici localement des épaisseurs significatives dans des secteurs affaissés où elle a été préservée dans des grabens. Le long du Kaiserstuhl les argiles et marnes oligocènes peuvent être surmontées de volcanites (tufs et tuffites) ou d'épaisses séquences de loess remaniés.

La base de l'aquifère (le substratum) s'approfondit vers le milieu du Fossé en s'éloignant de la Forêt-noire ou du Kaiserstuhl à l'Est et du piémont des Vosges à l'Ouest (*fig. 3.9, en bas*). Elle est décalée par de nombreuses failles, notamment au Sud du Kaiserstuhl. Ceci est dû non seulement à la tectonique d'effondrement du Fossé, mais aussi à la tectonique salifère qui affecte les formations tertiaires du Fossé. Le substratum atteint sa plus grande profondeur (plus de 240 m sous la surface du sol) au SW du Kaiserstuhl dans ce qu'on appelle la "fosse de Geiswasser". On remarque des structures importantes comme le dôme diapirique de Balgau ou la crête diapirique de Blodelsheim plus au SW. On connaît d'autres structures diapiriques analogues au SE de Colmar (dôme de Hettenschlag). Au NE du dôme de Balgau le substratum forme un graben orienté SSE-NNW. Le substratum se situe dans le secteur des bassins-tampons de l'île de Fessenheim à environ 130 m de profondeur (soit 80 m au-dessus du niveau de la mer), et s'abaisse dans ce graben à environ 190 m de profondeur (10 m au-dessus du niveau de la mer). Le nouveau forage de Geiswasser a atteint le substratum à 168 m de profondeur (près de 20 m au-dessus du niveau de la mer). Entre le massif du Kaiserstuhl et la colline du Münsterberg à Breisach, le substratum remonte jusqu'à 95 m de profondeur (95 m au-dessus du niveau de la mer).

Les résultats obtenus par les forages et les profils géophysiques permettent d'être beaucoup plus précis sur la géométrie du substratum dans certains secteurs (*fig. 3.9, en haut*). La carte du substratum, qui a une grande importance pour l'écoulement des saumures, a donc fait l'objet d'une révision dans le cadre du projet. Cette révision a pu être utilisée dans le modèle hydrodynamique (*cf. chap. 4*).

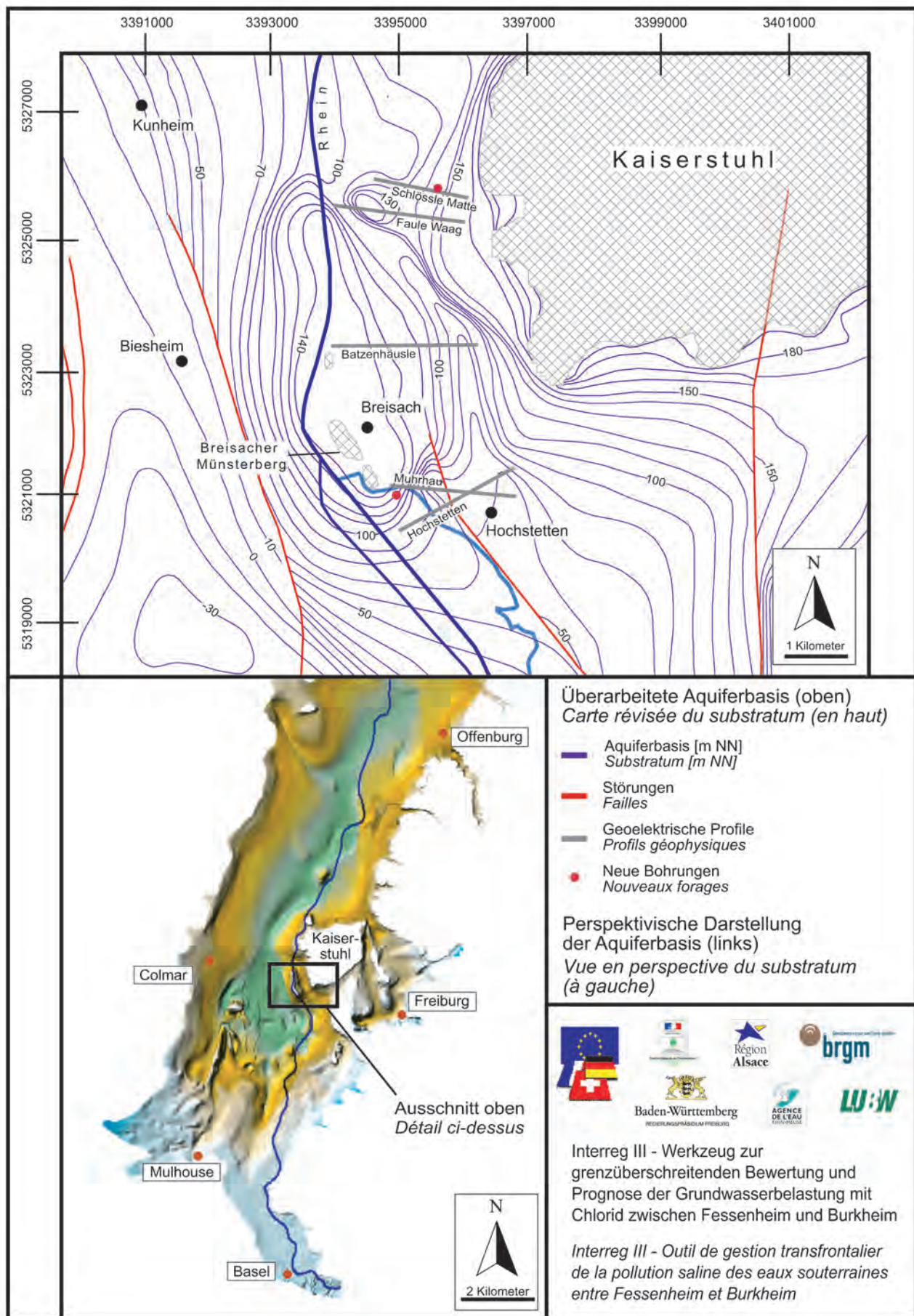


Abbildung 3.9: Perspektivische Übersichtsdarstellung der Aquiferbasis und überarbeitete Geometrie im Raum Breisach.
Figure 3.9 : Vue en perspective du substratum et de la géométrie révisée dans le secteur de Breisach.

Bereich südlich des Stadtgebiets von Breisach

Nach dem Aquifermodell (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007) wurde die Aquiferbasis westlich des Schwimmbades Breisach in einer Tiefe von ca. 60 m erwartet. Dagegen wurde sie in der Bohrung Schwimmbad Breisach tief (LGRB-Nummer 7911/629) bei der Endteufe von 70 m noch nicht erreicht.

Die 70 Ω .m – Grenze, die nach der Geoelektrik etwa der Basis der quartären Kiese und Sande entspricht, liegt in den beiden geoelektrischen Profilen Muhrhau und Hochstetten (vgl. Kapitel 3.1) in diesem Bereich ebenfalls tiefer. Wegen dieser Befunde wurde die Aquiferbasis wie folgt überarbeitet:

Profil Muhrhau (Abb. 3.4)

Die Basis wurde im westlichen Abschnitt etwa 10 m herabgesetzt und fällt im weiteren Verlauf steiler als ursprünglich angenommen ab. Im zentralen Abschnitt liegt die überarbeitete Aquiferbasis bis 40 m tiefer als ursprünglich vermutet. Im östlichen Abschnitt steigt sie wieder an und liegt hier etwa 20 m unter der bisherigen Grenzfläche.

Profil Hochstetten

Im westlichsten Bereich des Profils ergeben sich keine Diskrepanzen. Zum zentralen Abschnitt hin fällt die Aquiferbasis wie beim Profil Muhrhau steiler ab. Sie liegt hier 40 m tiefer als bisher angenommen. In beiden Geoelektrikprofilen deutet sich im östlichen Abschnitt eine rinnenartige Struktur an, deren Basis nach Norden ansteigt.

Bereiche östlich und nördlich von Breisach

Nach dem Aquifermodell (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007) wurde die Aquiferbasis am Ansatzpunkt der Bohrung Faule Waag in einer Tiefe von ca. 85 m erwartet. In der Bohrung Faule Waag wurde sie jedoch bereits in 45,30 m Tiefe angetroffen. Die 70 Ω .m – Grenze im geoelektrischen Profil Schlössle Matte liegt am Bohransatzpunkt ebenfalls in ca. 45 m u GOK. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse und der geoelektrischen Profile Batzenhäusle und Faule Waag wurde die Aquiferbasis wie folgt überarbeitet:

Profil Batzenhäusle

Im westlichen Abschnitt des Profils liegt die Aquiferbasis rund 10 m höher als bisher vermutet und fällt zum zentralen Abschnitt hin geringer ab. Die rinnenartige Struktur in den Profilen Muhrhau und Hochstetten setzt sich im zentralen und östlichen Abschnitt des Profils Batzenhäusle weiter fort. Die überarbeitete Aquiferbasis liegt in diesem Bereich rund 20 m tiefer als bisher angenommen.

Secteur au Sud de l'agglomération de Breisach

D'après les cartes du substratum existantes (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007) la base de l'aquifère était attendue à environ 60 m de profondeur à l'Ouest de la Piscine de Breisach. En fait le forage de la Piscine de Breisach (référence LGRB 7911/629) ne l'a pas encore atteinte à 70 m.

La limite de résistivité à 70 Ω .m, qui marque généralement la base de l'aquifère, se situe dans les deux profils électriques Muhrhau et Hochstetten (cf. chap. 3.1) à plus grande profondeur encore. Ces observations nous ont conduits à réviser comme suit la carte du substratum :

Profil Muhrhau (fig. 3.4)

Le substratum a été abaissé de 10 m environ à l'Ouest du profil et prend une pente plus forte qu'estimé auparavant. Dans sa partie centrale le substratum révisé se situe 40 m plus bas que ce que l'on pensait. Il remonte vers l'Est mais reste environ 20 m plus bas que dans la cartographie précédente.

Profil Hochstetten

La partie ouest du profil reste inchangée. Le substratum prend ensuite une pente plus forte comme dans le profil Muhrhau et se trouve 40 m plus bas que dans la cartographie précédente. Sur les deux profils il se dessine à l'Est une structure de chenal dont la base remonte vers le Nord.

Secteurs à l'E et au N de Breisach

D'après les cartes du substratum existantes (LUBW 2006, RPF/LGRB 2007) la base de l'aquifère était attendue à environ 85 m de profondeur à l'emplacement du piézomètre Faule Waag. En fait le forage Faule Waag l'a déjà atteinte à 45,30 m. La limite de résistivité à 70 Ω m est effectivement située vers 45 m de profondeur à cet endroit sur le profil géophysique Schlössle Matte. Sur la base de ces résultats et des profils géophysiques Batzenhäusle et Faule Waag, la carte du substratum a été révisée comme suit :

Profil Batzenhäusle

A l'Ouest du profil le substratum est situé 10 m plus haut que dans la cartographie précédente et a une pente moins forte vers la partie centrale. La structure de chenal visible sur les profils Muhrhau et Hochstetten se prolonge dans la partie centrale et est du profil Batzenhäusle : le substratum révisé se situe 20 m plus bas que dans la cartographie précédente.

Profil Faule Waag

Die rinnenartige Struktur verläuft im westlichen Teil des Profils und liegt rund 20 m tiefer als nach der ursprünglichen Konstruktion. Im weiteren Verlauf steigt die Aquiferbasis steil bis auf über 140 m NN an und fällt im zentralen Abschnitt wieder leicht ab. Daraus leitet sich für diesen Bereich in der Aquiferbasis eine sattelartige Struktur ab. Vom zentralen zum östlichen Abschnitt steigt die Aquiferbasis leicht an. In diesem Bereich liegt die Basis bis 45 m höher als im bisherigen Aquifermodell.

Profil Schlössle Matte (Abb. 3.5)

Die Aquiferbasis auf dem Profil Schlössle Matte steigt von Westen nach Osten zum Kaiserstuhl leicht an und liegt bis 50 m über der früher dargestellten Grenzfläche.

Zusammenfassung

Die Überarbeitung der Aquiferbasis auf der Grundlage der Erkenntnisse der geoelektrischen Messungen und der neuen Bohrungen ergibt für den Raum Breisach folgende Veränderungen (Abb. 3.9):

- Der aus miozänen Magmatiten aufgebaute Breisacher Münsterberg setzt sich im Untergrund unter den quartären Kiesen und Sanden in südöstliche Richtung bis südwestlich von Hochstetten fort. Nach Norden verläuft ein spornartiger Ausläufer im Untergrund unter der nordwestlichen Bebauungsgrenze von Breisach und weiter unter dem Rhein bis westlich des Gewanns Soldatenkopf auf Höhe der Bahnstation Achkarren.

- Im Osten des Geoelektrikprofils Batzenhäusle verläuft eine rinnenartige Struktur in der Aquiferbasis. Sie lässt sich von Hochstetten aus nach Norden verfolgen, biegt im weiteren Verlauf nach Nordwesten ab und setzt sich bis zum Rhein fort. Sie konnte auf französischer Seite nicht weiter nachgewiesen werden. Von Hochstetten im Süden (ca. 60 m NN) steigt die Rinne bis zum Geoelektrikprofil Faule Waag im Norden auf etwa 50 m u. GOK (ca. 110 m NN) an und fällt anschließend wieder in nordwestliche Richtung ab. Diese Struktur hat vermutlich einen bedeutenden Einfluss auf die Verbreitung der hochkonzentrierten Chloridwässer an der Aquiferbasis (Kap. 3.4.2). Sie lenkt im tieferen Aquiferabschnitt möglicherweise die Sole nach Westen ab.

- Auf Höhe der Geoelektrikprofile Schlössle Matte und Faule Waag lässt sich im Untergrund eine Hochlage der Aquiferbasis nachweisen, die vom Kaiserstuhl nach Westen verläuft und die östliche

Profil Faule Waag

La structure de chenal passe dans la partie ouest du profil et sa base se situe environ 20 m plus bas que dans la cartographie précédente. Ensuite le substratum remonte rapidement jusqu'à 140 m d'altitude pour s'abaisser légèrement dans la partie centrale. Il se dessine ainsi une structure en ensellement du substratum, qui remonte légèrement depuis ce secteur vers l'Est. Le substratum est ainsi situé jusqu'à 45 m plus haut que dans les cartographies précédentes.

Profil Schlössle Matte (fig. 3.5)

Le substratum sur ce profil monte légèrement d'Ouest en Est en direction du Kaiserstuhl et se situe jusqu'à 50 m plus haut que dans les cartographies précédentes.

Conclusions

La révision de la carte du substratum en fonction des résultats acquis par les profils de géophysique électrique et les nouveaux forages apporte les modifications suivantes dans le secteur de Breisach (fig. 3.9):

- La colline du Münsterberg de Breisach constituée de volcanites miocènes se prolonge en direction SE sous les alluvions quaternaires, jusqu'au SW de Hochstetten. Vers le Nord une branche en forme d'éperon se poursuit sous les alluvions de la partie NW de l'agglomération de Breisach puis sous le Rhin jusqu'à l'Ouest du lieu-dit Soldatenkopf, à la hauteur de la gare d'Achkarren.

- Une structure de chenal apparaît dans le substratum à l'E du profil géophysique Batzenhäusle. Elle se suit depuis Hochstetten vers le nord, s'incurve ensuite vers le NW et va jusqu'au Rhin. Elle n'a pas pu être identifiée côté français. Depuis Hochstetten au Sud (à environ 60 m d'altitude) ce chenal s'élève au niveau du profil géophysique Faule Waag au Nord jusqu'à environ 50 m de profondeur (env. 110 m d'altitude) puis s'abaisse en direction du NW. Cette structure a probablement une influence décisive sur la propagation des eaux très salées à la base de l'aquifère (cf. chap. 3.4.2). Elle dévie les saumures vers l'Ouest dans les couches profondes de l'aquifère.

- A la hauteur des profils géophysiques Schlössle Matte et Faule Waag, on distingue une partie surélevée du substratum, qui se prolonge du Kaiserstuhl vers l'Ouest et constitue la limite est du chenal décrit

Begrenzung der oben beschriebenen Rinne bildet. Über eine etwa 15 m tiefe Mulde im zentralen Bereich dieses Rückens kann die Salzfahne in den Tiefenstufen 0 m bis 30 m und 30 m bis 70 m ungehindert nach Norden in Richtung Burkheimer Baggersee abströmen (vgl. Kap. 3.4.2).

plus haut. Elle présente en son centre une dépression d'environ 15 m de profondeur qui permet à la langue salée se développant dans les tranches de 0 à 30 m et de 30 à 70 m de l'aquifère de s'écouler facilement vers le Nord en direction de la gravière de Burkheim (cf. *chap. 3.4.2*).

3.4 Hydrochemische und isoto- penhydrologische Untersuchungen

Im Rahmen des INTERREG III – Projektes wurden drei hydrochemische und isoto-
penhydrologische Mess-
kampagnen durchgeführt. Die Lage der untersuchten
Grundwassermessstellen ist in Abb. 3.10 dargestellt,
die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Tab.
A1 (Anhang auf der CD-ROM) zusammengefasst.

In der Zeit vom 12.06. bis 18.07.2006 wurden an 41
Grundwassermessstellen tiefenorientiert 77 Schöpf-
proben entnommen und auf die Hauptinhaltsstoffe
sowie Spurenelemente untersucht. Ergänzend hierzu
wurden im Februar 2007 weitere 18 Proben genom-
men. Diese Messkampagne sollte insbesondere klä-
ren, ob auf französischer Seite nördlich von Neuf-
Brisach erhöhte Chloridkonzentrationen im Grund-
und Oberflächenwasser vorliegen. In der Zeit vom
25.10. bis 07.11.2007 wurden in den neu errichteten
Grundwassermessstellen Faule Waag und Geiswasser
flach/tief, sowie in 14 weiteren Grundwassermessstellen
und aus der Möhlin Proben entnommen und auf die
Hauptinhaltsstoffe sowie ausgewählte Proben auf die
Isotope ^{18}O , Deuterium und Tritium sowie auf Schwefel-
hexafluorid (SF_6) untersucht (HYDROISOTOP
2007b). Die Ergebnisse dienen als umfassende
Datenbasis zur Unterscheidung verschiedener
Grundwasserkomponenten (Kap. 3.4.1) sowie zur flä-
chenhaften tiefenorientierten Darstellung der
Chloridverteilung (Kap. 3.4.2).

3.4.1 Hydrochemische und isoto- penhydrologische Charakterisierung der Wässer

Eine zentrale Fragestellung zur Grundwasserversalzung
im Raum Fessenheim – Burkheim ist, ob anhand
hydrochemischer und isoto-
penhydrologischer Merk-
male der Grundwässer eine Unterscheidung von
geogenen Chloridquellen und anthropogenen
Einträgen möglich ist. Dieses Thema wurde bereits in
der Vorgängerstudie bearbeitet (RPF 2002, BAUER
et al. 2005). In der vorliegenden Studie wurden
ergänzend zu den hydrochemischen Parametern,
die auch schon früher gemessen wurden, zahlreiche
weitere Inhaltsstoffe (u.a. Strontium, Selen, Rubidium
und Brom) analysiert. Gemeinsam mit den Ergebnissen
der früheren Untersuchungen (auch Isotope) wurde
der neue, umfangreichere Datensatz auf seine
Aussagekraft im Hinblick auf die o.g. Fragestellung
ausgewertet.

3.4.1.1 Grundwasserkomponenten

Das Grundwasser im Untersuchungsgebiet setzt
sich zu unterschiedlichen Anteilen aus mehreren

3.4 Etudes chimiques et isotopiques des eaux

Trois campagnes de prélèvements et d'analyses chi-
miques et isotopiques des eaux souterraines ont été
menées dans le cadre du projet Interreg III. La loca-
lisation des points d'eau prélevés est donnée en fig.
3.10, les résultats sont présentés dans le tableau A1
(annexe sur le CD-ROM joint).

77 prélèvements à la bouteille à différentes profon-
deurs ont été pratiqués sur 41 ouvrages sur la pério-
de du 12 juin au 18 juillet 2006 ; ils ont été analysés
pour les éléments majeurs ainsi que pour les élé-
ments traces. En complément 18 autres échantillons
ont été prélevés en février 2007. Ces campagnes de
mesures devaient notamment vérifier si des concen-
trations anormales en chlorures étaient présentes
côté français au Nord de Neuf-Brisach dans les eaux
de surface et les eaux souterraines. Entre le 25
octobre et le 7 novembre 2007 une nouvelle cam-
pagne a été menée sur les nouveaux piézomètres
Faule Waag et Geiswasser superficiel et profond,
ainsi que sur 14 autres ouvrages et dans la Möhlin ;
les échantillons ont été analysés pour les éléments
majeurs et pour certains pour les isotopes oxygène
18, deutérium et tritium, ainsi que pour l'hexafluorure
de soufre SF_6 (HYDROISOTOP 2007b). Les résultats
ont servi de base de données pour différencier les
différentes composantes des eaux souterraines
(chap. 3.4.1) ainsi que pour une cartographie des
chlorures à différentes profondeurs (chap. 3.4.2).

3.4.1 Caractérisation chimique et isotopique des eaux

Une problématique centrale dans la question de la
salure du secteur Fessenheim–Burkheim est de
savoir s'il est possible, à l'aide des caractéristiques
chimiques et isotopiques des eaux souterraines, de
différencier les apports de chlorures d'origine natu-
relle et anthropique. Ce thème avait déjà été abordé
dans l'étude précédente dans les années 2000 (RPF
2002, BAUER et al. 2005). Dans la présente étude,
en plus des paramètres hydrochimiques déjà mesu-
rés dans les études antérieures, on s'est attaché à
analyser un grand nombre d'éléments traces (par ex.
strontium, sélénium, rubidium et brome). L'ensemble
des résultats y compris ceux des études précé-
dentes et les isotopes ont été passés en revue pour
examiner les possibilités de répondre à la probléma-
tique évoquée plus haut.

3.4.1.1 Composantes des eaux souterraines

Les eaux souterraines du secteur étudié sont consti-
tuées de plusieurs composantes en proportions

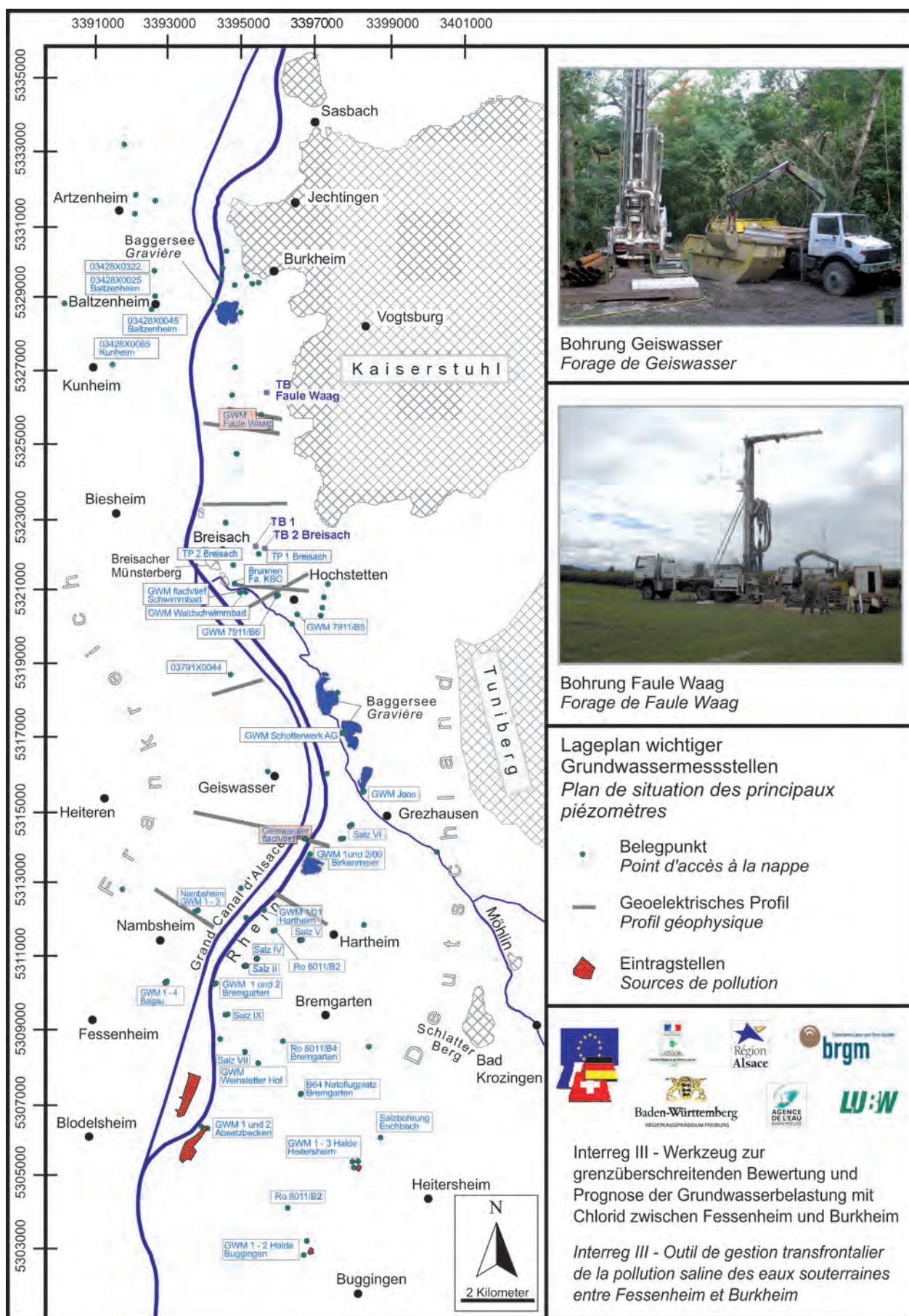


Abbildung 3.10: Lage wichtiger Grundwassermessstellen mit Bezeichnung.
Figure 3.10 : Situation des piézomètres importants avec leur dénomination.

Komponenten zusammen. Um Aussagen über die Herkunft der chloridhaltigen Grundwässer sowie über Austauschprozesse und Ausbreitungsmechanismen machen zu können, müssen die Einzelkomponenten identifiziert sowie hydrochemisch und isopenhydrologisch charakterisiert werden.

Im Abschlussbericht des INTERREG II-Projekts *“Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinischen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach”* (RPF 2002) sind die Verteilung und der Anteil der einzelnen Grundwasserkomponenten am Grundwassersystem auf Grundlage von isopenhydrologischen Betrachtungen ausführlich beschrieben. Sie werden durch die Befunde der neueren Untersuchungen ergänzt. Im Untersuchungsgebiet lassen sich bezüglich ihrer Herkunft folgende Grundwasserkomponenten unterscheiden:

- lokale Grundwasserneubildung
- Uferfiltrat des Rheins und des Rhein-Seitenkanals
- Uferfiltrat der Möhlin
- pleistozäne Komponente

Die charakteristischen Wertebereiche der Konzentrationen [mg/l] und der prozentualen Äquivalentkonzentrationen [% mmol(eq)/l] für die Inhaltsstoffe und Isotope der Grundwasserkomponenten sind in Tab. 3.6 zusammengestellt. Die Verteilung der Äquivalentkonzentrationen der Hauptinhaltsstoffe ist in den Piperdiagrammen (Abb. 3.11) dargestellt.

Grundwasser aus lokaler Grundwasserneubildung (Abb. 3.11.1)

Das lokal gebildete Grundwasser hat eine geringe Mineralisation (elektrische Leitfähigkeit ca. 500 $\mu\text{S/cm}$), die Chloridgehalte betragen bis zu 50 mg/l (unter 20 % mmol(eq)/l). Sie werden auf diffuse Einträge aus der Landwirtschaft und natürliche Quellen zurückgeführt. Hauptkation ist Calcium (75 – 110 mg/l, bis zu 80 % mmol(eq)/l), Hauptanion ist das Hydrogencarbonat (165 bis 275 mg/l, bis zu 70 % mmol(eq)/l). Die Nitratkonzentration kann bis zu 100 mg/l betragen. Meist liegt sie zwischen 30 und 50 mg/l und macht bis 10 % mmol (eq)/l aus. Die hohen Gehalte sind auf diffuse Einträge aus der Landwirtschaft zurückzuführen.

Der mittlere $\delta^{18}\text{O}$ Wert beträgt $-8,3\text{‰}$ (BAUER et al. 2005). Die Tritiumgehalte der lokal gebildeten Grundwasserkomponente haben in den letzten Jahren das Niveau der Hintergrundkonzentration von 9–11 TU erreicht.

Oberflächengewässer: Rhein und Rhein-Seitenkanal (Abb. 3.11.2)

Das Wasser von Rhein und Rhein-Seitenkanal ist mit

variablen. Toute interprétation sur l'origine des eaux chlorurées ainsi que sur les échanges et les mécanismes de diffusion/dilution nécessitent d'identifier ces composantes et de les caractériser du point de vue chimique et isotopique. Dans le rapport final du projet Interreg II de *“Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach”* (RPF 2002) la répartition et les proportions des différentes composantes des eaux souterraines avaient été décrits en détail sur la base de leur contenu isotopique. Ces éléments sont complétés grâce aux nouvelles données acquises par les nouvelles campagnes de prélèvements. Dans le secteur d'étude on peut ainsi distinguer les composantes suivantes des eaux souterraines :

- La recharge locale par les précipitations,
- Les infiltrations d'eau du Rhin et du Grand Canal d'Alsace,
- Les infiltrations de la Möhlin,
- Des eaux anciennes pléistocènes.

Les fourchettes de valeur caractéristiques des concentrations en mg/l et des proportions molaires (% mmol(eq)/l) des principales substances et isotopes des eaux souterraines sont présentées en table 3.6. La distribution des concentrations molaires des éléments majeurs est représentée sous forme de diagramme de Piper en fig. 3.11.

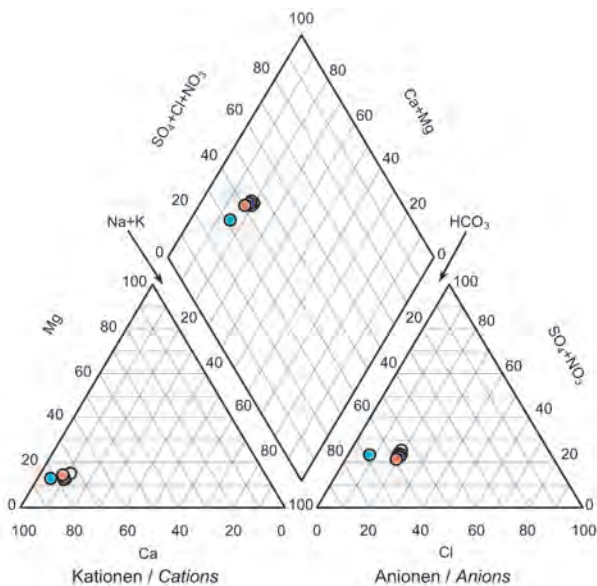
Eau souterraines de recharge locale (fig. 3.11.1)

Les eaux souterraines de recharge locale ont une minéralisation faible (conductivité électrique d'environ 500 $\mu\text{S/cm}$), et des concentrations en chlorures jusqu'à 50 mg/l (moins de 20 % de proportion molaire). On attribue la présence de ces chlorures à des pollutions diffuses d'origine agricole et à des sources naturelles (fond géochimique). Le cation principal est le calcium (75 – 110 mg/l, jusqu'à 80 % mmol(eq)/l, l'anion principal le bicarbonate (165 à 275 mg/l, jusqu'à 70 % mmol(eq)/l). La concentration en nitrates peut atteindre jusqu'à 100 mg/l. Elle est en général de 30 à 50 mg/l et représente jusqu'à 10 % d'équivalent molaire. Ces valeurs élevées sont dues aux pollutions diffuses d'origine agricole.

La valeur moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ est de $-8,3\text{‰}$ (BAUER et al. 2005). Les teneurs en tritium de la recharge locale par les précipitations sont revenues ces dernières années à la valeur du fond géochimique de 9–11 TU.

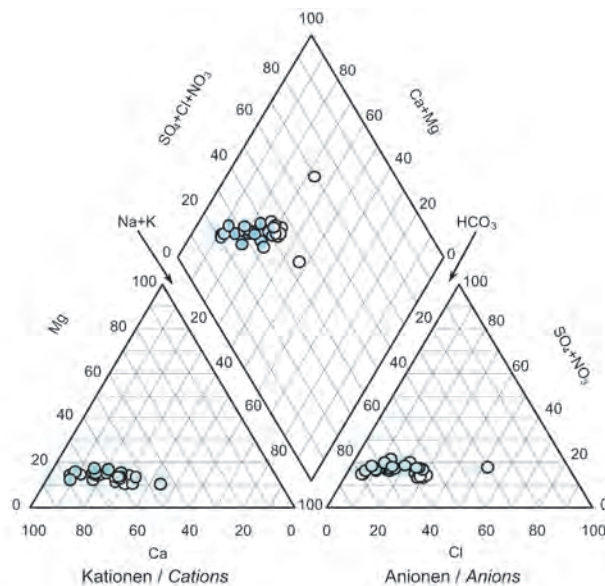
Eaux superficielles : Rhin et Canal d'Alsace (fig. 3.11.2)

L'eau du Rhin et du Grand Canal d'Alsace est en



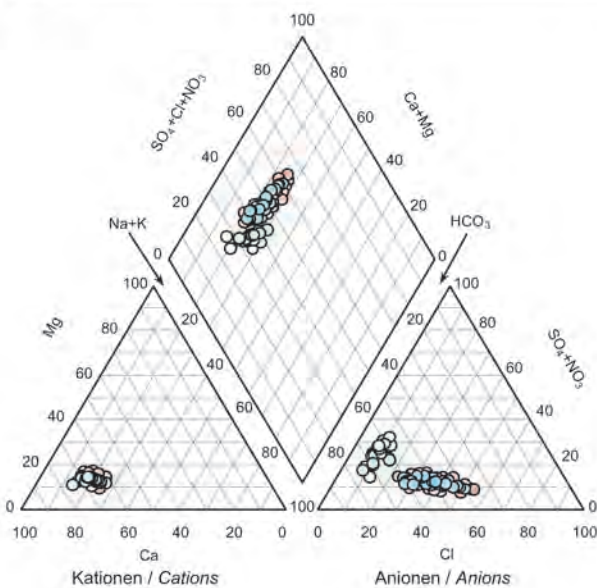
- Pegelbrunnen Gündlingen I
- Pumpwerk Gündlingen
- Versuchsbohrung WV Gündlingen
- GWM B 59
- Peter B 1
- Peter B 1
- Peter B 2

Abb. 3.11.1: Lokale Grundwasserneubildung
Fig. 3.11.1: Recharge locale



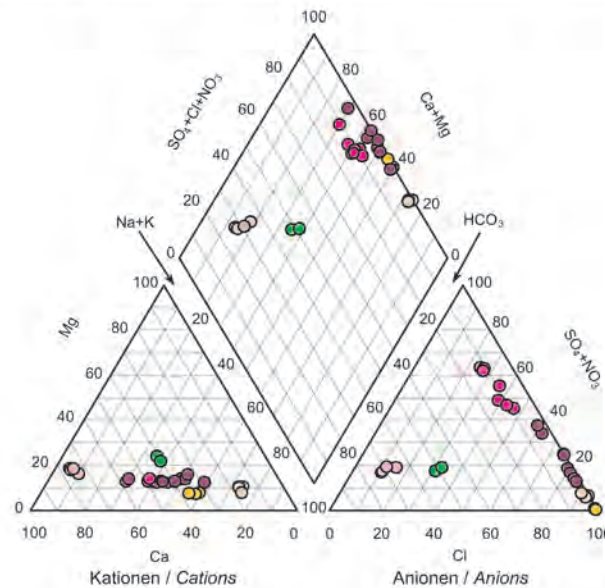
- Rhein-Seitenkanal / Grand canal d'Alsace
- Rhein / Rhin

Abb. 3.11.2: Rhein und Rhein-Seitenkanal
Fig. 3.11.2: Rhin et grand canal d'Alsace



- Möhlin oberhalb Uhlsee / Möhlin en amont de la gravière Uhl
- Auslauf Uhlsee / Sortie de la gravière Uhl
- Möhlin unterhalb Uhlsee / Möhlin en aval de la gravière Uhl

Abb. 3.11.3: Möhlin
Fig. 3.11.3: Möhlin



- 0252/020-5 (Bremgarten 8011108 122 u.Tertiär)
- 8509/020-9 (Balgau 104 m)
- 2024/020-9 (Oberrimsingen 165 m)
- 0294/021-4 (Eschbach Quartär 33-36 m)
- 0295/021-0 (Eschbach Quartär 46-51 m)
- 0296/021-5 (Eschbach Tertiär 64-92 m)

Abb. 3.11.4: Alte (pleistozäne?) Komponente
Fig. 3.11.4: Composantes anciennes (pléistocène ?)

Abb. 3.11: Äquivalentkonzentrationen der Hauptinhaltsstoffe wichtiger Grundwasserkomponenten (Piperdiagramme).
Fig. 3.11 : Concentrations équivalentes des éléments majeurs des principales composantes des eaux souterraines (diagramme de Piper).

Untersuchte Substanz Substance recherchée	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ³⁻	Lf	Tritium	δ ¹⁸ O
Maßeinheit Unité de mesure	[mg/l] [% mmol(eq)/l]					[μS/cm]		[TU]		[‰]	
lokale Grund- wasserneubildung Recharge locale	75-110 (73-82)	7-11 (12-15)	7-13 (4-10)	1-2,6 (0,5-1,3)	165-275 (55-68)	19-36 (8-20)	29-38 (11-14)	30-47,6 (9-11)	480-650	9-11	-8,3 (-8,0 bis -8,6) (Bauer et al. 2005)
Rhein-Seitenkanal Grand Canal d'Alsace	48-55 (55-60)	7-7,5 (112-15)	21-35 (23-31)	2,3-2,9 (1,3-1,5)	146-175 (55-60)	31-53 (22-29)	29-33 (12-16)	2,3-7,3 (0,8-2,9)	455-476	13,5 – 63,7 (Bauer et al. 2005)	-11,53 bis -11,43
Rhein/Breisach Le Rhin à Breisach	47-64 (14-26)	5-20 (10-17)	5-26 (6-26)	1,7-3,1 (1,2-1,6)	145-191 (65-79)	7-26 (6-17)	19-30 (11,5-17)	4-12 (2,7-4,2)	330-440	13,5 – 63,7 (Bauer et al. 2005)	-11,99 bis -10,38 (-10,9, Bauer et al. 2005)
Möhlín oberhalb Uhlsee La Möhlín en amont de la gravière Uhl	12-55 (60-77)	1-4 (10-15)	3-8 (10-22)	1,2-2,6 (1-5)	43 - 86 (56-74)	4-16 (8-16)	8-19 (8-22)	3-13 (3-13)	111-229	13,4 (9,5.2000) -	8,48
Möhlín unterhalb Uhlsee La Möhlín en aval de la gravière Uhl	34-73 (62-69)	4-8 (10-14)	10-27 (16-22)	1,6-2,4 (1-1,7)	66 - 115 (36-61)	28-93 (25-50)	12-27 (6-12)	5-10 (2-5)	251-560		
Pleistozän Eaux pléistocènes (ORI 150m) (2024/020-9)	82-2310 (0-76)	10-450 (0-24)	7-16970 (4-98)	1,5-419 (0,1-2,1)	35-398 (0-72)	27-28600 (11-99)	18-1897 (0,2-63)	0-2,0 (0-1,9)	1251	>0,6 (22.10.2007)	-11,52 (22.10.2007)

Tabelle 3.6: Ungefähre Wertebereiche der hydrochemischen Inhaltsstoffe (Konzentrationen [mg/l], prozentuale Äquivalentkonzentrationen [%mmol(eq)/l]) und Isotope in den Grund- und Oberflächenwasserkomponenten des Untersuchungsgebiets.

Tabelleau 3.6: Fourchettes de valeurs des constituants chimiques (concentrations en mg/l et proportions en équivalents molaires % mmol(eq)/l) et des isotopes dans les composantes des eaux souterraines et de surface du secteur d'étude.

Werten von 300 bis 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ meist geringer mineralisiert als das Grundwasser aus lokaler Neubildung. Die Chloridgehalte betragen im Rheinwasser bei Breisach 7 bis 26 mg/l (6 bis 17 % $\text{mmol (eq)}/\text{l}$), die von Natrium 5 bis 26 mg/l (6 bis 26 % $\text{mmol (eq)}/\text{l}$). Bedingt durch die salzbelasteten Einleitungen des Abwasserkanals (saumoduc) sind die Anteile an Chlorid bzw. Natrium im Wasser des Rhein-Seitenkanals im Mittel etwas höher als im Rhein (Tab. 3.6). Der Rhein weist dagegen etwas höhere Calcium- und Nitratgehalte als der Seitenkanal auf. Dies liegt daran, dass der Rhein einen Anteil an lokal gebildetem Grundwasser enthält, das in ihn als Folge der Vorflutwirkung nördlich der Stauwurzel des Kulturwehres Breisach (etwa südlich von Rhein-km 221 auf Höhe der Domäne Rothaus) übertritt. Der Rhein-Seitenkanal dagegen ist weitgehend abgedichtet und steht mit dem Grundwasser nicht direkt in hydraulischer Verbindung.

Bedingt durch die Höhenlage seines Einzugsgebiets sind die stabilen Sauerstoff- und Wasserstoffisotope im Rhein abgereichert. Die Werte für den Rhein betragen zwischen $-10,38$ und $-11,99$ ‰ für $\delta^{18}\text{O}$ und $-79,9$ ‰ für $\delta^2\text{H}$, die Werte für den Rhein-Seitenkanal liegen mit $-11,53$ bis $-11,43$ ‰ für $\delta^{18}\text{O}$ und $-81,8$ bis $-83,2$ ‰ für $\delta^2\text{H}$ in der selben Größenordnung (RPF 2002). Der Rhein und der Rhein-Seitenkanal sind durch die Einleitungen von tritiumhaltigem Wasser der schweizerischen und französischen Atomindustrie signifikant mit Tritium angereichert (1998/2000: 13,5 bis 63,7 TU, BAUER *et al.* 2005).

Oberflächengewässer: Möhlin (Abb. 3.11.3)

Die Möhlin durchfließt auf ihrem Weg zum Rhein den Baggersee Uhl. Im 90 m tiefen Baggersee nimmt während der Stagnationsphase die Leitfähigkeit mit der Tiefe signifikant zu. Ursache hierfür sind erhöhte Chloridgehalte im basalen Bereich, die auf chlorid-belastete Grundwasserzutritte in den tieferen Teil des Baggersees zurückzuführen sind.

Beim Durchfluss des Baggersees Uhl ändert sich die hydrochemische Zusammensetzung der Möhlin signifikant (Abb. 3.4.1.3). Insgesamt ist der Auslauf aus dem See höher mineralisiert als der Zulauf. Die Konzentrationen bzw. prozentualen Anteile der Hauptkationen verändern sich beim Durchfluss des Uhlsees geringfügig, die der Hauptanionen deutlich. Unterhalb des Uhlsees sind der prozentuale Hydrogencarbonat-, der Sulfat- und der Nitratanteil erniedrigt, während der Anteil an Chlorid deutlich und der an Natrium und Kalium geringfügig größer ist. Die Hydrogenkonzentration am Zufluss in den Uhlsee beträgt 43 bis 86 mg/l . Am Auslauf unterliegt

général encore moins minéralisée (300 à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que les eaux souterraines de recharge locale. Les concentrations en chlorures de l'eau du Rhin à Breisach varient entre 7 et 26 mg/l (6 à 17 % en équivalent molaire), celles en sodium entre 5 et 26 mg/l (6 à 26 % en équivalent molaire). En raison des rejets d'eaux salées par le saumoduc dans le canal, ce dernier affiche des concentrations en chlorures et en sodium un peu plus élevées que le Rhin (tab. 3.6). Le Rhin est par contre un peu plus concentré en calcium et en nitrates que le canal. La raison en est que le Rhin contient une proportion d'eau souterraine de recharge locale qu'il draine en aval du barrage agricole de Breisach (à peu près au Sud du PK 221 du Rhin au niveau du domaine Rothaus). Le Grand Canal d'Alsace est par contre largement étanche et n'a pas de lien hydraulique direct avec les eaux souterraines.

Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau du Rhin sont appauvris en raison de l'altitude de sa zone d'alimentation. Les valeurs pour le Rhin sont de $-10,38$ à $-11,99$ ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de $-79,9$ ‰ pour $\delta^2\text{H}$, elles sont du même ordre de grandeur pour le Grand Canal d'Alsace, de $-11,53$ à $-11,43$ ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de $-81,8$ à $-83,2$ ‰ pour $\delta^2\text{H}$ (RPF 2002). Le Rhin et le Canal sont par contre enrichis en tritium de façon significative par les rejets d'eau riche en tritium de l'industrie nucléaire suisse et française (1998/2000: 13,5 bis 63,7 TU, BAUER *et al.* 2005).

Cours d'eau : la Möhlin (fig. 3.11.3)

La Möhlin traverse la gravière Uhl sur son cours jusqu'au Rhin. Dans l'étang de cette gravière, profonde de 90 m, la conductivité augmente avec la profondeur de façon significative. La cause en est la présence de concentrations plus élevées en profondeur, que l'on peut rapporter à des arrivées d'eaux souterraines salées dans la partie profonde de la gravière.

La composition chimique des eaux de la Möhlin change de façon significative lors de sa traversée de l'étang de la gravière Uhl (fig. 3.4.1.3). Globalement ces eaux sont plus minéralisées à la sortie de la gravière qu'à son entrée. Les concentrations et les proportions des principaux cations changent peu pendant la traversée de la gravière, mais celles des principaux anions change nettement. En aval de la gravière Uhl les proportions en bicarbonates, sulfates et nitrates sont réduites, tandis que la proportion en chlorures est nettement plus élevée et celle en sodium et potassium un peu plus élevée. La concentration en bicarbonates à l'entrée de la gra-

sie starken jahreszeitlichen Schwankungen (zwischen 66 und 115 mg/l im Jahr 2001). Auf dem weiteren Weg zum Rhein nehmen die Hydrogenkarbonatgehalte in der Möhlin aufgrund von Grundwasserzutritten weiter zu (Möhlin Schwelle: Mittelwert 2000/2001: 133 mg/l). In diesem Abschnitt steigt der Anteil an Rheinuferfiltrat in der Möhlin von 0 % auf über 30 % an. Auch die Chloridgehalte zeigen am Auslauf des Baggersees Uhl diese jahreszeitlich bedingten Schwankungen. Die Konzentrationen lagen im Frühjahr/Sommer des Jahres 2001 zwischen 29 und 33 mg/l, im Herbst/Winter stiegen sie auf Werte zwischen 49 und 75 mg/l an. Ursache hierfür ist die jahreszeitlich bedingte Durchmischung des Baggersees, die Seewasser mit hohen Chloridkonzentrationen aus größerer Tiefe an die Seeoberfläche transportiert.

Der mittlere $\delta^{18}\text{O}$ Wert der Möhlin bei Grezhausen beträgt $-8,48\text{‰}$, der $\delta^2\text{H}$ Wert $-66,3\text{‰}$. Im Jahr 2000 lag der Tritiumgehalt bei 13,4 TU (RPF 2002).

Ältere (pleistozäne)

Grundwasserkomponenten (Abb. 3.11.4)

Bei früheren Untersuchungen konnten durch die kombinierte Auswertung der ^{14}C -, ^3H - und der ^{18}O -Gehalte mehrere Messstellen identifiziert werden, bei denen eine ältere (pleistozäne) Komponente an der Zusammensetzung des Grundwassers beteiligt ist (RPF 2002, in Klammern jeweils die Entnahmetiefe der Schöpfprobe bzw. die Lage der Filterstrecke):

- 0252/020-5 Weinstetten (Ro8011/B4 tief Bremgarten, 135 m)
- 0252/020-0 Weinstetten (Ro8011/B4 tief Bremgarten, 105 m)
- 0252/020-4 Weinstetten (Ro8011/B4 tief Bremgarten, 92 m)
- 2030/020-3 Bremgarten Sandbuck (150 m)
- 0253/020-0 Salz IX (125 m)
- 2024/020-9 Schotterwerke AG Oberrimsingen (140m, 165 m)
- 0296/021-5 Eschbach tief (64 - 92 m)
- 0295/021-0 Eschbach Mitte (46 - 51 m)
- 0294/021-4 Eschbach flach (33 - 36 m)
- 8509/020-9 Balgau (95 m und 104 m)

Bei der Messkampagne im Oktober/November 2007 wurde diese Interpretation für die Messstellen 2024/020-9, 0252/020-5, und 8509/020-9 durch Tritiummessungen bestätigt (Abb. 3.12). Die anderen Messstellen wurden nicht erneut untersucht.

Zusätzlich wird für folgende, erstmals untersuchte Grundwassermessstellen eine Beteiligung von älteren (pleistozänen) Komponenten angenommen (vgl.

vière Uhl est de 43 à 86 mg/l, à la sortie elle est affectée de fortes variations saisonnières (de 66 à 115 mg/l en 2001). Le long du trajet de la Möhlin jusqu'au Rhin les bicarbonates continuent à augmenter du fait d'arrivées d'eaux souterraines (moyenne du seuil de la Möhlin sur 2000/2001 : 133 mg/l). Sur ce trajet la proportion d'eau d'infiltration du Rhin dans la Möhlin augmente de 0 à 30 %. Les concentrations en chlorures présentent aussi des variations saisonnières à la sortie de la gravière Uhl. Ces concentrations étaient au printemps/été de l'année 2001 de 29 à 33 mg/l, en automne/hiver elles avaient augmenté jusqu'à 49 à 75 mg/l. La raison en est le mélange des eaux dans la gravière qui varie suivant les saisons et remonte plus ou moins d'eaux profondes salées vers la surface du lac.

La valeur moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ de la Möhlin à Grezhausen est de $-8,48\text{‰}$, celle du $\delta^2\text{H}$ de $-66,3\text{‰}$. En 2000 le contenu en tritium était de 13,4 TU (RPF 2002).

Composantes d'eaux anciennes pléistocènes (fig. 3.11.4)

Au cours des études antérieures une composante d'eau ancienne (pléistocène) avait pu être identifiée dans les eaux souterraines de plusieurs piézomètres par le croisement des contenus en ^{14}C -, ^3H - et ^{18}O (RPF 2002, la profondeur du prélèvement ou de la crépine est mentionnée entre parenthèses) :

- 0252/020-5 Weinstetten (Ro8011/B4 profond Bremgarten, 135 m)
- 0252/020-0 Weinstetten (Ro8011/B4 profond Bremgarten, 105 m)
- 0252/020-4 Weinstetten (Ro8011/B4 profond Bremgarten, 92 m)
- 2030/020-3 Bremgarten Sandbuck (150 m)
- 0253/020-0 Salz IX (125 m)
- 2024/020-9 Schotterwerke AG Oberrimsingen (140m, 165 m)
- 0296/021-5 Eschbach profond (64 - 92 m)
- 0295/021-0 Eschbach moyen (46 - 51 m)
- 0294/021-4 Eschbach superficiel (33 - 36 m)
- 8509/020-9 Balgau (95 m et 104 m)

A l'occasion de la campagne d'octobre/novembre 2007 cette interprétation a été confirmée par des mesures du tritium sur les piézomètres 2024/020-9, 0252/020-5 et 8509/020-9 (fig. 3.12). Les autres piézomètres n'ont pas été rééchantillonnés.

La présence d'une composante ancienne (pléistocène) est également détectée pour les piézomètres suivants qui n'avaient pas été échantillonnés aupara-

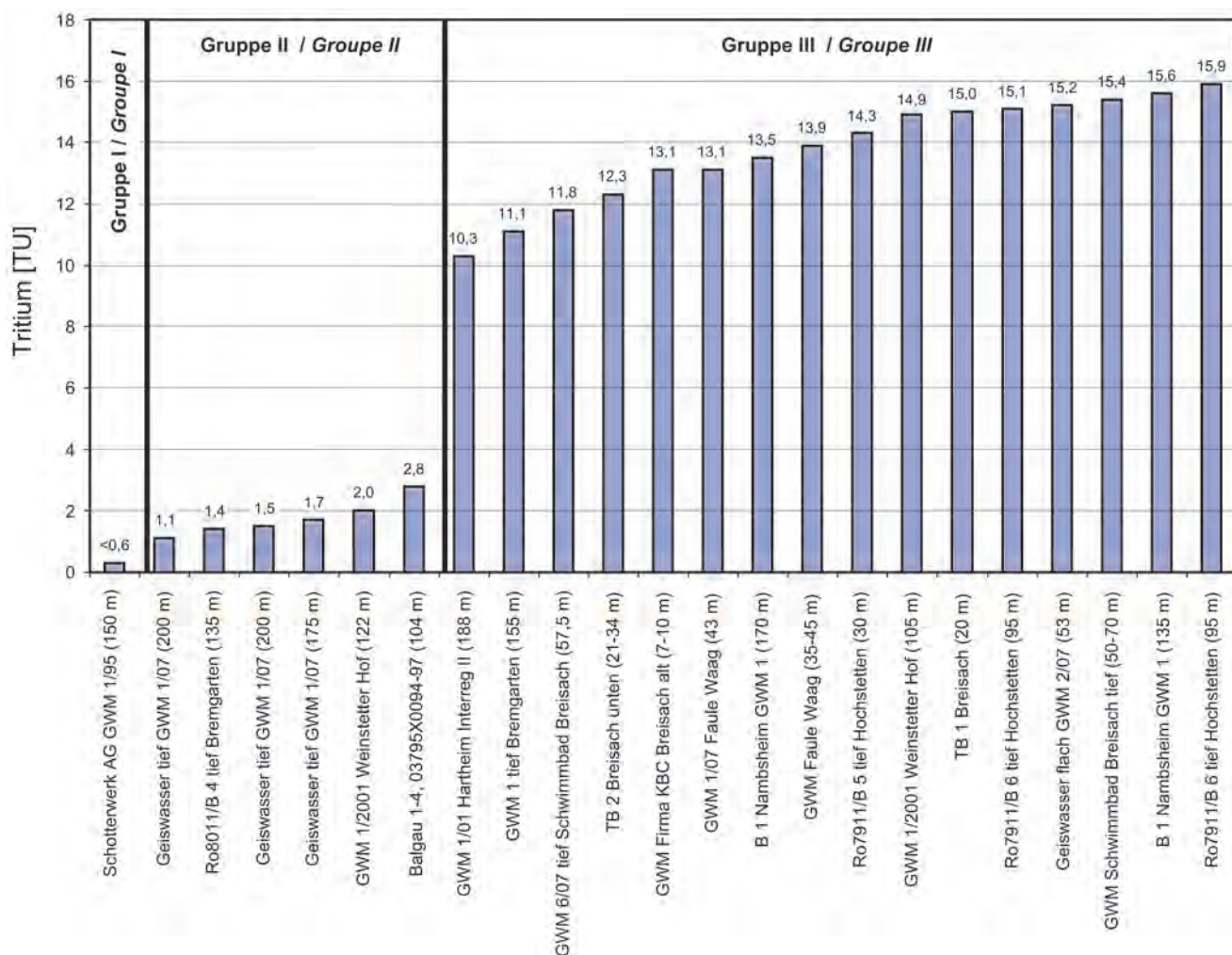


Abbildung 3.12: Tritiumgehalte ausgewählter Grundwässer (Messkampagne Okt./ Nov. 2007, HYDROISOTOP 2007).

Figure 3.12 : Teneurs en tritium d'eaux souterraines sélectionnées (campagne de prélèvements d'octobre-novembre 2007, HYDROISOTOP 2007).

hierzu auch die Ergebnisse der SF6-Messungen, HYDROISOTOP 2007b):

- 8508/020-3 Geiswasser tief (175 m und 200 m)
- 8508/020-3 GWM 1/01 Weinstetter Hof (122 m)

Von den Messstellen mit einer älteren Grundwasserkomponente sind die GWM 0252/020-5 Weinstetten bzw. Ro8011/B4 tief Bremgarten, 0296/021-5 Eschbach tief und vermutlich auch 2024/020-9, Schotterwerke AG (Oberriemsingen) ausschließlich im Tertiär verfiltert.

Die GWM 0252/020-5 Weinstetten (135 m) weist bei einem Tritiumgehalt von 1,4 TU (2007) einen hohen Mineralisationsgrad (el. Leitfähigkeit bis zu 31000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und niedrigere Hydrogenkarbonatgehalte (170 – 200 mg/l) auf. Nach HYDROISOTOP (2007b) gibt der ^{14}C - Gehalt von $42,9 \pm 5,4$ %-modern (1998) einen Hinweis auf die Beteiligung von mehrere Tausend Jahre alten Grundwasserkomponenten.

vant (voir aussi les résultats des analyses de SF6, HYDROISOTOP 2007b) :

- 8508/020-3 Geiswasser profond (175 m und 200 m)
- 8508/020-3 GWM 1/01 Weinstetter Hof (122 m)

On notera que parmi les piézomètres contenant une composante d'eau ancienne les ouvrages suivants sont crépinés uniquement dans le Tertiaire : 0252/020-5 Weinstetten (Ro8011/B4 profond Bremgarten), 0296/021-5 Eschbach profond et probablement aussi le 2024/020-9, Schotterwerke AG (Oberriemsingen).

Le piézomètre 0252/020-5 Weinstetten (135 m) présente un contenu en tritium de 1,4 TU (2007), une minéralisation élevée (conductivité jusqu'à 31 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et une faible teneur en bicarbonates (170 – 200 mg/l). D'après HYDROISOTOP (2007b) la teneur en ^{14}C de $42,9 \pm 5,4$ %-modern (1998) indique la présence de composantes d'eaux souterraines de plusieurs milliers d'année d'âge.

Das Grundwasser der GWM 2024/020-9 (Schotterwerke AG, Oberrimsingen, 150 m tief) besitzt im Untersuchungsgebiet die geringsten ^{14}C - (5,8 pmc) und Tritiumgehalte (< 0,6 TU; Nov. 2007). Trotz des hohen Grundwasseralters ist die Mineralisation dieses Wassers auffallend niedrig (elektrische Leitfähigkeit: 1251 $\mu\text{S}/\text{cm}$, weniger als 12 mmol(eq)/l, 22.10.2007) und der Hydrogencarbonatanteil vergleichsweise hoch (zwischen 375 und 403 mg/l, bzw. 50 % mmol(eq)/l). Der Sulfatgehalt ist mit 113 mg/l (2007) bzw. 16,2 % mmol(eq)/l ebenso wie der Chloridgehalt (211 mg/l) relativ niedrig. Für die GWM wird ein überwiegend im Pleistozän neu gebildetes Grundwasser angenommen.

Im Grundwasser der GWM Eschbach tief (0296/021-5) gibt der Tritiumgehalt von 6,3 TU (26.08.1998) einen Hinweis auf die Mischung einer älteren mit einer jüngeren Komponente. Das Grundwasser ist durch einen hohen Sulfatgehalt (1360 – 1830 mg/l bzw. 12,9 – 18,7 % mmol(eq)/l) bei gleichzeitig deutlich erhöhten Chloridkonzentrationen (5250 bis 6630 mg/l, ca. 75 bis 84,5 % mmol(eq)/l) gekennzeichnet. Das Sulfat stammt aus der Lösung von Gips, der auch bei der Bohraufnahme festgestellt wurde. Der Hydrogenkarbonatgehalt liegt bei ca. 190 mg/l (1,4 – 1,7 % mmol(eq)/l). Im Gegensatz dazu weist das Grundwasser der GWM Eschbach flach (33-36 m u. GOK), in der ebenfalls niedrigere Tritiumgehalte gemessen wurden (15,7 TU, RPF 2002) Hydrogenkarbonatgehalte von bis zu 360 mg/l (bis 72 % mmol(eq)/l) auf. Neben der geringen Mineralisation im Grundwasser der GWM Eschbach flach deuten auch die hohen Nitratgehalte von 59,9 mg/l (entspricht 10 % mmol(eq)/l, Juni 2006) auf eine Beteiligung einer oberflächennahen Komponente (lokale Grundwasserneubildung) hin. Im Grundwasser der GWM Eschbach Mitte handelt es sich ebenfalls um ein Mischwasser aus jungen und älteren Komponenten. Hinweise darauf geben die Isotopenuntersuchungen aus dem Jahr 1998 (Tritiumgehalt: $7,4 \pm 1$ TU, ^{14}C -Gehalt von $36,5 \pm 0,6$ %-modern, entspricht einem Minimalalter der ältesten Komponente von 3700 bis 7300 Jahren, KLOPPMANN 1999).

Im Grundwasser der GWM 8509/020-9 Balgau wurde bei früheren Messungen (KLOPPMANN 1999) an einer Pumpprobe aus 85 – 105 m Tiefe (Nov. 1998) ein Tritiumgehalt von $14,0 \pm 2$ TU, ein ^{14}C - Gehalt von $52,4 \pm 0,4$ %-modern (entspricht einem Minimalalter der ältesten Komponente von 0 bis 1200 Jahren), und ein Chloridgehalt von 5490 mg/l ermittelt. Im Gegensatz dazu wurde im Nov. 2007 ein deutlich niedrigerer Tritium- und ein höherer Chloridgehalt gemessen (Schöpfprobe bei 104 m u. GOK: 2,8 TU bzw. 11119

L'eau souterraine du piézomètre 2024/020-9 (Schotterwerke AG, Oberrimsingen, 150 m de profondeur) présente les teneurs en ^{14}C - (5,8 pmc) et en tritium (< 0,6 TU, nov. 2007) les plus faibles de tout le secteur d'étude. Malgré l'âge élevé de cette eau, la minéralisation est étonnamment faible (conductivité : 1251 $\mu\text{S}/\text{cm}$, soit moins de 12 mmol(eq)/l, 22.10.2007) tandis que la concentration en bicarbonates est relativement élevée (entre 375 et 403 mg/l, soit 50 % mmol(eq)/l). La concentration en sulfates avec 113 mg/l (2007) soit 16,2 % mmol(eq)/l comme en chlorures (211 mg/l) est relativement basse. On suppose que ce piézomètre contient une eau qui se serait essentiellement formée au Pléistocène.

L'eau souterraine du piézomètre Eschbach profond (0296/021-5), le contenu en tritium de 6,3 TU (26/08/1998) indique un mélange entre des eaux anciennes et jeunes. L'eau est caractérisée par un contenu élevé en sulfates (1360 – 1830 mg/l soit 12,9 – 18,7 % mmol(eq)/l) ainsi qu'en chlorures (5250 à 6630 mg/l, soit 75 à 84,5 % mmol(eq)/l). Les sulfates proviennent de la dissolution de gypse, qui a d'ailleurs été identifié sur les échantillons de forage. Les bicarbonates sont de l'ordre de 190 mg/l (1,4 – 1,7 % mmol(eq)/l). Par contre les eaux du piézomètre Eschbach superficiel (33-36 m de profondeur), dans lesquelles des teneurs basses en tritium ont été mesurées (15,7 TU, RPF 2002) présentent des concentrations en bicarbonates atteignant 360 mg/l (jusqu'à 72 % mmol(eq)/l). En plus de la faible minéralisation dans ce piézomètre, les concentrations élevées en nitrates de 59,9 mg/l (soit 10 % mmol(eq)/l en juin 2006) indiquent une composante d'eau de recharge superficielle. L'eau du piézomètre Eschbach moyen est également un mélange d'eaux jeunes et anciennes, d'après les études isotopiques de l'année 1998 (contenu en tritium : $7,4 \pm 1$ TU, en ^{14}C de $36,5 \pm 0,6$ %-modern, ce qui correspond à un âge minimal de 3700 à 7300 ans pour la composante ancienne, KLOPPMANN 1999).

Dans le piézomètre de Balgau 8509/020-9 un précédent prélèvement par pompage à 85-105 m de profondeur (nov. 1998, Kloppmann 1999) avait donné un contenu en tritium de $14,0 \pm 2$ TU, en ^{14}C de $52,4 \pm 0,4$ %-modern, ce qui correspond à un âge minimal de 0 à 1200 ans pour la composante ancienne, et une concentration en chlorures de 5490 mg/l. Par contre on a mesuré en novembre 2007 un contenu beaucoup plus faible en tritium et une concentration plus élevée en chlorures (prélèvement à la bouteille

mg/l; HYDROISOTOP 2007b). Dies legt die Vermutung nahe, dass das Grundwasser in der Filterstrecke eine markante Schichtung in der Altersstruktur und im Chloridgehalt aufweist, wobei älteres Wasser mit hohen Chloridkonzentrationen von jüngerem Wasser mit niedrigeren Chloridgehalten überschichtet wird.

Die Verteilung der Hauptionen in den Grundwässern mit Beteiligung älterer Komponenten ist heterogen (Abb. 3.11.4). Häufig sind dem gering mineralisierten "normalen" Süßwasser nicht nur ältere Komponenten in unterschiedlichen Anteilen beigemischt, sondern in vielen Fällen auch eine weitere junge Komponente mit anthropogen erhöhtem Salzgehalt. Dabei fallen die Messstellen 2024/020-9 (Schotterwerk Oberirnsingen 165 m) und 0294/021-4 (Eschbach flach 33-36 m) besonders auf. Im Grundwasser dieser Messstellen beträgt der Hydrogencarbonatanteil 50 % mmol (eq)/l (GWM 2024/020-9) bzw. über 70 % mmol (eq)/l (GWM 0294/021-4). Dagegen liegt der prozentuale Anteil an Hydrogencarbonat in den übrigen Grundwasserproben bei etwa 1 % mmol (eq)/l (Ausnahme GWM 0295/021-0, Eschbach Mitte 46-51 m mit rund 10 % mmol (eq)/l).

3.4.1.2 Unterscheidung von Grundwässern mit Chlorid geogener und anthropogener Herkunft

Das anthropogen eingetragene Chlorid ist im Untersuchungsgebiet hauptsächlich ein Restprodukt der Düngemittelproduktion aus Kalisalz. Mengenmäßig von untergeordneter Bedeutung sind Chlorideinträge durch die Straßensalzung und die Landwirtschaft. Für geogene Chlorideinträge durch aufsteigende Solen aus dem Festgesteinsuntergrund wird angenommen, dass die Chloridfracht dieser Tiefenwässer überwiegend aus der Lösung von Steinsalz herrührt, da die geringer mächtigen Kalisalzlager erst in größeren Tiefen auftreten. Diese Annahme wird durch die Beschaffenheit des Grubenwassers im Schacht Heitersheim gestützt.

Hauptinhaltsstoffe

In der Tab. 3.7 sind die prozentualen Anteile der Hauptinhaltsstoffe für Eluate der Ausgangskomponenten Steinsalz und Kalisalz (Eluate aus Grubensalz, jeweils 50 g getrocknetes Salz wurden in 500 ml destilliertem Wasser gelöst), für das Haldenmaterial (Restsalz, Eluat) und für Grubenwasser aus dem Schacht Heitersheim dargestellt.

Nach dem produktionstechnisch bedingten Entzug des Kaliums ist das Haldenmaterial (Gemisch aus

à 104 m u. GOK : 2,8 TU et 11119 mg/l de chlorures, HYDROISOTOP 2007b). Ceci indique sans doute une stratification des eaux de la crépine en âge et en contenu en chlorures, où une eau jeune avec moins de chlorures serait superposée à une eau ancienne plus riche en chlorures.

La distribution des ions principaux de ces eaux à composante ancienne est hétérogène (fig. 3.11.4). Souvent les eaux douces "normales" peu minéralisées sont mélangées non seulement à une composante ancienne en proportion variable, mais aussi à une autre composante d'eau jeune chargée en chlorures d'origine anthropique. On remarquera en particulier les piézomètres 2024/020-9 (Schotterwerk Oberirnsingen 165 m) et 0294/021-4 (Eschbach superficiel 33-36 m). Dans ces piézomètres la concentration en bicarbonates représente de 50 % en mmol(eq)/l (2024/020-9) à plus de 70 % mmol (eq)/l (0294/021-4). Dans les autres prélèvements d'eaux souterraines la proportion en bicarbonates est faible, de l'ordre de 1 % mmol(eq)/l (à l'exception des ouvrages 0295/021-0 et Eschbach moyen 46-51 m qui font environ 10 % mmol (eq)/l).

3.4.1.2 Distinction entre chlorures d'origine naturelle et anthropique dans les eaux souterraines

Les chlorures d'origine anthropique sont dans le secteur d'étude essentiellement des résidus de la production d'engrais à partir de potasse. Les chlorures dus au salage des routes ou à l'agriculture sont d'importance beaucoup plus faible.

En ce qui concerne les chlorures d'origine naturelle qui proviendraient de remontée de saumures du socle, on suppose que la charge en chlorures de ces eaux profondes est due en majeure partie à la dissolution de sel gemme, car les couches de potasse sont bien moins importantes en épaisseur et sont situées à plus grande profondeur que les couches de sel gemme. Cette hypothèse est confortée par la composition des eaux d'exhaure du puits de Heitersheim.

Éléments majeurs

Le tableau 3.7 donne la composition en pourcentage des éléments majeurs pour des solutions des composants de base sel gemme et sel de potasse (mise en solution d'échantillons de mine, 50 g de sel séché est dissout dans 500 ml d'eau distillée), ainsi que pour du matériel de terrils (résidus salés, eau de dissolution) et pour de l'eau d'exhaure du puits de Heitersheim.

Le traitement du minerai étant destiné à extraire le potassium, les produits mis sur les terrils (un mélange

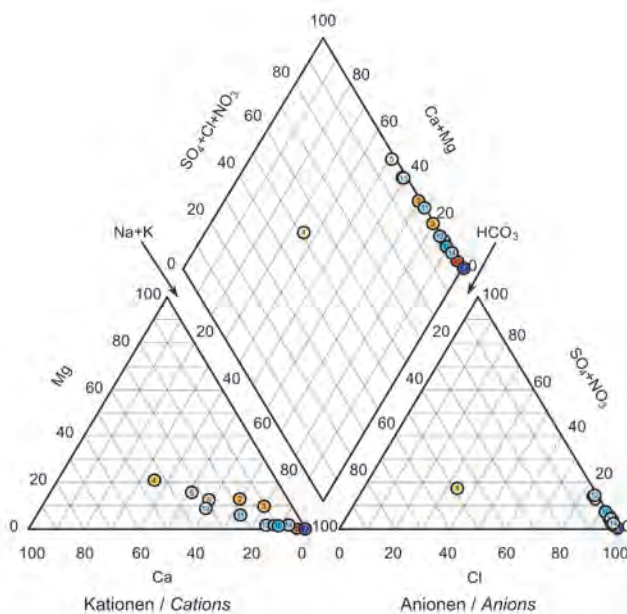
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ³⁻
	[% mmol (eq)/l]							
Steinsalz Sel gemme	3.39	0.04	96.47	0.16	0	95.87	4.13	0
Kalisalz Sel de potasse	0.56	0.01	41.44	57.99	0	99.82	0.18	0
Haldenmaterial (Restsalz) Terril (résidu salé)	5.59	1.60	91.93	0.88	0.25	97.59	2.16	0
Grubenwasser Schacht Heitersheim (334 m u. GOK) Eau d'exhaure du puits Heitersheim	1.21	0.20	98.34	0.20	0.05	99.60	0.32	0.04

Tabelle 3.7: Prozentualer Anteil der Hauptkationen und -anionen in den Eluaten von Steinsalz (Grube Buggingen) und Kalisalz (elsässisches Kalibecken) und von Haldenmaterial (Restsalz Eluat, Halde Marie Louise Nr. 04131X0512) sowie Grubenwasser aus dem Schacht Heitersheim.

Tableau 3.7: Composition en pourcentage des ions principaux pour des solutions de sel gemme (mine de Buggingen), de sel de potasse (bassin potassique alsacien), ainsi que pour du matériel de terrils (eau de dissolution du terril Marie-Louise, puits 04131X0512) et pour de l'eau d'exhaure du puits de Heitersheim.

	Strontium (Sr)	Rubidium (Rb)	Sr/Rb
Maßeinheit / unité	[mg/l]	[mg/l]	[-]
Steinsalz / sel gemme	26,1	0,01609	1544
Kalisalz / sel de potasse	1,85	4,008	0,52

Tabelle 3.8: Konzentrationen von Strontium und Rubidium in Steinsalz und Kalisalz (Eluat).
Tableau 3.8 : Concentrations en strontium et rubidium dans le sel gemme et le sel de potasse (solutés).



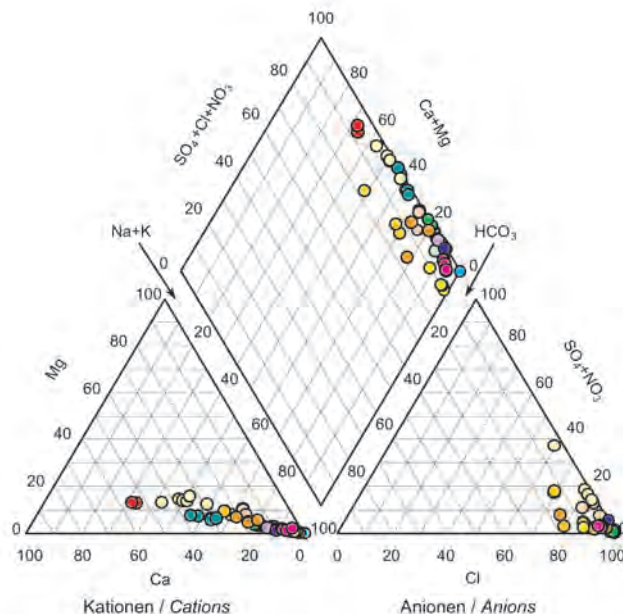
- Steinsalz / Sel gemme
- Schacht / Puits Heitersheim III (106 m u GOK)
- Schacht / Puits Heitersheim III (124 m u GOK)
- Schotterwerk AG GWM 1/95 (145 m)
- Salzbohrung / Sondage sel Eschbach (75 m)
- Salzbohrung / Sondage sel Eschbach (88 m)
- Kalisalz / Sel de potasse
- Abwasserkanal / Saumoduc Kaliminen
- Abwasserkanal Kaliminen südl. Fessenheim Saumoduc au S de Fessenheim
- ANNA 2 Nr. 04132X0419 (Abstrom Halde / Aval terri)
- Salzsole aus dem Ringgraben der Halde Marie-Louise Saumure du fossé de ceinture du terri Marie-Louise
- Nr. 04131X0514
- Marie Louise Nr. 04131X0512

Abbildung 3.13: Verteilung der Hauptinhaltsstoffe in Eluaten, in Grubenwasser aus dem Schacht Heitersheim und dem Abwasserkanal.

Figure 3.13 : Distribution des éléments majeurs dans des solutés, l'eau d'exhaure du puits Heitersheim et le saumoduc.

Nebengestein, Steinsalz und Produktionsrückständen) in Bezug auf das ursprüngliche Kalisalz an Calcium, Natrium und Sulfat angereichert und an Kalium abgereichert.

In Abb. 3.13 ist die Verteilung der Hauptinhaltsstoffe in den Eluaten, dem Grubenwasser im Schacht Heitersheim und dem Abwasser des Abwasserkanals, in Abb. 3.14 die Verteilung in Grundwässern mit erhöhten Chloridgehalten dargestellt. Tab. 3.7 und Abb. 3.13 zeigen, dass die Eluate von Kalisalz und Steinsalz im Piper-Diagramm eng nebeneinander liegen und das Haldenmaterial sich davon je nach Anteil des Nebengesteins (Ton, Kalzit, Dolomit) unterscheidet. Ähnlich groß ist die Streuung der Hauptinhaltsstoffe in den Grundwassermessstellen mit einem ein-



- 7911/552: Brunnen Fa. KBC Breisach (9 m)
- 8011/035: 0253/020-0 Salzbohrung IX Bremgarten (123 m)
- 8011/050: 2030/020-3 GWM 1 tief Bremgarten Interreg II (150 m)
- 8011/064: 0140/020-6 Salzbohrung VII Bremgarten (105 m)
- 8011/108: 0251/020-0 Weinstetter Diapir Iffezheim-Fm (102,5 - 108,5 m)
- 8011/108: 0252/020-5 Weinstetter Diapir Tertiär (120 - 150 m)
- 8011/376: 8509/020-9 Balgau (81 - 110 m)
- 8011/381: 2032/020-4 GWM 2 Bremgarten (95 m)
- 8011/492: 8504/020-1 GWM 1/01 Hartheim Interreg II (145 m)
- 8011/493: 2062/020-3 Weinstetter Hof (123 m)
- 8111/138: 0238/021-2 GWM 1A Kalihalde Buggingen
- 8111/176: 0296/021-5 Eschbach Tertiär (64 - 92 m)
- 8111/467: 2001/021-2 GWM 2 Kalihalde Heitersheim (19,5 m)

Abbildung 3.14: Verteilung der Hauptinhaltsstoffe in Grundwässern mit erhöhten Chloridgehalten.

Figure 3.14 : Distribution des éléments majeurs dans les eaux souterraines à forte concentration en chlorures.

de steriles, de sel gemme et de résidus de production) sont enrichis en calcium, sodium et sulfates et appauvris en potassium par rapport au minerai de départ.

On trouvera en figure 3.13 la distribution des éléments majeurs dans les solutés, l'eau d'exhaure du puits Heitersheim et la saumure du saumoduc, en fig. 3.14 la répartition dans les eaux souterraines enrichies en chlorures. Le tableau 3.7 et la fig. 3.13 montrent que les solutés de sel de potasse et de sel gemme sont très proches sur le diagramme de Piper et que les matériaux des terrils se différencient par une proportion de stérile (argiles, calcite, dolomie). La dispersion des concentrations en éléments majeurs est tout aussi grande dans les eaux souter-

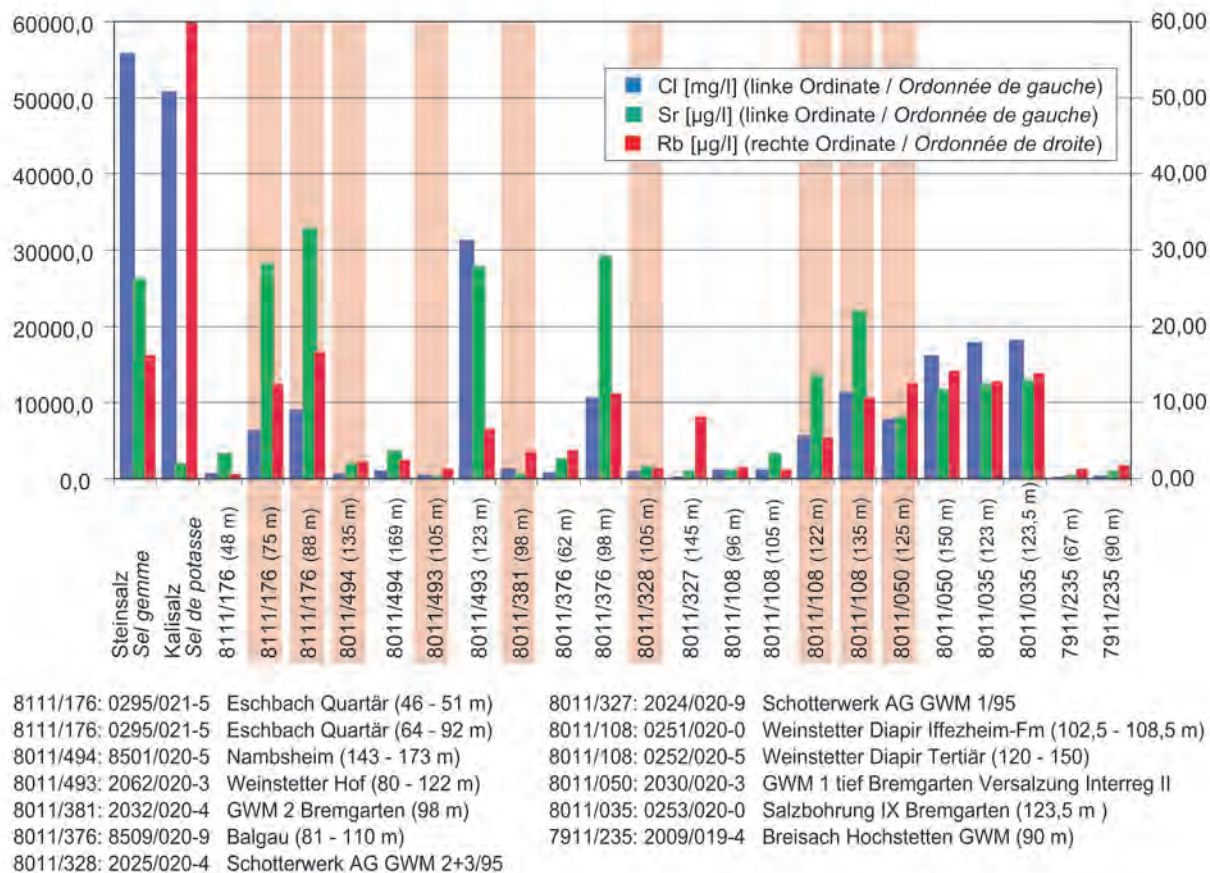


Abbildung 3.15: Chlorid-, Strontium- und Rubidiumgehalte einiger ausgesuchter Messstellen und der Ausgangskomponenten (rot hinterlegt: Grundwässer mit geogenen Chloridgehalten).

Figure 3.15 : Teneurs en chlorures, strontium et rubidium de piézomètres sélectionnés et des roches de référence (souligné en rouge : eaux souterraines à contribution géologique).

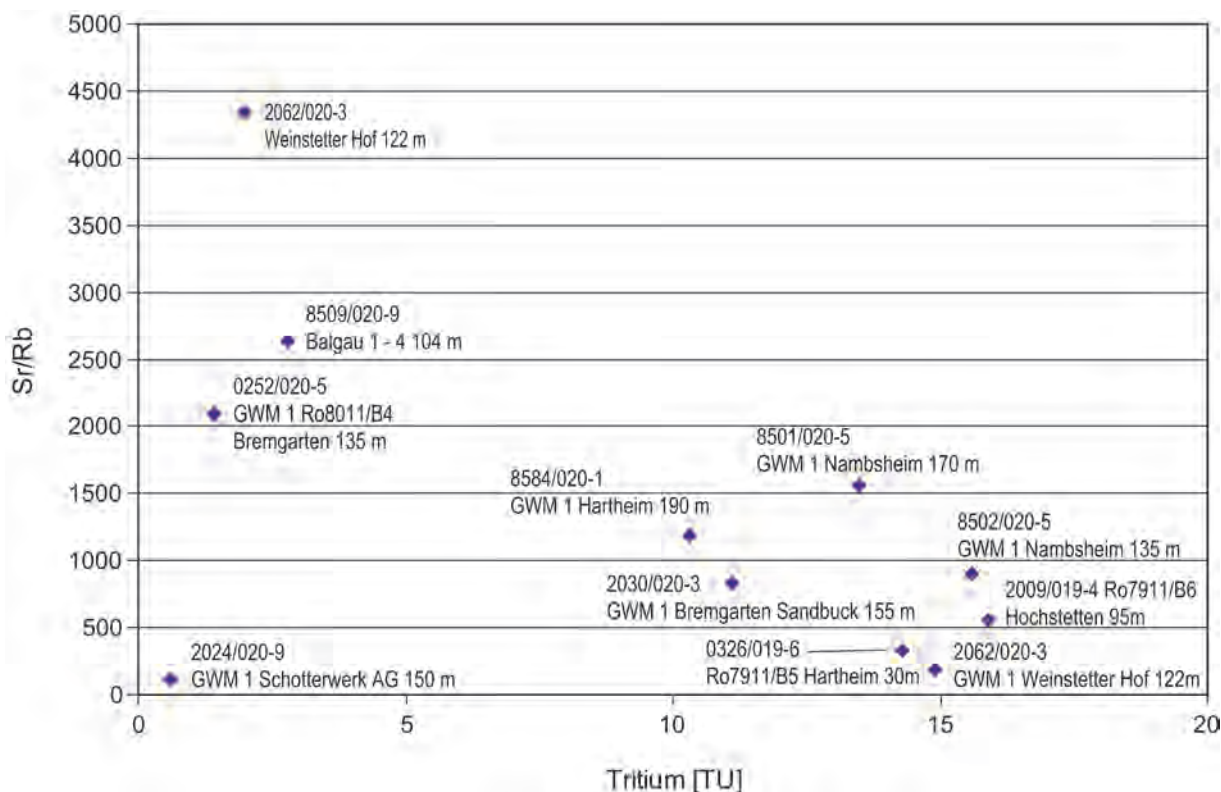


Abbildung 3.16: Korrelationsdiagramm Sr/Rb zu Tritium.

Figure 3.16 : Diagramme de corrélation entre le rapport Sr/Rb et le tritium.

deutigen Anteil geogener Komponenten (*Abb. 3.14*). Mit Hilfe dieser Parameter lassen sich daher keine eindeutigen Hinweise auf die Herkunft der Chloridgehalte in den hoch konzentrierten Grundwässern ableiten.

Spurenstoffe

Neben den Hauptinhaltsstoffen wurden die im Juni und Juli 2006 beprobten Grundwässer auf mehrere Spurenstoffe untersucht.

Kalisalz unterscheidet sich nach Abreicherung des Kaliums vom Steinsalz in den Hauptinhaltsstoffen nur unwesentlich (s.o.). Dagegen sind die Unterschiede bei den Spurenstoffen Strontium und Rubidium markant (Tab. 3.8, *DIETZE 2007*, mündl. Mitt.). Steinsalz weist im Vergleich zum Kalisalz eine deutlich höhere Konzentration an Strontium (Sr) und signifikant niedrigere Konzentrationen an Rubidium (Rb) auf.

Wird für die Spurenstoffe Sr und Rb in Tiefenwässern eine identische Verteilung wie beim Steinsalzeluat angenommen, so weist ein Sr/Rb- Verhältnis im Grundwasser in der Größenordnung des Steinsalz-Eluates (ca. 1600) auf Tiefenwasser als Chloridquelle hin.

Anhand des signifikanten Strontiumüberschusses wurden die hochkonzentrierten Grundwässer mit einer Beteiligung einer geogenen Komponente identifiziert (in *Abb. 3.15* rot hinterlegt). Grundwassermessstellen mit geogenen Chloridanteilen treten ausschließlich im Verbreitungsgebiet des Weinstetter Diapirs auf. Für die übrigen Grundwässer wird eine ausschließlich anthropogene Chloridherkunft angenommen.

Für die in verschiedenen Tiefen ausgebauten bzw. beprobten Grundwassermessstellen GWM 8502/020-0 (Nambsheim 120-139 m) bzw. 8501/020-5 (Nambsheim 143-173 m), 2062/0203 (Weinstetter Hof 105 m) bzw. 2062/0203 (Weinstetter Hof 122 m), 8509/020-9 (Balgau 62 m) bzw. 8509/020-9 (Balgau 81-110 m) sowie 0250/020-4 (Weinst. Diapir Q. 84-99 m) bzw. 0251/020-0 (Weinst. Diapir Altq. 102,5-108,5) bzw. 0252/020-5 (Weinst. Diapir Tertiär 120-150 m) deuten die Sr/Rb- Verhältnisse in den an der Aquiferbasis verfilterten Messstellen die Beteiligung einer geogenen Komponente, in den höher verfilterten Messstellen den anthropogenen Ursprung des Chlorids an.

In der Messstelle 2024/020-9 Schotterwerke AG Oberrimsingen wurde trotz des isotopisch nachgewiesenen pleistozänen Grundwasseralters ein relativ niedriges Sr/ Rb- Verhältnis festgestellt (*Abb. 3.16*). Außerdem fallen die vergleichsweise hohen Hydrogenkarbonatgehalte auf. Eventuell handelt es sich dabei

raines de piézomètres contenant nettement une proportion de composante d'origine géologique (*fig. 3.14*). Ces paramètres ne permettent donc pas de conclure sur l'origine des eaux souterraines enrichies en chlorures.

Eléments traces

Les prélèvements d'eaux souterraines de juin et juillet 2006 ont également été analysés pour plusieurs éléments traces en plus des éléments majeurs.

Le sel de potasse se distingue peu du sel gemme par ses éléments majeurs après extraction du potassium (*cf. plus haut*). Par contre les différences sur les éléments traces strontium et rubidium sont très nets (tab. 3.8, *DIETZE 2007*, comm. orale). Le sel gemme montre une concentration beaucoup plus élevée en strontium (Sr) et une concentration plus basse en rubidium (Rb).

Si l'on admet que la distribution du Sr et du Rb est la même dans les eaux profondes que pour le soluté de sel gemme, cela impliquerait qu'un rapport Sr/Rb analogue au sel gemme (de l'ordre de 1600) serait une indication d'une origine profonde des chlorures.

On a ainsi identifié les eaux souterraines présentant un excès significatif de strontium comme des eaux contenant une composante d'eau profonde (elles sont soulignées en rouge dans la *fig. 3.15*). Les piézomètres contenant une composante géologique sont uniquement localisés sur l'aire de répartition du diapir de Weinstetten. Les autres eaux souterraines semblent être d'origine exclusivement anthropique.

En ce qui concerne les piézomètres multiples prélevés à différentes profondeurs, GWM 8502/020-0 (Nambsheim 120-139 m) et 8501/020-5 (Nambsheim 143-173 m), 2062/0203 (Weinstetter Hof 105 m) et 2062/0203 (Weinstetter Hof 122 m), 8509/020-9 (Balgau 62 m) et 8509/020-9 (Balgau 81-110 m) ainsi que 0250/020-4 (Weinst. Diapir Q. 84-99 m), 0251/020-0 (Weinst. Diapir Altq. 102,5-108,5) et 0252/020-5 (Weinst. Diapir Tertiaire 120-150 m), les rapports Sr/Rb indiquent la présence d'une composante géologique profonde dans les crépines situées à la base de l'aquifère, et une origine exclusivement anthropique pour les crépines moins profondes.

Cependant, dans le piézomètre 2024/020-9 des Schotterwerke AG à Oberrimsingen le rapport Sr/Rb est relativement bas bien que les études isotopiques aient donné un âge pléistocène (*fig. 3.16*). La concentration en bicarbonates est également anormalement élevée. Il pourrait s'agir d'eaux profondes

um eine Tiefenwasserkomponente, die mit Kalisalz in Kontakt stand.

Isotopenhydrologie

Aufgrund der Beteiligung von Rheinuferfiltrat mit erhöhten Tritiumwerten (Einflüsse der schweizerischen und französischen Kernkraftwerke) ist eine Bilanzierung der Tritiumgehalte im Hinblick auf die mittlere Verweilzeit nicht möglich. Die erhöhten Tritiumgehalte in tieferen Aquiferabschnitten werden durch die Zumischung einer jungen, tritiumhaltigen Komponente mit älteren tritiumfreien Tiefenwässern erklärt.

Die erstmals im Untersuchungsgebiet durchgeführten Schwefelhexafluorid-Spurengas – Untersuchungen (SF₆) bestätigen im Wesentlichen die Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen zur Altersstruktur der Grundwässer.

Für die neu untersuchten Messstellen sind in Kombination mit den ¹⁸O- und den Tritiummessungen folgende Aussagen möglich (Abb. 3.15, HYDROISOTOP 2007b):

- GWM Faule Waag, TB 2 Breisach unten (21 -34m), Brunnen KBC Breisach (7-10m) und GWM 6 Schwimmbad Breisach (50 - 70 m): junge Grundwässer mit einer mittleren Verweilzeit (MVZ) von 10 bis 40 Jahren, möglicherweise mit Beteiligung geringer Anteile älterer Komponenten (in Abhängigkeit vom zugrunde gelegten Aquifermodell). Im Brunnen KBC Breisach (7 - 10 m) und der GWM 6 Schwimmbad Breisach (50 - 70 m) treten nach den ¹⁸O- Gehalten Rheinuferfiltratanteile von 80 - 100 % auf. Aufgrund der hohen Mittleren Verweilzeiten (MVZ) der Wässer handelt es sich um weitläufiges Uferfiltrat.
- TB 1 Breisach (20 m): MVZ von 5 - 10 Jahren
- GWM B 6 Hochstetten (95 m): unplausible Ergebnisse, evtl. Baggerseeinfluss
- GWM Geiswasser tief (200 m): evtl. erhöhte Anteile einer älteren Komponente, jedoch auch Mischung einer 30 bis 50 Jahre alten Komponente mit hohen anthropogenen Chloridgehalten (10%) und einer älteren Komponente mit geringeren Chloridgehalten (90%) möglich.

Die ¹⁸O- Gehalte sind ebenfalls in der gleichen Größenordnung wie bei früheren Untersuchungen, so dass sich keine Hinweise auf Veränderungen in den Anteilen der Grundwasserkomponenten ergeben.

ayant été en contact avec des sels de potasse.

Etudes isotopiques

En raison de la présence d'eaux d'infiltration du Rhin avec des teneurs élevées en tritium (dus à l'influence des centrales nucléaires suisses et française), il n'est pas possible de faire des calculs de temps de transfert à l'aide de cet isotope. Les teneurs élevées en tritium trouvées dans les niveaux profonds de l'aquifère s'expliquent par un mélange d'eaux jeunes riches en tritium avec des eaux anciennes sans tritium.

Les analyses de l'hexafluorure de soufre (SF₆, un gaz en traces) sont une première dans le secteur. Elles confirment globalement les conclusions des études antérieures sur l'âge des eaux souterraines.

Sur les nouveaux piézomètres les résultats suivants ont été obtenus par la combinaison des analyses de l'oxygène 18 et du tritium (fig. 3.15, HYDROISOTOP 2007b) :

- Piézomètre Faule Waag, Puits AEP TB2 de Breisach profond (21 – 34 m)), puits KBC de Breisach (7 – 10 m) et piézomètre 6 de la piscine de Breisach (50 – 70 m) : eaux jeunes présentant un temps de résidence moyen de 10 à 40 ans, peut-être avec une part réduite de composantes anciennes (suivant le modèle d'aquifère employé). Dans le puits KBC de Breisach (7 – 10 m) et le piézomètre 6 de la piscine de Breisach (50 – 70 m) la part d'eaux d'infiltration du Rhin est de 80 à 100 % d'après le contenu en oxygène 18.
- TB 1 Breisach (20 m) : temps de résidence moyen de 5 à 10 ans
- Piézomètre B6 de Hochstetten (95 m) : résultats ininterprétables, éventuellement sous influence des gravières
- Piézomètre Geiswasser profond (200 m) : présence possible d'une composante ancienne, ou bien mélange d'une composante âgée de 30 – 50 ans ayant une concentration très élevée en chlorures (10 %) avec une composante ancienne ayant peu de chlorures (90 %).

Les teneurs en oxygène 18 sont du même ordre de grandeur que dans les études antérieures, de sorte qu'il ne semble pas y avoir eu de changements dans les proportions des composantes des eaux souterraines.

3.4.1.3 Zusammenfassende Bewertung

Die Interpretation der Hauptinhaltsstoffe, der Spurenstoffe und der Isotopengehalte in den Grundwässern des Untersuchungsgebietes sowie in den Ausgangsgesteinen zeigt, dass nur die vergleichende Auswertung mehrerer Parameter Hinweise auf die Herkunft der Salzgehalte im Grundwasser liefern kann. Eindeutige Marker konnten trotz des im Vergleich zu früheren Untersuchungen deutlich ausgeweiteten Parameterumfanges nicht identifiziert werden. Die Unterscheidung zwischen einer geogenen und einer anthropogenen Herkunft des Chlorids anhand der Hauptinhaltsstoffe ist nicht möglich. Einen aussichtsreichen Ansatz zur Unterscheidung bilden die Konzentrationen der Spurenstoffe Rubidium und Strontium in Kombination mit den Befunden der Isotopenmessungen.

Im Untersuchungsgebiet tragen die versickerten Salzlaugen der Kaliindustrie sowie aufsteigende Tiefenwässer in unterschiedlichem Ausmaß zu den hohen Salzkonzentrationen bei. Bei Messstellen im Tertiär und in der Iffezheim-Formation ist vermutlich eine geogene Komponente beteiligt. Hohe Chloridkonzentrationen im Grundwasser in der Neuenburg- und Breisgau-Formation sind hingegen überwiegend anthropogenen Ursprungs.

Im basalen Teil der Breisgau-Formation können beide Komponenten Mischsysteme bilden, wobei in den meisten Fällen der anthropogene Chlorideintrag überwiegt. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die geogenen Chloridquellen im Untersuchungsgebiet nur eine untergeordnete Rolle für die Gesamtbelastung des Grundwassers mit Chlorid spielen. Dies liegt daran, dass die geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der tertiären Sedimente und der Iffezheim-Formation keinen bedeutenden Zufluss von chloridbelastetem Grundwasser aus dem Festgesteinsuntergrund in den quartären Kiesaquifer ermöglicht.

Die Konzentrationsunterschiede zwischen den versickerten Salzlaugen der Kaliindustrie und den möglicherweise aufsteigenden Tiefenwässern einerseits und dem durch lokale Grundwasserneubildung bzw. Uferfiltrat gebildeten Grundwasser andererseits sind sehr hoch. Deshalb können bereits geringe Beimengungen von hoch konzentrierten Kaliabwässern (gesättigte Kochsalzlösungen bis 356 g/l NaCl bzw. 230 g/l Cl) oder aufsteigendem Tiefenwasser zum niedrig konzentrierten lokalen Grundwasser (Chloridkonzentration bis ca. 50 mg) zu hohen Chloridkonzentrationen im Mischwasser führen, ohne dass dabei die Gehalte anderer Inhaltsstoffe wie z.B. die isotopische Zusammensetzung wesentlich verändert werden.

3.4.1.3 Conclusions générales

L'examen des éléments majeurs, des éléments traces et des isotopes des eaux souterraines du secteur étudié ainsi que des roches impliquées montre qu'il est nécessaire de croiser plusieurs paramètres pour pouvoir interpréter l'origine du contenu en sels des eaux souterraines. Il n'a pas été possible de trouver des marqueurs non ambigus malgré la prise en compte de beaucoup plus de paramètres que dans les études précédentes. La distinction entre une origine géologique et une origine anthropique des chlorures n'est pas possible d'après les éléments majeurs. Par contre des éléments intéressants pour cette distinction sont apportés par les concentrations des éléments traces rubidium et strontium en combinaison avec les résultats des études isotopiques.

Dans le secteur d'étude les apports des infiltrations de saumures de l'industrie de la potasse et des remontées d'eaux profondes contribuent de façon inégale aux fortes concentrations en chlorures des eaux souterraines. Les piézomètres crépinés dans le Tertiaire et dans la formation d'Iffezheim portent probablement une part d'eaux profondes. Les fortes concentrations en chlorures des eaux des alluvions des formations de Neuenburg et de Breisgau sont par contre essentiellement d'origine anthropique.

Au niveau de la base de l'aquifère graveleux (formation de Breisgau) ces deux composantes peuvent être mélangées, mais l'apport anthropique domine en général. Globalement on peut estimer que les sources de chlorures d'origine géologique ne jouent qu'un rôle mineur dans la salure des eaux souterraines du secteur étudié. Ceci est dû au fait que les faibles à très faibles perméabilités des sédiments tertiaires et de la formation d'Iffezheim ne permettent pas une contribution importante de remontées d'eaux profondes du substratum dans l'aquifère graveleux quaternaire.

Il y a une énorme différence entre la concentration élevée des saumures industrielles infiltrées et des remontées d'eaux profondes d'une part, et celle des eaux jeunes issues de la recharge par les précipitations ou des infiltrations des cours d'eau d'autre part. C'est pourquoi une faible proportion de ces saumures (solutions de chlorure de sodium proches de la saturation à 356 g/l de NaCl soit 230 g/l Cl) ou d'eaux profondes concentrées dans des eaux jeunes à faible concentration en chlorures (atteignant au maximum 50 mg/l) suffit à produire un mélange riche en chlorures sans que les teneurs en d'autres éléments ou la composition isotopique en soient beaucoup affectées.

In den Grundwassermessstellen GWM 1/2001 Weinstetter Hof (122 m), Ro8011/B4 tief Bremgarten (135 m), GWM Balgau 1-4 (104 m) sowie GWM Geiswasser tief (175 und 200 m) dominiert altes Grundwasser, welches vor 1953 neugebildet wurde. Bei einigen Messstellen weisen frühere Ergebnisse von Kohlenstoffisotopenuntersuchungen auf hohe mittlere Verweilzeiten von mehreren Tausend Jahren hin. Die z. T. deutlich unterschiedlichen ^{18}O - Gehalte und insbesondere die uneinheitliche hydrochemische Zusammensetzung der tiefen Grundwässer sind ein Indiz dafür, dass im Untersuchungsgebiet mehrere alte Grundwasserkomponenten auftreten, die sich hinsichtlich Herkunft und Neubildungsbedingungen deutlich unterscheiden. Dies trifft insbesondere für die eindeutig "alten" Grundwässer der GWM Eschbach tief und GWM Schotterwerke AG zu.

Darüber hinaus konnten in den meisten tiefen Messstellen auch noch junge Grundwasserkomponenten festgestellt werden (Tritiumgehalte von 1 bis 3 TU; entspricht Jungwasseranteilen von mindestens 10 bis 30 %). Im Gegensatz dazu liegen häufig in tiefen Messstellen mit vergleichsweise hohen Tritiumgehalten (z. B. GWM 1/01 Hartheim (188 m), GWM 1 tief Bremgarten (155 m); Tritiumgehalte von 10 bis 11 TU) Mischwassersysteme mit Beteiligung von alten Grundwasserkomponenten vor.

Dans les piézomètres GWM 1/2001 Weinstetter Hof (122 m), Ro8011/B4 profond à Bremgarten (135 m), GWM Balgau 1-4 (104 m) ainsi que GWM Geiswasser profond (175 et 200 m), les eaux anciennes datant d'avant 1953 dominent. Dans quelques piézomètres des études antérieures des isotopes du carbone indiquaient des temps de résidence élevés, de plusieurs milliers d'années. Les grandes différences dans les teneurs en oxygène 18 et surtout dans les compositions chimiques des eaux profondes indiquent que plusieurs composantes d'eaux anciennes sont présentes dans le secteur d'étude ; elles seraient d'origines et de conditions de recharge très différentes. Ceci est notamment vrai pour les eaux nettement "anciennes" des piézomètres Eschbach profond et Schotterwerke AG.

De plus la plupart des piézomètres profonds contiennent aussi une composante d'eau jeune : les teneurs en tritium de 1 à 3 UT correspondent à une contribution d'eau récente de 10 à 30 % au minimum. Dans les piézomètres profonds qui présentent des teneurs en tritium relativement élevées (de 10 à 11 UT dans les piézomètres GWM 1/01 Hartheim (188 m), GWM 1 profond Bremgarten (155 m) par exemple), on a des mélanges comprenant une contribution d'eaux anciennes.

3.4.2 Flächenhafte tiefendifferenzierte Darstellung der Chloridverteilung

Die Verteilung der Chloridkonzentration im Grundwasser wurde für den Zeitraum 2006/2007 dargestellt. Grundlage hierfür sind die Ergebnisse der hydrochemischen Beprobung 2006/2007 (Grundwasser und Oberflächengewässer) und der geoelektrischen Messungen in den Jahren 2006/2007 (*Kap. 3.4.1*). Die Grundwasserproben wurden überwiegend tiefendifferenziert mit einem Schöpfer entnommen. Daneben wurden in Bereichen geringer Belegpunktdichte Informationen aus früheren Messkampagnen (u.a. *BINDER 2002*) hinzugezogen. Für die Chloridkonzentrationen im Grundwasserabstrom der Kalihalde Heitersheim wurden Chloridwerte aus dem Jahr 2004 verwendet, die bei der Grundwasserüberwachung im Zuge der Sicherungsmaßnahme der Halde gemessen wurden. Für den Abstrom der Halde Buggingen lagen lediglich Werte aus den Jahren 1996 vor. Eine weitere Grundlage für die Darstellung der Chloridkonzentrationen waren die Ergebnisse aus dem Jahr 2003 für den oberflächennahen Abschnitt des Grundwasserleiters nördlich von Breisach (*HYDROISOTOP 2004*).

Aufgrund der Ausbreitungsmechanismen der hochkonzentrierten chloridhaltigen Lösungen als Folge des dichteinduzierten Transportes sowie des Transportes durch konvektive Strömung sind die Chloridverteilungen im Untergrund tiefendifferenziert zu betrachten. Erhöhte Chloridkonzentrationen können sowohl innerhalb des Kiesaquifers in rinnenartigen Bereichen erhöhter Durchlässigkeiten oder an Grenzflächen zwischen hydrogeologischen Einheiten, als auch an der Basis des Kiesaquifers direkt über der stauenden Sohlschicht auftreten. Hier wurden innerhalb weniger Profilmeter Konzentrationsunterschiede von mehreren g/l festgestellt.

Die Chloridverteilung wurde für folgende Tiefenstufen kartenmäßig dargestellt:

- 0 – 30 m u. Geländeoberkante (*Abb. 3.17*)
- 30 – 70 m u. Geländeoberkante (*Abb. 3.19*)
- 70 – 100 m u. Geländeoberkante (*Abb. 3.20*)
- über 100 m u. Geländeoberkante (*Abb. 3.21*)

Hierfür wurden die Chloridgehalte in 6 Klassen unterteilt. Ihre räumliche Verteilung wird im Folgenden näher erläutert. In den Abbildungen für die verschiedenen Tiefenstufen sind außerdem die jeweils beprobten GWM als Stützstellen eingetragen (zu den Bezeichnungen der Grundwassermessstellen siehe *Abb. 3.10*). Neben den im Bericht dargestellten Übersichtskarten wurden zur besseren Lokalisierung für die vier Tiefenstufen Verteilungskarten im Maßstab 1 : 50 000 mit topographischem Hintergrund erstellt.

3.4.2 Cartographie des chlorures par tranche de profondeur

La répartition des concentrations en chlorures dans la nappe a été cartographiée pour l'année 2006/2007. La cartographie s'est basée sur les résultats d'analyse des prélèvements de 2006/2007 (eaux souterraines et eaux de surface) et sur les campagnes de géophysique électrique de 2006 et 2007 (*chap. 3.4.1*). Les échantillons d'eaux souterraines ont pour la plupart été prélevés à la bouteille à différentes profondeurs. Dans des secteurs disposant de peu de points de mesure on s'est également basé sur des campagnes antérieures (notamment *BINDER 2002*). En ce qui concerne les concentrations en chlorures à l'aval du terril de Heitersheim, on a utilisé des valeurs mesurées en 2004 dans le cadre de la surveillance au cours de la réhabilitation du terril. Pour l'aval du terril de Buggingen les seuls valeurs disponibles dataient de 1996. Une autre source d'information pour la cartographie des chlorures était les résultats de la campagne menée en 2003 sur les niveaux superficiels de la nappe au Nord de Breisach (*HYDROISOTOP 2004*).

Il est nécessaire d'examiner la répartition des concentrations en chlorures dans la nappe en fonction de la profondeur en raison des différents types de transport des chlorures : écoulement gravitaire des saumures denses et écoulement convectif des eaux légèrement salées. Les concentrations élevées en chlorures peuvent être confinées à des structures chenalisantes dans l'aquifère graveleux ou s'étendre à la limite de deux formations de perméabilités contrastées, voire stagner à la base de l'aquifère au-dessus du substratum imperméable. Dans ce cas il arrive d'observer des différences de concentration de plusieurs g/l sur quelques mètres de profil vertical.

Les concentrations en chlorures ont été cartographiées pour les tranches de profondeur suivantes :

- 0 – 30 m de profondeur (*fig. 3.17*)
- 30 – 70 m de profondeur (*fig. 3.19*)
- 70 – 100 m de profondeur (*fig. 3.20*)
- über 100 m de profondeur (*fig. 3.21*)

Les concentrations en chlorures ont été réparties en 6 classes pour la cartographie. Leur répartition spatiale est expliquée en détail ci-après. Les points de mesure respectifs de la tranche considérée sont reportés sur chaque carte (voir la *fig. 3.10* pour les désignations des piézomètres). Les cartes simplifiées des figures du rapport sont complétées par des cartes plus complètes de chaque tranche, à l'échelle de 1/50 000 sur fond topographique, pour une meilleure localisation des points. Ces cartes sont

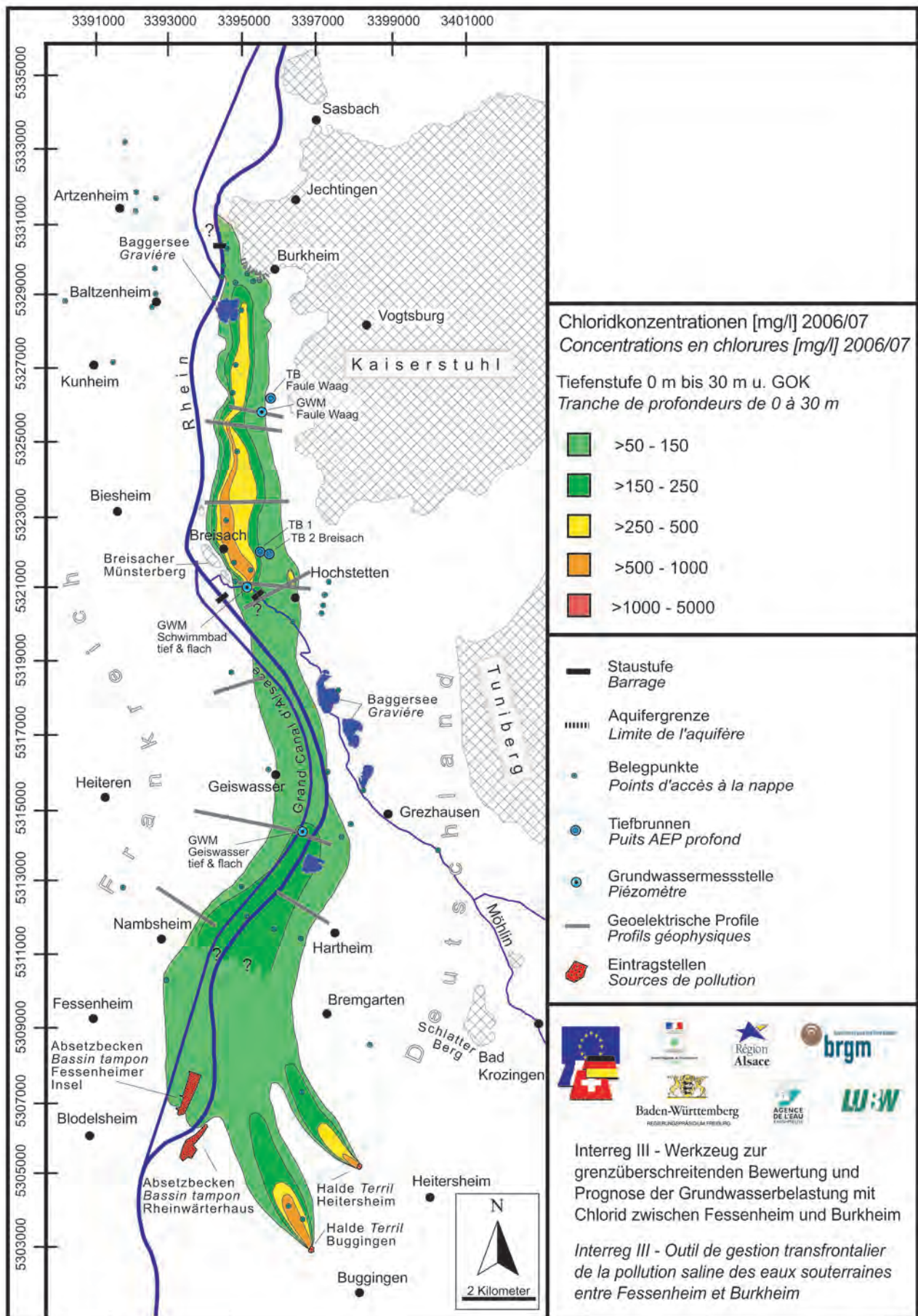


Abbildung 3.17: Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe 0 – 30 m u. GOK.
Figure 3.17 : Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche 0 – 30 m de profondeur.

Sie sind auf der beigegeführten CD-ROM dokumentiert (Verzeichnis karten: *Karte 1 bis Karte 4*).

3.4.2.1 Tiefenstufe 0 – 30 m u. GOK

(Abb. 3.17)

In der Tiefenstufe 0 – 30 m u. GOK erstreckt sich der Bereich erhöhter Chloridgehalte im Grundwasser ausgehend von den Halden Heitersheim und Buggingen und den ehemaligen Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel in einem schmalen, zwei bis drei Kilometer breiten Streifen in nördliche Richtung. Die Chloridkonzentrationen liegen zwischen 9 und 1220 mg/l. Die höchsten Chloridgehalte treten im unmittelbaren Grundwasserabstrom der Kalihalden Heitersheim und Buggingen und bei der Stichtagsmessung 2006 im Brunnen der Firma KBC Breisach (GW-Nr. 185/019-4) sowie in einem schmalen Streifen westlich des Kaiserstuhls auf, der im Bereich der Möhlin südlich von Breisach beginnt.

Im unmittelbaren Abstrom der Halde Heitersheim wurden im Jahr 2004 Chloridkonzentrationen in der Größenordnung von ca. 1120 mg/l gemessen (GW-Nr. 2001/020-2, Entnahmetiefe 20 m), in den Jahren davor lagen die Gehalte deutlich über diesem Wert (bis zu 7425 mg/l im Jahr 1995). Diese Abnahme ist möglicherweise die Folge der Abdeckung der Halde Heitersheim zur Verringerung des Chlorideintrags durch versickernde Niederschläge. Bei der Darstellung des weiteren Verlaufs der Chloridfahne im Abstrom der Halde wurde angenommen, dass sie sich in Grundwasserfließrichtung erstreckt. Diese Annahme wird durch den Chloridgehalt in der Messstelle B64 (GW-Nr. 0293/021-9) auf dem ehemaligen Nato-Flugplatz gestützt, in der im Jahr 2006 in einer Tiefe von 22 m ein Chloridgehalt von 238 mg/l gemessen wurde. Die genaue Lage der Fahnnenspitze im Abstrom der Halde Heitersheim ist nicht bekannt.

Im unmittelbaren Abstrom der Kalihalde Buggingen lagen die Chloridwerte im Jahr 2001 in der Entnahmetiefe von 25,4 m u. GOK bei 1442 mg/l (GW-Nr. 0283/021-2). In der ca. 1300 m nordwestlich der Halde gelegenen Messstelle Ro8011/B2 Grifheim flach (GW-Nr. 0291/021-8) betrug der Chloridwert im Jahr 2004 in einer Entnahmetiefe von 27 m u. GOK 948 mg/l. Ebenso wie bei der Abstromfahne Heitersheim wurde auch für die Fahne im Abstrom der Halde Buggingen entsprechend der Grundwasserfließrichtung ein Verlauf nach Nordwesten angenommen. Auch die genaue Lage der Fahnnenspitze im Abstrom der Halde Buggingen ist nicht bekannt.

Im unmittelbaren Abstrom der Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel und der Absetzbecken Rhein-

fournies sur le CD ROM annexé au rapport (répertoire karten: *Karte 1 bis Karte 4*).

3.4.2.1 Tranche de profondeur

0 à 30 m (fig. 3.17)

Dans la tranche de profondeur de 0 à 30 m la zone de concentrations en chlorures élevées part des terrils de Heitersheim et Buggingen et des anciens bassins-tampons de l'île de Fessenheim pour former une langue étroite, large de deux à trois kilomètres, se dirigeant vers le Nord. Les concentrations en chlorures varient de 9 à 1220 mg/l. Les concentrations les plus élevées sont observées à l'aval immédiat des terrils de Heitersheim et Buggingen, dans le puits de la société KBC à Breisach en 2006 (référence 185/019-4), ainsi que dans une bande étroite à l'Ouest du Kaiserstuhl qui apparaît près de la Möhlin au Sud de Breisach.

A l'aval immédiat du terril de Heitersheim des concentrations de l'ordre de 1120 mg/l ont été mesurées en 2004 (piézomètre 2001/020-2, à 20 m de profondeur) ; les concentrations étaient nettement plus élevées les années précédentes (jusqu'à 7425 mg/l l'année 1995). Cette diminution avec le temps est probablement due à la couverture du terril de Heitersheim qui était destinée à réduire les infiltrations d'eau de pluie. Dans la cartographie on a supposé que le panache salé suivait l'écoulement des eaux souterraines en aval du terril. Cette hypothèse est confortée par la concentration observée dans le piézomètre B64 (référéncé 0293.021-9) de l'ancien aérodrome de l'OTAN, où une concentration de 238 mg/l de chlorures a été mesurée en 2006 à une profondeur de 22 m. La position exacte de l'extrémité de la langue salée en aval du terril de Heitersheim n'est cependant pas connue.

A l'aval immédiat du terril de Buggingen les concentrations en chlorures atteignaient en 2001 1442 mg/l à 25,4 m de profondeur (piézomètre 0283/021-2). Dans le piézomètre Grissheim superficiel Ro8011/B2 (référéncé 0291/021-8) situé à environ 1300 m au NW du terril les chlorures atteignaient 948 mg/l en 2004 à une profondeur de prélèvement de 27 m. De même que pour le terril de Heitersheim, on a admis que le panache salé s'étendait en aval du terril dans la direction d'écoulement vers le NO. Là non plus la position exacte de l'extrémité du panache en aval du terril de Buggingen n'est pas connue.

En aval immédiat des bassins tampons de l'île de Fessenheim et du bassin de décantation Rheinwärter-

wärterhaus liegen die Chloridkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser zwischen 50 und 150 mg/l (z.B. GWM Salz I, GW-Nr. 0134/020-9, Entnahmetiefe 40 m, Beprobung im Jahr 2000: 78 mg/l Cl). Weiter nach Norden nehmen die Chloridwerte auf 150 bis 250 mg/l zu. Im maximal 32 m tiefen "Hartheimer Baggersee" (BR 346) wurde in der Stagnationsphase eine deutliche Zunahme der Leitfähigkeit bzw. der Chloridgehalte mit der Tiefe beobachtet (kein Baggerbetrieb). Die höchsten Leitfähigkeiten wurden am Seegrund am Ende der sommerlichen Stagnationsphase gemessen (17.10.2001: 1333 μ S/cm, *BINDER* 2002). In der GWM 02/00 Birkenmeier (GW-Nr. 2051/020-0) am Nordrand des Baggersees lag der Chloridwert am 27.06.2006 bei 160 mg/l (Entnahmetiefe 18 m u. GOK) bzw. 175 mg/l (in 28 m u. GOK). Erhöhte Chloridkonzentrationen im oberflächennahen Bereich zeichnen sich auch in den Geoelektrik-Profilen Namsbheim, Hartheim und Geiswasser ab (*MIEHÉ* 2007, Kap. 3.1). Sie ermöglichen gemeinsam mit den hydrochemischen Befunden die seitliche Abgrenzung der Zonen erhöhter Chloridkonzentrationen.

Als Ursache für die Zunahme der Chloridkonzentrationen zwischen Hartheim und Namsbheim und nördlich davon bis auf Höhe von Grezhausen wird die Vorflutwirkung des Rheins in diesem Flussabschnitt gesehen. Dies führt zu einem Beizug von Grundwasser mit erhöhten Chloridkonzentrationen aus größerer Tiefe (s. unten) in den oberen Aquiferabschnitt und damit zu erhöhten Chloridkonzentrationen im rheinnahen Bereich. Im weiter nördlich anschließenden Abschnitt bis auf Höhe von Hochstetten wurden in früheren Messkampagnen wiederholt Chloridgehalte bis maximal 150 mg/l festgestellt. Auch die Ergebnisse des Geoelektrikprofils Algolsheim sprechen für niedrige Chloridgehalte in diesem Bereich. Lediglich im äußersten Osten finden sich Hinweise auf leicht erhöhte Chloridgehalte. Deutlich erhöhte Chloridkonzentrationen wurden erst wieder weiter im Norden ungefähr auf Höhe von Hochstetten festgestellt. Dabei liegt ein Bereich erhöhter Chloridgehalte bei Hochstetten, der andere beginnt westlich des Breisacher Schwimmbades und zieht unter der östlichen Bebauungsgrenze von Breisach nach Norden.

Die eng begrenzte Zone erhöhter Chloridgehalte nördlich von Hochstetten ist durch die Ergebnisse der Geoelektrik-Profile Muhrhau und Hochstetten belegt (*MIEHÉ* 2007). Grundwassermessstellen gibt es in diesem Gebiet nicht. In den ca. 600 m nördlich davon gelegenen Grundwassermessstellen am Spitalhof (GW-Nr. 0133/019-8) wurden im Jahr 2004 30 mg/l Chlorid gemessen.

haus les concentrations en chlorures dans les niveaux de la nappe proches de la surface sont de l'ordre de 50 à 150 mg/l (par exemple le piézomètre Salz I référencé 0134/020-9 donnait 78 mg/l de chlorures à 40 m de profondeur en 2000). Plus au Nord les concentrations en chlorures augmentent jusqu'à 150-250 mg/l. Dans le lac de la gravière de Hartheim (BR 346) qui a 32 m de profondeur maximale, on a observé une nette augmentation de la conductivité et donc des chlorures avec la profondeur en phase de repos (pendant un arrêt de l'exploitation). Les conductivités les plus élevées ont été mesurées au fond du lac à la fin de la phase de repos estival (17/10/2001, 1333 μ S/cm, *BINDER* 2002). Dans le piézomètre 02/00 Birkenmeier (référéncé 2051/020-0) à l'extrémité nord de la gravière les concentrations en chlorures atteignaient 160 mg/l à 18 m de profondeur et 175 mg/l à 28 m de profondeur le 27/06/2006. On note également des concentrations élevées en chlorures proches de la surface sur les profils géophysiques Namsbheim, Hartheim et Geiswasser (*MIEHÉ* 2007, chap. 3.1). Ceci nous permet, avec les mesures ponctuelles, de délimiter l'extension latérale de la langue salée.

La cause de l'augmentation des concentrations en chlorures entre Hartheim/Namsbheim vers le Nord jusqu'à la hauteur de Grezhausen semble être le fonctionnement du Rhin qui est en position de drainage dans cette section du fleuve. Ce drainage entraîne une remontée d'eaux salées de la profondeur vers les niveaux plus superficiels de la nappe et ainsi une concentration en chlorures plus élevée près du Rhin. Dans la section suivante du fleuve vers le nord jusqu'à la hauteur de Hochstetten on a systématiquement obtenu des valeurs en dessous de 150 mg/l dans les campagnes de prélèvement antérieures. Le profil géophysique Algolsheim indique également des concentrations en chlorures faibles. Ce n'est qu'à l'extrémité Est du profil que l'on a des indications de concentrations légèrement supérieures au fond. On retrouve des concentrations élevées en chlorures plus au Nord seulement à partir de Hochstetten. Une zone de concentrations élevée est située près de Hochstetten, l'autre commence à l'Ouest de la piscine de Breisach et se prolonge vers le Nord sous la limite Est de l'agglomération de Breisach.

L'étroite langue salée au Nord de Hochstetten est confirmée par les résultats des profils géophysiques Muhrhau et Hochstetten (*MIEHÉ* 2007). Il n'y a pas de piézomètres dans ce secteur. Dans le piézomètre du Spitalhof situé environ 600 m plus au Nord (numéro 0133/019-8) on n'a relevé que 30 mg/l de chlorures en 2004.

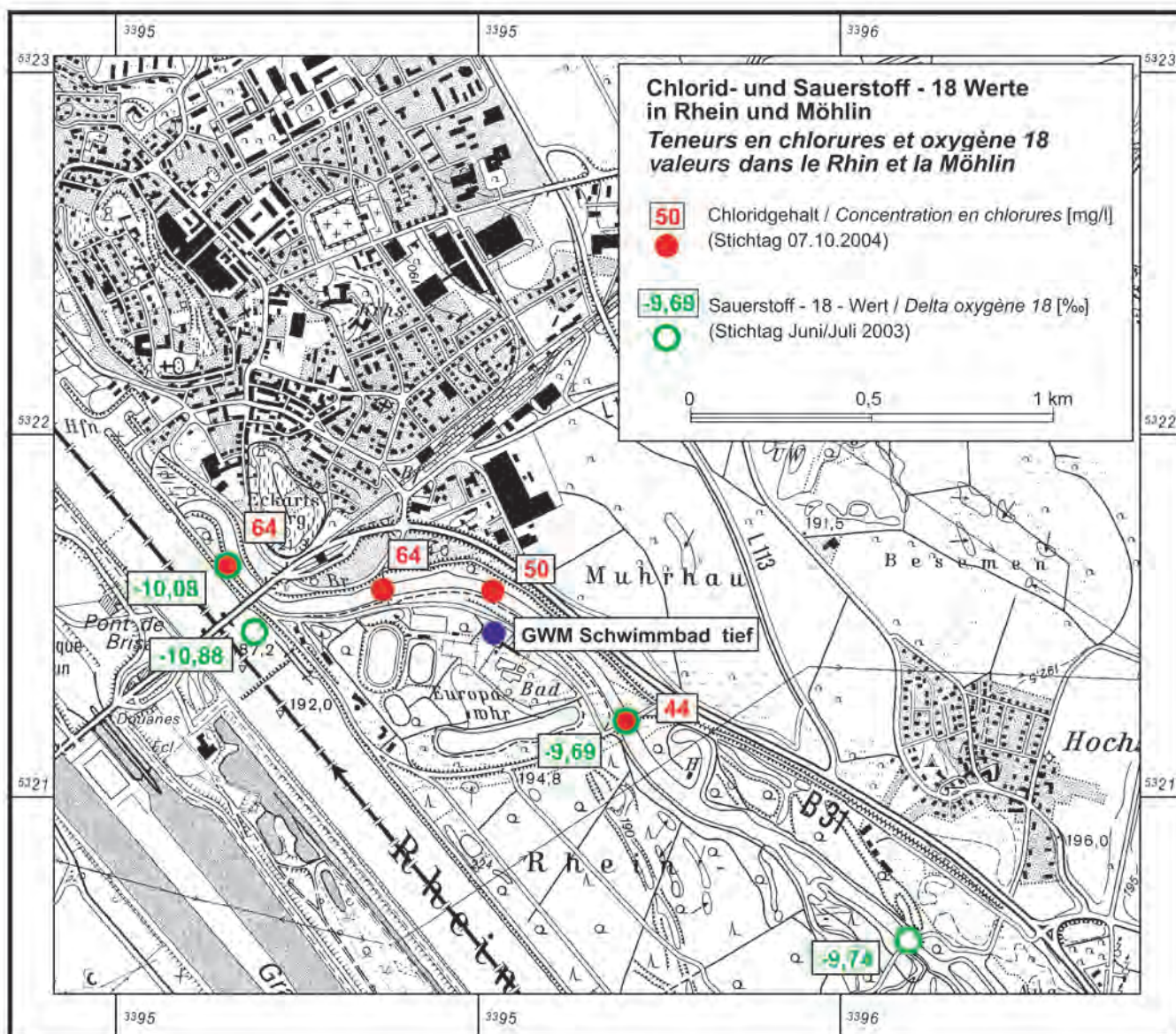


Abbildung 3.18: Chlorid – und Sauerstoff-18 – Werte in der Möhlin zwischen Wehr und Mündung in den Rhein (HYDROISOTOP 2004).

Figure 3.18 : Valeurs en chlorures et en oxygène 18 dans la Möhlin entre le barrage et la confluence avec le Rhin (HYDROISOTOP 2004).

Signifikant erhöhte Chloridkonzentrationen treten im weiteren Verlauf im Südosten von Breisach im Brunnen der Firma KBC (GW-Nr. 185/019-4) auf. Dort wurden im Jahr 2006 in einer Entnahmetiefe von 9 m u. GOK 1220 mg/l Cl (Okt. 2007: 852 mg/l) gemessen. Ähnlich hohe Chloridgehalte sind auch aus früheren Messungen bekannt (u.a. HYDROISOTOP 2004). Der Bereich erhöhter Chloridgehalte im Grundwasser reicht im Süden bis auf Höhe des Schwimmbades. Im Brunnen Waldschwimmbad (LGRB-Nr. 7911/616) lagen die Werte im Jahr 2006 lediglich bei 59 mg/l Cl, in der neu errichteten Grundwassermessstelle Schwimmbad flach (GW-Nr. 8502/019-1) bei 31,1 mg/l (Okt. 2007). Die südliche Grenze lässt sich durch die Geoelektrik-Profile Muhrhau und Hochstetten festlegen: während im Westteil des Profils Hochstetten im

Plus au Nord on rencontre des concentrations en chlorures anormales au SE de Breisach dans le puits de la société KBC (numéro 185/019-4). On y a mesuré 1220 mg/l de chlorures à 9 m de profondeur en 2006 (852 mg/l en octobre 2007). Des concentrations élevées sont également connues par des études antérieures (notamment HYDROISOTOP 2004). La zone de salure des eaux souterraines s'étend au Sud jusqu'à la piscine. Dans le puits Waldschwimmbad (numéro LGRB 7911/616) les concentrations étaient de 59 mg/l en 2006 et de 31,1 mg/l dans le nouveau piézomètre superficiel de la piscine (numéro 8502/019-1 en octobre 2007). La limite sud peut être définie grâce aux profils géophysiques Muhrhau et Hochstetten : alors qu'on ne voit pas d'indice de concentrations anormales près de la

oberflächennahen Bereich keine eindeutigen Hinweise auf erhöhte Chloridgehalte im Grundwasser zu erkennen sind, zeichnen sie sich im Profil Muhrhau deutlich ab (Abb. 3.4).

Ursache für die erhöhten Chloridkonzentrationen im oberflächennahen Aquifer südöstlich von Breisach ist die Vorflutwirkung der Möhlin, in die nach Abflussmessungen und Modellberechnungen zwischen dem Möhlinwehr und der Einmündung in den Rhein ca. 600 l/s Grundwasser eintreten. Dies führt zu einer hydraulischen Entlastung im tieferen Aquiferabschnitt und damit zu einem Aufstieg chloridhaltigen Grundwassers aus größeren Tiefen. Diese Erklärung wird durch hydrochemische und isotopehydrologische Messungen gestützt. Die Ergebnisse von je einer Stichtagsmessung zu den Chlorid – und der $\delta^{18}\text{O}$ – Werten (HYDROISOTOP 2004) in der Möhlin sind in Abb. 3.18 dargestellt. Die Zunahme der Chloridkonzentration in Verbindung mit einer Abnahme des $\delta^{18}\text{O}$ – Wertes sind eindeutige Hinweise auf einen Zustrom von Grundwasser aus größeren Tiefen. In der neuen Grundwassermessstelle Schwimmbad Breisach tief (GW-Nr. 8503/019-7) wurden in einer Entnahmetiefe von 57,5 m ein Chloridgehalt von 1303 mg/l und ein $\delta^{18}\text{O}$ – Wert von $-10,90 \pm 0,2 \text{ ‰}$ festgestellt (Nov. 2007). Die niedrigen Isotopenwerte in der GWM werden auf weitläufiges Rhein-Uferfiltrat zurückgeführt (HYDROISOTOP 2007a).

Die genaue nördliche Begrenzung der Zone über 1000 mg/l Cl ist nicht bekannt. Sie reicht jedoch vom Brunnen der Fa. KBC aus höchstens mehrere Hundert Meter nach Norden. In der ca. 600 m nördlich entfernten GWM 2011 (GW-Nr. 2001/019-7) lagen die Chloridkonzentrationen in den vergangenen Jahren zwischen 534 und 675 mg/l (Entnahmetiefe 8 m u. GOK). Diese Interpretation wird auch durch die Ergebnisse der Stichtagsmessung aus dem Jahr 2003 gestützt (HYDROISOTOP 2004). Chloridkonzentrationen zwischen 500 und 1000 mg/l Chlorid reichen in einem schmalen Streifen bis zum Geoelektrik-Profil Faule Waag, Chloridgehalte von 250 mg/l bis 500 mg/l bis auf Höhe des Baggersees Burkheim (BR 305, 51,1 m u. Wasseroberfläche: 119,5 mg/l Cl am 22.09.1997) und von 150 – 250 mg/l bis ca. 400 m nördlich davon. Die Zone von 50 – 150 mg/l Cl biegt südlich des Burgberges von Burkheim nach Westen ab und reicht bis zum Rhein. Dort wurde im Februar 2007 in der Messstelle B 112 Burkheim in 6 Meter Tiefe ein Chloridwert von 141 mg/l gemessen. Der weitere Verlauf der Chloridfahne ist unbekannt, da auf französischer Seite in Rheinnähe keine Messstellen existieren. Das Grundwasser der Messstellen im Raum Baltzenheim – Artzenheim (Abb.

surface dans le profil Hochstetten, ils sont nets dans le profil Muhrhau (fig. 3.4).

La cause de cette salure de la partie superficielle de la nappe au SE de Breisach est l'effet de drainage de la Möhlin, qui d'après les mesures de débit et les calculs du modèle draine environ 600 l/s d'eau de nappe entre le barrage de la Möhlin et la confluence avec le Rhin. Ceci conduit à une dépression hydraulique des niveaux plus profonds de l'aquifère et à une remontée d'eaux salées de la profondeur. Cette explication est confirmée par les études géochimiques et isotopiques. Les résultats d'analyses synchrones des concentrations en chlorures et des valeurs du delta en oxygène 18 dans la Möhlin (HYDROISOTOP 2004) sont représentés en fig. 3.18. Le fait que l'augmentation de la concentration en chlorures est couplée avec la diminution de la valeur du delta en oxygène 18 démontre clairement l'arrivée d'eaux souterraines de la grande profondeur. Dans le nouveau piézomètre profond de la piscine de Breisach (numéro 8503/019-7) on a mesuré à une profondeur de 57,5 m une concentration en chlorures de 1303 mg/l et un delta en oxygène 18 de $-10,90 \pm 0,2 \text{ ‰}$ (novembre 2007). Ces faibles valeurs isotopiques dans le piézomètre sont interprétées comme provenant d'infiltrations du Rhin (HYDROISOTOP 2007a).

La limite nord de la zone à plus de 1000 mg/l n'est pas connue exactement. Elle doit s'étendre sur au plus quelques centaines de mètres au Nord du puits de la société KBC. Dans le piézomètre 2011 (numéro 2001/019-7) à 600 m au Nord les concentrations en chlorures atteignaient les années passées entre 534 et 675 mg/l (à une profondeur de 8 m sous la surface). Cette interprétation est confortée par les résultats de la campagne synchrone menée en 2003 (HYDROISOTOP 2004). L'étroite langue de concentrations entre 500 et 1000 mg/l de chlorures s'étend jusqu'au profil géophysique Faule Waag, les teneurs de 250 à 500 mg/l continuent jusqu'à la hauteur de la gravière de Burkheim (BR 305, 119,5 mg/l mesurés à 51,1 m de la surface le 22/09/1997), les teneurs de 150 à 250 mg/l se prolongeant jusqu'à environ 400 m plus au Nord. La langue de 50 à 150 mg/l s'incurve vers l'Ouest au Sud du Burgberg de Burkheim et s'étend jusqu'au Rhin. On y a mesuré en février 2007 dans le piézomètre B112 de Burkheim une concentration en chlorures de 141 mg/l à 6 mètres de profondeur. On ne sait pas si cette langue salée se propage de l'autre côté du Rhin en l'absence de piézomètres côté français. Les eaux souterraines des puits du secteur de Baltzenheim – Artzenheim plus en

3.17) hatte bei der Stichtagsmessung im Februar 2007 Chloridgehalte zwischen 18 und 27 mg/l.

Die östliche Grenze der Zone erhöhter Chloridkonzentrationen (über 50 mg/l Cl) verläuft knapp östlich des Winzerkellers Breisach in leicht geschwungener Linie nach Norden auf den westlichen Ortsrand von Burkheim zu. Sie stimmt gut mit der Grenze aus HYDROISOTOP (2004) überein. Der Brunnen Faule Waag (Filterstrecke 19,3 – 34,8 m u. GOK) der Stadt Vogtsburg liegt knapp außerhalb dieser Zone. In ihm wurden in den Jahren 2000 bis 2007 Chloridkonzentrationen zwischen 33,8 mg/l (08.03.2004) und 39,4 mg/l (21.01.2002) gemessen. In der letzten Messung am 07.03.2007 lag der Chloridwert bei 35,6 mg/l.

3.4.2.2 Tiefenstufe 30 – 70 m u. GOK (Abb. 3.19)

In der Tiefenstufe 30 – 70 m u. GOK sind die Chloridgehalte des Grundwassers generell höher als in der oberflächennahen Zone. Die Verbreitungsgebiete erhöhter Chloridgehalte entsprechen einander weitgehend.

Im unmittelbaren Abstrom der Halde Heitersheim sind Konzentrationen von 3170 mg/l Chlorid bis in einer Entfernung von ca. 175 m bekannt (GWM 4, GW-Nr. 2003/021-3). In der GWM B 64 Nato-Flugplatz (GW-Nr. 0293/021-9) Entfernung zur Halde Heitersheim ca. 2,6 Kilometer) wurden am 06.06.2006 in einer Probe aus 62 m Tiefe 734 mg/l Chlorid gemessen. Der weitere Verlauf der Chloridfahne und die Chloridkonzentrationen im Grundwasserabstrom der Halde wurden aus dem großräumig bekannten Verhältnissen und früheren Messungen abgeleitet, wobei sich der Verlauf an der Grundwasserfließrichtung orientiert. Die genaue Breite sowie die Lage der Spitze der Chloridfahne sind nicht bekannt.

Im unmittelbaren Abstrom der Kalihalde Buggingen wurde im Jahr 2004 in der Grundwassermessstelle 8111/139 (GW-Nr. 0284/021-8) in der Entnahmetiefe von 36 m u. GOK eine Chloridkonzentration von 9400 mg/l gemessen. Neuere Untersuchungsergebnisse liegen von der GWM nicht vor. Analog zu den Ergebnissen der Halde Heitersheim wird davon ausgegangen, dass Chloridkonzentrationen über 1000 mg/l ungefähr bis in eine Entfernung von 500 m, Konzentrationen bis 500 mg/l Chlorid ungefähr bis zum Gewann "Mittlere Sichling" und solche bis 250 mg/l ungefähr bis zur Kreisstraße K4941 reichen. Bis in den Bereich der Landesstraße L134 dürften erhöhte Konzentrationen über 50 mg/l Chlorid verbreitet sein. Die genaue Breite sowie die Lage der Spitze der Chloridfahne sind auch hier nicht bekannt.

aval (fig. 3.17) präsentierten des concentrations entre 18 et 27 mg/l lors de la campagne de février 2007.

La limite Est de la langue salée (à plus de 50 mg/l) passe juste à l'Est de la Cave vinicole de Breisach et forme une légère courbe jusqu'à la bordure ouest de l'agglomération de Burkheim. Elle correspond bien avec la limite donnée par HYDROISOTOP (2004). Le puits AEP Faule Waag de la ville de Vogtsburg (crépîné de 19,3 à 34,8 m de profondeur) est situé juste en dehors de la langue. On y a relevé des concentrations en chlorures entre 33,8 mg/l (le 08/03/2004) et 39,4 mg/l (le 21/01/2002). La dernière analyse du 07/03/2007 donnait 35,6 mg/l de chlorures.

3.4.2.2 Tranche de profondeur de 30 à 70 m (fig. 3.19)

Les concentrations en chlorures sont en général plus élevées dans la tranche de profondeur de 30 à 70 m que dans la tranche la plus superficielle. La répartition spatiale des langues salées est par contre très semblable.

En aval immédiat du terril Heitersheim on connaît des concentrations en chlorures de 3170 mg/l jusqu'à une distance de 175 m environ (piézomètre 4, numéro 2003/021-3). Le piézomètre B64 de l'aérodrome de l'OTAN (numéro 0293/021-9, situé à environ 2,6 km du terril) a donné une valeur de 734 mg/l en chlorures à 62 m de profondeur le 06/06/2006. Le tracé du panache salé et sa concentration à l'aval du terril ont été déduits des connaissances générales sur le secteur et d'après des analyses anciennes, en sachant que le panache suit l'écoulement des eaux souterraines. La largeur exacte du panache et la localisation de son extrémité ne sont pas connues.

En aval immédiat du terril de Buggingen une concentration de 9400 mg/l de chlorures a été mesurée en 2004 à la profondeur de 36 m dans le piézomètre 8111/139 (numéro 0284/021-8). On ne dispose pas d'analyses plus récentes. On suppose que le panache salé est analogue à celui de Heitersheim et que les concentrations de plus de 1000 mg/l s'étendent jusqu'à une distance de 500 m environ, les concentrations jusqu'à 500 mg/l de chlorures jusqu'au lieu-dit "Mittlere Sichling" et que celles jusqu'à 250 mg/l atteignent la route du kreis K4941. On devrait trouver des concentrations supérieures à 50 mg/l jusqu'au niveau de la route du land L134. Ici non plus la largeur et l'extrémité exactes de la langue salée ne sont pas connues.

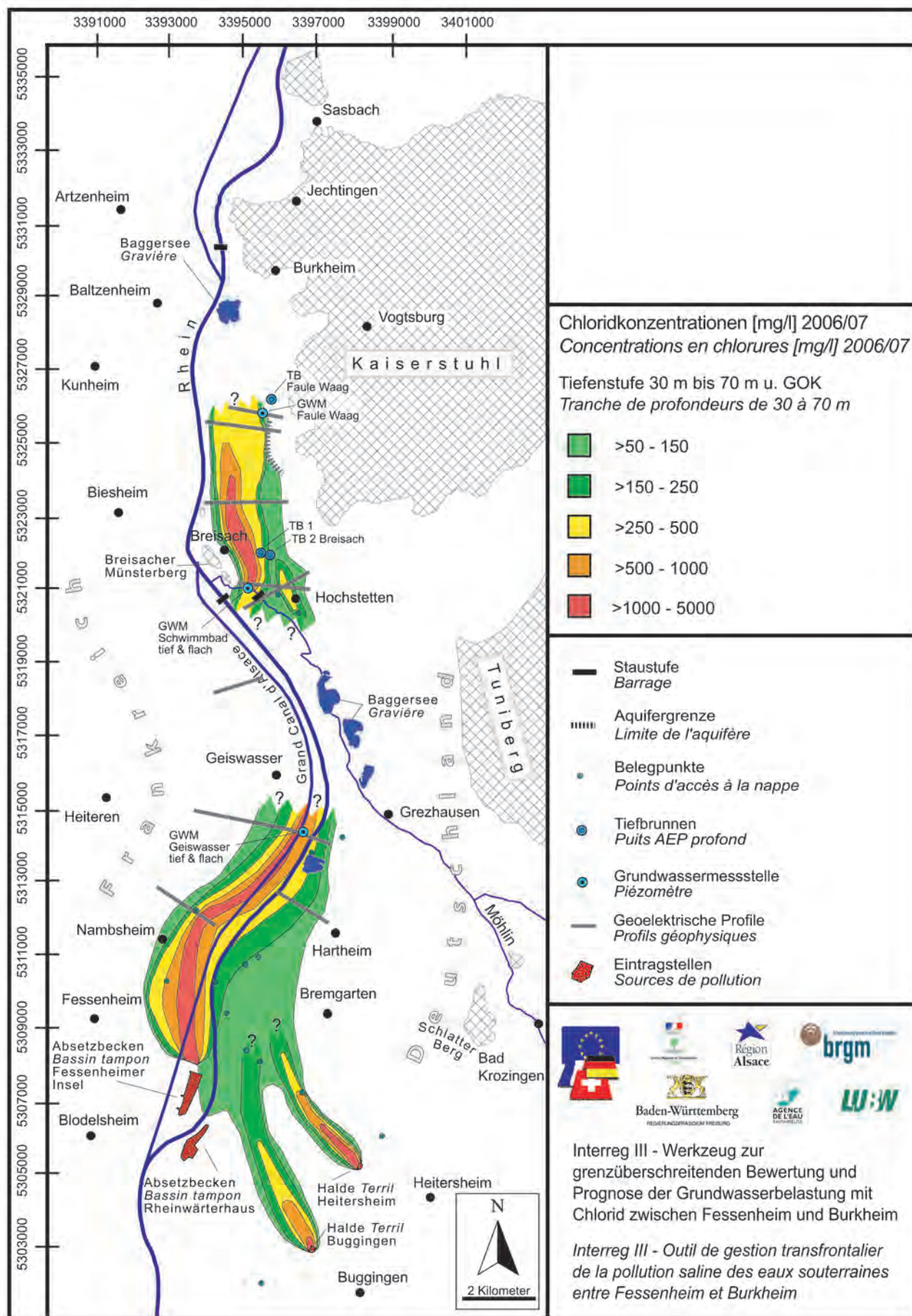


Abbildung 3.19: Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe 30 – 70 m u. GOK
Figure 3.19 : Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche 30 – 70 m de profondeur.

Im Abstrom der Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel erlauben die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen eine im Vergleich zu früheren Darstellungen genauere Eingrenzung der Zonen erhöhter Chloridgehalte.

Im unmittelbaren Abstrom der Absetzbecken liegen keine GWM, die in dieser Tiefenstufe verfiltert sind. Da jedoch in den Geoelektrikprofilen Nambenheim, Hartheim und Geiswasser erhöhte Chloridgehalte identifiziert (vgl. Kap. 3.1, Abb. 3.2 und 3.3) und durch die GWM Geiswasser flach bestätigt wurden, ist davon auszugehen, dass sich die Zone mit deutlich erhöhten Chloridgehalten bis nördlich der drei Geoelektrikprofile erstreckt. Möglicherweise treten im unmittelbaren Abstrom der Becken noch höhere Chloridkonzentrationen auf. Im Osten des Profils Nambenheim gibt es deutliche Hinweise auf Chloridkonzentrationen über 1000 mg/l. Sie finden sich auch in einem sehr schmalen Streifen im zentralen Abschnitt des Profils Geiswasser. Chloridkonzentrationen zwischen 500 und 1000 mg/l wurden im Abstrom in mehreren Grundwassermessstellen festgestellt. In der neuen GWM Geiswasser flach (GW-Nr. 8505/020-2) wurden in einer Entnahmetiefe von 53 m 653 mg/l Chlorid gemessen. Die Abgrenzung der nach Westen und Osten abnehmenden Chloridgehalte basiert im Nahbereich der Absetzbecken auf Chloridmessungen an tiefenorientiert entnommenen Grundwasserproben, im nördlichen Abschnitt (bis südlich von Geiswasser) im Wesentlichen auf den Ergebnissen der Geoelektrik. Sie wird dort durch die Analyseergebnisse für die zwischen den Profilen liegenden Grundwassermessstellen ergänzt. So deckt sich z. B. das Ergebnis der Grundwasseruntersuchungen aus der GWM 1/00 Birkenmeier (GW-Nr. 2050/020-6, Entnahmetiefe 55 m: 301 mg/l Cl) gut mit dem der geoelektrischen Untersuchungen. Der weitere Verlauf der Chloridfahne nördlich des Profils Geiswasser bis südlich von Breisach ist unbekannt.

Ebenso wie in der darüber liegenden Tiefenstufe treten auch zwischen 30 und 70 m im Raum Hochstetten sowie südöstlich und nördlich von Breisach erhöhte Chloridwerte auf. Die Zone erhöhter Chloridwerte ergibt sich aus der Auswertung der Geoelektrik-Profile Muhrhau und Hochstetten. Die Interpretationsergebnisse werden durch die Grundwasseranalytik in der GWM Ro 7911/B5 (GW-Nr. 0325/019-0, 0326/019-6) gestützt, die südlich von Hochstetten liegt. Bei der Probenahme im Okt. 2007 wurden hier in einer Tiefe von 30 m u. GOK 151 mg/l Cl festgestellt. Deutlich erhöhte Gehalte sind auch aus früheren Untersuchungen bekannt (z.B. Juni

En aval des anciens bassins-tampons de l'île de Fessenheim, les résultats de la géophysique permettent une délimitation de la langue salée plus précise qu'il n'était possible dans les études précédentes.

En aval immédiat des bassins il n'y a pas de piézomètres crépinés dans cette tranche de profondeur. Cependant comme dans les profils géophysiques Nambenheim, Hartheim et Geiswasser il est possible d'identifier des concentrations anormales en chlorures qui ont été confirmées par le piézomètre Geiswasser superficiel (voir chap. 3.1, figs. 3.2 et 3.3), on peut admettre que la langue salée s'étend jusqu'au Nord de ces trois profils. Il est pas impossible que des concentrations plus élevées existent en aval immédiat des bassins. A l'Est du profil Nambenheim il semble nettement y avoir des concentrations en chlorures supérieures à 1000 mg/l. Elles se retrouvent aussi dans une langue étroite dans la partie centrale du profil Geiswasser. En aval, des concentrations en chlorures entre 500 et 1000 mg/l ont été relevées dans plusieurs piézomètres. Dans le nouveau piézomètre Geiswasser superficiel (numéro GW 8505/020-2, indice BSS 03795X0111/GWM2) la concentration mesurée à 53 m de profondeur est de 653 mg/l. La délimitation des concentrations en chlorures qui décroissent de part et d'autre de la langue salée vers l'Ouest et l'Est se base sur des mesures des chlorures à différentes profondeurs en aval proche des bassins-tampons, plus au Nord (jusqu'au Sud de Geiswasser) essentiellement sur les résultats de la géophysique électrique. Elle est complétée par les résultats d'analyse de piézomètres situés entre les profils géophysiques. C'est ainsi que par exemple les analyses du piézomètre 1/00 Birkenmeier (numéro 3982050/020-6, profondeur 55 m, 301 mg/l de chlorures) correspondent bien aux résultats des profils géophysiques. Le tracé de la langue salée au Nord du profil Geiswasser jusqu'au Sud de Breisach n'est pas connu.

De même que dans la tranche plus superficielle, on trouve des concentrations anormales entre 30 et 70 m de profondeur dans le secteur de Hochstetten, aussi bien au SE qu'au Nord de Breisach. La zone de salure est délimitée d'après l'interprétation des profils géophysiques Muhrhau et Hochstetten. Les résultats de l'interprétation sont confirmés par les analyses du piézomètre Ro 7911/B5 (numéros GW 0325/019-0, 0326/019-6), situé au Sud de Hochstetten. Lors de la campagne d'octobre 2007 on a mesuré 151 mg/l de chlorures à la profondeur de 30 m. Des concentrations élevées sont connues d'après des campagnes antérieures (par exemple 167 mg/l en juin 2006). Dans le

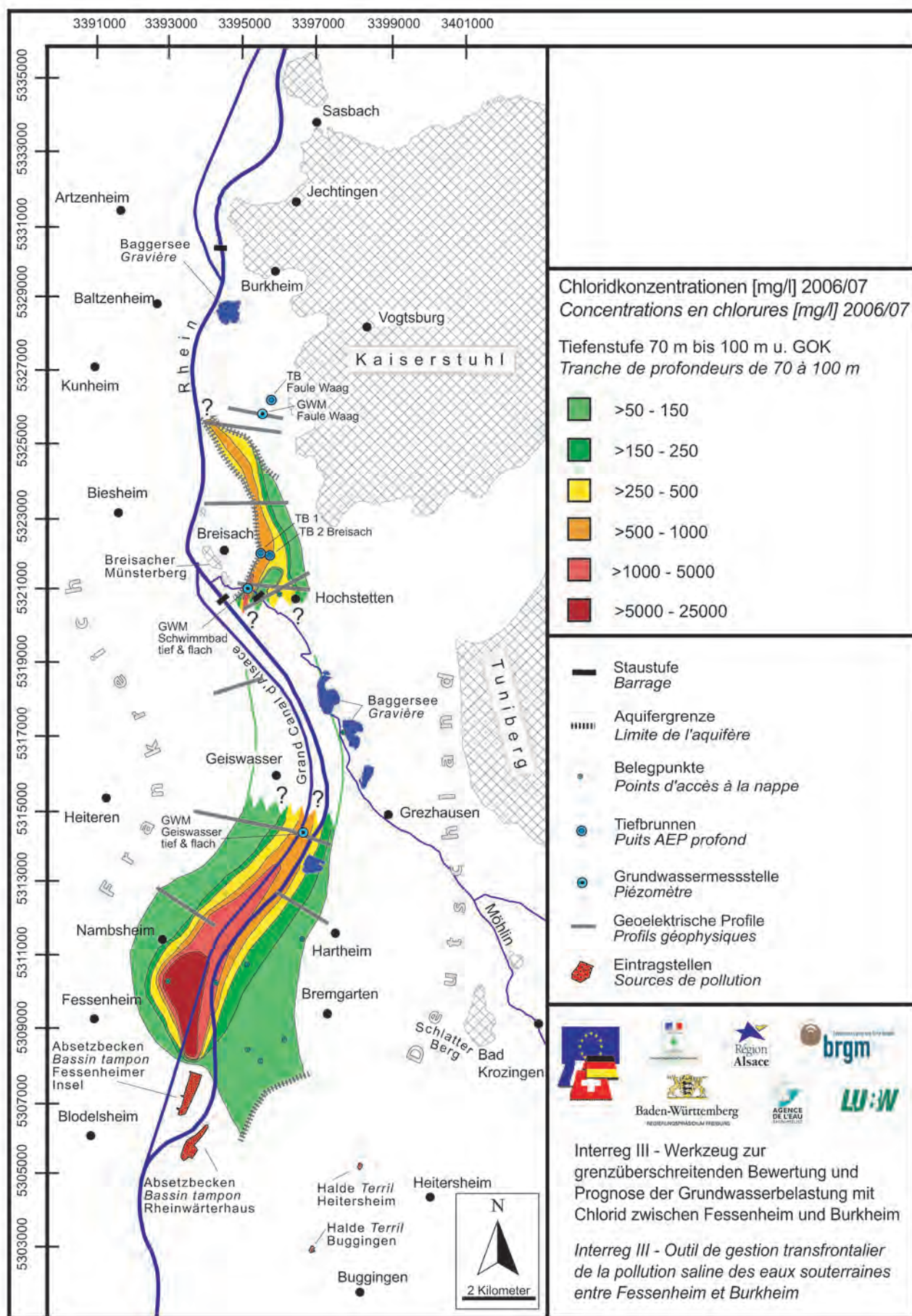


Abbildung 3.20: Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe 70 – 100 m u. GOK
Figure 3.20 : Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche 70 – 100 m de profondeur.

2006: 167 mg/l). In der GWM Ro 7911/B6 (GW-Nr. 2016/019-4) westlich von Hochstetten lag der Chloridwert im Juni 2006 bei 98 mg/l (Entnahmetiefe 67 m u. GOK).

Südwestlich von Breisach wurden in der Bohrung Schwimmbad tief Breisach (GW-Nr. 8503/019-7) im Oktober 2007 in der Tiefe von 57,5 m 1303 mg/l Chlorid gemessen. Hinweise auf hohe Chloridkonzentrationen finden sich auch in den Geoelektrikprofilen Hochstetten und Muhrhau sowie in den nördlich davon verlaufenden Profilen Batzenhäusle, Faule Waag und Schlössle Matte (*Abb. 1.1*). Allerdings gibt es in diesem Gebiet erhöhter Chloridwerte keine Grundwassermessstellen, die in der Tiefenstufe 30 – 70 m bzw. darunter verfiltert sind. Die westliche Begrenzung der Chloridfahne wird durch den Aquiferand vorgegeben, der in dieser Tiefenstufe annähernd Süd-Nord verläuft (*Abb. 3.19*). Die östliche Fahnenbegrenzung folgt im Nordosten ebenfalls auf einem kurzen Abschnitt dem Aquiferrand. Der zwischen 19,3 und 34 m u. GOK verfilterte Brunnen Faule Waag (GW-Nr. 0228/019-0) liegt mit Chloridwerten zwischen 30 und 40 mg/l knapp außerhalb der Zone. In der Grundwassermessstelle Faule Waag 1/07, die im Rahmen des Interreg-Projektes als neue Vorfeldmessstelle für den Brunnen errichtet wurde, betrug die Chloridkonzentration im Okt. 2007 in 43 m Tiefe 51 mg/l. Der weitere Verlauf der Chloridfahne sowie die genaue Lage der Fahnen Spitze nördlich des Geoelektrikprofils Schlössle Matte sind nicht bekannt.

3.4.2.3 Tiefenstufe 70 – 100 m u. GOK (*Abb. 3.20*)

Der Grundwasserleiter im Bereich der Halden Heitersheim und Buggingen sowie in deren Abstrom ist weniger als 70 m mächtig. Deshalb ist hier für diese Tiefenstufe keine Chloridverteilung dargestellt.

Im unmittelbaren Abstrom der Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel wurden die höchsten Chloridgehalte von 5160 mg/l in der GWM Balgau (GW-Nr. 085/020-9) gemessen (Juni 2006, Entnahmetiefe 95 m). Ähnlich hohe Konzentrationen sind auch aus den Jahren 2001 (4890 mg/l) und 2004 (5050 mg/l) bekannt. Die Ergebnisse der hydrochemischen und isopenhydrologischen Messungen deuten darauf hin, dass in dieser GWM auch ältere Komponenten an der Zusammensetzung des Grundwassers beteiligt sind (*Kap. 3.4.1*). In der GWM 2 Bremgarten tief Sandbuck (GW-Nr. 2031/020-9), die auf gleicher Höhe liegt, wurden im Juni 2006 1140 mg/l Chlorid festgestellt (Entnahmetiefe 98 m u. GOK, in den Jahren 2000 und 2004: 1430 mg/l). Hierdurch kann die West-Ost - Ausdehnung der Zone über 5000 mg/l

piézomètre Ro 7911/B6 (numéro GW 2016/019-4) à l'Ouest de Hochstetten la concentration en chlorures était de 98 mg/l en juin 2006 (à 67 m de profondeur).

Au SW de Breisach on a mesuré 1303 mg/l de chlorures dans le piézomètre profond de la piscine de Breisach (numéro GW 8503/019-7) en octobre 2007 à 57,5 m de profondeur. On observe des indices de fortes concentrations en chlorures sur les profils géophysiques Hochstetten et Muhrhau ainsi que dans les profils situés plus au Nord, Batzenhäusle, Faule Waag et Schlössle Matte (*fig. 1.1*). Il n'y a malheureusement pas de piézomètres crépinés dans cette tranche de profondeur dans ce secteur pour le confirmer. La limite ouest de la langue salée est constituée par la bordure de l'aquifère, qui a une direction approximativement NS à cette profondeur (*fig. 3.19*). La limite est de la langue salée suit également la bordure de l'aquifère sur une petite distance. Le puits AEP Faule Waag crépiné de 19,3 à 34 m de profondeur (numéro GW 0228/019-0) est situé juste à l'extérieur de la langue avec des concentrations entre 30 et 40 mg/l de chlorures. Dans le piézomètre Faule Waag 1/07 mis en place dans le cadre du projet comme piézomètre d'alerte pour le puits AEP, la concentration en chlorures était de 51 mg/l à 43 m de profondeur en octobre 2007. La localisation de la suite de la langue salée au Nord du profil géophysique Schlössle Matte n'est pas connue.

3.4.2.3 Tranche de profondeur 70 à 100 m (*fig. 3.20*)

L'aquifère a moins de 70 m dans le secteur des terils de Heitersheim et de Buggingen. Il n'y a donc pas de langue salée à cette profondeur.

En aval proche des bassins-tampons de l'île de Fessenheim les plus fortes concentrations en chlorures, 5160 mg/l, ont été mesurées dans le piézomètre de Balgau (numéro GW 085/020-9, indice BSS 03795X0094/PMT) en juin 2006 à 95 m de profondeur. Les concentrations étaient aussi élevées en 2001 (4890 mg/l) et en 2004 (5050 mg/l). Les résultats des études géochimiques et isotopiques indiquent que l'eau de ce piézomètre contient des composantes anciennes (*chap. 3.4.1*). Dans le piézomètre profond Bremgarten-Sandbuck GWM2 (numéro GW 2031/020-9), qui est situé à la même hauteur, on a relevé 1140 mg/l en juin 2006 à 98 m de profondeur (1430 mg/l en 2000 et 2004). Ceci permet de délimiter approximativement en Est-Ouest la zone à plus de 5000 mg/l. Le reste du contour à forte teneur est inter-

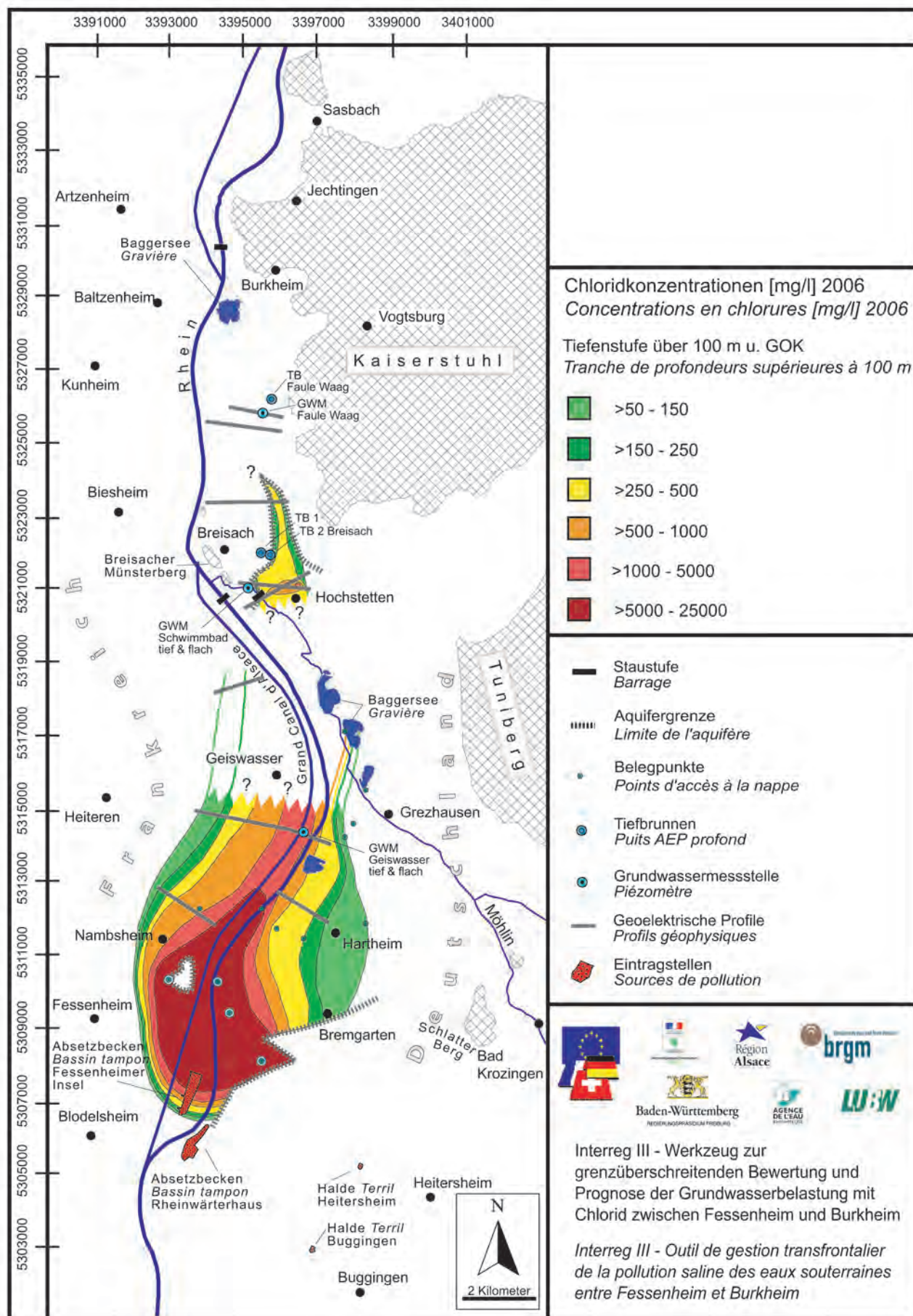


Abbildung 3.21: Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe über 100 m u. GOK
Figure 3.21 : Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche de plus de 100 m de profondeur.

ungefähr eingegrenzt werden. Die weitere seitliche Abgrenzung der Zonen erhöhter Chloridwerte in Nahbereich erfolgte durch Interpolation zwischen den wenigen Stützstellen. Die südöstliche Verbreitungsgrenze erhöhter Chloridwerte im Untersuchungsgebiet ist durch den Aquiferrand in 70 m u. GOK vorgegeben (Abb. 3.20).

Da auf der französischen Seite lediglich die GWM Balgau in diesem Niveau verfiltert ist, ist die Abgrenzung hier sehr unsicher. Weiter nördlich ermöglichen die Geoelektrikprofile Nambenheim, Hartheim und Geiswasser eine verlässlichere Grenzziehung. Grundwassermessstellen existieren in diesem Bereich nicht. Zwischen Geiswasser und südlich von Breisach – Hochstetten ist die Verteilung der Chloridgehalte unklar. Niedrigere spezifische Widerstände im Osten des Profils Algolsheim deuten in diesem Bereich auf erhöhte Chloridkonzentrationen von 50 - 150 mg/l hin.

Südlich von Breisach sind durch die GWM Schwimmbad tief (GW-Nr. 8503/019-7, Okt. 2007: 1303 mg/l in 57,5 m u. GOK) und die GWM Ro 7911/B6 (GW-Nr. 2016/019-4, Okt. 2007: 284 mg/l Cl in 95 m Tiefe) erhöhte Chloridgehalte bekannt. Die höchsten Gehalte wurden in der von 84,4 bis 96,4 m verfilterten GWM Ro 7911/B6 im Juni 2004 mit 401 mg/l Cl gemessen. Erhöhte Chloridwerte in Tiefenabschnitt 70 – 100 m u. GOK wurden auch in den Geoelektrikprofilen Muhrhau und Hochstetten identifiziert. Gemeinsam mit dem nördlich von Breisach verlaufenden Profil Batzenhäusle erlauben sie die Darstellung der Zonen erhöhter Chloridgehalte, die nach den Befunden der Geoelektrik in einem sehr schmalen Streifen südöstlich von Breisach vermutlich sogar Werte von über 1000 mg/l Cl erreichen können. Die westliche und östliche Begrenzung der Chloridfahne im Raum von Breisach und nördlich davon wird durch den Aquiferrand vorgegeben. Die Aquiferbasis steigt zu den Geoelektrikprofilen Faule Waag und Schlössle Matte hin an. Südlich davon verläuft eine Rinne in nordwestliche Richtung unter dem Rhein nach Frankreich. In dieser Struktur strömt möglicherweise Grundwasser mit erhöhten Chloridgehalten ab. Sie sollte zukünftig auf deutscher und französischer Seite durch geoelektrische Profile nördlich und nordwestlich von Breisach und gegebenenfalls durch eine Bohrung näher erkundet werden.

3.4.2.4 Tiefenstufe über 100 m

u. GOK (Abb. 3.21)

Die höchsten Chloridkonzentrationen mit Werten über 5000 mg/l treten im unmittelbaren Umfeld der Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel auf. Sie sind durch fünf Grundwassermessstellen belegt (von Süden nach Norden GWM 1/2001 Weinstetter Hof

polé d'après les quelques points de mesure. Cette zone de fortes teneurs est limitée au SE par la bordure de l'aquifère à 70 m de profondeur (fig. 3.20).

Du côté français il n'existe que le piézomètre de Balgau qui soit crépiné à cette profondeur, la délimitation des fortes teneurs est donc très incertaine. Plus au Nord les profils géophysiques Nambenheim, Hartheim et Geiswasser permettent une définition plus sûre de la langue salée, malgré l'absence de piézomètres à cette profondeur. Entre Geiswasser et le Sud de Breisach-Hochstetten la répartition des chlorures n'est pas claire. Les faibles résistivités relevées à l'est du profil Algolsheim indiquent la présence de concentrations en chlorures de l'ordre de 50 à 150 mg/l.

Au Sud de Breisach les concentrations en chlorures sont connues par le piézomètre profond de la piscine (numéro GW 8503/019-7, 1303 mg/l à 57,5 m de profondeur en octobre 2007) et le piézomètre Ro 7911/B6 (numéro GW 2016/019-4, 284 mg/l à 95 m de profondeur en octobre 2007). Des valeurs plus élevées ont été mesurées dans le piézomètre Ro 7911/B6, crépiné de 84,4 à 96,4 m de profondeur, en juin 2004 avec 401 mg/l. Des concentrations élevées dans la tranche de 70 à 100 m ont également été identifiées sur les profils géophysiques Muhrhau et Hochstetten. Ces profils ainsi que le profil Batzenhäusle situé au Nord de Breisach permettent de délimiter les langues salées, qui d'après les résultats de la géophysique pourraient dépasser les 1000 mg/l dans une étroite langue au SE de Breisach. Les limites ouest et est de la langue salée sont imposées dans le secteur de Breisach et au Nord par les bordures de l'aquifère. Le substratum remonte jusqu'aux profils géophysiques Faule Waag et Schlössle Matte. Au Sud de ces profils un chenal du substratum se dirige vers le NW et passe sous le Rhin en direction de la France. Il se pourrait que des eaux très salées suivent cette structure. Il conviendrait dans le futur de la contrôler par des profils géophysiques sur le territoire français et allemand au N et au NW de Breisach et le cas échéant par un piézomètre.

3.4.2.4 Tranche au-dessous de 100 m (fig. 3.21)

On relève les concentrations les plus élevées avec des valeurs dépassant les 5000 mg/l à proximité des anciens bassins-tampons de l'île de Fessenheim. Elles sont rencontrées dans cinq piézomètres profonds, du Sud vers le Nord : GWM 1/2001 Weinstetter

(122 m Entnahmetiefe: 31680 mg/l, Okt. 2007), Salz IX, 123 m: 17700 mg/l (Juni/Juli 2006), GWM 1 Bremgarten Sandbuck, 125 m: 7760 mg/l, 150 m: 16000 mg/l (Juni/Juli 2006), Balgau 1, 104 m: 10500 mg/l (Juni/Juli 2006), 11119 mg/l (Okt. 2007), GWM 1/01 Hartheim, 105 m: 11700 mg/l, 145 m: 11200 mg/l (Juni/Juli 2006)). Mit Ausnahme der GWM 1/01 Hartheim enthalten diese Messstellen wahrscheinlich auch gewisse Anteile einer älteren Grundwasserkomponente. Die südöstliche Begrenzung des Bereiches erhöhter Chloridkonzentrationen ist durch den Aquiferrand vorgegeben. Die westliche Grenzziehung der Zone erhöhter Chloridgehalte zwischen Namsheim und Fessenheim ist unsicher. Ebenso kann anhand der vorliegenden Daten nicht geklärt werden, wie die Grenzen zwischen den einzelnen Zonen im Osten bis in den Raum Bremgarten – Hartheim verlaufen. Anhaltspunkte hierfür liefern die beiden GWM Ro 8011/B2 (GW-Nr. 0249/020-7: 438 mg/l Cl in 118 m Tiefe, Juni/Juli 2006) und Salz V (GW-Nr. 0128/020-1: 293 mg/l Cl in 135 m Tiefe).

Im Raum Breisach ergeben sich aus den beiden Geoelektrikprofilen Muhrhau und Hochstetten Hinweise auf erhöhte Chloridgehalte. Sie reichen bis in die Größenordnung über 1000 mg/l. Die nördliche Begrenzung der Zone erhöhter Chloridgehalte wird durch den Aquiferrand vorgegeben.

Hof (prélèvement à 122 m de profondeur : 31 680 mg/l, octobre 2007) ; Piézomètre Salz IX (123 m : 17 700 mg/l, juin-juillet 2006) ; piézomètre GWM1 de Bremgarten Sandbuck (125 m : 7 760 mg/l ; 150 m : 16 000 mg/l, juin-juillet 2006) ; piézomètre de Balgau (104 m : 10 500 mg/l, juin-juillet 2006, 11 119 mg/l, octobre 2007) ; piézomètre GWM1/01 Hartheim (105 m : 11 700 mg/l ; 145 m : 11 200 mg/l, juin-juillet 2006). A l'exception du piézomètre de Hartheim, tous ces ouvrages contiennent sans doute aussi une certaine proportion de composante d'eau ancienne. La limite SE de la langue salée est contrainte par la bordure de l'aquifère. La limite ouest entre Namsheim et Fessenheim est incertaine. De même les données ne permettent pas de définir la position des contours d'isoconcentrations à l'Est jusqu'au secteur Bremgarten-Hartheim. Les seules données sont les deux piézomètres Ro 8011/B2 (numéro GW 0249/020-7 : 438 mg/l à 118 m de profondeur, juin-juillet 2006) et Salz V (numéro GW 0128/020-1 : 293 mg/l de chlorures à 135 m de profondeur).

Dans le secteur de Breisach les profils géophysiques Muhrhau et Hochstetten montrent des indices de concentrations en profondeur jusqu'à environ 1000 mg/l. La limite nord de la langue salée est donnée par la bordure de l'aquifère.

4 Grundwasserströmungs- und Salztransportmodell

4.1 Ziel und Vorgehensweise

Das numerische Modell hat als Ziel, die Ausbreitung der Salzfahnen im Raum Fessenheim/Burkheim nachzubilden, die weitere Entwicklung zu prognostizieren und Szenarienbetrachtungen zu wasserwirtschaftlichen Maßnahmen sowie zu Sanierungs- bzw. Sicherungsmöglichkeiten durchzuführen. Dabei werden alle verfügbaren Informationen zur Geologie, Hydrologie und zur Wasserwirtschaft berücksichtigt. Zunächst werden die stationären und instationären Strömungsverhältnisse seit dem Beginn des Salzeintrags aus den Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel und den Kalihalden bei Buggingen und Heitersheim mit Hilfe des Modells beschrieben. Dieses Strömungsmodell ist dann die Grundlage für die Modellierung der dichtebehafteten Salztransportprozesse. Damit liegt ein Planungswerkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim vor.

Aufgrund der zahlreichen, bereits früher durchgeführten Untersuchungen im Modellierungsraum kann auf bestehende Informationen zurückgegriffen werden. Dies ist insbesondere die im Rahmen des grenzüberschreitenden Interreg-III – Projektes *Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben (MoNit)* durchgeführte Modellbetrachtung (LUBW 2006). Nach dem Modellaufbau wurde das Strömungsmodell stationär und instationär kalibriert. Dabei wurden die gemessenen Piezometerhöhen mit den berechneten verglichen. Durch Variation der Durchlässigkeiten, der Leakagekoeffizienten an den Oberflächengewässern und der Speicherkoeffizienten im instationären Fall wurde das Modell kalibriert bis eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen vorlag.

Im Anschluss an die Strömungskalibrierung wurde das Modell zur Nachbildung der dichtebehafteten Salztransportprozesse erweitert. In einer Sensitivitätsstudie wurde die erforderliche vertikale Netzverfeinerung im Bereich der Salzfahne ermittelt und der Salzeintrag über die vorhandenen Informationen abgeschätzt. In einer umfassenden Kalibrierung des Salztransportmodells wurden der durchflusswirksame Hohlraumanteil und insbesondere die Durchlässigkeiten in der Breisgau-Formation so bestimmt, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Salzkonzentrationen

4 Modélisation des écoulements et du transport de sel

4.1 Objectifs et démarche

Le modèle numérique a pour objectifs la simulation de l'extension actuelle du panache d'eau salée dans la région de Fessenheim/Burkheim, la prévision de son évolution et la mise en œuvre de scénarii afin d'évaluer des actions hydrauliques comme la remédiation ou la fixation de la pollution. Pour cela, toutes les informations disponibles sur la géologie, l'hydrologie et l'exploitation de la ressource sont prises en compte.

Dans un premier temps, les situations hydrodynamiques en régime permanent et transitoire sont décrites par le modèle depuis le début des infiltrations d'eau salée au niveau des bassins de rétention sur l'île de Fessenheim et au niveau des terrils de Buggingen et Heitersheim. Ce modèle hydrodynamique sert de base aux modélisations du transport d'eau salée avec prise en compte du contraste de densité. Il en résulte un outil de gestion transfrontalier permettant de prédire la contamination des eaux souterraines par les chlorures entre Fessenheim et Burkheim.

De nombreuses informations sont disponibles, sur la base de plusieurs études antérieures dont notamment la modélisation menée lors du projet transfrontalier Interreg III *“Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben (MoNit)”* (LUBW 2006).

Après la conception du modèle, celui-ci a été étalonné en régime permanent et transitoire en comparant les hauteurs piézométriques calculées avec celles mesurées. Ce modèle a été étalonné par essais-erreurs en modifiant les perméabilités, les coefficients d'échange nappe-rivières et les coefficients d'emménagement en situation transitoire afin d'obtenir la meilleure adéquation possible entre mesures et simulation de la piézométrie.

Après étalonnage, le modèle a été étendu au transport d'eau salée avec prise en compte des effets de densité. La discrétisation verticale au droit des zones salées a été établie par analyse de sensibilité et les flux d'infiltration de sel ont été estimés à partir des informations disponibles. L'étalonnage est ensuite finalisé au niveau des porosités et de la perméabilité de la formation du Breisgau en particulier, en obtenant la meilleure comparaison possible entre les évolutions des concentrations en sel mesurées et simulées. La simulation de :

und deren zeitlicher Entwicklung vorliegt. In diesem Zusammenhang war wichtig, die derzeitige gemessene Chloridverteilung dreidimensional nachzubilden, die zeitliche Entwicklung der hoch konzentrierten Salzlauge nach der Inbetriebnahme der Absetzbecken zu simulieren und die in den letzten 10 Jahren gemessenen Effekte im Raum Breisach, wie z.B. die Auswirkungen durch den Abstau des Möhlinwehres im Jahr 2003, nachzuvollziehen.

Mit dem kalibrierten Salztransportmodell lassen sich die derzeitige Salzverteilung numerisch beschreiben und Prognosen hinsichtlich der weiteren Entwicklung der Salzfahne durchführen. Das kalibrierte Salztransportmodell ermöglicht Szenarienrechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen von veränderten Grundwasserentnahmen, der Flutung von Retentionsräumen oder der Veränderung von Baggerseegeometrien. Darüber hinaus können mögliche Sanierungs- bzw. Sicherungsszenarien der Salzfahne exemplarisch untersucht werden.

Der Schwerpunkt der Bearbeitung liegt auf der Nachbildung einer plausiblen zeitlichen Entwicklung und der möglichst genauen räumlichen Verteilung der Chloridbelastung, wie sie insbesondere für die jüngere Vergangenheit auf Grundlage verschiedener Untersuchungen angenommen werden kann. Aufgrund der Unsicherheiten beim Chlорideintrag, bei der Interpretation der komplexen hydrogeologischen Verhältnisse (Verteilung der Aquiferkenngrößen) und der lokalen Verhältnisse bei den Chloridmessungen an den Messstellen ist eine exakte Nachbildung sämtlicher gemessener Chloridgehalte in den Grundwassermessstellen und Brunnen nur eingeschränkt möglich.

4.2 Modellaufbau

Das numerische Modell wurde unter Berücksichtigung des aktuellen geologischen und hydrogeologischen Kenntnisstandes (*siehe Kap. 2*) und unter Verwendung der Parameterdatensätze aus dem Projekt MoNit aufgebaut. Zur Strömungs- und Salztransportberechnung wurde das Finite-Elemente-Modell Spring (delta-h 2007) verwendet. Der Modellaufbau erfolgte zunächst für die Nachbildung der stationären Strömungsverhältnisse und dann auch für die instationäre Simulation der Strömung zwischen 1956 und 2005.

Modellgebiet und Randbedingungen

Das Modellgebiet umfasst den quartären Grundwasserleiter im Oberrheingraben zwischen Mulhouse im Süden und Lahr im Norden. Es wird im Westen durch den Rand der Vogesen und im Osten durch den Schwarzwaldrand bzw. den Rand des Kaiserstuhles begrenzt (*Abb. 4.1*). An diesen Modellrändern wurde ein unterirdischer Randzufluss angesetzt, der dem Projekt MoNit entnommen wurde.

- la distribution tridimensionnelle et actuelle des concentrations mesurées,
 - l'évolution temporelle des fortes teneurs en sel suite à la mise en œuvre des bassins de rétention ;
 - des variations observées ces 10 dernières années dans la zone de Breisach, comme celles dues à la mise en œuvre du barrage de Möhlin,
- est une étape essentielle.

Le modèle ainsi calibré permet de bien représenter la distribution actuelle des chlorures et de réaliser des prévisions concernant l'extension future de la contamination.

Il permet également de réaliser des scénarios concernant les effets des modifications de pompage, de l'inondation de polders ou de la géométrie des gravières de stockage. Il est donc possible d'analyser de manière fine différentes mesures de dépollution.

Sur la base des travaux et hypothèses existants, une des difficultés principales du travail se situe au niveau de l'évaluation d'une évolution possible de la zone salée et d'une estimation aussi précise que possible de la distribution des chlorures dans l'espace en fonction, notamment dans le passé. Une simulation précise des teneurs en chlorures mesurées dans les piézomètres ou puits de pompage n'est pas envisageable, compte tenu des nombreuses incertitudes existantes sur les flux d'infiltration des chlorures, des incertitudes liées à la complexité de l'hydrogéologie (paramètres de transport) et de la représentativité d'une mesure locale de concentration en chlorures.

4.2 La construction du modèle

Le modèle a été construit sur la base des connaissances géologiques et hydrogéologiques actuelles (*cf. chapitre 2*) et des paramètres issus du programme MoNit. Le modèle utilisé pour l'hydrodynamique et le transport est le modèle Spring (delta-h 2007) utilisant les éléments finis. Dans un premier temps, le modèle est construit pour reproduire un état stationnaire puis développé pour simuler un état transitoire de 1956 à 2005.

Domaine modélisé et conditions aux limites

Le domaine modélisé concerne l'aquifère des alluvions quaternaires de la plaine du Rhin Supérieur entre Mulhouse au Sud et Lahr au Nord. Il est limité à l'Ouest par les Vosges et à l'Est par la Forêt Noire (Kaiserstuhl) (*Fig. 4.1*). Les flux d'eau souterraine évalués lors du projet MoNit sont imposés à ces deux limites.

Da im Süden Grundwasser in das Modellgebiet zufließt und im Norden wieder abströmt wurde eine Festpotentialrandbedingung entlang einer angenommenen Grundwassergleiche an diesen beiden Modellrändern gewählt. Im Bereich der Ostrheinrinne südöstlich des Kaiserstuhls und der Riegeler Pforte wurde ebenfalls eine Festpotentialrandbedingung angesetzt, um den Abstrom aus dem Modellgebiet in die Freiburger Bucht bzw. den Zustrom aus der Freiburger Bucht nachzubilden.

Neben den äußeren Randbedingungen wurden innerhalb des Modellgebiets das feinmaschige Gewässernetz und der Rhein mit Rheinseitenkanal als Leakage-Randbedingung berücksichtigt. Dabei wird der Austausch zwischen den oberirdischen Gewässern und dem Grundwasser über den Leakagekoeffizienten, der den Kolmationsgrad der Gewässer beschreibt und die Potenzialdifferenz zwischen Grundwasser und oberirdischem Gewässer berechnet. Der Verlauf des Wasserspiegels im Rhein wurde anhand einer eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung bestimmt. Der Wasserspiegel des Gewässernetzes berechnet sich aufgrund einer segmentweisen Bilanzbetrachtung an den Gewässern, denen jeweils am Modellrand ein Zufluss vorgegeben wurde. Die zahlreichen Entnahmen im Modellgebiet wurden als punktuelle Entnahmerandbedingungen angesetzt.

Die wichtigste Zuflussrandbedingung ist die Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Die detaillierten Berechnungen zur Grundwasserneubildung erfolgten in Monatsauflösung zwischen 1956 und 2005 mit dem Modell GWN_BW. Das Modell wurde im Rahmen des *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg* (UVM u. LfU, 2004) entwickelt (Armbruster, 2002) und anschließend im Auftrag der LfU weiterentwickelt. Für die stationäre Modellkalibrierung wurde die instationäre Neubildung zwischen 1956 und 1986 gemittelt. Im Verlauf der instationären Modellanpassung hat sich gezeigt, dass die Grundwasserstände zwischen Fessenheim und Neuf-Brisach durch eine saisonale Bewässerung beeinflusst werden. Aus diesem Grund wurde hier im Bereich der Maisanbauflächen eine zusätzliche künstliche Neubildung über die Sommermonate angesetzt.

Diskretisierung

Um der hydrogeologischen Differenzierung Rechnung zu tragen, wurde das numerische Modell vertikal in 4 Modellschichten unterteilt. An der Geländeoberkante wurden die Deckschichten als eigenständige Modellschicht berücksichtigt. Der darunter liegende Kiesgrundwasserleiter wurde in die Neuenburg- und Breisgau-Formation unterteilt (vgl. Kap. 2). Da sich innerhalb der Neuenburg-Formation ein oberer höher

Les flux d'eau entrant par la limite Sud et celle sortant à la limite Nord sont décrits par des conditions de piézométrie imposée.

La hauteur piézométrique pour chacune de ces 2 limites est issue de lignes de niveau observées. La piézométrie a aussi été imposée dans la zone de Ostrheinrinne au Sud-Est du Kaiserstuhl et au niveau de Riegeler Pforte pour tenir compte des échanges avec la Freiburger Bucht.

Un réseau d'eaux de surface détaillé intégrant le Rhin et son canal de drainage a également été décrit par le modèle sous forme de conditions d'échange nappe-rivières. Ceci permet d'évaluer les flux échangés à partir d'un coefficient d'échange dépendant du colmatage du lit de la rivière et de la différence de charge entre la rivière et la nappe.

La surface libre du Rhin est simulée par un modèle hydraulique monodimensionnel.

La surface libre des autres cours d'eau est calculée à partir de bilans en eau établis sur des tronçons. Un débit est imposé pour chaque rivière en limite du domaine. Les nombreux puits de pompage sont considérés comme des termes puits/source ponctuels.

L'apport d'eau le plus important est dû à la recharge. Un calcul détaillé au pas mensuel de 1956 à 2005 a été mené à l'aide du modèle GWN_BW. Ce modèle a été conçu par Armbruster, dans le cadre de l'action *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg*, UVM u. LfU, (2004) et amélioré lors d'un contrat avec la LfU. Une recharge moyenne entre 1956 et 1986 a été calculée pour le calage en régime permanent. Une contribution importante de l'irrigation dans le secteur situé entre Fessenheim et Breisach a été identifiée. Pour ces raisons dans le domaine de la culture du maïs, une recharge additionnelle a été prise en compte durant la période estivale.

La construction du maillage

Le domaine est discrétisé en 4 couches afin de tenir compte des conditions hydrogéologiques. La couverture représentée par la zone superficielle est considérée comme une couche. L'aquifère sous-jacent est séparé en 2 niveaux : la formation du Neuenburg et celle de Breisgau (voir chapitre 2). La formation du Neuenburg est divisée en deux couches pour tenir compte de la perméabilité plus forte de la partie

durchlässiger Bereich abgrenzen lässt, wurde die Neuenburg-Formation mit zwei Modellschichten beschrieben. Die Mächtigkeit des oberen Teils der Neuenburg-Formation wurde mit 20 m angenommen. Im Kernbereich (Absetzbecken, Salzfahne) wurde das numerische Modell mit 33 Modellschichten vertikal noch erheblich höher aufgelöst, um den dichte-behafteten Salztransport zu simulieren.

Horizontal wurde das Modell in einem Finite-Elemente-Netz diskretisiert. Bei der Generierung des Modellnetzes mit Drei- und Vierecken wurden alle relevanten Geometrien wie folgt berücksichtigt:

- Horizontale Verbreitung des Lockergesteins im Oberrheingraben
- Gewässernetz und Baggerseen
- Entnahmen
- Messstellen
- Salzeintragsstellen
- Retentionsräume und Anpassungsmaßnahmen

Daraus ergibt sich das in *Abb. 4.1* dargestellte Modellnetz, das im Bereich der Salzfahne und der Salzeintragsstellen verfeinert ist. Außerhalb der Salzfahne beträgt die durchschnittliche Kantenlänge der Elemente etwa 500 m, innerhalb der Salzfahne wurde diese auf 100 m, im Versickerungsbereich bis auf 25 m verfeinert. Die zeitliche Diskretisierung bei der Strömungsmodellierung wurde konstant auf jeweils einen Monat gesetzt, um die saisonalen und mehrjährigen Schwankungen des Grundwasserstandes nachzubilden.

4.3 Modellkalibrierung

Das Strömungsmodell wurde zunächst für stationäre Verhältnisse kalibriert. Dazu wurde der Stichtag 20.10.1986 verwendet, an dem in etwa Mittelwasser-Verhältnisse vorgelegen haben. Im Anschluss an die stationäre Strömungskalibrierung wurde eine instationäre Strömungskalibrierung für den Zeitraum zwischen dem 20.10.1986 und dem 31.12.2005 durchgeführt. Um das Strömungsmodell zu überprüfen, wurde es zwischen 1956 und 1986 validiert, indem die instationäre Strömung ohne Veränderung der Aquiferparameter nachgebildet wurde.

Da das Ziel der Modellierung die Nachbildung der vorhandenen Salzfahren zwischen Fessenheim und Burkheim ist, erfolgten Salztransportberechnungen, bei denen die ermittelten Aquiferstrukturen weiter verfeinert wurden. Dies betrifft im Wesentlichen die Breisgau-Formation. Grundlage der Salztransportrechnungen ist die instationär berechnete Strömung zwischen 1956 und 2005.

supérieure de cette formation. L'épaisseur de cette partie supérieure est estimée à 20 m.

Dans la partie centrale du domaine (gravières de stockage, panache d'eau salée), la discrétisation verticale a été considérablement augmentée (33 couches) afin de pouvoir simuler les effets de densité.

Un maillage éléments finis a été construit sur le plan horizontal. Ce maillage comprend des éléments triangulaires et quadrangulaires et a été généré en respectant les principales contraintes géométriques suivantes :

- La géométrie de la zone alluviale du Rhin Supérieur
- Les réseaux d'eau de surface et les plans d'eau
- Les puits de pompage
- Les points de mesure
- Les zones d'infiltration de l'eau salée
- Les zones de stockages et pompage

La discrétisation obtenue est présentée dans la *figure 4.1*. Le maillage est affiné dans la zone d'infiltration d'eau salée et au niveau du panache. La taille des mailles est en moyenne de 500 m en dehors de la zone contaminée, de 100 m au niveau du panache et de 25 m au niveau de la zone d'infiltration.

La discrétisation temporelle est de 1 mois afin de pouvoir tenir compte des variations piézométriques saisonnières et pluriannuelles.

4.3 L'étalonnage du modèle

Le modèle hydrodynamique a été étalonné en régime permanent dans un premier temps. Les niveaux piézométriques mesurés le 20.10.1986 ont été pris pour référence car ils correspondent à un état moyen de la nappe. Le modèle a été ensuite étalonné en régime transitoire pour la période du 20.10.1986 au 31.12.2005. Le modèle a été validé en utilisant les paramètres obtenus par étalonnage pour simuler la période de 1956 à 1986.

L'objectif de la modélisation étant la simulation de la propagation de la langue salée entre Fessenheim et Burkheim, le modèle a ensuite été affiné lors des simulations de transport, notamment au niveau de la structure de l'aquifère dans la formation de Breisgau. Le calcul de la propagation de la langue de salée s'est fait sur la base du calcul hydrodynamique de 1956 à 2005.

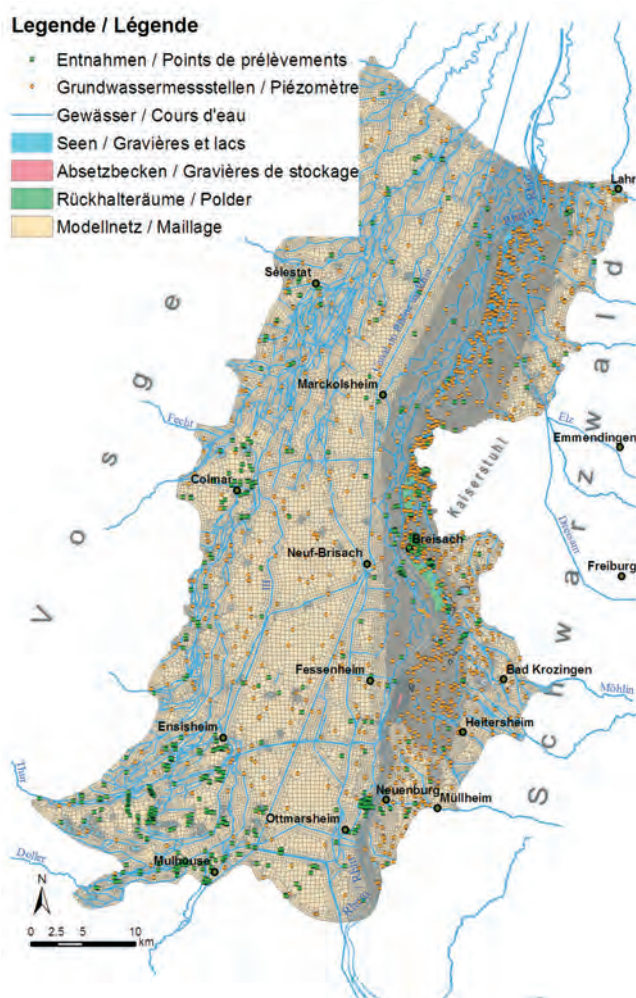


Abbildung 4.1: Modellgebiet und Randbedingungen (links), Modellnetz (rechts).
Figure 4.1 : Limites et conditions aux limites (à gauche) et le maillage (à droite).

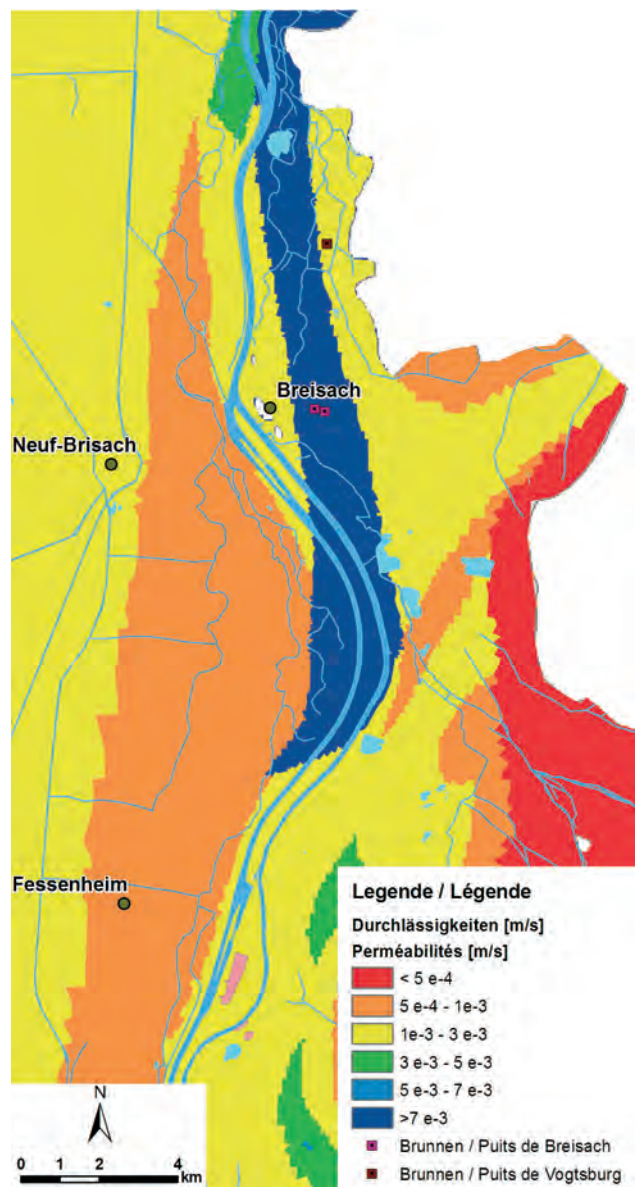
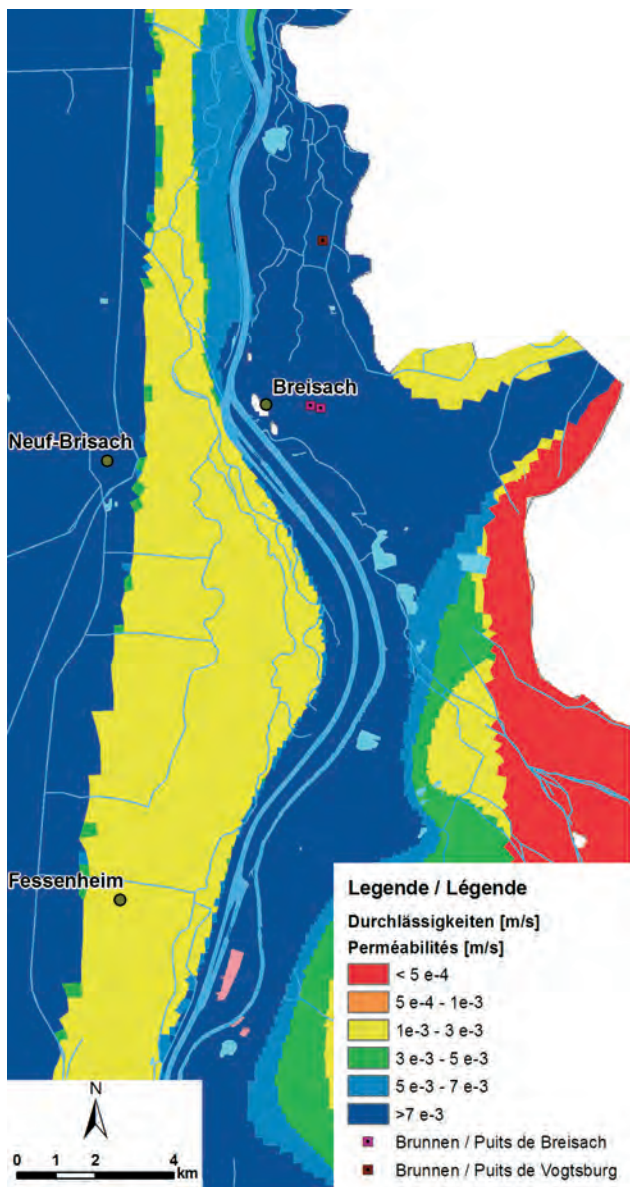


Abbildung 4.2: Durchlässigkeitsverteilung im oberen Teil (links) und unteren Teil (rechts) der Neuenburg-Formation.
Figure 4.2 : Perméabilités de l'horizon supérieur (à gauche) et inférieur (à droite) de la formation du Neuenburg.

Durchlässigkeiten

Da die Durchlässigkeiten der hydrogeologischen Einheiten im Untersuchungsraum generell von oben nach unten abnehmen, werden die Piezometerhöhen hauptsächlich von der Durchlässigkeitsverteilung im oberen Teil der Neuenburg-Formation bestimmt. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Strömungskalibrierung hauptsächlich die Durchlässigkeitsverteilung der Neuenburg-Formation nachgebildet. Die Durchlässigkeitsverteilung in der Breisgau-Formation wurde im Rahmen der Salztransportmodellierung variiert und zur Nachbildung der derzeitigen Salzfahnen modifiziert. Die aus der Strömungs- und Transportkalibrierung resultierenden Durchlässigkeitsverteilungen sind in Abb. 4.2 für die Neuenburg-Formation und in Abb. 4.3 für die Breisgau-Formation dargestellt. Für die Nachbildung der Salzfahnen wurde auch die Breisgau-Formation in einen oberen und unteren Teil differenziert.

Les conductivités hydrauliques

Dans le domaine d'étude, la perméabilité des structures hydrogéologiques décroît avec la profondeur. Les niveaux piézométriques sont donc essentiellement influencés par les perméabilités des niveaux supérieurs de la formation de Neuenburg. Ce sont donc les perméabilités de cette zone qui ont été ajustées lors de l'étalonnage du modèle hydrodynamique. Les perméabilités de la formation de Breisgau ont été modifiées lors des simulations du transport afin de reproduire au mieux le panache d'eau salé actuel.

Les perméabilités de la formation du Neuenburg (resp. Breisgau) obtenus après l'étalonnage des modèles hydrodynamique et de transport sont présentés sur la figure 4.2 (resp. 4.3). La formation du Breisgau a également été différenciée en deux horizons afin de simuler le panache d'eau salée.

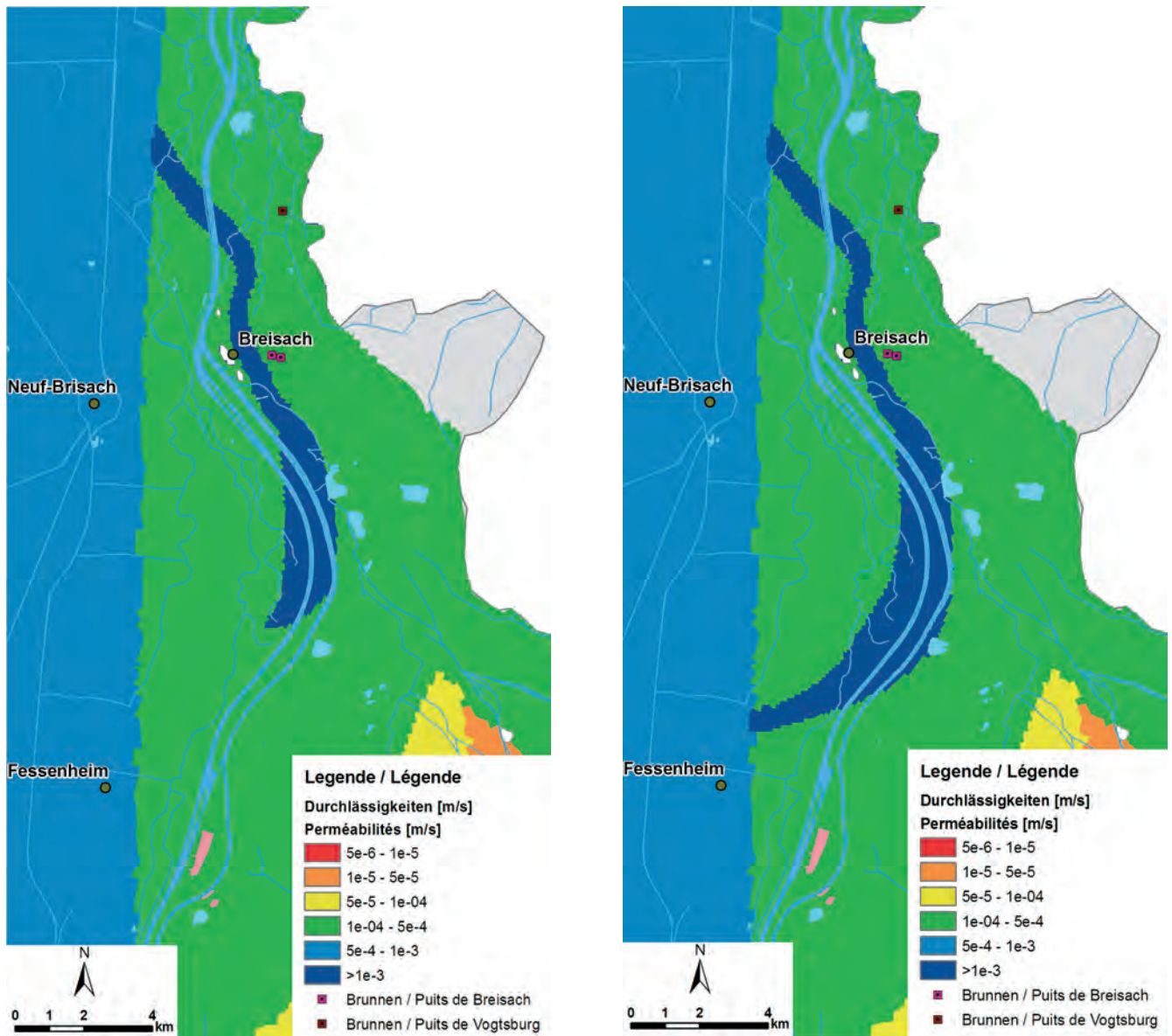


Abbildung 4.3: Durchlässigkeitsverteilung im oberen Teil (links) und unteren Teil (rechts) der Breisgau-Formation.
Figure 4.3 : Perméabilités de l'horizon supérieur (à gauche) et inférieur (à droite) de la formation du Breisgau.

Der obere Teil der Neuenburg-Formation weist die höchsten Durchlässigkeiten in Rheinnähe auf. Hier wurden Durchlässigkeiten von bis zu $2 \cdot 10^{-2}$ m/s bestimmt. Generell nehmen die Durchlässigkeiten zum Modellrand hin ab. Der untere Teil der Neuenburg-Formation weist eine hochdurchlässige Rinne ebenfalls in Rheinnähe auf, die nördlich der Absatzbecken beginnt und sich bis in den Raum Burkheim hineinzieht. Diese Rinne hat eine Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Die Durchlässigkeiten im übrigen Bereich liegen zwischen $5 \cdot 10^{-4}$ m/s und $3 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Die Breisgau-Formation wurde ebenfalls in einen oberen und unteren Teil differenziert. Die großräumigen Durchlässigkeiten liegen in beiden Teilen bei $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Eine höher durchlässige Rinne mit $1 \cdot 10^{-3}$ m/s zieht sich nördlich der Absatzbecken entlang des Rheins bis in den Raum Breisach. Diese Struktur

Les perméabilités les plus élevées se trouvent proche du Rhin dans la formation du Neuenburg. Les valeurs atteignent $2 \cdot 10^{-2}$ m/s dans cette zone. Globalement, les perméabilités diminuent lorsqu'on s'approche des limites du domaine. Une zone à haute perméabilité se situe également proche du Rhin dans la partie inférieure de la formation du Neuenburg. Cette zone s'étend du nord des gravières de stockage jusqu'à la proximité de Burkheim. Cette zone a une perméabilité de $1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Dans les autres parties du domaine modélisé, les perméabilités varient entre $5 \cdot 10^{-4}$ m/s et $3 \cdot 10^{-3}$ m/s.

La formation du Breisgau a aussi été différenciée en deux parties. Globalement, la perméabilité est de $1 \cdot 10^{-4}$ m/s pour ces deux parties. Une zone avec perméabilité élevée de $1 \cdot 10^{-3}$ m/s a été identifiée le long du Rhin, du nord des gravières de stockage jusqu'à la proximité de Breisach. Cette structure allongée a

ergab sich aus den Salztransportberechnungen, da nur mit dieser Rinnenstruktur, die gemessenen Chloridfahnen im Modell nachvollzogen werden konnten.

4.3.1 Stationäre Kalibrierung für den Stichtag 20.10.1986

Bei der stationären Kalibrierung wurden die gemessenen Piezometerhöhen vom 20.10.1986 als Vergleichsgrößen verwendet und mit den berechneten Piezometerhöhen verglichen. Im Rahmen der stationären Kalibrierung wurden die Durchlässigkeiten in der Neuenburg-Formation und die Leakagekoeffizienten an den Gewässern variiert. Zu Beginn der stationären Kalibrierung wurden die Aquiferparameter aus der Modelluntersuchung des Projektes MoNit übernommen. Damit wurde eine mittlere Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen von 1,37 m erreicht. Nach der Kalibrierung mit verfeinerter Durchlässigkeitsstruktur wurde der mittlere Unterschied zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen auf 0,60 m im gesamten Modellgebiet reduziert (Kup 2007).

Für den Raum zwischen Fessenheim und Burkheim ergibt sich eine mittlere Anpassungsgenauigkeit von 0,24 m. Bei dem in diesem Bereich vorliegenden Piezometerhöhenunterschied von ca. 22 m ist die Anpassung mit einer Abweichung von ca. 1% der Piezometerhöhendifferenz sehr gut. Die sich im Modell ergebende Piezometerhöhenverteilung in der Neuenburg-Formation sowie die Wechselwirkungen mit den Fließgewässern ist in Abb. 4.4 für den Bereich zwischen Fessenheim und Burkheim dargestellt. Generell verläuft die Grundwasserströmung rheinparallel. Am östlichen Modellrand strömt Grundwasser vom Schwarzwaldrand zu. Der Rhein ist nördlich von Fessenheim zunächst Vorfluter. Im Bereich des Baggersees Hartheim liegt die Stauwurzel des Breisacher Kulturwehrs. Etwa ab hier liegt der Rheinwasserspiegel oberhalb des Grundwasserspiegels, so dass es zu einer Infiltration von Rheinwasser bis zum Kulturwehr Breisach kommt. Im Unterwasser des Kulturwehres nimmt der Rhein wieder Grundwasser auf. Die Möhlin infiltriert Wasser oberhalb des Wehres und nimmt unterhalb davon auf einer kurzen Fließstrecke ca. 600 l/s Grundwasser auf. Die kleinen Gewässer nördlich Breisach nehmen ebenfalls Grundwasser auf.

Mit Hilfe des stationären Strömungsmodells wurde die Wasserbilanz im Untersuchungsraum ermittelt. Die einzelnen Wasserbilanzkomponenten sind in Tab. 4.1 für das Gesamtgebiet, den Raum zwischen Fessenheim und Breisach sowie das Gebiet zwischen Breisach und Burkheim zusammengestellt. Der Umsatz im

été détectée lors de la modélisation du transport de l'eau salée. Sans elle, il n'était pas possible de simuler le panache d'eau salée observé.

4.3.1 Etalonnage en régime permanent de la situation de référence du 20.10.1986

La piézométrie mesurée le 20.10.1986 a servi de référence pour l'étalonnage du modèle hydrodynamique en régime permanent et a été comparée aux piézométries simulées. L'étalonnage en régime permanent a consisté à faire varier les perméabilités de la formation du Neuenburg et les coefficients d'échange nappe-rivières.

Les paramètres initiaux concernant l'aquifère ont été repris des études de modélisation menées dans le cadre du programme Interreg III MoNit (projet Interreg III A, 2006). Avec ces paramètres, l'écart moyen entre la piézométrie calculée et mesurée était de 1.37 m. Après étalonnage, cet écart moyen a été diminué pour atteindre 0.60 m, grâce à une discrétisation plus fine de la distribution des perméabilités (Kup, 2007).

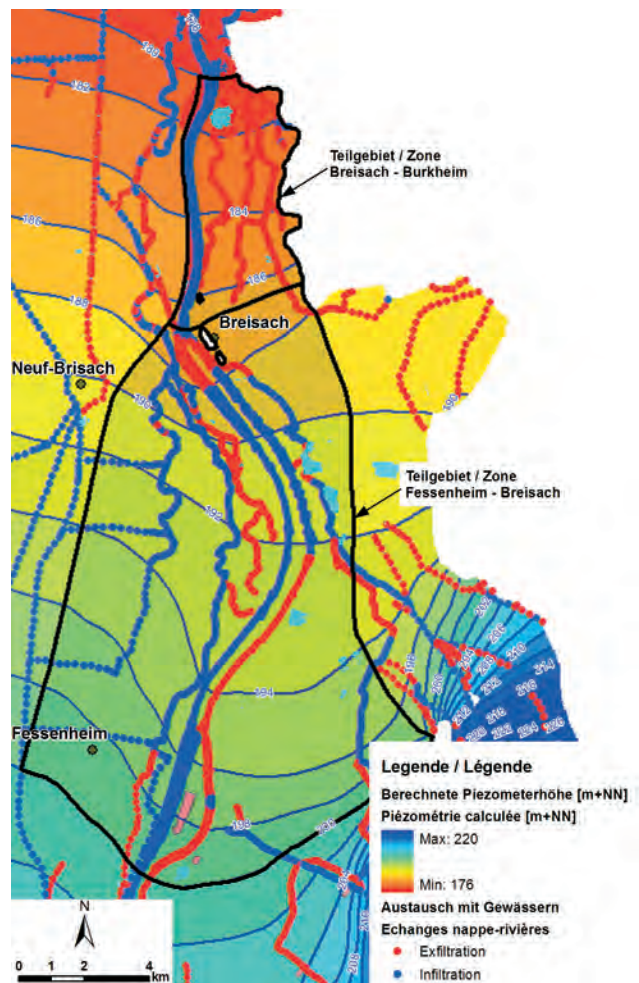
Dans la zone entre Fessenheim et Burkheim, l'écart moyen est de 0.24 m. La piézométrie variant dans l'ensemble d'environ 22 m dans ce secteur, cet écart représente 1% de la variation de piézométrie observé et l'étalonnage peut être considéré comme très bon. La figure 4.4 représente les hauteurs piézométriques mesurées dans la formation du Neuenburg entre Fessenheim et Burkheim et les échanges nappe-rivières. L'orientation de l'écoulement est globalement parallèle au Rhin. Cette orientation est modifiée à l'Est, suite aux apports provenant de la Forêt Noire. Au Nord de Fessenheim, le Rhin alimente la nappe. L'effet du barrage de Breisach se situe dans la zone des gravières de Breisach. A partir de là, la surface libre du Rhin se situe au-dessus de celle des eaux souterraines. Il y a donc infiltration des eaux du Rhin jusqu'au barrage de Breisach.

A l'aval du barrage de Breisach, le Rhin draine à nouveau la nappe. La Möhlin alimente la nappe à l'amont du barrage et draine la nappe à son aval sur un petit tronçon avec un débit d'environ 600 l/s. Les petits cours d'eau situés au Nord de Breisach jouent également un rôle de drainage de la nappe.

Un bilan en eau a été établi par le modèle en régime permanent pour la zone d'étude. Les différentes composantes de ce bilan sont présentées dans le tableau 4.1 pour l'ensemble du domaine, pour la zone entre Fessenheim et Breisach et la zone entre Breisach et Burkheim. Pour l'ensemble de domaine, les flux

Abbildung 4.4: Berechnete Piezometerhöhenverteilung für den Stichtag 20.10.1986 zwischen Fessenheim und Burkheim sowie der Austausch zwischen Grundwasser und oberirdischen Gewässern.

Figure 4.4 : *Piezométrie calculée pour le jour de référence du 20.10.1986 et échanges nappe-rivières entre Fessenheim et Burkheim.*



Gesamtgebiet beträgt rd. 30 m³/s. Im Teilgebiet "Fessenheim-Breisach" beträgt er 5,8 m³/s und in "Breisach- Burkheim" 1,6 m³/s. Im Gesamtgebiet ist die Grundwasserneubildung die hauptsächliche Zuflusskomponente. Die größte Abflusskomponente ist der Austausch mit den Gewässern. Im Bereich "Fessenheim-Breisach" fließt das meiste Wasser über den Bilanzrand von Süden zu. Dieses wird dort hauptsächlich über den Rhein ausgetragen. Im nördlichen Bilanzgebiet "Breisach-Burkheim" fließt von Süden die größte Wassermenge zu, die vom Gewässernetz aufgenommen wird. Der Rhein infiltriert in diesem Teilgebiet ausschließlich.

entrant ou sortant sont de 30 m³/s. Ces flux sont de 5,8 m³/s pour la zone "Fessenheim-Breisach" et de 1,6 m³/s pour la zone "Breisach- Burkheim". La recharge constitue le principal apport d'eau pour l'ensemble du domaine. Les principales pertes d'eau sont dues au drainage de la nappe par les rivières. Pour la zone "Fessenheim-Breisach", le principal apport d'eau provient de sa limite Sud. Cette eau est essentiellement récupérée par le Rhin. Dans la zone "Breisach- Burkheim", les apports proviennent également de sa limite Sud et cette eau est reprise par les eaux de surface. Le Rhin ne fait qu'alimenter la nappe dans ce secteur.

	Gesamtgebiet / <i>Ens. du domaine</i>		Fessenheim-Breisach		Breisach-Burkheim	
	Zufluss <i>Apports</i>	Abfluss <i>Pertes</i>	Zufluss <i>Apports</i>	Abfluss <i>Pertes</i>	Zufluss <i>Apports</i>	Abfluss <i>Pertes</i>
Neubildung <i>Recharge</i>	13,68	0,0	0,90	0,0	0,07	0,0
Austausch mit Rhein <i>Echanges avec le Rhin</i>	5,15	6,66	1,01	3,83	0,24	0,0
Austausch mit Gewässernetz <i>Echanges avec les cours d'eau</i>	8,82	11,53	0,75	0,68	0,03	1,46
Randzu-/abfluss <i>Flux aux limites</i>	2,69	0,0	3,13	1,03	1,30	0,14
Entnahmen <i>Pompages</i>	0,0	6,86	0,0	0,25	0,0	0,04
Festpotential <i>Potentiel imposé</i>	1,94	4,23	-	-	-	-
Gesamt / Total	29,28	29,28	5,79	5,79	1,64	1,64

Tabelle 4.1: Stationäre Wasserbilanz in m³/s
Tableau 4.1: Bilan en eau en régime permanent (m³/s)

4.3.2 Instationäre Strömung zwischen 1986 und 2005 (Kalibrierungszeitraum)

Nach der stationären Strömungsanpassung wurde das numerische Modell zwischen 1986 und 2005 instationär kalibriert. Dazu wurde die instationäre Grundwasserneubildung auf Monatsbasis verwendet. Weiterhin wurden die instationär schwankenden Rheinwasserspiegel aus einer Wasserspiegellagenberechnung, die instationären wasserhaushaltsmodellgestützt ermittelten Zuflüsse in den oberirdischen Gewässern über den Rand des Modellgebietes und die zeitlich variierenden Grundwasserentnahmen verwendet. Die zeitliche Diskretisierung erfolgte in Monatsschritten. Als Anfangspiezometer-höhenverteilung wurde das Ergebnis der stationären Kalibrierung verwendet. Die Verteilung des speichernutzbaren Hohlraumanteils wurde aus dem Projekt MoNit übernommen und in einer Sensitivitätsstudie variiert. Sie hat das Ergebnis aus dem Projekt MoNit bestätigt. Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Verteilung der Durchlässigkeit und der Leakagekoeffizienten an den Gewässern aus der stationären Kalibrierung weiter verfeinert.

Für die Kalibrierung standen 829 gemessene Grundwasserstandsganglinien zur Verfügung. Abb. 4.5 bis Abb. 4.7 zeigen ausgewählte Grundwasserstandsganglinien im Untersuchungsraum. Mit Hilfe des instationären Strömungsmodells konnten die räumlich unterschiedliche Dynamik der Grundwasserströmung, die instationären Schwankungen infolge saisonaler Grund-

4.3.2 Ecoulement transitoire pendant la période d'étalonnage entre 1986 et 2005.

Le modèle numérique est étalonné en régime transitoire pour la période de 1986 à 2005 après l'étalonnage en régime permanent. Pour ce faire, la recharge de nappe a été évaluée au pas de temps mensuel. Les variations de la surface libre du Rhin calculées à partir d'un modèle hydraulique, les débits d'entrée des eaux de surface aux limites du domaine évalués par un modèle conceptuel et les fluctuations des débits de pompage ont été pris en compte. Le pas de temps retenu est celui du mois. La piézométrie initiale est issue de l'étalonnage en régime permanent. Les porosités ont été reprises du projet MoNit et modifiées par analyse de sensibilité.

La distribution des perméabilités et coefficients d'échange nappe-rivières a été reprise du calage en régime permanent et affinée.

829 points de mesure de la piézométrie ont été utilisés pour l'étalonnage. Les figures 4.5 à 4.7 montrent quelques chroniques piézométriques représentatives. Les différentes dynamiques spatiales de la nappe, consécutives aux variations saisonnières de la recharge et des échanges nappe-rivières, dont le Rhin notamment, sont très bien reproduites par le modèle.

wasserneubildung und die durch Gewässer wie z.B. den Rhein verursachten Schwankungen sehr gut nachgebildet werden. So zeigen die Grundwasserstandsganglinien der Messstellen 13/021-3 und 3784X0024 einen deutlichen saisonalen Gang, der durch mehrjährige Schwankungen und Hochwässer des Rheins überlagert ist. Auch lokale Effekte wie der Abstau des Möhlin-Wehres im Jahr 2003 (siehe Ganglinie der Messstelle 138/019-0) werden vom Modell sehr gut nachgebildet. Das Strömungsmodell erfasst somit alle relevanten Effekte.

4.3.3 Instationäre Strömung zwischen 1956 und 1986

Nach der Strömungskalibrierung wurde das numerische Modell für den Zeitraum 1956 bis 1986 validiert. Dabei wurde eine monatlich schwankende Grundwasserneubildung, der zeitlich variable Zufluss in den Gewässern ab 1961, die instationären Grundwasserentnahmen und die Entwicklung des Rheinausbaus mit der Inbetriebnahme des Rheinseitenkanals im Jahr 1959 und des Kulturwehres Breisach im Jahr 1965 berücksichtigt. Schwankungen im Rheinwasserspiegel infolge der Hydrologie wurden nicht mitberücksichtigt. Das bedeutet, dass der Rheinwasserspiegel zeitlich konstant ist, nur durch die Inbetriebnahme des Rheinseitenkanals zunächst absinkt und dann durch die Inbetriebnahme des Kulturwehres Breisach wieder ansteigt. Das Ergebnis der Validierungsbetrachtung ist exemplarisch an der Ganglinie der Messstelle 113/020-3 (siehe Abb. 4.8) dargestellt.

Die Inbetriebnahme des Kulturwehres Breisach führte nach 1965 zu einer Grundwasserstandserhöhung von 1 bis 2 m im Raum zwischen Fessenheim und Breisach. Die gemessenen größeren kurzfristigen Schwankungen infolge des Abflussgeschehens im Rhein können vom Modell nicht gleichermaßen mitberücksichtigt werden, da der Rheinwasserspiegel im Betrachtungszeitraum nur zweimal infolge der Inbetriebnahme des Rheinseitenkanals und des Kulturwehres Breisach schwankt. Im Hinblick auf die Salztransportbetrachtungen sind die hydrologisch bedingten Schwankungen des Rheinwasserspiegels allerdings von untergeordneter Bedeutung.

4.4 Salztransportmodellierung zwischen 1956 und 2005

Um die derzeit gemessene Chloridverteilung im Grundwasser mit Hilfe des numerischen Modells nachzubilden, wurde das Strömungsmodell auf den Transport von Natriumchlorid erweitert. Dazu wurden zunächst Detailuntersuchungen zum erforderlichen vertikalen Modellaufbau bzw. zur zeitlichen Diskretisierung durchgeführt. Anschließend erfolgten langjährige

Les chroniques piézométriques aux points de mesure 3/021-3 et 3784X0024 montrent très bien les variations saisonnières influencées par des fluctuations pluri-annuelles liées aux crues du Rhin. Des effets locaux comme ceux du barrage sur la Möhlin en 2003 ont aussi été très bien reproduits par le modèle (voir chronique au point 138/019-0). Le modèle hydrodynamique tient donc compte des effets hydrodynamiques prépondérants.

4.3.3 Hydrodynamique en régime transitoire entre 1956 et 1986 (période de validation)

Le modèle numérique étalonné en régime transitoire est validé sur la période de 1956 à 1986. Les fluctuations mensuelles de la recharge, les variations des flux d'entrée aux limites du domaine des eaux de surface depuis 1961 et des débits de pompage, les aménagements du Rhin avec la mise en œuvre du contre-canal de drainage en 1959 et du barrage de Breisach en 1965 ont été pris en compte. Les variations de la surface libre du Rhin due aux processus hydrologiques n'ont pas été prises en compte.

La surface libre du Rhin a été maintenue constante et a été modifiée pour tenir compte des différents aménagements : le niveau a baissé après la mise en œuvre du contre-canal et a augmenté après la mise en œuvre du barrage de Breisach. Les résultats de la phase de validation sont présentés sur la figure 8 pour le point 113/020-3, considéré comme représentatif des résultats obtenus.

La mise en œuvre du barrage de Breisach s'est traduite par une augmentation de la hauteur piézométrique de 1 à 2 m entre Fessenheim et Breisach après 1965. Les fluctuations locales observées aux petites échelles de temps résultant des variations des débits du Rhin ne peuvent pas être décrites par le modèle, le niveau du Rhin n'étant modifié que 2 fois : après la construction du contre-canal et lors de la mise en route du barrage de Breisach. Par ailleurs, les fluctuations du niveau du Rhin liés aux processus hydrologiques ont une influence que l'on peut considérer comme négligeable sur le transport de l'eau salée.

4.4 Modélisation du transport de l'eau salée entre 1956 et 2005

Le modèle hydrodynamique a été transféré à un modèle de transport de chlorure de sodium pour permettre la simulation des teneurs en chlorures actuelles des eaux souterraines. Dans un premier temps, une étude détaillée de la discrétisation verticale et temporelle a été menée. Le modèle a ensuite été utilisé pour simuler le transport de sel entre 1956 et 2005. Les apports

Abbildung 4.5: Gemessene und berechnete Piezometerhöhen an der Grundwassermessstelle 13/021-3 zwischen 1986 und 2005.

Figure 4.5 : Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 13/021-3 entre 1986 et 2005.

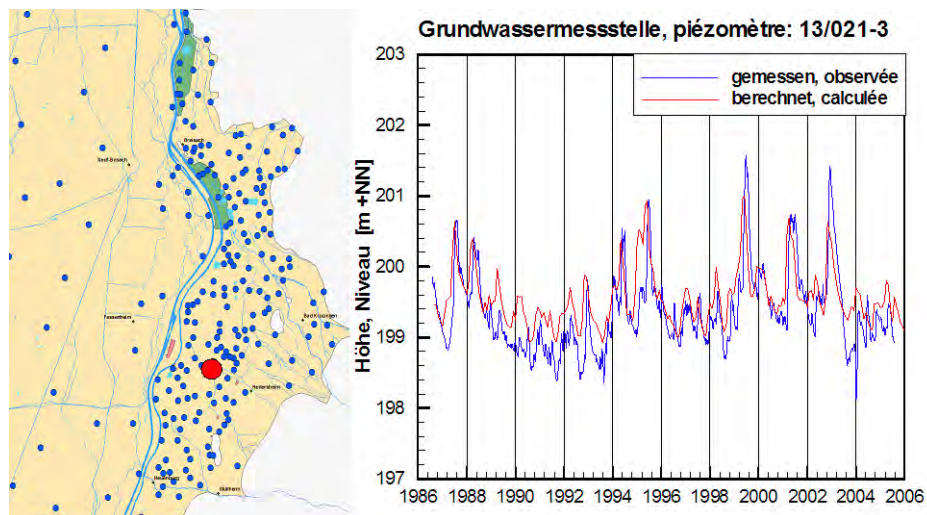


Abbildung 4.6: Gemessene und berechnete Piezometerhöhen an der Grundwassermessstelle 138/019-0 zwischen 1986 und 2005.

Figure 4.6 : Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 138/019-0 entre 1986 et 2005.

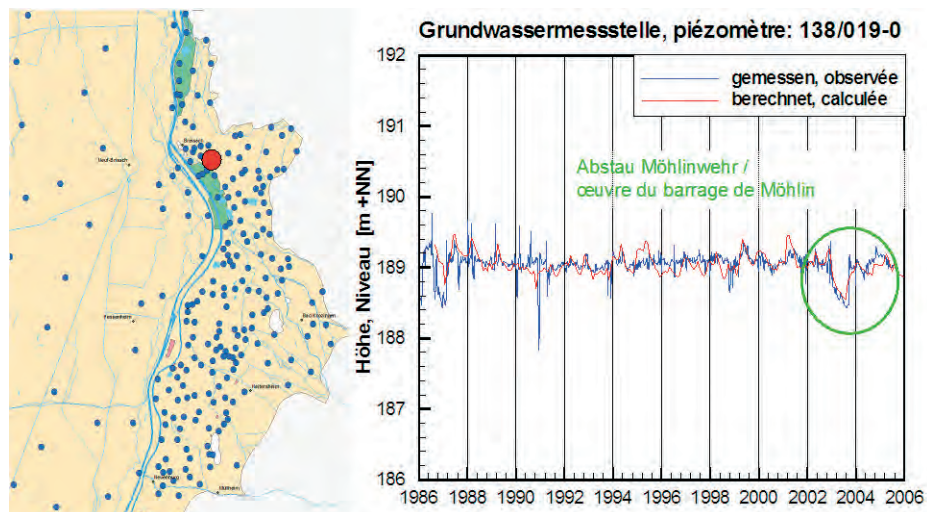
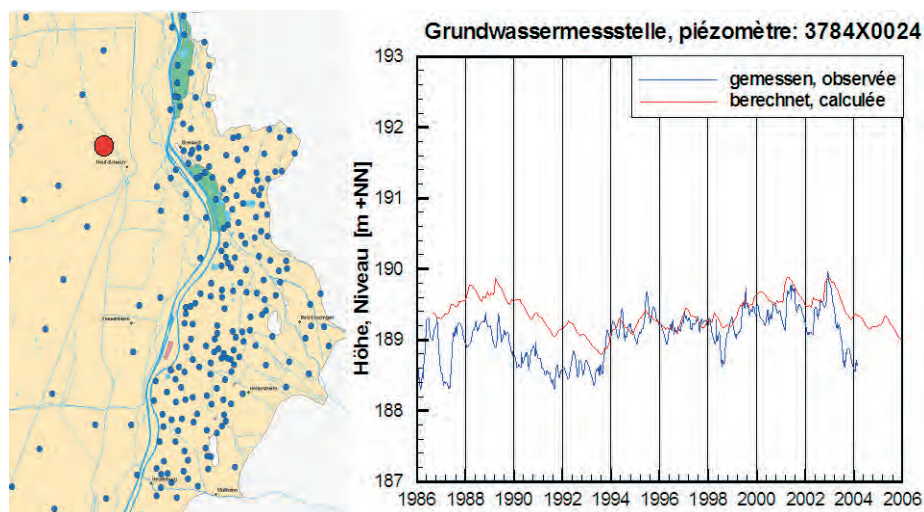


Abbildung 4.7: Gemessene und berechnete Piezometerhöhen an der Grundwassermessstelle 3784X0024 zwischen 1986 und 2005.

Figure 4.7 : Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 3784X0024 entre 1986 et 2005.



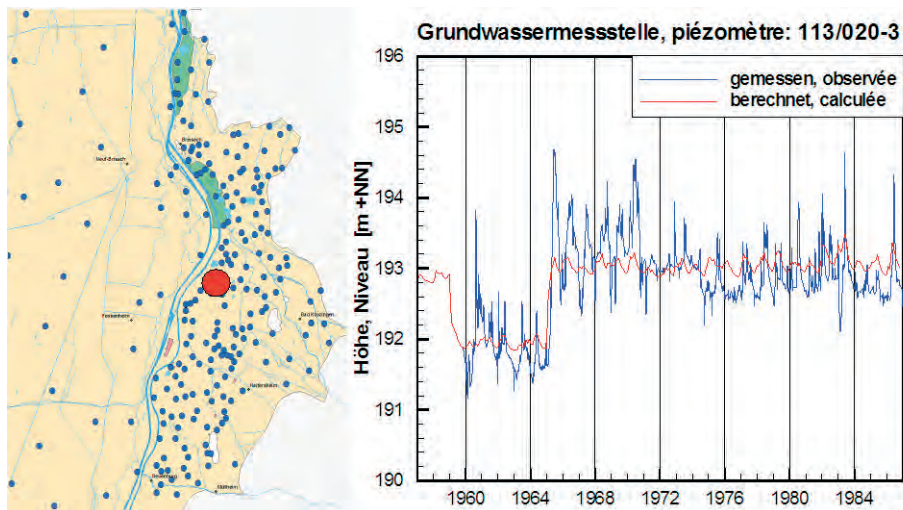


Abbildung 4.8: Gemessene und berechnete Piezometerhöhen an der Grundwassermessstelle 113/020-3 zwischen 1956 und 1986.

Figure 4.8 : Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 113/020-3 entre 1956 et 1986.

Salztransportbetrachtungen zwischen 1956 und 2005. Dabei wurde der Salzeintrag aus den Absatzbecken auf der Fessenheimer Insel, der Autobahnkiesgrube, der Fünfbeckenanlage sowie aus den beiden Kalihalden Buggingen und Heitersheim berücksichtigt.

Diskretisierung

Anhand eines Vertikalschnittmodelles, das unter den Absatzbecken der Fessenheimer Insel etwa entlang des Rheins bis Geiswasser verläuft (siehe Abb. 4.9), wurde die Versickerung von salzhaltigem Grundwasser im Nahbereich der Becken untersucht. Dabei wurden verschiedene vertikale und zeitliche Diskretisierungen angesetzt, um einen konstanten Salzeintrag von 44 l/s mit einer Konzentration von 270 g NaCl/l über 20 Jahre zu untersuchen.

Das Ergebnis der Voruntersuchungen mit dem Vertikalschnittmodell war, dass im Bereich der Salzfahne eine maximale Schichtmächtigkeit von 9 m anzusetzen ist. Damit wurde die schwerkraftbedingte Versickerung des salzhaltigen Wassers aus den Absatzbecken ausreichend genau simuliert. Wie Abb. 9 zeigt, fällt das hoch konzentrierte Salzwasser bis zur Basis des Grundwasserleiters und breitet sich dort nicht nur in Strömungsrichtung, sondern auch entgegen dieser aus. Sensitivitätsuntersuchungen zur zeitlichen Diskretisierung haben ergeben, dass zur Vermeidung numerischer Probleme Transportzeitschrittlängen von ca. 5 Stunden erforderlich sind. Aus diesem Grund wurde das Salzmodell für die Strömungsmodellierung in Monatszeitschritte und diese wiederum in jeweils 150 Transportzeitschritte unterteilt. Für den Zeitraum 1965 bis 2005 ergeben sich 600 Zeitschritte, in denen sich die Strömungsrandbedingungen ändern, und insgesamt 90.000 Transportzeitschritte.

liés aux bassins de rétention sur l'île de Fessenheim, d'une gravière dénommée *Autobahnkiesgrube*, d'une zone appelée *Fünfbeckenanlage* et les infiltrations au niveau des terrils de Buggingen et Heitersheim ont été pris en compte.

Discrétisation

L'infiltration de l'eau salée sous et à proximité des bassins de rétention a été étudiée à l'aide d'une coupe verticale parallèle au Rhin et localisée sous les bassins de rétention de l'île de Fessenheim et jusqu'au droit de Geiswasser (figure 4.9). Plusieurs simulations ont été réalisées avec différentes discrétisations verticales et différents pas de temps, en considérant une infiltration d'eau de 44 l/s avec une concentration de 270 g NaCl/l pendant 20 ans.

Les résultats de cette étude menée sur une coupe verticale ont montré que la discrétisation verticale ne doit pas excéder 9 m dans la zone du panache de sel. Cette discrétisation permet de simuler les effets gravitaires dus aux infiltrations d'eau salée sous les bassins de rétention avec une bonne précision. Comme le montre la figure 9, l'eau salée s'infiltre jusqu'au substratum de l'aquifère et s'étend non seulement dans le sens de l'écoulement mais aussi à contre-sens. Les analyses de sensibilité aux pas de temps ont montré qu'un pas de 5 h permet de limiter considérablement les problèmes numériques. Pour cette raison, un pas de temps mensuel a été utilisé pour le modèle hydrodynamique, et des pas de temps 150 fois plus petits ont été utilisés pour la simulation du transport de sel. La simulation de 1965 à 2005 nécessite donc 600 pas de temps pour l'hydrodynamique et 90 000 pas de temps pour le transport.

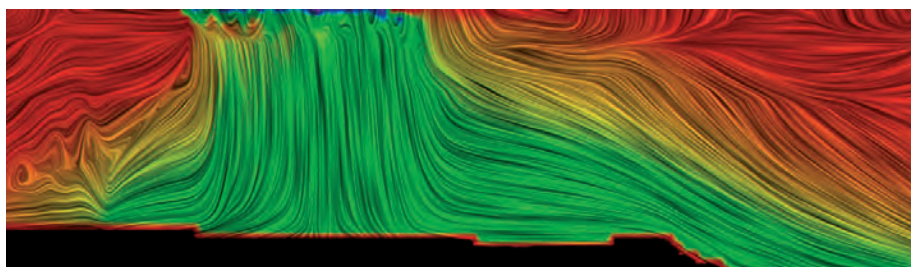
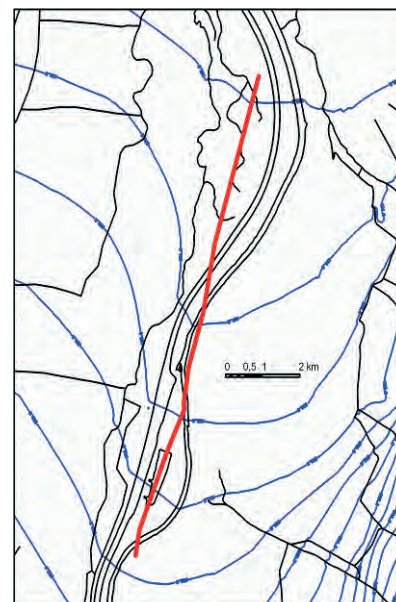


Abbildung 4.9: Berechnete Stromfäden und Salzkonzentrationen (rot: Frischwasser, grün: Salzwasser) im Vertikalschnittmodell unter den Absetzbecken der Fessenheimer Insel nach 20 Jahren mit konstantem Salzeintrag.

Figure 4.9 : Coupe verticale située sous l'île de Fessenheim représentant les lignes de courant et concentrations en sels (eau douce en rouge, eau salée en vert) calculées sur une période 20 ans avec une infiltration constante.



Salzeintrag

Um den Salzeintrag zu simulieren wurde im Modell eine Zuflussrandbedingung mit definierter Salzkonzentration angesetzt. Bei den Halden Buggingen und Heitersheim wurde davon ausgegangen, dass der Zufluss der natürlichen Grundwasserneubildung auf den Halden entspricht. Da die Halde Heitersheim seit dem Jahr 2006 abgedeckt ist, endet der Eintrag zu dieser Zeit. Bei der Autobahnkiesgrube und bei der Fünfbeckenanlage wurden ein Zufluss und eine Zuflusskonzentration abgeschätzt. Die angenommene Dauer, die Zuflussrate, -Konzentration und die Zuflussmasse sind in Tab. 2 zusammengefasst. Die Summe des Salzeintrags auf deutscher Seite beträgt ca. 160.000 t NaCl bzw. 97.000 t Cl, dies entspricht weniger als 2% des Gesamteintrags.

Infiltration d'eau salée

L'infiltration d'eau salée est décrite par le modèle à l'aide d'une infiltration d'eau avec une concentration en sel imposée. L'infiltration d'eau au niveau des terrils de Buggingen et Heitersheim a été supposée égale à la recharge. Ce flux est annulé à partir de 2006 pour le terril de Heitersheim, celui-ci ayant été recouvert. Une estimation du flux d'eau et de la concentration en sels a été faite pour les lieux-dits *Autobahnkiesgrube* et *Fünfbeckenanlage*. La durée d'infiltration supposée, les flux d'eau, les concentrations associées et les masses de sel infiltrées sont présentés dans le *tableau 2*. La masse totale infiltrée du côté allemand est de 160 000 t en NaCl soit 97 000 t de chlorures, ce qui représente moins de 2% de tous les apports en sel.

	Halde / Terril de Buggingen	Halde / Terril de Heitersheim	Autobahnkiesgrube	Fünfbeckenanlage
Zeitraum Période	depuis 1957	1959-2006	1961-1970	1971-1973
Zuflussrate Flux d'eau Austausch	Recharge : 0,16 l/s	Recharge : 0,2 l/s	3 l/s	3 l/s
Zuflusskonzentration Concentration en NaCl	200 g/l	100 g/l	66 g/l	66 g/l
Zuflussmasse Masse infiltrée NaCl	50.000 t	30.000 t	60.000 t	20.000 t

Table 2: Salzeintrag über die Halden, die Autobahnkiesgrube und die Fünfbeckenanlage

Tableau 2 : Infiltration en eau salée du coté allemand au niveau des terrils et des lieux Autobahnkiesgrube et Fünfbeckenanlage.

Für die Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel liegen von den Betreibern monatsdifferenzierte Informationen zu den ein- und ausgeleiteten Salzfrachten zwischen 1962 und 1970 vor. Aus der Differenz wurde die versickernde Salzrate bestimmt. Es wurde von einem Betrieb der Absetzbecken zwischen 1956 und 1976 ausgegangen. Nach neusten Informationen waren die Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel zwar ab 1956 genehmigt, ein Betrieb erfolgte jedoch erst ab 1960. Die Datenlücken für den Zeitraum vor 1962 wurde durch die Annahme der Versickerungsrate von 1962, die nach 1970 durch den Mittelwert der letzten zwei Jahre geschlossen. Hieraus wurde eine Versickerungsrate bestimmt, wobei die Versickerungskonzentration mit 270 g/l Natriumchlorid angenommen wurde. Daraus ergibt sich der in Abb. 10 dargestellte zeitliche Verlauf der Salzwasserversickerung aus den Absetzbecken zwischen 1956 und 1976. Nach 1976 wurde angenommen, dass die Versickerung der Grundwasserneubildung entspricht und die Salzkonzentration bis 2006 linear auf 0 zurückgeht. Der Gesamtzufluss an Natriumchlorid während des Betriebs der Absetzbecken beträgt 11,4 Mio. t und an Chlorid 6,9 Mio. t. Der Gesamteintrag wird damit ggf. etwas überschätzt und würde bei einem Betrieb ab 1960 rd. 8,3 Mio. t NaCl, bzw. 5 Mio. t Cl betragen.

Les exploitants des bassins de rétention de l'île de Fessenheim ont fourni des informations aux pas de temps mensuels concernant les flux de sel entre 1962 à 1970 lors des alimentations et vidanges des bassins. Les flux d'infiltration ont été déterminés par différence. L'exploitation des bassins est supposée avoir duré de 1956 à 1976. Les informations obtenues récemment indiquent que l'autorisation d'exploitation de ces bassins a été obtenue en 1956 et que les bassins ont été opérationnels en 1960. En l'absence de données avant 1962, une infiltration identique à celle de 1962 a été admise. Après 1970, cette infiltration est supposée égale à l'infiltration moyenne établie sur les 2 dernières années. La concentration en NaCl de l'eau infiltrée est supposée être égale à 270 g/l. La figure 10 représente les infiltrations d'eau ainsi calculées au droit des bassins de rétention de 1956 à 1976. Après 1976, le flux d'eau est égal à celui de la recharge et la concentration en sel diminue d'une manière linéaire pour atteindre une valeur de 0 en 2006. La masse totale infiltrée durant l'exploitation est donc de 11,4 millions de t de NaCl soit 6,9 millions de tonnes de Chlorures. Cette masse est surestimée. Pour une exploitation commencée en 1960, cette masse est d'environ 8,3 Mio. t NaCl, soit 5 Mio. t Cl.

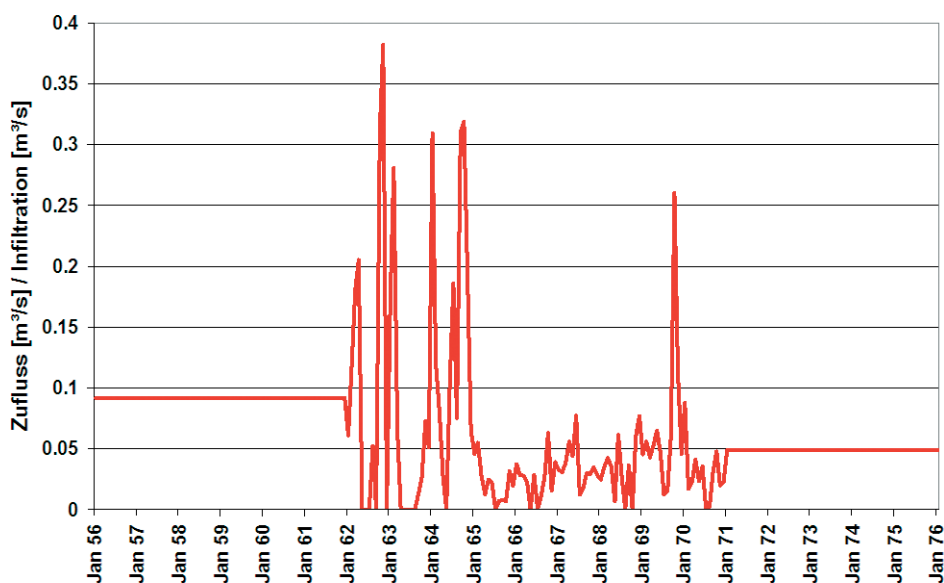


Abbildung 4.10: Zufluss über die Absetzbecken der Fessenheimer Insel während des Betriebs zwischen 1956 und 1976.

Figure 4.10 : Infiltration au niveau des bassins de rétention de l'île de Fessenheim durant la période d'exploitation de 1956 à 1976.

Berechnete Salzkonzentrationen

Mit Hilfe des Salztransportmodells wurde die dreidimensionale Salzkonzentrationsverteilung zwischen 1956 und 2005 berechnet. Im Rahmen der Kalibrierung wurden zunächst die durchflusswirksamen Hohlraumanteile und die Dispersivitäten variiert. Hier hat sich gezeigt, dass für die Neuenburg-Formation und den oberen Teil der Breisgau-Formation durchflusswirksame Hohlraumanteile von 12% und für den

Les concentrations en sel calculées

La distribution tri-dimensionnelle des concentrations en chlorures entre 1956 et 2005 a été calculée à l'aide du modèle de transport. Les porosités cinématiques et les dispersivités ont été déterminées lors de l'étalonnage. Cette porosité est de 12% pour la formation du Neuenburg et la partie supérieure de la formation du Breisgau, la partie inférieure ayant une porosité de estimée à 8%. La porosité est supposée

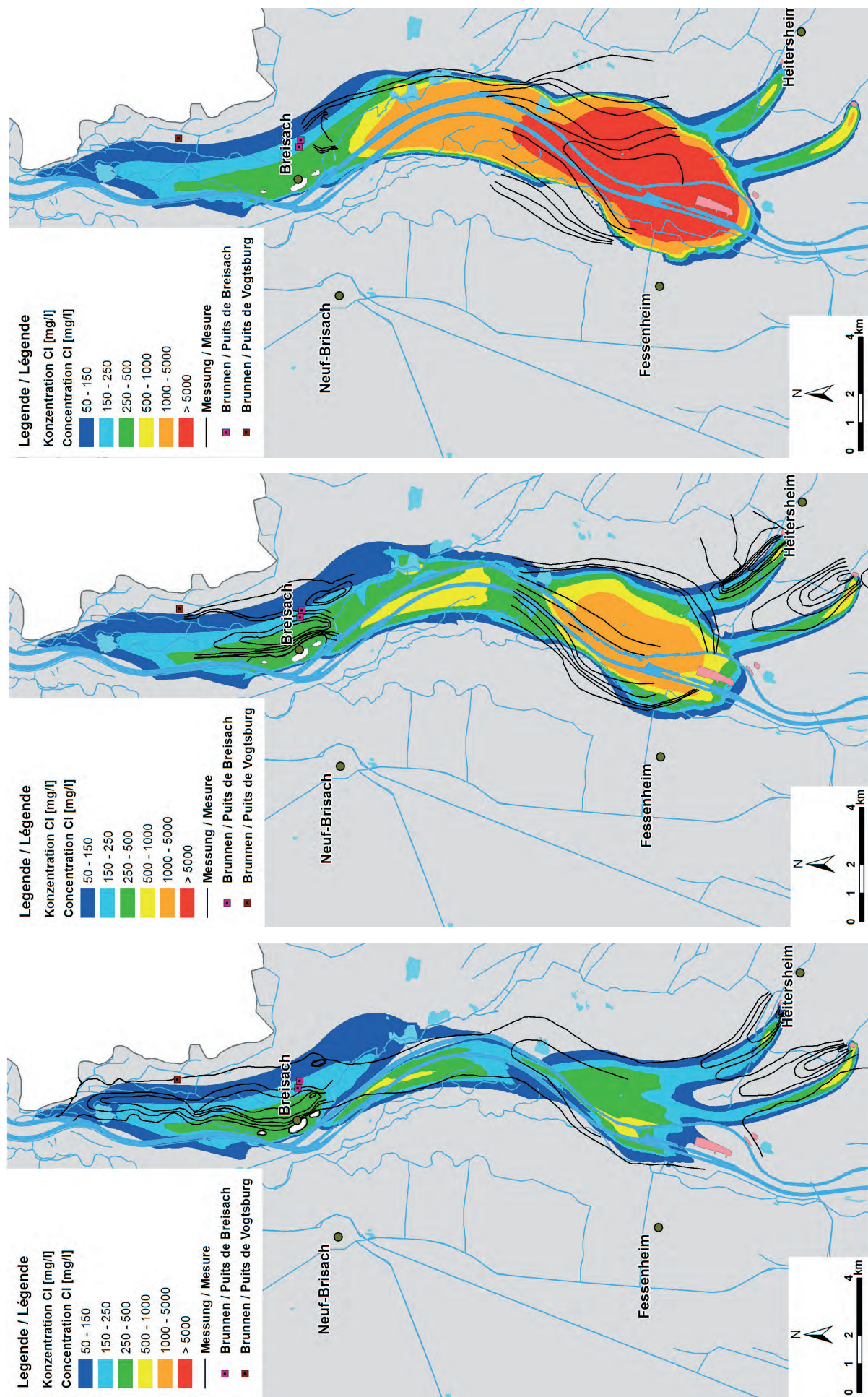


Abbildung 4.11: Berechnete Chloridverteilung an der Basis des oberen (links) und unteren (Mitte) Teils der Neuenburg-Formation sowie an der Aquiferbasis (rechts) mit aus Messwerten interpretierten Isolines für 2006.
Figure 4.11 : Distribution des concentrations en chlorures simulée à la base de la partie supérieure de la formation du Neuenburg (à gauche), à la base de la partie inférieure de la formation du Neuenburg (au milieu) et au substratum de l'aquifère (à droite). Les lignes de niveau sont issues d'une interprétation des mesures faites en 2006.

unteren Teil der Breisgau-Formation ein Hohlraumanteil von 8% anzusetzen sind. Die Verteilung der Hohlraumanteile wurde als homogen angenommen. Die Dispersivitäten wurden in Abhängigkeit der Transportentfernung gewählt. Entsprechend der von Gelhar et al. (1992) durchgeführten Auswertung wurden im Nahbereich der Salzversickerung Dispersivitäten von 50 m und im Fernfeld von 400 m angenommen.

Bei der Kalibrierung des Salztransportmodells wurde die Durchlässigkeitsverteilung in der Breisgau-Formation und im unteren Teil der Neuenburg-Formation variiert. Die berechneten Salzkonzentrationen wurden dabei hauptsächlich mit den aus Messwerten und Geoelektrik-Profilen erstellten Verteilungen für 2006 verglichen (vgl. Kap. 3.1, Kap. 3.4). Die beste Übereinstimmung konnte für die in Abb. 4.2 und 4.3 dargestellte Durchlässigkeitsverteilung erzielt werden, in der nördlich der Fessenheimer Insel eine höher durchlässige Rinne in der Breisgau-Formation angenommen wird (Abb. 4.11). Dadurch wird salzhaltiges Grundwasser bis in den Raum Breisach-Burkheim transportiert. Die vergleichsweise geringeren Durchlässigkeiten im Bereich der Fessenheimer Insel führen dazu, dass hier die beobachteten hohen Chloridkonzentrationen von bis 30 g/l verbleiben.

Die berechnete Chloridverteilung wurde für die Basis des oberen und unteren Teils der Neuenburg-Formation und für die Aquiferbasis ausgewertet (Abb. 4.11). Chloridkonzentrationen über 10 g/l finden sich nur an der Aquiferbasis. Obwohl seit dem Ende des Eintrags aus den Absetzbecken 30 Jahre vergangen sind, befinden sich die hohen Chloridkonzentrationen weiterhin unter den Absetzbecken und nördlich davon. Im Bereich zwischen Breisach und Burkheim liegen die Chloridkonzentrationen zwischen 0,1 und 0,5 g/l. Die von den Kalihalden Buggingen und Heitersheim ausgehenden Salzfahren vereinigen sich mit der aus den Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel. Südlich von Breisach im Bereich des Möhlinwehres werden an der Aquiferbasis bis zu 1,0 g/l. Der Vergleich mit den aus Messung interpretierten Isolinien der Chloridkonzentration zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung. Die Breite der Fahne wird im Bereich Fessenheim gut reproduziert. Der östliche Rand der berechneten Salzkonzentrationen zwischen Breisach und Burkheim stimmt mit den Messwerten vergleichsweise gut überein. Auf der westlichen Seite liegen die erhöhten Salzkonzentrationen etwas näher am Rhein als in der Messung. Für die Beurteilung der zeitlichen Entwicklung der Chloridkonzentration stehen nur Ganglinien im Bereich der hohen Salzkonzentrationen im Süden und am alten Brunnen der Stadt Breisach zur

konstante à l'intérieur de ces structures. Les dispersivités ont été estimées à partir des distances à la source. Sur la base des travaux de synthèse de Gelhar et al. (1992), la dispersivité longitudinale a été estimée à 50 m à proximité des sources, pour atteindre 400m loin de la source.

Les perméabilités de la formation du Breisgau et de la partie inférieure de la formation du Neuenburg ont été modifiées lors du calage du modèle de transport. Les concentrations calculées ont été comparées essentiellement aux concentrations mesurées et aux observations géophysiques (mesures électriques) de 2006 (voir chapitres 3.1 et 3.4). La meilleure comparaison est obtenue à partir des perméabilités présentées dans les figures 4.2 et 4.3 et en ajoutant une zone à forte perméabilité située dans la formation du Breisgau au nord de l'île de Fessenheim (Figure 4.11). Ceci permet de transporter des eaux souterraines salées jusqu'au secteur de Breisach-Burkheim. Le maintien des faibles perméabilités au droit de l'île de Fessenheim permet d'atteindre les concentrations observées de 30 g/l.

La distribution en chlorures calculée à la base des parties supérieure et inférieure de la formation du Neuenburg et à la base de l'aquifère a été interprétée (Figure 4.11). Les concentrations en chlorures supérieures à 10 g/l se trouvent uniquement à la base de l'aquifère. Bien que les entrées au niveau des bassins de rétention aient cessé depuis 30 ans, les concentrations élevées en chlorures se trouvent au droit et au nord de ces bassins. Les concentrations en chlorures se situent entre 0,1 et 0,5 g/l dans le secteur situé entre Breisach et Burkheim. Au sud de Breisach, dans le domaine du barrage de Möhlin à la base de l'aquifère, on atteint jusqu'à 1,0 g/l. Les panaches d'eau salée provenant des terrils de Buggingen et Heitersheim se mélangent à celui provenant des bassins de rétention.

La comparaison entre les iso-valeurs de concentrations mesurées et simulées montre une bonne adéquation d'un point de vue qualitatif.

La limite Est du panache calculé entre Breisach et Burkheim correspond bien aux observations. Les concentrations importantes calculées par le modèle du côté Ouest sont situées un peu plus près du Rhin que celles observées.

Les chroniques de concentrations observées permettant d'évaluer la qualité du modèle sont seulement disponibles dans les zones à fortes concentrations situées au Sud et au niveau de l'ancien puits de Breisach.

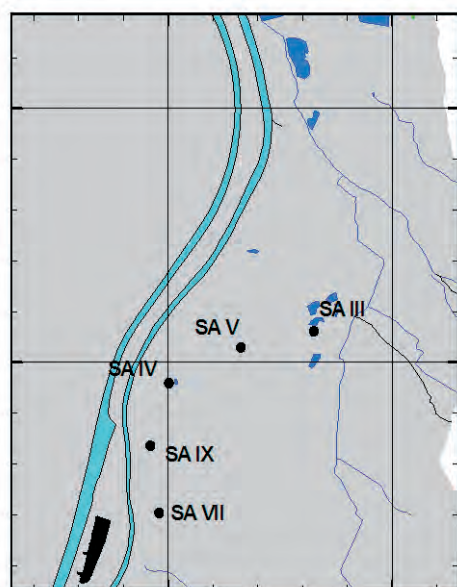
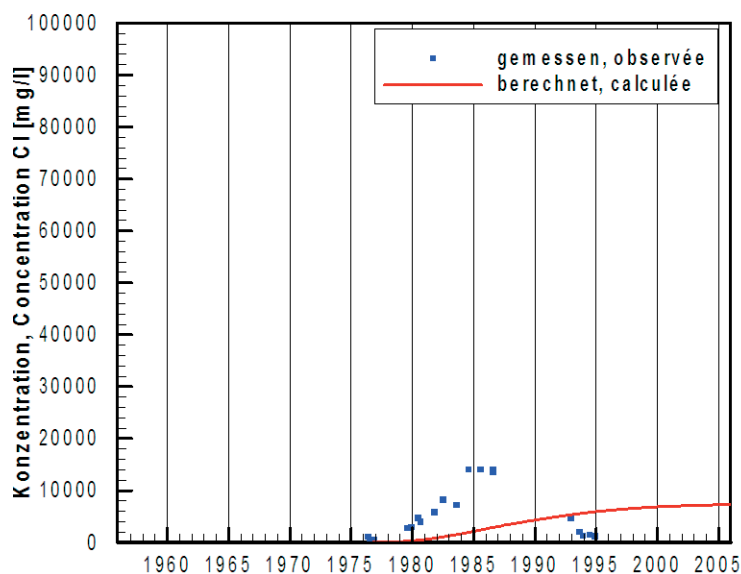


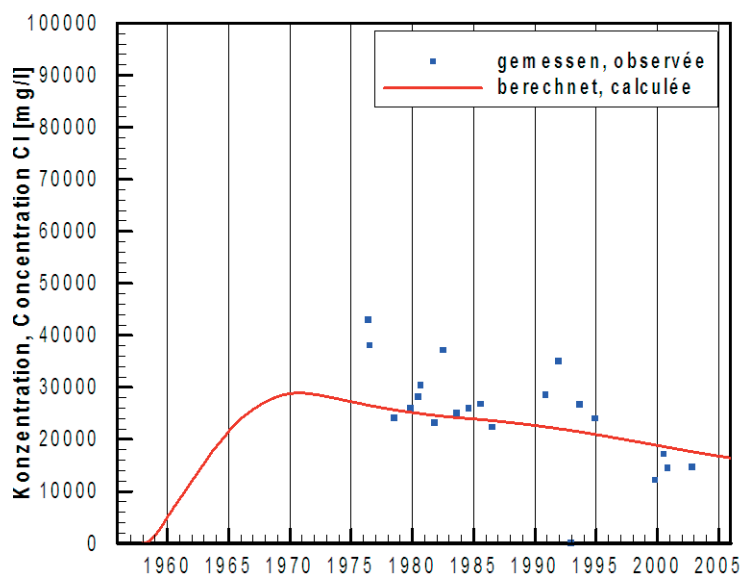
Abbildung 4.12: Langjährige berechnete und gemessene Ganglinien von Chloridkonzentrationen.

Figure 4.12 : Chroniques des concentrations en chlorures mesurées et simulées.

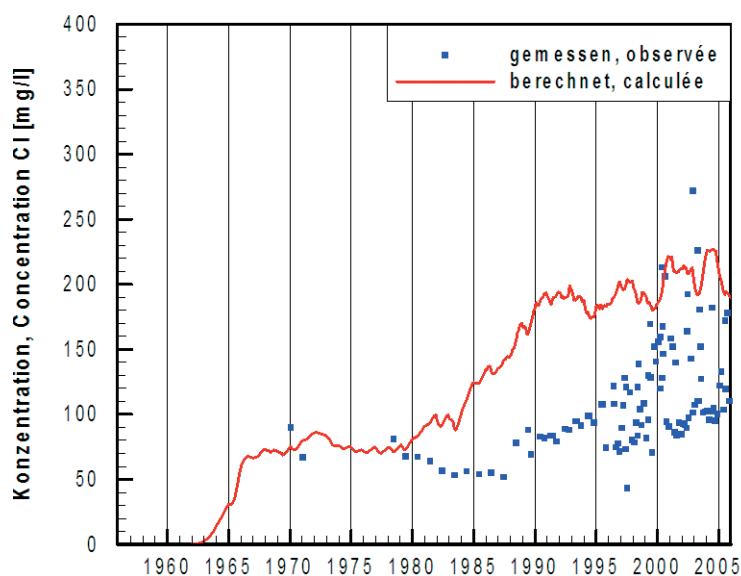
Messstelle, piézomètre: Salz V Hartheim



Messstelle, piézomètre: Salz IX Bremgarten



Messstelle, piézomètre: TB Breisach (alt)



Verfügung. Die gemessenen und berechneten Chloridkonzentrationen sind in Abb. 4.12 dargestellt. An den Messstellen im Abstrom der Absetzbecken wird die gemessene Chloridkonzentration mit Maximalwerten von bis zu 30 g/l im Modell in der Größenordnung sehr gut getroffen. Die langjährige Zeitreihe des Trinkwasserbrunnens in Breisach wird in den 70er Jahren von der Berechnung vergleichsweise gut getroffen. Danach steigen die berechneten Chloridkonzentrationen schneller an als die Messwerte. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass mit dem Modell auch die zeitliche Entwicklung der Verbreitung der Salzkonzentrationen im Grundwasserleiter hinreichend genau nachgebildet wird.

Les chroniques des concentrations en chlorures mesurées et simulées sont présentées sur la figure 4.12. Les concentrations en chlorures observées à l'aval des bassins de rétention et présentant des valeurs maximales pouvant atteindre 30g/l sont bien reproduites par le modèle. La longue chronique de concentration au puits de Breisach est bien simulée pour la période située dans les années 1970. Les concentrations simulées croissent plus rapidement que celles observées après cette période. Dans l'ensemble, on peut considérer que le modèle reproduit bien l'évolution temporelle des concentrations dans le domaine d'étude.

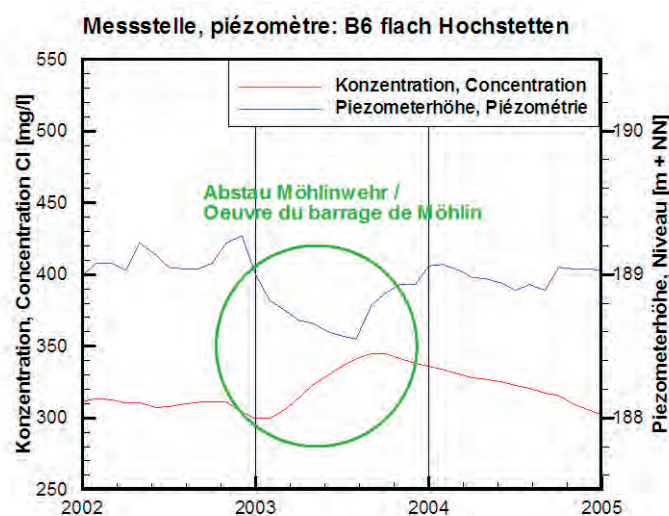


Abbildung 4.13: Berechnete Piézometerhöhe und Chloridkonzentration an der Messstelle Hochstetten zwischen 2002 und 2006 mit den Auswirkungen durch den Abstau des Möhlinwehr im Jahr 2003.

Figure 4.13 : Piézométrie et concentration en chlorures au point de mesure Hochstetten de 2002 à 2005 avec l'effet du barrage de Möhlin en 2003.

Für die Beurteilung der zukünftigen Chloridentwicklung zwischen Breisach und Burkheim spielen lokale Verhältnisse wie z.B. die gemessenen Änderungen der Chloridkonzentration infolge des Abstaus des Möhlinwehres im Jahr 2003 eine wichtige Rolle. Hierzu wurde die Ganglinie der Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Grundwasserstandsänderung an der Mess-stelle B6 Hochstetten ausgewertet (Abb. 4.13). Diese zeigt einen starken Einfluss der veränderten Strömungsverhältnisse infolge des Absenkens des Möhlinwasserspiegels. Der Effekt, dass mehr mit Salz belastetes Grundwasser aus der Tiefe nach oben gezogen wird, mit der Folge, dass sich die Konzentrationen im oberen Teil des Grundwasserleiters erhöhen, konnte im Modell gut nachgebildet werden.

Des modifications locales, comme par exemple l'élévation de la surface libre au niveau du barrage de la Möhlin en 2003, jouent un rôle important sur la dynamique de l'évolution future des teneurs en chlorures entre Breisach et Burkheim. Cet effet est montré sur la chronique de concentrations simulées au niveau du point de mesure B6 Hochstetten en fonction des modifications du niveau piézométrique (figure 4.13). La modification de l'écoulement liée à la baisse du niveau dans la Möhlin influence fortement l'évolution des concentrations en chlorures. Cette augmentation des chlorures en surface est liée à une augmentation des flux d'eau du bas vers le haut de l'aquifère entraînant des eaux à teneurs élevées en chlorures. Ce phénomène est bien reproduit par le modèle.

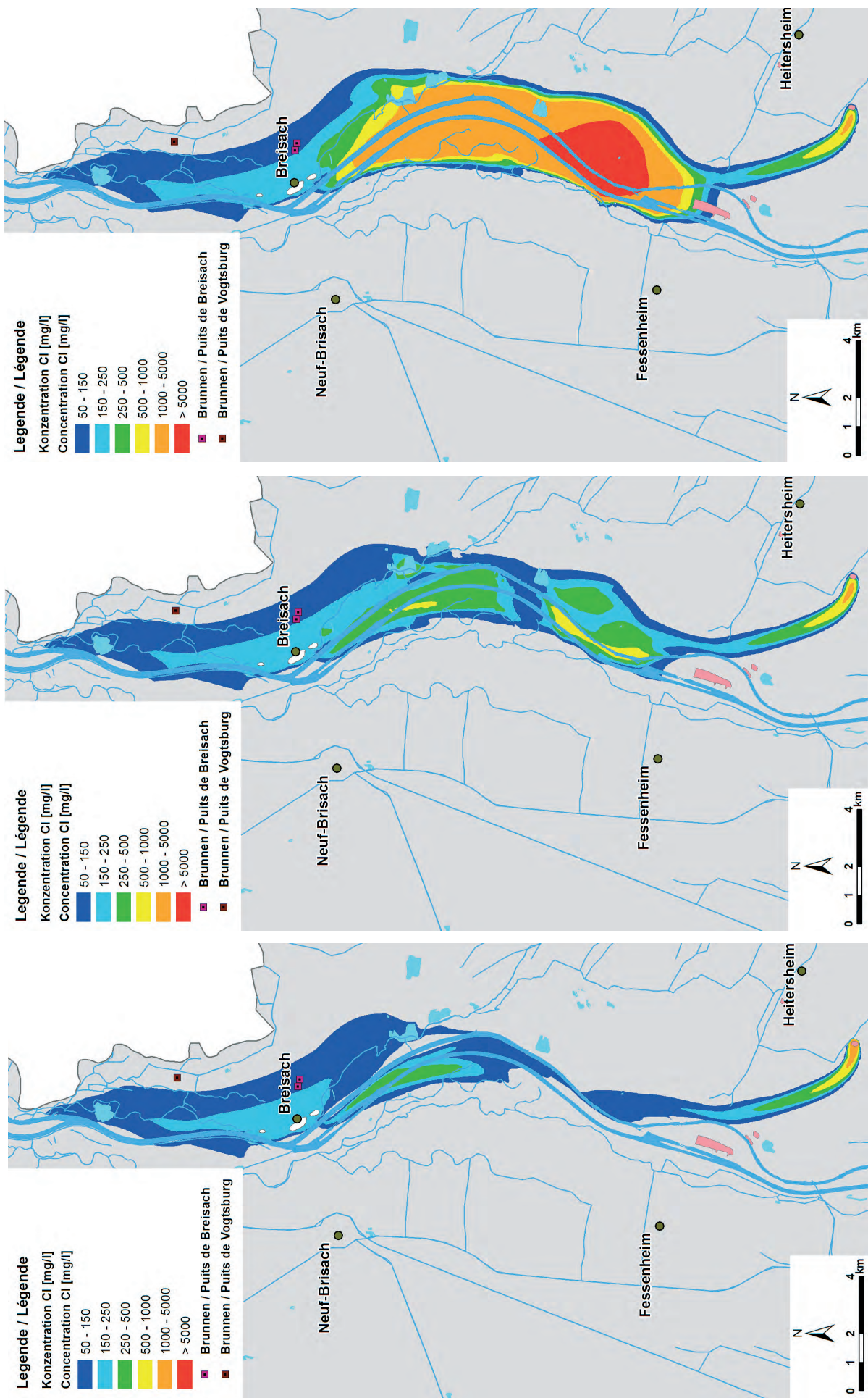


Abbildung 14: Berechnete Chloridverteilung an der Basis des oberen (links) und unteren (Mitte) Teils der Neuenburg-Formation sowie an der Aquiferbasis (rechts) für 2056.
Figure 14 : Distribution des concentrations en chlorures en 2056 à la base de la partie supérieure (à gauche) et inférieure (au milieu) de la formation du Neuenburg et sur le substratum de l'aquifère (à droite).

4.5 Prognose der Salzverteilung

Ein Ziel der Salzwassermodellierung ist, die Veränderung der Salzkonzentrationen über die nächsten 50 Jahre zu prognostizieren. Basierend auf der berechneten Salzverteilung für 2006 wurde der Salztransport unter der Annahme mittlerer konstanter hydrologischer Verhältnisse bis 2056 berechnet. Die berechneten Chloridverteilungen für 2056 sind in *Abb. 4.14* dargestellt. Die prognostizierte Salzkonzentrationsverteilung liegt aufgrund des angenommenen Betriebsbeginns im Jahr 1956 auf der sicheren d.h. ungünstigen Seite, da damit die eingetragene Salzmenge größer ist als bei einem Betriebsbeginn im Jahr 1960. Da die Halde Heitersheim seit 2006 abgedichtet ist, erfolgt hier kein Salzeintrag mehr.

Für die Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel wurde auch kein weiterer Salzeintrag angenommen. Generell wird der Bereich mit hohen Chloridkonzentrationen nördlich der Fessenheimer Insel kleiner. Es erfolgt ein konstanter Austrag aus diesem Bereich, der aber zu keinen signifikant höheren Konzentrationen im Abstrom führt. Insbesondere ergeben sich im weiter nördlich liegenden Gebiet der Wasserefassungen von Breisach und Vogtsburg keine Anzeichen eines steigenden Trends der Chloridkonzentrationen. Wertet man auch Chloridkonzentrationen unter 0,1 g/l aus, so lässt sich feststellen, dass die Chloridfahne mit geringen Konzentrationen auch bis nördlich des Kaiserstuhles, allerdings nur auf der deutschen Seite, reicht. Der Rhein selbst wird aufgrund seiner Vorflutwirkung im Unterwasser des Wehres Marckolsheim nicht unterströmt.

Die von der Kalihalde Buggingen ausgehende Salzfahne wird oberflächennah nördlich der Fessenheimer Insel vom Rhein aufgenommen (*Abb. 4.15 links*). Im mittleren und unteren Bereich des Aquifers vereinigt diese sich mit der von der Fessenheimer Insel ausgehenden Salzfahne (*Abb. 4.15 Mitte, rechts*).

4.6 Szenarienbetrachtungen zum Salztransport Sanierungsszenarien

Mit Hilfe des Salztransportmodells wurden Szenarienrechnungen mit veränderten hydraulischen Randbedingungen durchgeführt. Dabei wurden die in der *Abb. 4.15* dargestellten drei Szenarien untersucht

- Abwehrbrunnen südlich von Breisach
- Sanierungsbrunnen im Bereich hoher Salzkonzentrationen
- Absenkung des Wasserspiegels im Baggersee Hartheim

4.5 Prévision de l'évolution des concentrations en sel

Un des objectifs de la construction du modèle de transport d'eau salée est la prévision de l'évolution de la répartition du sel lors des 50 prochaines années. La simulation a été menée jusqu'en 2056 avec une distribution initiale des concentrations identiques à celle de 2006 et en utilisant une dynamique hydrologique moyenne supposée constante. La répartition des concentrations en chlorures en 2056 est présentée sur la *figure 4.14*. Cette répartition est obtenue en considérant que l'exploitation des bassins de rétention a commencé en 1956. De ce fait, la masse de sel infiltrée est plus importante que si l'on avait pris en compte la date réelle de l'exploitation en 1960. On se place ainsi dans les conditions les plus défavorables.

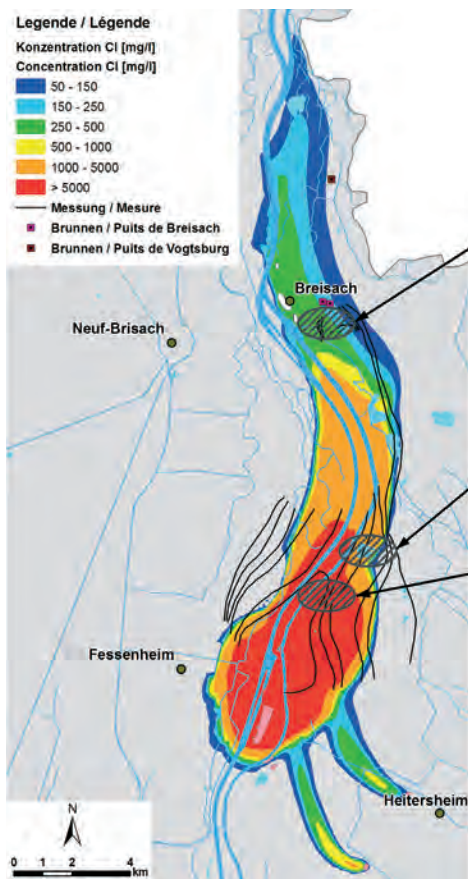
Le terriil de Heitersheim ayant été imperméabilisé en 2006, les apports en sel sont nuls. De même, il n'y a plus d'infiltration au droit des bassins de rétention sur l'île de Fessenheim. L'extension de la zone à très fortes concentrations située au Nord de l'île diminue globalement. Cela implique une exportation de sel de cette zone qui se traduit par aucune baisse significative des concentrations à l'aval de cette zone. Dans les zones plus à l'aval, aucune tendance significative d'évolution des concentrations en chlorures n'est détectée, notamment au niveau des zones de captage de Breisach et Vogtsburg. En analysant les teneurs inférieures à 0,1 g/l, il apparaît que la panache se déplace jusqu'au Nord du Kaiserstuhl, mais uniquement du côté allemand. La nappe ne circule pas sous le Rhin à cause de ces échanges avec la nappe à l'aval du barrage de Marckolsheim.

Le panache d'eau salée issu du terriil de Buggingen circulant dans la partie supérieure de l'aquifère est repris par le Rhin au Nord de l'île de Fessenheim (*figure 4.14, à gauche*). Le panache circulant dans les parties centrales et inférieures de l'aquifère rejoint le panache issu des bassins de rétention (*figure 4.14, milieu et droite*).

4.6 Scénarios concernant le transport de l'eau salée Scénarios de remédiation

Plusieurs scénarios avec des conditions hydrauliques différentes ont été étudiés à l'aide du modèle de transport. Les trois scénarios présentés sur la *figure 4.15* consistent en :

- La mise en place de puits de fixation au sud de Breisach ;
- La mise en place de puits de dépollution dans les zones à fortes concentrations ;
- L'abaissement de la surface libre au niveau dans la gravière de Hartheim.



Abwehrbrunnen südlich von Breisach /
Puits de fixation au Sud de Breisach

Absenkung des Wasserspiegels im Baggersee Hartheim /
Baisse de la surface libre de la gravière d'Hartheim

Sanierungsbrunnen im Bereich hoher Salzkonzentrationen /
Puits de dépollution dans la zone à forte concentrations

Abbildung 4.15: Betrachtete Szenarien zum Salztransport.
Figure 4.15 : Présentation des 3 scénarios.

Bei den Szenarienbetrachtungen wurde die Entwicklung der Chloridfahne über die nächsten 50 Jahre unter der Annahme mittlerer hydrologischer Verhältnisse simuliert.

4.6.1 Abwehrbrunnen südlich von Breisach

Zunächst wurde untersucht, mit welchen Maßnahmen im Bereich Breisach ein Abströmen der Salzfahne weiter nach Norden verringert werden kann. Dazu wurden Abwehrbrunnen südlich des Tiefbrunnens Breisach angenommen, die die von Süden zuströmende Chloridfahne aufnehmen sollen. Mit dem Modell wurde in einer Sensitivitätsstudie die hierfür notwendige Entnahmerate variiert. Es hat sich gezeigt, dass eine vergleichsweise große Entnahme von 3,6 m³/s notwendig ist, mit der sich die Chloridkonzentration am Tiefbrunnen Breisach in etwa halbieren ließe. Durch die damit verbundene große Grundwasserspiegelabsenkung sind weitreichende Auswirkungen zu erwarten. Die Maßnahme würde zwar den Abstrom von chloridhaltigem Wasser verhindern, eine Sanierung des Bereiches weiter im Süden mit sehr hohen Chloridkonzentrationen erfolgt damit jedoch nicht (siehe Abb. 4.16).

L'évolution du panache de chlorure lors des prochaines 50 années est simulée en admettant des conditions hydrologiques moyennes et constantes.

4.6.1 Puits de fixation au Sud de Breisach

Dans un premier temps, des solutions permettant de réduire l'extension du panache au Nord de la zone Breisach ont été étudiées. Des puits de fixation implantés au Sud du puits profond de Breisach ont été envisagés afin de capturer le panache provenant du Sud.

Les débits de pompage ont été définis par analyse de sensibilité à l'aide du modèle. Un débit d'environ 3,6 m³/s est nécessaire pour diminuer de moitié les concentrations en chlorures dans le puits de Breisach.

Ce pompage pourrait se traduire par une baisse de la piézométrie sur un secteur assez étendu. Ces mesures de fixation empêchent l'extension vers l'aval du panache mais ne permettent pas d'améliorer la situation dans les zones à très fortes concentrations (voir figure 4.16).

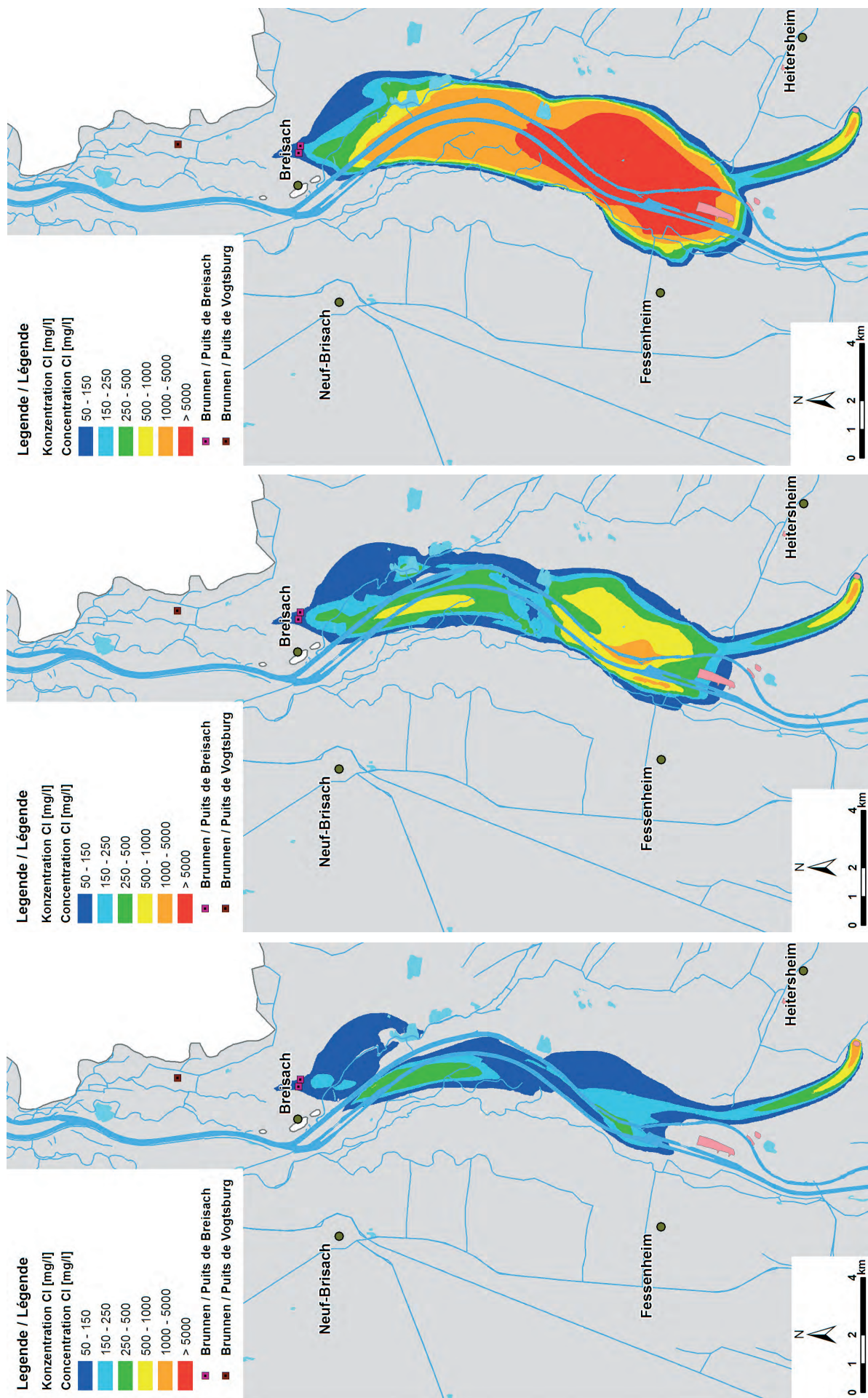


Abbildung 4.16: Berechnete Chloridverteilung an der Basis des oberen (links) und unteren (Mitte) Teils der Neuenburg-Formation sowie an der Aquiferbasis (rechts) für 2021 unter der Annahme von Abwehrbrunnen südlich Breisach.

Figure 4.16 : Distribution des concentrations en chlorures à la base de la partie supérieure (à droite) et inférieure (au milieu) de la formation du Neuenburg et sur le substratum de l'aquifère (à droite) en 2021 en présence des puits de fixation au sud de Breisach.

4.6.2 Sanierungsbrunnen im Bereich hoher Salzkonzentrationen

In einer weiteren Szenarienbetrachtung wurden Sanierungsbrunnen im Bereich hoher Salzkonzentrationen im unteren Teil des Grundwasserleiters angenommen. Um das eingetragene Chlorid aus dem Bereich nördlich der Absetzbecken der Fessenheimer Insel abzupumpen wurde eine Grundwasserentnahme von 1,54 m³/s aus 14 Brunnen angesetzt. Auch hier ergeben sich weitreichende Grundwasserspiegelabsenkungen (siehe Abb. 4.17).

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die hohen Chloridkonzentrationen durch die Pumpmaßnahme innerhalb von 20-30 Jahren deutlich abnehmen. Nach 50 Jahren Pumpbetrieb ergeben sich die in Abb. 4.18 dargestellten Chloridverteilungen im Grundwasserleiter. Danach liegt oberflächennah praktisch kein Chlorid mehr vor. Lediglich im Abstrom der Halde Buggingen bleibt nach diesem Szenario die Salzflanke bestehen, die vom Rhein nördlich der Absetzbecken aufgenommen wird. Es ist jedoch davon auszugehen, dass im Betrachtungszeitraum Sicherungsmaßnahmen an der Halde Buggingen durchgeführt werden, die dort den Chlорideintrag beenden. An der Aquifersohle sind noch maximale Chloridkonzentrationen von ca. 1 g/l zwischen den Sanierungsbrunnen und dem Kulturwehr Breisach zu erkennen. Nördlich des Kulturwehres zwischen Breisach und Burkheim ist das Salz ausgetragen und es findet kein zusätzlicher Zustrom von Süden mehr statt, so dass mit dieser Maßnahme eine erfolgreiche Sanierung der Salzkontamination verbunden ist. Auch bei dieser Sanierungsvariante sind durch die damit verbundenen großen Grundwasserspiegelabsenkungen weitreichende Auswirkungen zu erwarten.

4.6.2 Puits de dépollution dans la zone à forte concentrations

Une autre action de restauration consiste à implanter des puits profonds dans la zone fortement contaminée par les chlorures. 14 puits pour un débit de 1,54 m³/s permettant de prélever les chlorures infiltrés au niveau des bassins de rétention. Ces pompes se traduiront aussi par une baisse des niveaux piézométriques à grande échelle (figure 4.17).

Les simulations ont montré une baisse significative des teneurs en chlorures après une durée de pompage de 20 à 30 ans. La répartition des chlorures dans le domaine après 50 ans de pompage est présentée dans la figure 4.18.

Les chlorures ont presque disparus dans les horizons superficiels. Ce scénario montre que le panache issu du terril de Buggingen persiste et est capturé au niveau des bassins de rétention. On peut supposer que pendant cette période de 50 ans, des mesures seront prises au niveau de ce terril pour arrêter les infiltrations de sel. Des concentrations maximales d'environ 1 g/l persistent au niveau du substratum entre les puits de dépollution et le puits de Breisach. Il n'y a plus d'eau salée au Nord du barrage entre Breisach et Burkheim et plus d'apport de sel dans cette zone.

On peut considérer que cette solution permet une bonne restauration de l'eau souterraine dans ce domaine. Cependant, d'importants rabattements de la nappe à grande échelle sont à prévoir.

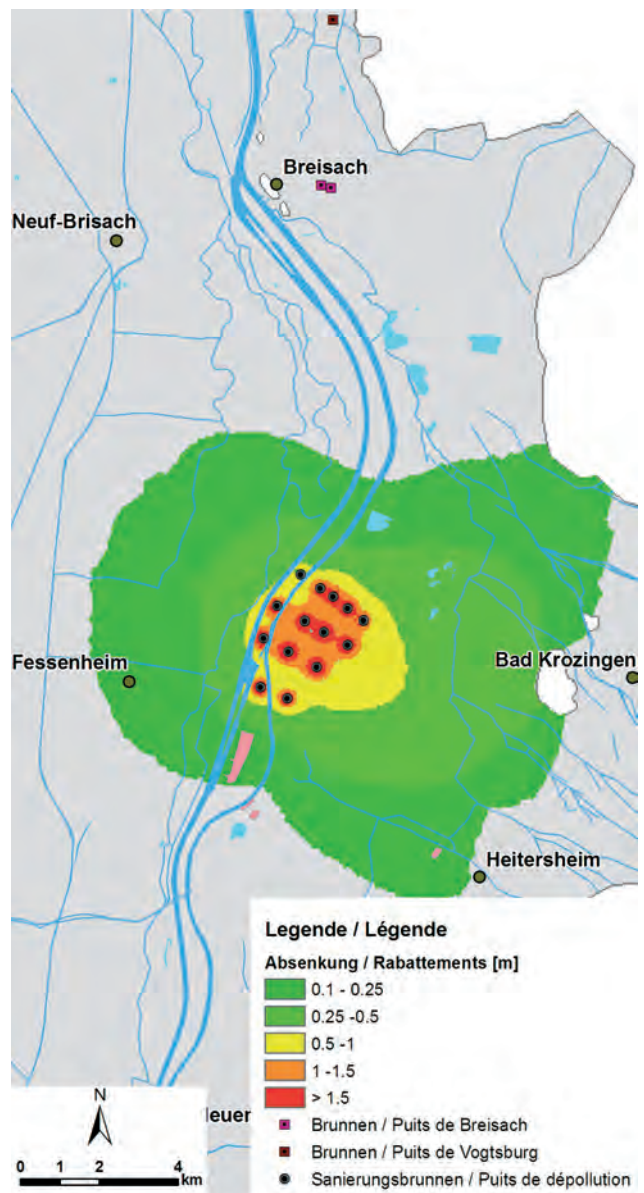
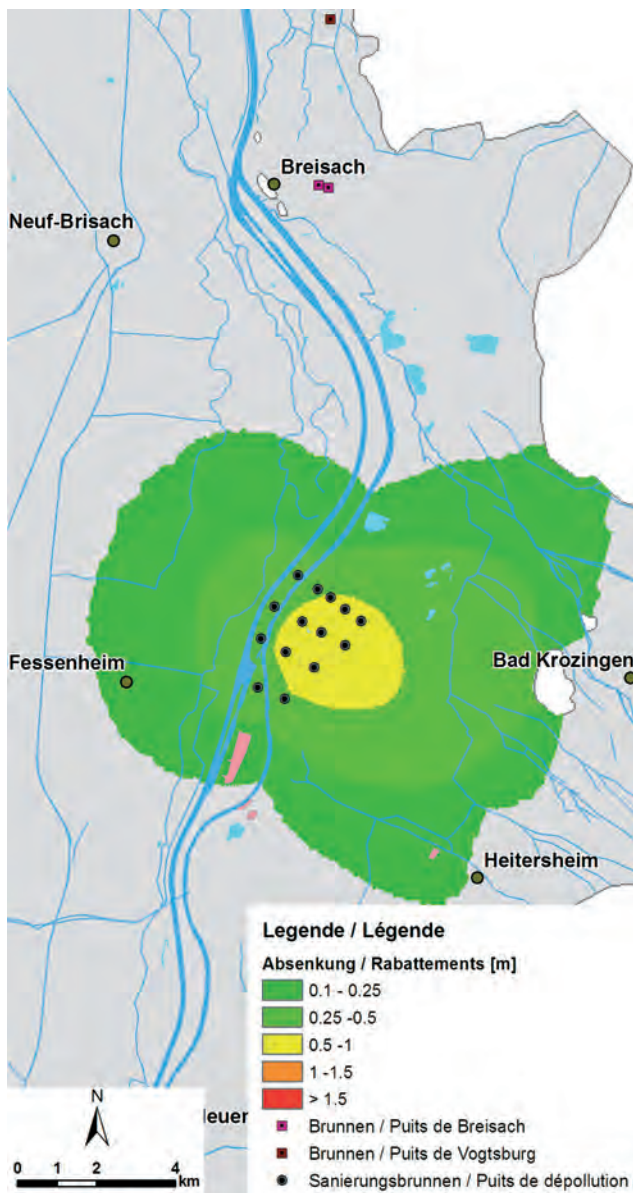
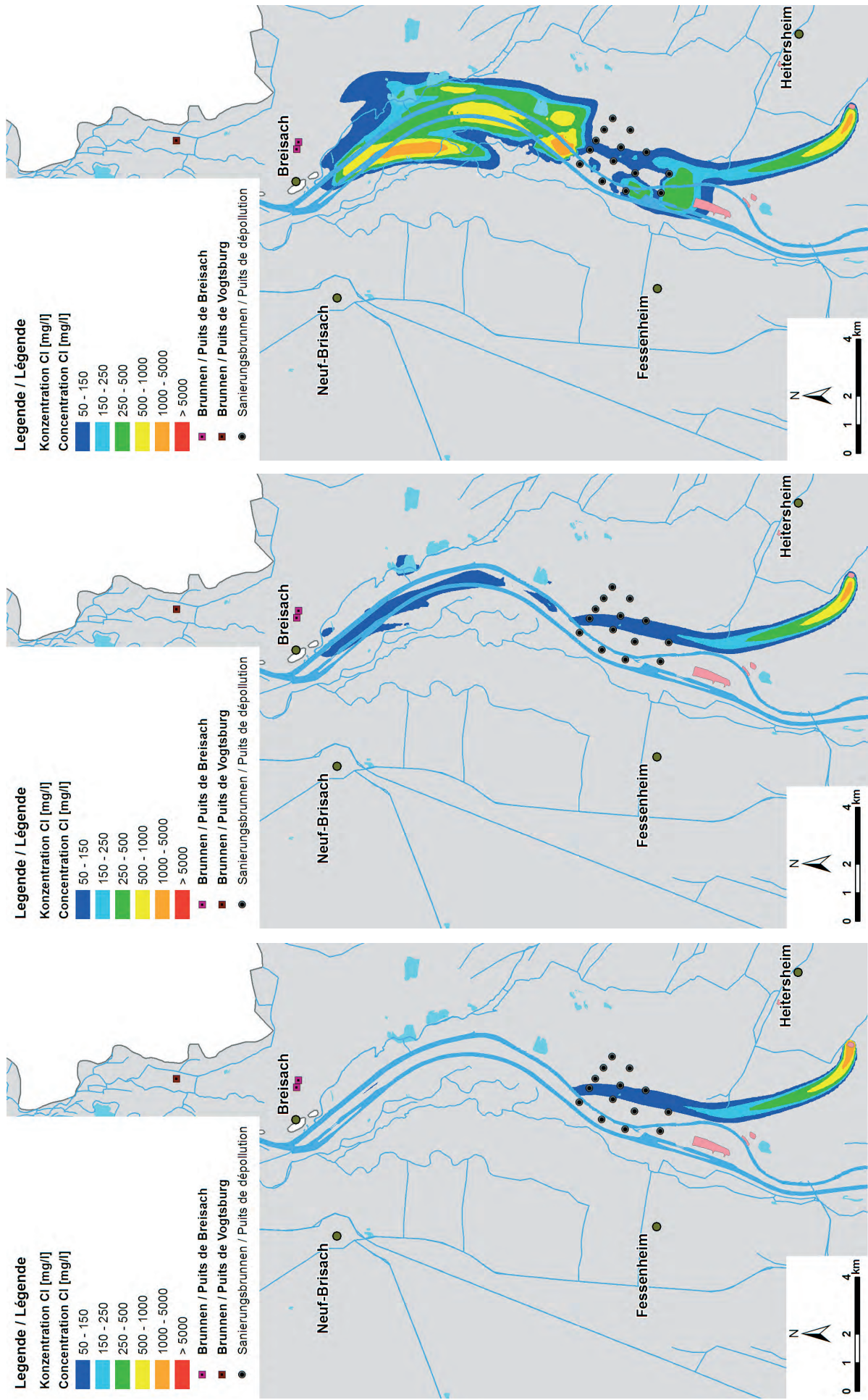


Abbildung 4.17: Berechnete Absenkungen in der Neuenburg-Formation (links) und der Breisgau-Formation (rechts) unter der Annahme von Sanierungsbrunnen im Bereich der hohen Salzkonzentrationen.

Figure 4.17 : Rabattements de la nappe calculés au niveau de la formation du Neuenburg (à gauche) et du Breisgau (à droite) consécutifs aux pompages dans la zone à fortes concentrations en chlorures.



4.6.3 Absenkung des Wasserspiegels im Baggersee Hartheim

Eine weitere Variante der Sanierung ist die Entnahme von Grundwasser aus dem Baggersee Hartheim und seine Ableitung in den Rhein. Dazu wurde der bestehende Baggersee Hartheim im Modell auf 100 m vertieft und der derzeitige Seewasserspiegel um 0,7 m abgesenkt. Es ergibt sich dann ein zusätzlicher Zustrom zum Baggersee von 1 m³/s, der bei dem gewählten Seewasserspiegel gerade noch in den Rhein mit einem Wasserspiegelunterschied von 0,1 m bei Mittelwasser abfließen kann.

Die Modelluntersuchungen zeigen, dass die Zuströmung zum Baggersee nicht ausreicht, um das schwere Salzwasser von der Aquifersohle in den Baggersee zu ziehen. Die hohen Salzkonzentrationen nördlich der Absetzbecken der Fessenheimer Insel verringern sich nur unwesentlich gegenüber der Prognosebetrachtung ohne Sanierungsmaßnahmen. Dies bedeutet, dass eine vertiefende Auskiesung des bestehenden Baggersees und Absenkung des Wasserspiegels zu keiner wirksamen Sanierung des hoch kontaminierten Bereichs führt. Im oberflächennahen Abstrom ergibt sich eine gewisse Verbesserung, die sich geringfügig auch bis in den Raum Breisach auswirkt.

4.6.4 Einfluss der Flutung des Retentionsraumes Kulturwehr Breisach

Da im Bereich der Salzfahne der Einsatz des Retentionsraumes Kulturwehr Breisach vorgesehen ist und mit dem Modell der Einfluss veränderter hydraulischer Verhältnisse – wie am Beispiel des Möhlinabstaus gezeigt wurde – gut nachgebildet werden kann, wurden Szenarienrechnungen für die Flutung des Retentionsraumes Kulturwehr Breisach durchgeführt. Dabei wurde ein entsprechend des Betriebsreglements maßgebliches Hochwasserereignis mit und ohne Flutung betrachtet und die Auswirkungen infolge der Retentionsmaßnahme ausgewertet.

Es wurden zwei aufeinanderfolgende Rheinhochwässer betrachtet, die entsprechend dem vorgesehenen Reglement zu den regelmäßigen Flutungen des Retentionsraumes mit Einsatz der Grundwasserhaltungsmaßnahmen führen. Dieser extreme Lastfall wurde gewählt, da grundsätzlich davon ausgegangen werden kann, dass kleinere und somit häufigere Flutungen ohne Grundwasserhaltungsmaßnahmen auf die Chloridbelastung verdünnend wirken. Beim betrachteten Lastfall infiltriert salzfreies Wasser hauptsächlich am binnenseitigen Rand des Retentionsraumes in den Grundwasserleiter. Dieses salzfreie Wasser verdrängt die Salzfahne und führt zu einer Verringerung der Chloridkonzentration unter dem Retentionsraum

4.6.3 Baisse de la surface libre de la gravière d'Hartheim

Une autre variante étudiée consiste à faire baisser le niveau de la gravière d' Hartheim en la connectant au Rhin afin d'extraire des eaux souterraines. Au niveau de la modélisation, la profondeur de la gravière a été augmentée pour atteindre 100 m et le niveau de la surface libre baissé de 0,7 m. Le flux d'eaux souterraines drainés par la gravière est ainsi augmenté de 1 m³/s. Cela permet tout juste d'évacuer l'eau dans le Rhin grâce à une différence de niveau des surfaces libres de 0,1 m en régime hydraulique moyen.

Les simulations montrent que cet effet de drainage est insuffisant pour attirer les eaux fortement concentrées en sel. Ces fortes concentrations localisées au Nord des bassins de rétention diminuent à peine plus vite que la diminution prévue sans aucune mesure de restauration. Cela montre que l'extension de la gravière en profondeur et l'abaissement du niveau de sa surface libre ne permettent pas la décontamination de la zone à fortes concentrations. Une légère amélioration est détectée à l'aval, dans la partie supérieure de la nappe, amélioration pouvant atteindre le secteur de Breisach.

4.6.4 Influence de l'inondation du polder près du barrage de Breisach

Il est prévu d'installer un polder dans la zone du panache de chlorures au niveau du barrage de Breisach.

Le modèle étant capable de bien reproduire les effets d'aménagements hydrauliques comme le barrage sur la Möhlin, une simulation prévisionnelle a été menée pour évaluer l'impact d'une inondation sur le polder. Des simulations ont été menées avec et sans inondation selon les principes de gestion du polder qui seront en vigueur lors des périodes de hautes eaux, pour analyser les effets de ces inondations.

Deux crues consécutives du Rhin ont été considérées qui, selon les principes de gestion prévus, conduiront à une mise en eau du polder. Ce cas extrême a été choisi afin de pouvoir évaluer l'impact maximum et en admettant que des crues de plus faibles amplitudes et donc plus fréquentes auront moins d'effets.

Pour le cas étudié, une infiltration d'eau douce dans les eaux souterraines aura lieu principalement aux limites du polder. L'infiltration d'eau douce conduit à une baisse des concentrations en chlorures au droit du polder, et, plus tard, en aval du polder (voir figure 4.19). Les concentrations en chlorures baissent au niveau du polder et de Hochstetten pendant la période d'inondation pour retrouver progressivement leur

und mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung auch in seinem Abstrom (siehe Abb. 4.19). Während im Retentionsraum und an der Grundwasserhaltung in Hochstetten die Chloridkonzentrationen bereits während der Flutung des Retentionsraumes abnehmen und dann vergleichsweise schnell wieder auf das ursprüngliche Niveau ansteigen, sind die geringsten Konzentrationen im Tiefbrunnen Breisach ca. 180 Tage nach der zweiten Retention zu beobachten. Danach steigen auch hier die Chloridkonzentrationen wieder bis auf die ursprüngliche Höhe an. In Breisach nehmen die Konzentrationen bis zum Ende der Berechnung ab. Es ist zu erwarten, dass sie auch hier wieder auf das ursprüngliche Niveau ansteigen. Aufgrund der Entfernung zum Retentionsraum dauert dies jedoch deutlich länger als im unmittelbaren Umfeld. Ein Anstieg der Chloridgehalte infolge der Wasserhaltungen in Hochstetten und Breisach ist nicht erkennbar, da die Pumpdauer vergleichsweise kurz ist und die Pumpraten im Vergleich zu den Infiltrationsraten im Retentionsraum gering sind. Ohne die Retentionsmaßnahme, d.h. nur mit einer Hochwasserwelle im Rhein, bleiben die Chloridkonzentrationen über den Betrachtungszeitraum näherungsweise konstant.

niveau initial après l'inondation. Au niveau du puits profond de Breisach, les concentrations baissent 180 jours après la deuxième crue pour retrouver également leur niveau initial d'avant inondation. Les concentrations baissent au niveau de Breisach jusqu'à la fin de la période de simulation. Un retour à la situation initiale est probable. Compte tenu de la distance au polder, ces effets ont lieu bien plus tard. Les teneurs en chlorures suite au stockage des eaux à Hochstetten ne sont pas modifiées, les durées de pompage sont courtes et les débits d'infiltration sont faibles comparés aux débits d'infiltration au niveau du polder. En l'absence de stockage des eaux pendant les crues, les concentrations en chlorures restent à peu près constantes pendant la période simulée.

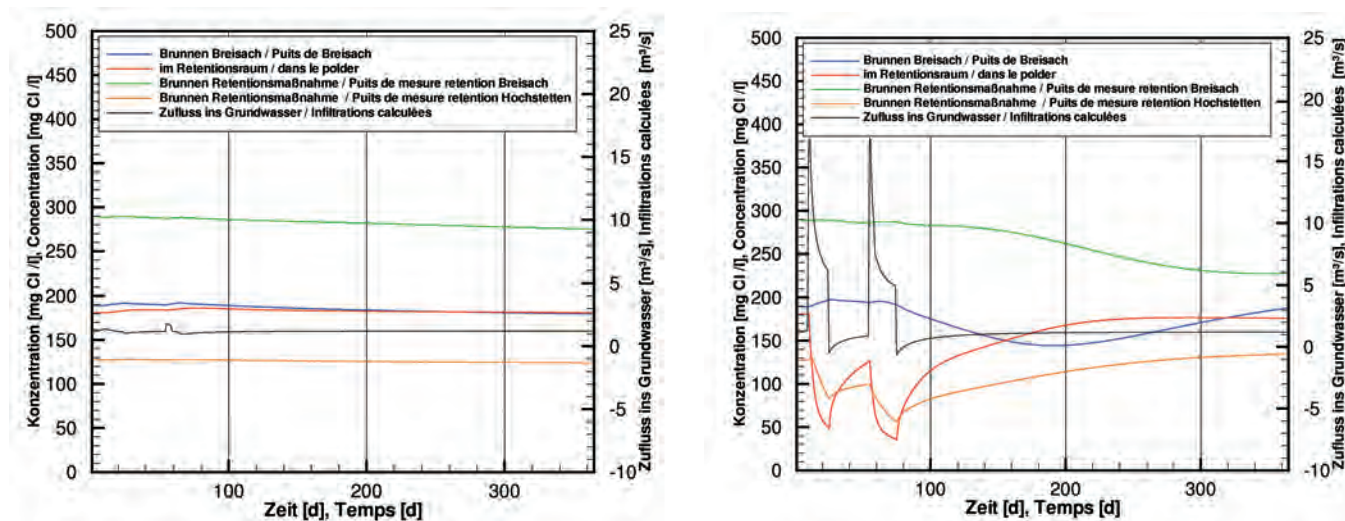


Abbildung 4.19: Berechnete Chloridkonzentrationen in den Schutzbrunnen bei Breisach und Hochstetten, im Tiefbrunnen Breisach und im Retentionsraum, auf der Basis berechneter Infiltrationsraten des Rheins, links ohne Retention und rechts mit Retention.

Figure 4.19 : Concentrations en chlorures simulées au niveau du puits Schutzbrunnen près de Breisach et Hochstetten, du puits profond de Breisach et dans la zone de stockage, suite aux infiltrations calculées des eaux du Rhin (à gauche, sans polder, à droite avec stockage dans le polder).

Aus den in Abb. 4.20 dargestellten berechneten Chloridverteilungen geht hervor, wie stark sich die Chloridfahne durch die Retentionsmaßnahme verdünnt. So liegen die Chloridgehalte im Bereich des Retentionsraumes nach 290 Berechnungstagen in

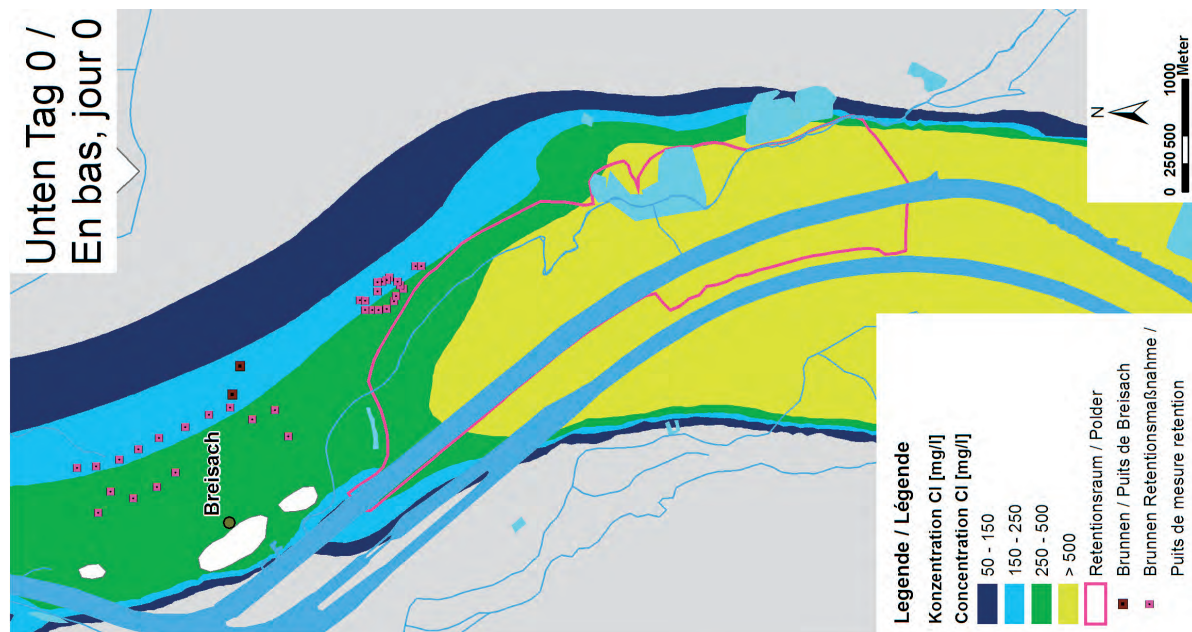
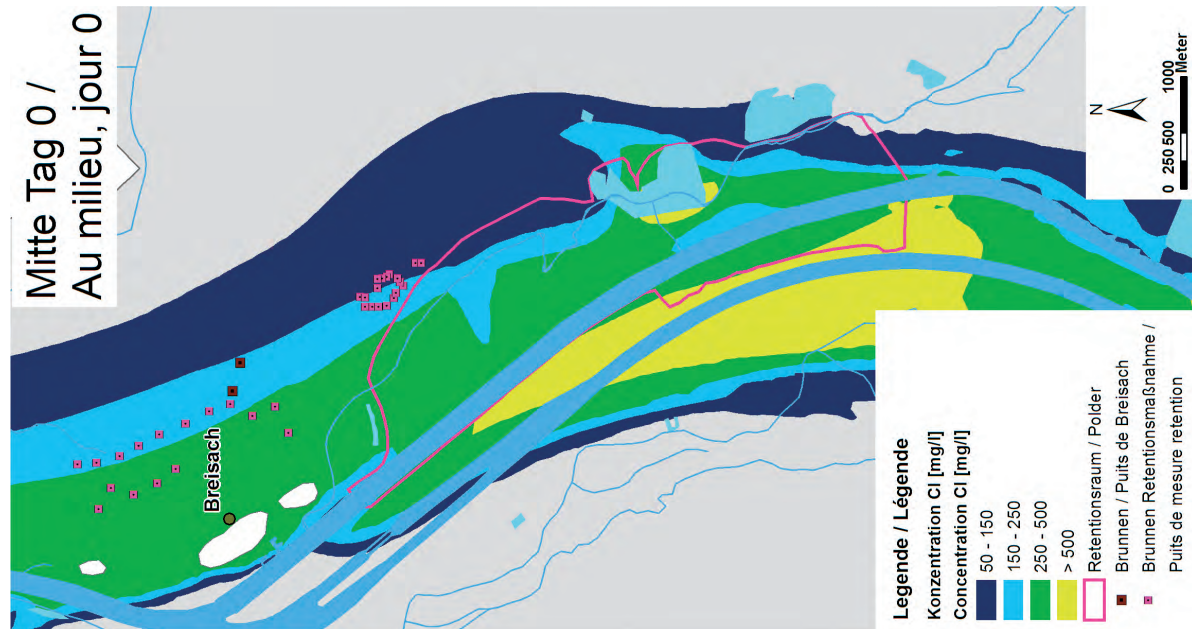
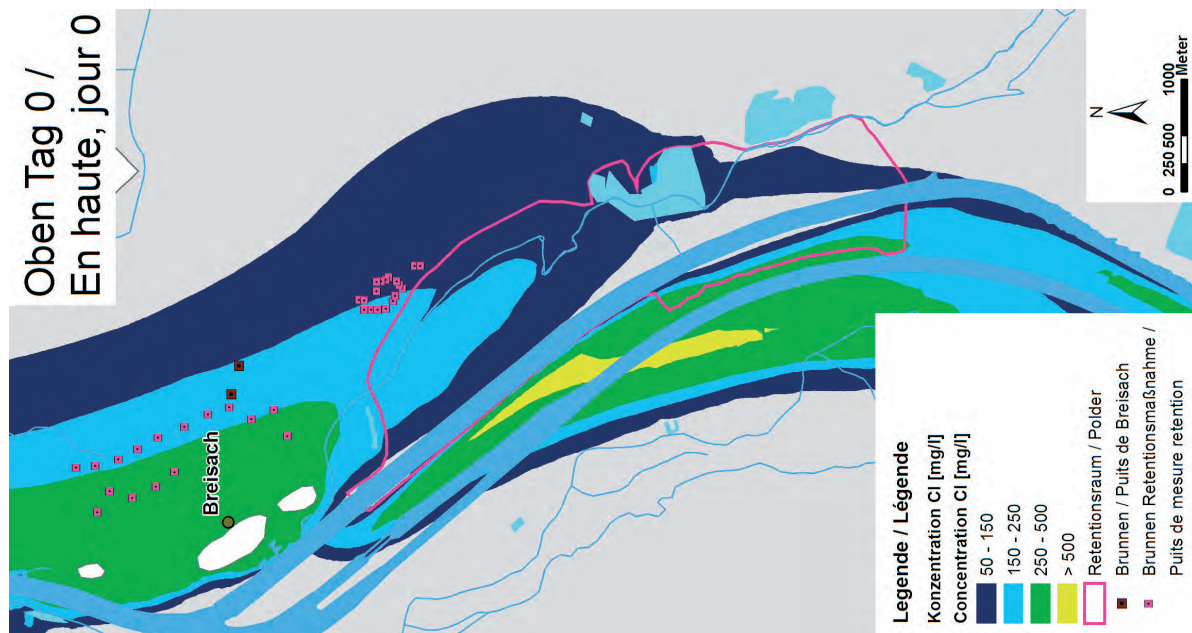
L'effet du stockage de l'eau sur la dilution des chlorures obtenus par simulation est présenté sur la figure 4.20. Dans ce secteur, les concentrations retrouvent leur niveau initial 290 jours après les crues. Au Nord de ce secteur, dans la région de Breisach, la

etwa in derselben Größenordnung wie vor der Retention. Nördlich des Retentionsraumes im Bereich Breisach ist die Verdünnung des salzhaltigen Wassers durch das Rheinwasser auch nach 290 Berechnungstagen deutlich zu erkennen, die Chloridkonzentrationen nehmen deutlich ab. Diese Wirkung der Flutung des Retentionsraumes ist dort sogar an der Aquiferbasis deutlich sichtbar.

Die Simulation der Retentionsmaßnahme zeigt, dass die Infiltration im Retentionsraum auch bei Einsatz der Wasserhaltungsmaßnahmen eine Verringerung der Chloridkonzentrationen erwarten lässt. Durch die Infiltration von Rheinwasser nehmen die oberflächennahen Chloridkonzentrationen im Abstrom des Retentionsraumes während und nach der Retentionsmaßnahme ab. Sie steigen danach aber wieder auf das Ausgangsniveau an.

dilution de l'eau salée par les eaux du Rhin se voit nettement après 290 jours et conduit à une baisse des teneurs en chlorures. Cet effet se voit également sur les concentrations en chlorures au niveau du substratum.

La simulation de ces mesures de stockage montre que les effets attendus sur les concentrations en chlorures se traduisent par une baisse des concentrations. Dans les parties superficielles de la nappe et à l'aval des zones de stockage, les concentrations baissent suite à l'infiltration de l'eau du Rhin pendant et après les périodes de rétention. Ces concentrations retrouvent plus tard leur niveau initial.



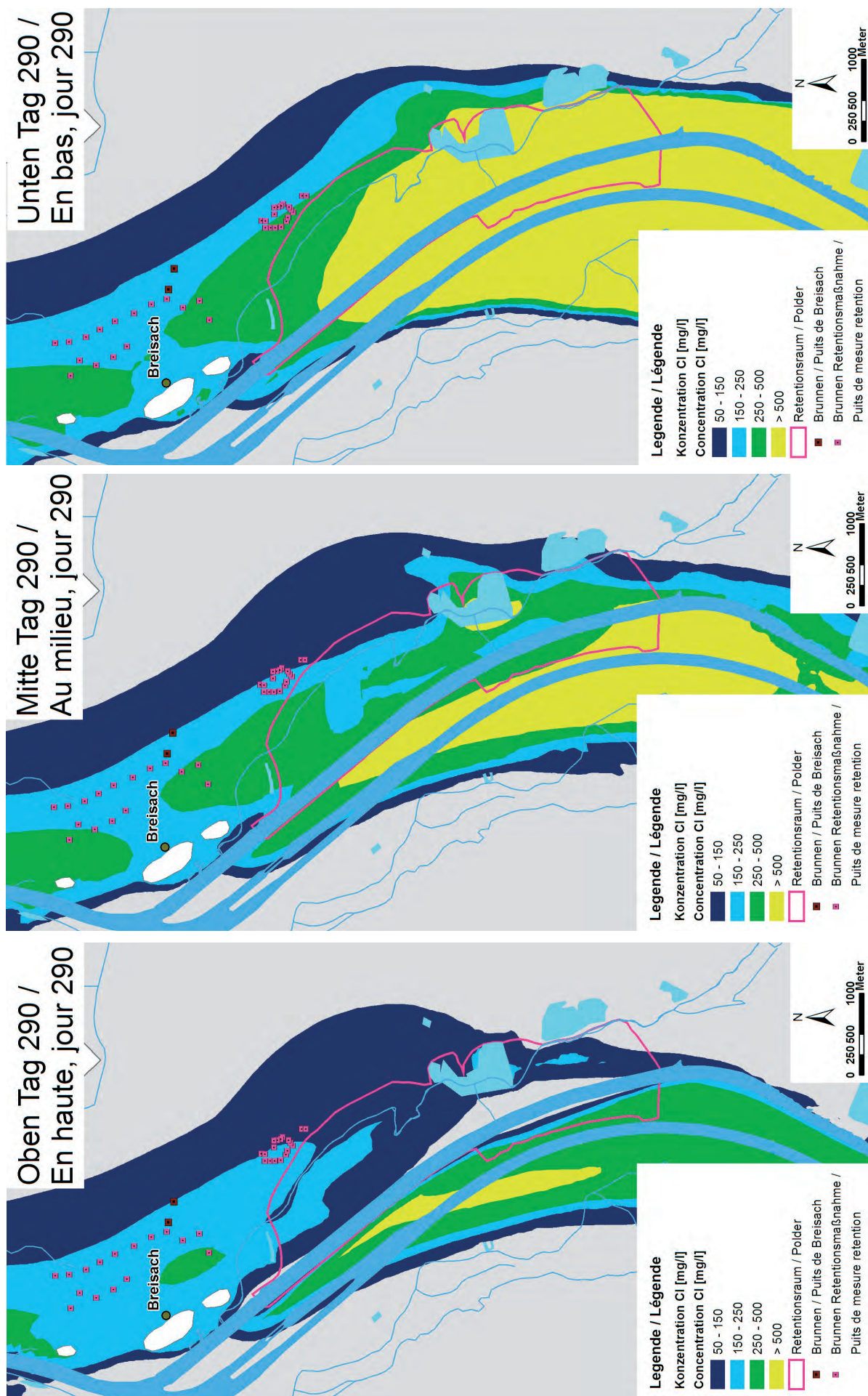


Abbildung 4.20: Berechnete Verteilungen der Chloridkonzentrationen vor der Retention (nach 0 Tagen) und nach 290 Berechnungstagen.
Figure 4.20 : Distribution des chlorures simulés avant le stockage (jour 0) et 290 jours après stockage.

5 Bewertung und Ausblick

5.1 Bewertung

Mit dem numerischen Grundwassermodell wurde für das Gebiet zwischen Fessenheim und Burkheim erstmals ein grenzüberschreitendes Werkzeug geschaffen, mit dem zum einen die heutige Chloridverteilung im Grundwasser nachgebildet und zum anderen ihre zukünftige Entwicklung auch unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien prognostiziert werden kann. Um die erforderlichen Eingangsgrößen und Validierungsgrundlagen für ein aussagekräftiges numerisches Grundwassermodell zu verbessern, wurden aufbauend auf den Erkenntnissen vorangegangener grenzüberschreitender Projekte verschiedene Erkundungsmaßnahmen durchgeführt. Insbesondere die geoelektrischen Messungen lieferten wichtige tiefenbezogene Informationen über die Chloridverteilung, die durch die Ergebnisse der hydrochemischen Übersichtsbeprobungen und der neu eingerichteten Grundwassermessstellen bestätigt wurden. Durch die neuen Erkenntnisse konnten auch die Aquifergeometrie und die Aquiferparameter als wichtige Eingangsgrößen für das Grundwassermodell detaillierter dargestellt werden.

Es ist im Rahmen der Modellierung gelungen, die derzeitige räumliche und tiefendifferenzierte Verteilung der Chloridbelastung mit den gemessenen Werten hinreichend gut in Übereinstimmung zu bringen. Hierzu trugen wesentlich die detaillierten Daten zum Chlorideintrag aus den französischen Absetzbecken bei, die von den Betreibern erstmals zur Verfügung gestellt wurden. Nach einer groben Bilanzierung der in der Vergangenheit in das Grundwasser eingetragenen Chloridmengen ist davon auszugehen, dass über 95 % des Eintrags aus den französischen Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel stammen. Die Gesamtbetrachtung der durchgeführten Erkundungsmaßnahmen sowie der Messdaten und Eingangsgrößen zeigt, dass mit Hilfe des Grundwassermodells eine belastbare Aussage zur Herkunft der Salzbelastung und zur Verbreitung der Salzfahren gemacht werden kann. Außerdem können erstmals Einschätzungen für Bereiche vorgenommen werden, in den keine Informationen aus Messwerten zur Verfügung stehen.

Zur Unterscheidung verschiedener Grundwasserkomponenten in geogene und anthropogene Einträge – und damit auch der Chloridquellen – wurden die Wässer hydrochemisch und isotopenhydrologisch charakte-

5. Conclusions et perspectives

5.1 Conclusions

Le modèle hydrodynamique mis au point pour le secteur compris entre Fessenheim et Burkheim constitue le premier outil transfrontalier permettant de simuler les panaches actuels de chlorures dans les eaux souterraines et de prévoir leur évolution future en fonction de divers scénarios. Différents types de travaux de reconnaissance ont été réalisés, en se basant sur les connaissances acquises dans de précédents projets transfrontaliers, afin d'améliorer les paramètres d'entrée et les données de validation du modèle hydrodynamique et le rendre ainsi plus fiable. Les campagnes de mesures géophysiques électriques, en particulier, ont apporté des informations très utiles sur la localisation en profondeur des panaches salés, informations qui ont été confirmées par les résultats des campagnes de prélèvements d'eaux souterraines ainsi que par le forage des nouveaux piézomètres. Ces travaux ont également permis de préciser la géométrie et les propriétés de l'aquifère qui sont les données de base les plus importantes pour réaliser une modélisation hydrodynamique.

Il a été possible de reproduire par la modélisation la répartition des panaches d'eaux salées tant en surface qu'en profondeur de façon relativement satisfaisante, avec des concentrations proches des valeurs mesurées. Il était très important pour cela de pouvoir disposer des données détaillées sur les quantités de saumure effectivement déversées dans les bassins français, qui ont été mises à disposition pour la première fois par les exploitants. En effet un bilan rapide des quantités de chlorures déversées par le passé indique que plus de 95% provenaient des bassins-tampons français de l'île de Fessenheim. Un examen de l'ensemble des travaux de reconnaissance, des données mesurées et des paramètres d'entrée choisis indique que le modèle hydrodynamique permet de donner des réponses fiables sur l'origine et l'évolution des panaches d'eaux salées. En outre il est possible pour la première fois de donner des estimations pour des secteurs où nous ne disposons pas de points de mesure.

Les eaux souterraines ont fait l'objet de caractérisations géochimiques et isotopiques dans le but de distinguer parmi différentes composantes des apports d'origine géologique ou anthropique. Malgré

risiert. Trotz des ausgeweiteten Untersuchungsumfanges konnten keine eindeutigen Marker identifiziert werden. Einen aussichtsreichen Ansatz bietet die kombinierte Betrachtung der Spurenstoffe Rubidium und Strontium mit Befunden der Isotopenmessungen. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die geogenen Chloridquellen eine untergeordnete Rolle für die Gesamtbelastung des Grundwassers mit Chlorid spielen. Das numerische Grundwassertransportmodell ist gut geeignet, um die drängenden Fragen nach der weiteren Entwicklung der Chloridbelastung und möglichen Einschränkungen für die Grundwassernutzung zu beantworten. Mit Hilfe von Prognose- und Szenarienrechnungen können die Auswirkungen der Chloridbelastung auf bestehende sowie künftige Maßnahmen und Nutzungen aufgezeigt, sowie Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen untersucht werden. Mit dem Modell ist es möglich, Handlungsempfehlungen zum Schutz der Grundwasserressource und zur Vermeidung von Fehlinvestitionen zu geben.

Die durchgeführten Untersuchungen sowie die Prognose- und Szenarienrechnungen erlauben folgende Bewertungen:

5.1.1 Chloridverteilung 2006, aktuelle Gefährdungen für Nutzungen

Anhand der Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen sowie der geoelektrischen Messungen konnte erstmals für das gesamte Projektgebiet tiefendifferenziert die Verteilung der aktuellen Chloridkonzentrationen im Grundwasser dargestellt und im Grundwassermodell nachvollzogen werden. Der Schwerpunkt der Belastung mit sehr hohen Chloridwerten bis zu 25 g/l liegt nördlich der Absetzbecken auf der Fessenheimer Insel. Die hohen Konzentrationen bewegen sich nur sehr langsam unter dem Rhein nach Norden. Aus diesem Salzpool wird Chlorid ausgetragen und entlang des Rheins nach Norden verfrachtet. Ein Abdriften nach Westen in das sogenannte Becken von Geiswasser ist im Modell nicht erkennbar. Durch die neuen Messstellen wurden erstmals auf französischer Seite erhöhte Chloridgehalte im unteren und mittleren Aquiferabschnitt zwischen dem Grand Canal d'Alsace und dem Rhein bis auf die Höhe von Geiswasser – ca. 7 km nördlich der Absetzbecken – belegt. In 50 m Tiefe wurden dort 653 mg/l Chlorid, in 200 m Tiefe ca. 3 000 mg/l gemessen. Im nördlich anschließenden Bereich konnte diese Belastung bis auf die Höhe von Hochstetten wegen fehlender Messstellen nicht weiterverfolgt werden. Die Ergebnisse des Grundwassermodells zeigen jedoch, dass sich die Belastung unter dem Rhein bis in den Bereich Hochstetten fortsetzt. Im Bereich zwischen

l'étendue de ces recherches, aucun marqueur vraiment non ambigu n'a pu être identifié. La meilleure indication est donnée par la comparaison des éléments traces rubidium et strontium avec les données isotopiques. Il semble que l'on puisse admettre que les sources géologiques de chlorures jouent un rôle mineur dans la pollution globale des eaux souterraines par les chlorures.

Le modèle hydrodynamique est bien adapté pour répondre aux questions les plus pressantes sur l'évolution future de la pollution par les chlorures et sur d'éventuels impacts sur l'utilisation des eaux souterraines. Les impacts de la pollution par les chlorures sur les aménagements et les usages actuels et futurs, ainsi que les possibilités d'interventions pour la sécurisation ou la remédiation, ont été étudiés à l'aide de simulations de différents scénarios. Le modèle permet de donner des conseils sur la marche à suivre pour protéger les ressources en eaux souterraines et éviter de commettre des erreurs d'investissement.

Les études réalisées ainsi que les simulations de scénarios nous font aboutir aux conclusions suivantes :

5.1.1 Répartition des chlorures en 2006, impacts avérés pour les utilisateurs

Les résultats des campagnes de prélèvements géochimiques ainsi que des campagnes de mesures géophysiques nous ont permis pour la première fois de dessiner la répartition actuelle des chlorures à différentes profondeurs dans les eaux souterraines de l'ensemble du secteur étudié, et de la reproduire à l'aide du modèle hydrodynamique. La pollution la plus importante, avec des concentrations en chlorures atteignant jusqu'à 25 g/l, est située au N des anciens bassins-tampons de l'île de Fessenheim. Ces concentrations très élevées ne migrent que très lentement sous le Rhin vers le Nord. Le modèle n'indique pas de dérive vers l'Ouest en direction de la fosse de Geiswasser. Des chlorures sont relargués par cette lentille de saumure profonde et entraînés vers le Nord le long du Rhin. Les nouveaux piézomètres implantés côté français ont mis en évidence pour la première fois des concentrations élevées en chlorures dans les alluvions à moyenne et à grande profondeur entre le Grand Canal d'Alsace et le Rhin à la hauteur de Geiswasser, soit 7 km au Nord des bassins-tampons. A 50 m de profondeur on a mesuré 653 mg/l de chlorures, et à 200 m de profondeur environ 3 000 mg/l. On ne peut suivre cette pollution dans le secteur situé plus au Nord jusqu'à la hauteur de Hochstetten par manque de piézomètres assez profonds. La modélisation indique cependant que le

Hochstetten und Burkheim ist die Chloridfahne durch Messungen wieder gut belegt.

Wesentliche Ursache für die zunehmenden Chloridkonzentrationen im oberflächennahen Aquifer im Bereich südöstlich von Breisach ist die Vorflutwirkung der Möhlin. Sie bildet unterhalb des Möhlinwehrs für das Grundwasser die Vorflut. Dies führt zu einem Aufstieg chloridhaltigen Grundwassers aus größeren Tiefen. Der Bereich der erhöhten Chloridbelastung mit Konzentrationen bis zu 500 mg/l setzt sich nördlich von Breisach oberflächennah in einem schmalen Streifen bis zum Baggersee Burkheim fort. Das Grundwassermodell zeigt dort etwas geringere Chloridwerte als gemessen wurden. Die Brunnen der Stadt Breisach liegen am östlichen Rand der Salzfahne. Die Modellergebnisse zeigen die aktuelle bekannte Gefährdungssituation. Der Tiefbrunnen von Vogtsburg liegt östlich außerhalb der Salzfahne.

5.1.2 Prognose der Entwicklung bis 2056 und künftige Auswirkungen auf bestehende Nutzungen

Nach den Berechnungen wird sich die Chloridfahne nicht mehr weiter ausdehnen. Die hohen Chloridkonzentrationen über 5 g/l im Belastungsschwerpunkt im tiefen Bereich nördlich der Fessenheimer Insel halten jedoch noch jahrzehntelang an. Trotz des ständigen Chloridaustrags aus diesem "Salzpool", der aber künftig zu keinen signifikant höheren Konzentrationen im Abstrom führt, verkleinert sich dieser Bereich nur sehr langsam. Im oberflächennahen und mittleren Tiefenbereich ist zu erwarten, dass die Chloridkonzentrationen zurückgehen, wobei sich die Chloridfahnen in ihrer Lage kaum verändern. Es ist daher nicht zu erwarten, dass weitere Nutzungen gefährdet sind. Insbesondere ergeben sich im Gebiet der Wasserfassungen von Breisach und Vogtsburg keine Anzeichen eines steigenden Trends. Nach den Prognoserechnungen liegt der Tiefbrunnen Vogtsburg auch weiterhin östlich außerhalb der Chloridfahne. Die höheren Belastungen von ca. 1g/l Chlorid in größerer Tiefe im Bereich zwischen dem Baggersee bei Hartheim und dem Uhlsee bleiben jedoch nach den Prognoserechnungen noch über Jahrzehnte erhalten. Die östliche Grenze der Chloridfahne bleibt dort stabil, so dass bislang im unbelasteten Bereich liegende Kiesabbaustätten nicht gefährdet sind. Auf französischer Seite ist zu erwarten, dass die mittleren und tiefen Grundwasserbereiche unterhalb des Rheinbogens im Gebiet von Geiswasser ebenfalls noch Jahrzehnte stark belastet bleiben. Die westliche Grenze dieses Bereichs verändert sich nach

panache se poursuit au Nord sous le Rhin jusqu'à Hochstetten. Plus au Nord entre Hochstetten et Burkheim la langue salée est bien connue par des observations et des mesures.

La cause principale de l'augmentation des concentrations en chlorures dans l'aquifère superficiel dans le secteur au SE de Breisach est l'effet de drainage de la Möhlin. Celle-ci est en effet en position de drainage de la nappe en aval du barrage de la Möhlin. Ceci entraîne une remontée des eaux salées depuis la profondeur. La zone affectée par la pollution en chlorures avec des concentrations jusqu'à 500 mg/l se poursuit au Nord de Breisach sous la forme d'un étroit panache dans la nappe superficielle jusqu'à la gravière de Burkheim. Le modèle reproduit là des concentrations plutôt inférieures à celles effectivement mesurées. Les puits AEP de la Ville de Breisach sont situés en bordure est de la langue salée. Le modèle reproduit bien l'impact actuellement constaté. Le puits AEP profond de Vogtsburg est situé à l'Est du panache.

5.1.2 Prévision de l'évolution jusqu'en 2056 et impact futur sur les usages

D'après les simulations le panache salé ne devrait pas s'étendre plus en aval. Par contre les concentrations très élevées de plus de 5 g/l de la pollution principale au Nord de l'île de Fessenheim seront encore présentes dans des dizaines d'années. Malgré le "relargage" constant de chlorures par la lentille de saumure, qui ne devrait pas provoquer d'augmentation significative des concentrations à l'aval dans l'avenir, cette saumure ne se réduit que très lentement. On peut s'attendre à ce que les concentrations en chlorures baissent dans les tranches superficielle et moyenne de la nappe, mais avec peu de changements sur la localisation des panaches. Ceci implique que d'autres captages AEP ne devraient pas être touchés. En particulier il n'y a pas d'indication d'une tendance à l'augmentation dans les secteurs des captages AEP de Breisach et Vogtsburg. D'après les simulations le puits AEP profond de Vogtsburg devrait rester en dehors de la langue salée. Les pollutions plus importantes au niveau d'1 g/l de chlorures environ, situées en profondeur dans le secteur situé entre les gravières près de Hartheim et la gravière Uhl resteront stables pendant des dizaines d'années encore. La bordure est de la langue salée devrait rester stable, de sorte que les gravières actuellement non touchées par les chlorures ne sont pas en danger. Côté français on peut s'attendre à ce que les tranches moyenne et profonde de l'aquifère sous le coude du Rhin dans le secteur de Geiswasser restent également polluées pen-

den Prognosen nur unwesentlich. Die Chloridkonzentrationen des Grundwassers in dem für die Feldberechnung wichtigen Gebiet zwischen Breisach und Burkheim werden nach der Prognose langfristig zurückgehen. Ebenso gibt es keine Anzeichen, dass die Chloridfahne im Norden unterhalb der Staustufe Marckolsheim den Rhein Richtung Frankreich unterströmt. Die Prognosen zeigen, dass die Fahne dort ausläuft und sich auch rechtsrheinisch nicht weiter nach Norden fortsetzt. Die Prognoseberechnungen für den hypothetischen Fall der bis 2056 nicht gesicherten Halde bei Buggingen zeigen, dass ihre oberflächennahe Fahne bei Hartheim in den Rhein übertritt. Tiefere Bereiche der Fahne mit relativ geringen Chloridkonzentrationen vereinen sich mit der Fahne von den Fessenheimer Insel. Von den Halden Buggingen und Heitersheim gelangen somit vergleichsweise vernachlässigbar geringe Chloridfrachten bis in den Raum Breisach.

5.2 Sanierungs- und Sicherungsszenarien

Es wurden drei hydraulische Sanierungs- und Sicherungsszenarien untersucht. Diese hatten zum Ziel, die Chloridbelastungen aus dem Aquifer zu entfernen, d.h. die Chloridfahne insgesamt im Sinne der WRRL zu sanieren bzw. die Chloridkonzentrationen an den Tiefbrunnen Breisach sowie im Bereich nördlich davon zu reduzieren. Die untersuchten Szenarien sind nur mit Einschränkungen Erfolg versprechend. Grundsätzlich ließe sich die Belastung nur durch das Abpumpen der hochkonzentrierten Sole im Belastungsschwerpunkt sanieren. Auf Grund der erforderlichen Investitionskosten und der sehr hohen Pumpraten über Jahrzehnte hinweg wäre der finanzielle Aufwand immens. Somit sind die Wirtschaftlichkeit und die Verhältnismäßigkeit dieser Maßnahmen derzeit nicht gegeben. Darüber hinaus ergeben sich weitere nachteilige Auswirkungen, wie z.B. großräumige Absenkungen des Grundwasserspiegels und Veränderungen im Grundwasserfließsystem, was sich negativ auf terrestrische Ökosysteme auswirken kann. Bezüglich der Entsorgung des bei Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen anfallenden chloridhaltigen Abwassers stellt sich die Frage, inwieweit dieses unter Berücksichtigung der europäischen Richtlinien und internationalen Vereinbarungen ohne Weiteres in den Rhein eingeleitet werden kann. Zudem müssen mögliche Sanierungsmaßnahmen vor dem Hintergrund gesehen werden, dass auch ohne weitere Eingriffe kein signifikanter Chloridanstieg im Bereich der derzeitigen Grundwassernutzungen prognostiziert wird, sondern – wenn auch sehr langfristig – mit einem fallenden Trend der Chloridbelastung gerechnet wer-

dant des dizaines d'années. La bordure ouest de la langue salée se déplacera peu d'après les simulations. Les concentrations en chlorures des eaux souterraines du secteur d'irrigation importante entre Breisach et Burkheim devraient baisser à long terme d'après les simulations. De même il n'y a pas d'indication que le panache salé puisse passer sous le Rhin en direction de la France, tout au Nord en aval du barrage de Marckolsheim. Les simulations indiquent que le panache se termine là et ne se propage pas plus au Nord en rive droite du Rhin. Les simulations du cas hypothétique où le terril de Buggingen ne serait toujours pas étanché en 2056 montrent que le panache superficiel est drainé par le Rhin au niveau de Hartheim. En profondeur les concentrations, qui restent modestes, rejoignent le panache issu de l'île de Fessenheim. Les terrils de Buggingen et de Heitersheim contribuent ainsi de façon très marginale au panache de chlorures qui atteignent le secteur de Breisach.

5.2 Scénarios de remédiation et de prévention

Trois scénarios de remédiation et prévention par pompage ont été étudiés. Ils avaient pour objectif de neutraliser la pollution des eaux souterraines par les chlorures, c'est-à-dire soit de résorber le panache salé totalement dans l'esprit de la Directive cadre européenne sur les eaux souterraines, soit de faire baisser les teneurs en chlorures au niveau du captage AEP profond de Breisach et plus au Nord. Les scénarios étudiés donnent des résultats mitigés. Il serait en principe possible de résorber la pollution en pompant la saumure très concentrée là où elle est à son maximum. Cependant les coûts en investissements et en pompages à fort débit pendant des dizaines d'années représenteraient un effort financier énorme, de sorte que l'on peut mettre en question la faisabilité économique et l'adéquation d'une telle opération (coût disproportionné). De plus il faut s'attendre à des dommages induits, comme par exemple un rabattement généralisé du niveau de la nappe et des modifications de son écoulement ce qui peut avoir des conséquences négatives sur le fonctionnement des écosystèmes terrestres (zones humides). Enfin le rejet des eaux salées pompées pose la question des quantités de chlorures que l'on peut rejeter au Rhin au regard du respect des directives européennes et des conventions internationales. Par ailleurs il faut évaluer l'ampleur des mesures à prendre par rapport aux bénéfices attendus, or si l'on ne fait rien il ne devrait pas y avoir d'aggravation dans les secteurs actuellement utilisés pour l'AEP et même, bien qu'assurément à long terme, la pollution devrait avoir tendance à baisser. Les résultats de

den kann. Die Bewertung der Sicherungs- und Sanierungsszenarien ist in der *Tab. 5.1* zusammengefasst.

5.3 Einfluss des Retentionsraums Kulturwehr Breisach

Zur Beurteilung des Einflusses von Retentionsmaßnahmen im Bereich des Kulturwehres Breisach wurden vergleichend die Auswirkungen des Durchganges einer Hochwasserwelle im Rhein mit und ohne Retentionsmaßnahme berechnet. Die Modellierung eines extremen Lastfalls von zwei aufeinanderfolgenden Rheinhochwässern, die entsprechend dem vorgesehenen Reglement zu den regelmäßigen Flutungen des Retentionsraums mit Einsatz der Grundwasserhaltungsmaßnahmen führen, bringt nach der Modellberechnung keine signifikanten Änderungen der Chloridkonzentrationen in den Tiefbrunnen Breisach mit sich. Im weiteren nördlichen Abstrom des Retentionsraumes ist im Grundwasser eine Abnahme der Chloridkonzentration durch das infiltrierte chloridarme Rheinwasser zu erwarten. Sie hält über Monate an, bevor die Konzentrationen wieder auf das ursprüngliche Maß ansteigen. Die nur kurzfristigen Grundwasserhaltungen haben somit keine nachteiligen Auswirkungen auf die Chloridgehalte im oberflächennahen Grundwasser. Kleinere und somit häufigere Flutungen, die keinen Einsatz von Grundwasserhaltungsmaßnahmen erfordern, wirken sich grundsätzlich verdünnend auf die Chloridkonzentrationen aus.

5.4 Ausblick

Die durchgeführten Prognose- und Szenarienrechnungen zeigen, dass das Grundwassermodell grundsätzlich wichtige und belastbare Aussagen zu wasserwirtschaftlichen Fragestellungen im Untersuchungsgebiet ermöglicht. Für weitere, standortbezogene Bewertungen ist die Weiterführung des grenzüberschreitenden Werkzeugs zweckmäßig. Seine Verankerung in den Wasserwirtschaftsverwaltungen beider Länder sollte zu einem routinemäßigen Einsatz führen. Künftige Anwendungsgebiete sind die Bewertung der Auswirkungen von lokalen Einzelvorhaben auf die Chloridbelastung wie z.B. dem Kiesabbau (Erweiterung und Vertiefung), von neuen Grundwassernutzungen und von weiteren Hochwasserrückhalteräumen. Für die Genehmigungsbehörden wird somit eine Entscheidungshilfe bereitgestellt, die dazu beiträgt, eine Verschlechterung der Grundwasserqualität zu verhindern und Fehlinvestitionen zu vermeiden. Ein weiteres Einsatzgebiet für das Modell bietet die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Bereits die bisher gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine Optimierung des geforderten Monitorings. Sie stellen darüber hinaus für die Erstellung der Bewirtschaftungspläne eine wichtige Bewertungsgrundlage hinsichtlich

l'évaluation des scénarios de remédiation et de prévention sont récapitulés dans le *tableau 5.1*.

5.3 Influence du polder du Barrage agricole de Breisach

Afin d'évaluer l'influence des mesures de rétention de crues au niveau du Barrage agricole de Breisach, le passage d'une onde de crue du Rhin a été simulé avec et sans mesure de rétention. La modélisation du cas extrême de deux crues successives du Rhin, qui d'après les consignes prévues conduiraient à des inondations régulières du polder accompagnées de mesures de pompage de rabattement, ne provoque pas de modifications notables des concentrations en chlorures dans le puits AEP profond de Breisach d'après la simulation. Au Nord, en aval du polder, on peut s'attendre à une diminution des concentrations en chlorures en raison de la dilution par les eaux du Rhin pauvres en chlorures. Cette diminution se manifeste pendant plusieurs mois, jusqu'à ce que les concentrations reviennent à leur valeur de départ. Les pompages de rabattement, qui ne durent pas longtemps, n'auront ainsi aucun impact négatif sur les concentrations en chlorures dans les eaux souterraines proches de la surface. Des inondations moins importantes mais plus fréquentes, qui ne mettent pas en route les pompages de rabattement, auront par principe un effet de dilution sur les concentrations en chlorures.

5.4 Perspectives

Les simulations de différents scénarios montrent que le modèle hydrodynamique permet de répondre de façon fiable à des problématiques de gestion des eaux souterraines dans le secteur étudié. Le maintien en service de cet outil transfrontalier permettra la résolution d'autres questions d'intérêt local. Sa maintenance par les services des deux pays chargés de la gestion des eaux devrait conduire à une utilisation de routine. Parmi les applications à venir on citera l'évaluation de l'impact de projets particuliers sur la pollution en chlorures, comme par exemple l'exploitation de graviers (extensions ou approfondissements), la recherche de ressources en eau souterraine, la redynamisation du Vieux-Rhin ou la création de nouveaux polders d'écêtement de crues. Il sera ainsi mis à disposition des autorités une aide à la décision qui contribuera à éviter une dégradation de la qualité des eaux souterraines et des investissements mal placés. Un autre domaine d'application pour le modèle hydrodynamique est celui de la mise en œuvre de la Directive cadre européenne sur l'eau. Les connaissances acquises sur le secteur permettent déjà une optimisation du réseau de contrôle opérationnel. Elles permettront de plus de préparer les plans de

der Festlegung der Umweltziele für den betroffenen Grundwasserkörper dar. Die Beantwortung von grenzüberschreitenden Fragestellungen wird durch das Werkzeug beschleunigt. Ebenfalls profitiert das grenzüberschreitende Monitoring, wie es in den von der Region Alsace ausgeführten Bestandsaufnahmen 1996/97 und 2003 sowie dem INTERREG-Projekt *“Indikatoren zur Überwachung der Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers im Oberrheingraben”* unter Federführung der APRONA auch für den Parameter “Chlorid” umgesetzt wird, vom erarbeiteten Werkzeug. Dies führt auch zu einer Effizienzsteigerung der dafür eingesetzten finanziellen Mittel. Das Prognosewerkzeug trägt insgesamt zur Entwicklung einer grenzüberschreitenden Strategie zum Schutz der Grundwasserressource bei.

Für die kontinuierliche weitere Nutzung und Weiterentwicklung des Werkzeuges ist die Einrichtung einer gemeinsamen grenzüberschreitenden Plattform am Oberrhein zur Weiterführung derartiger Modellsysteme wünschenswert.

gestion et de définir les objectifs environnementaux de la masse d'eau concernée. La réponse à des problématiques transfrontalières sera accélérée par cet outil. De même les évaluations transfrontalières de la qualité de la nappe, tels que celles réalisées par les Inventaires qualité de 1996/97 et de 2003 menées par la Région Alsace ou par le projet INTERREG *“Indicateurs de suivi des actions de protection de la nappe rhénane dans la vallée du Rhin supérieur”* sous maîtrise d'ouvrage de l'APRONA, bénéficieront de l'outil pour le paramètre “chlorures”. Ceci contribuera par ailleurs à une amélioration de l'efficacité des moyens financiers investis. Le nouvel outil de prévision participe ainsi au développement d'une stratégie transfrontalière de protection des ressources en eaux souterraines.

Pour cela il serait utile qu'une plate-forme transfrontalière soit créée au niveau du Rhin supérieur pour la maintenance et l'utilisation de tels outils de modélisation.

	Abwehr- brunnen südl. Breisach <i>Pompage de fixation au S de Breisach</i>	Sanierungs- brunnen im Schwerpunkt der Belastung <i>Pompage de dépollution de la saumure</i>	Absenkung und Vertiefung Baggersee Hartheim <i>Rabattement et approfondis- sement de la gravière de Hartheim</i>
Auswirkung großräumige Absenkung des Grundwasserspiegels / <i>Impact sur le rabattement de la nappe</i>	--	--	-
Investitionskosten / <i>Coûts d'investissement</i>	--	--	-
Betriebskosten / <i>Coûts de fonctionnement</i>	-	-	0
Wirksamkeit Sanierung der Fahne (WRRL) / <i>Efficacité sur la résorption du panache (DCE)</i>	+	++	0
Wirksamkeit Senkung Chloridkonzentration in Breisach / <i>Efficacité à réduire les teneurs en chlorures à Breisach</i>	++	+	0
Zeitliche Wirksamkeit Vorteil im Vergleich zur Nullvariante / <i>Efficacité en temps par rapport au statu quo</i>	+	++	0

Tab. 5.1: Bewertungsmatrix betrachteter Sanierungs- und Sicherungsszenarien.
Tab. 5.1 : Matrice d'évaluation des scénarios de remédiation et de prévention étudiés.

Literatur / Bibliographie
Abbildungsverzeichnis / Liste des illustrations

Literatur/Bibliographie

ARMBRUSTER, V. (2002): *Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Dissertation.* Freiburger Schriften zur Hydrologie, Bd.17. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg

BAUER, M., EICHINGER, L., ELSASS, P., KLOPPMANN, W., WIRSING, G. (2005): *Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the Southern Upper Rhine Graben.* – Int J Earth Sci (Geol Rundsch) 94: 565-579, 10 figs., 3 tables, Springer-Verlag.

BINDER, E. (2002): *Stoffdynamik tiefer Baggerseen im Markgräfler Land im Hinblick auf die Versalzungsproblematik.* 154 S., 89 Abb., 27 Tab., 28 Anl., Diplomarbeit; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg – [unveröff.].

FUNK (2007): *INTERREG-IIIa: Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters bei Breisach: Pumpversuche Faule Waag und Geiswasser 1(fach) und 2 (tief).* – Bericht E. Funk, Büro für Hydrogeologie vom 13.12.2007, 4 S.; Staufen – [unveröff.].

GLA (1997): *Sachstandsbericht zur Grundwasserversalzung in der Oberrheinebene südlich des Kaiserstuhls.* Geologisches Landesamt Baden Württemberg, Bericht Az. 0886,01/96-4763; Freiburg i. Br. – [unveröff.].

HYDROISOTOP (2004): *Erkundung des rheinnahen quartären Grundwasserleiters zwischen Baggersee Uhl und Burkheimer Baggersee: Ergebnisse der hydrochemischen und isopenhydrologischen Übersichtsuntersuchung.* Bericht vom 14.06.2004; Emmendingen – [unveröff.].

HYDROISOTOP (2007a): *Beweissicherung Hochwasserrückhalteraum Kulturwehr Breisach, GWM 6 Breisach Schwimmbad tief.* Bericht vom 17.07.2007; Emmendingen – [unveröff.].

HYDROISOTOP (2007b): *Ergebnisse der Isotopen- und Spurengasuntersuchungen an Grundwässern zwischen Fessenheim und Breisach. Interreg Projekt IIIa.* Bericht vom 20.12.2007; Emmendingen – [unveröff.].

INGENIEURGESELLSCHAFT PROF. KOBUS UND PARTNER (2007): *Interreg III A – Projekt Modellierung der Chloridbelastung im Raum Fessenheim/Burkheim.* Bericht A303-1; Stuttgart – [unveröff.].

KLOPPMANN, W. (1999): *INTERREG II Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan.* Rapport BRGM R 40596, 107 p., 15 fig., 8 tabl.; Orléans – [unveröff.].

LUBW (2006): *Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben – Abschlussbericht Teilprojekt Hydrogeologie – Aquifergeometrie der quartären und pliozänen Lockergesteinsfüllung im baden-württembergischen Teil des Oberrheingrabens.* – Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Geol.- Pal. Institut Univ. Basel (Bearb.: WIRSING, G., ELSASS P., LUZ, A., HUGGENBERGER, P.): 160 S., 56 Abb., 6 Tab., 1 Anl.; Karlsruhe.

LUBW (2006): *Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben – Abschlussbericht Teilprojekt Grundwasserströmung und Nitrattransport.* – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 42 -Grundwasser-: 183 S.; Karlsruhe

NEUMANN, LEBEDE, SCHWEIZER (2007): *Interreg III A Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim – Errichtung von Grundwassermessstellen – Mise en place de piézomètres* – zweisprachiger Bericht vom 20.12.2007, 10 Seiten ; Freiburg i. Br. – [unveröff.].

MIEHÉ, J.M. (2003): *Mesures géophysiques par méthodes électrique sur la langue salée est en aval du bassin potassique.* BRGM/RP-52329-FR, 29 p., 10 fig., 1 tabl.; Orléans – [unveröff.].

MIEHÉ, J.M (2004): *Contrôle de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace en aval du bassin potassique. Campagne d'automne 2004. Compléments de mesures électriques sur les secteurs d'Ensisheim, d'Ungersheim, du Hettenschlag*. BRGM/RP-53907-FR, 22p., 13 ill.; Orléans – [unveröff.].

MIEHÉ, J.M (2007): *Etude de la salure de la nappe d'Alsace par imagerie électrique. Positionnement transfrontalier de la nappe salée le long du Rhin entre Fessenheim (Haut-Rhin) et le Nord de Breisach (Allemagne)*. BRGM/RP-55359-FR, 45 p., 14 ill.; Orléans – [unveröff.].

Région Alsace Hrsg (2000): *Inventaire 1997 de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur – Bestandsaufnahme 1997 der Grundwasserqualität im Oberrheingraben*; Strasbourg.

Région Alsace Hrsg. (2005): *Inventaire 2003 de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur – Bestandsaufnahme 2003 der Grundwasserqualität im Oberrheingraben*; Strasbourg.

RPF – Regierungspräsidium Freiburg (2002): *Interreg II: Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach*. Endbericht 172 S.; Freiburg i. Br.

RPF/LGRB – Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2007): *Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg)* (Bearb.: WIRSING, G., LUZ, A., unter Beteiligung von ELLWANGER, D., ENGESSER, W., GEERDTS, P., HESS, M., KILGER, B.-M., OHNEMUS, J., PLUM, H., SCHWARZ, M., STOBER, I., WATZEL, R.). – L.-Amt Geol. Rohst. Bergb. Baden-Württ., LGRB-Inform., 19: 130 S., 118 Abb., 12 Tab.; Freiburg i. Br.

SAUER, K. (1978): *Die Versalzung des Grundwassers im Rheintal durch die elsässischen Kaliminen – Eine ernste Tatsachenbilanz und Lösungsmöglichkeiten*. – Gas.-Wasser-Abwasser 58. Jahrgang, Nr. 5, 267-273, 7 Abb.

TERRATEC (2007): *Bohrlochmessungen bei Breisach in den GWM Faule Waag, Geiswasser Tief, Geiswasser Flach und GWM6 Tief*, 10 S., 1 CD-ROM, Bericht terratec Büro f. Geologie und Geophysik vom 05.12.2007; Heitersheim – [unveröff.].

WaBoA (2004): *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg*. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.).

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen / Liste des illustrations et des tableaux

Kapitel 1 / Chapitre 1

Abbildung 1.1 Figure 1.1	Übersichtslageplan des Untersuchungsgebietes 18 <i>Carte d'ensemble du secteur étudié</i>
Abbildung 1.2 Figure 1.2	Prinzipskizze zur Ausbreitung hoch konzentrierter Chloridlösungen im Untergrund 20 <i>Schéma de principe de la propagation d'une saumure concentrée dans la nappe</i>

Kapitel 2 / Chapitre 2

Abbildung 2.1 Figure 2.1	Hydrogeologischer Längsschnitt zwischen Weil a. Rhein und Rust 24 (Schnittverlauf ungefähr entlang des Rheins, verändert nach RPF/LGRB 2007) <i>Coupe hydrogéologique entre Weil a. Rhein et Rust (le profil suit approximativement le cours du Rhin des Rheins, modifié d'après RPF/LGRB 2007).</i>
Abbildung 2.2 links Figure 2.2 à gauche	Räumliche Verteilung der Durchlässigkeit im oberen Abschnitt 26 der Neuenburg-Formation (Tiefenstufe 0 – 20 m, verändert nach LUBW 2006) <i>Cartographie des perméabilités de la partie supérieure de la formation de Neuenburg (alluvions récentes, tranche de 0 à 20 m, modifié d'après LUBW 2006).</i>
Abbildung 2.2 rechts Figure 2.2 à droite	Räumliche Verteilung der Durchlässigkeit im unteren Abschnitt 26 der Neuenburg-Formation (verändert nach LUBW 2006) <i>Cartographie des perméabilités de la partie inférieure de la formation de Neuenburg (alluvions récentes, tranche de 0 à 20 m, modifié d'après LUBW 2006).</i>
Abbildung 2.3 Figure 2.3	Zeitliche Entwicklung der Chloridkonzentration im TB 1 (alt) Breisach 28 <i>Historique de la concentration en chlorures du puits AEP TB1 de Breisach</i>

Kapitel 3 / Chapitre 3

Tabelle 3.1 Tableau 3.1	Im Projektzeitraum durchgeführte Erkundungsmaßnahmen 29 <i>Travaux de reconnaissance réalisés dans le cadre du projet</i>
Abbildung 3.1 Figure 3.1	Korrelation zwischen dem spezifischen Widerstand der grundwassererfüllten 32 Kiese (mit unterschiedlichem Elektrolytgehalt) und der Chloridkonzentration des Grundwassers. <i>Corrélation entre la résistivité spécifique de graviers saturés en eau (pour différentes salinités) et la concentration en chlorures de l'eau souterraine.</i>
Abbildung 3.2 Figure 3.2	Geoelektrikprofil Nambenheim 33 <i>Profil géophysique Nambenheim</i>
Abbildung 3.3 Figure 3.3	Geoelektrikprofil Geiswasser (2006) mit Erweiterung nach Osten (2007) 33 <i>Profil géophysique Geiswasser (2006) avec extension vers l'Est (2007)</i>
Abbildung 3.4 Figure 3.4	Geoelektrikprofil Muhrhau 36 <i>Profil géophysique Muhrhau</i>
Abbildung 3.5 Figure 3.5	Geoelektrikprofil Schlössle Matte 38 <i>Profil géophysique Schlössle Matte</i>

Tabelle 3.2	Angaben zu den Grundwassermessstellen Faule Waag 39 sowie Geiswasser flach und tief
Tableau 3.2	<i>Données des piézomètres Faule Waag et Geiswasser superficiel et profond</i>
Abbildung 3.6	Schichtenfolge, Ausbauplan und bohrlochgeophysikalische Messungen 40 in der GWM Faule Waag
Figure 3.6	<i>Lithologie, équipement et diagraphies dans le piézomètre Faule Waag</i>
Tabelle 3.3	Pumpversuch in der GWM Faule Waag, 44 (aus dem Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007)
Tableau 3.3	<i>Essai de pompage dans le piézomètre Faule Waag (d'après le rapport Funk du 13.11.2007.</i>
Tabelle 3.4	Pumpversuch in der GWM Geiswasser 1 (tief) 48 (aus dem Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007, dort als GWM 2 bezeichnet)
Tableau 3.4	<i>Essai de pompage dans le piézomètre Geiswasser profond (d'après le rapport du bureau d'études Funk du 13 novembre 2007, où il est dénommé GWM 2)</i>
Abbildung 3.7	Schichtenfolge, Ausbauplan und bohrlochgeophysikalische Messungen 46 in der GWM Geiswasser tief
Figure 3.7	<i>Lithologie, équipement et diagraphies dans le piézomètre Geiswasser profond</i>
Abbildung 3.8	Schichtenfolge, Ausbauplan und bohrlochgeophysikalische Messungen 50 in der GWM Geiswasser flach
Figure 3.8	<i>Lithologie, équipement et diagraphies dans le piézomètre Geiswasser superficiel</i>
Tabelle 3.5	Pumpversuch in der GWM 2 Geiswasser (flach) 52 (aus dem Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007, dort als GWM 1 bezeichnet)
Tableau 3.5	<i>Essai de pompage dans le piézomètre Geiswasser superficiel (d'après le rapport du bureau d'études Funk du 13 novembre 2007, où il est dénommé GWM 1)</i>
Abbildung 3.9	Perspektivische Übersichtsdarstellung der Aquiferbasis 54 und überarbeitete Geometrie im Raum Breisach.
Figure 3.9	<i>Vue en perspective du substratum et de la géométrie révisée dans le secteur de Breisach.</i>
Abbildung 3.10	Lage der untersuchten Messstellen mit Bezeichnung..... 59
Figure 3.10	<i>Situation des piézomètres étudiés avec leur dénomination</i>
Abbildung 3.11	Äquivalentkonzentrationen der Hauptinhaltsstoffe wichtiger 60 Grundwasserkomponenten (Piperdiagramme)
Figure 3.11	<i>Concentrations équivalentes des éléments majeurs des principales composantes des eaux souterraines (diagramme de Piper)</i>
Tabelle 3.6	Ungefähre Wertebereiche der hydrochemischen Inhaltsstoffe 62 (Konzentrationen [mg/l], prozentuale Äquivalentkonzentrationen [%mmol(eq)/l]) und Isotope in den Grund- und Oberflächenwasserkomponenten des Untersuchungsgebiets (aus dem Bericht des Büros Funk vom 13.11.2007, dort als GWM 1 bezeichnet)
Tableau 3.6	<i>Fourchettes de valeurs des constituants chimiques (concentrations en mg/l et proportions en équivalents molaires % mmol(eq)/l) et des isotopes dans les composantes des eaux souterraines et de surface du secteur d'étude</i>

Abbildung 3.12	Tritiumgehalte ausgewählter Grundwässer65 (Messkampagne Okt./ Nov. 2007, HYDROISOTOP 2007)
Figure 3.12	<i>Teneurs en tritium d'eaux souterraines sélectionnées (campagne de prélèvements d'octobre-novembre 2007, HYDROISOTOP 2007)</i>
Tabelle 3.7	Prozentualer Anteil der Hauptkationen und -anionen in den Eluaten von Steinsalz 68 (Grube Buggingen) und Kalisalz (elsässisches Kalibecken) und von Haldenmaterial (Restsalz Eluat, Halde Marie Louise Nr. 04131X0512) sowie Grubenwasser aus dem Schacht Heitersheim.
Tabelle 3.7	<i>Composition en pourcentage des ions principaux pour des solutions de sel gemme (mine de Buggingen), de sel de potasse (bassin potassique alsacien), ainsi que pour du matériel de terrils (eau de dissolution du terril Marie-Louise, puits 04131X0512) et pour de l'eau d'exhaure du puits de Heitersheim.</i>
Tabelle 3.8	Konzentrationen von Strontium und Rubidium in Steinsalz und Kalisalz (Eluat)68
Tabelle 3.8	<i>Concentrations en strontium et rubidium dans le sel gemme et le sel de potasse (solutés)</i>
Abbildung 3.13	Verteilung der Hauptinhaltsstoffe in Eluaten, in Grubenwasser69 aus dem Schacht Heitersheim und dem Abwasserkanal
Figure 3.13	<i>Distribution des éléments majeurs dans des solutés, l'eau d'exhaure du puits Heitersheim et le saumoduc.</i>
Abbildung 3.14	Verteilung der Hauptinhaltsstoffe in Grundwässern mit erhöhten Chloridgehalten69
Figure 3.14	<i>Distribution des éléments majeurs dans les eaux souterraines à forte concentration en chlorures</i>
Abbildung 3.15	Chlorid-, Strontium- und Rubidiumgehalte einiger ausgesuchter Messstellen70 und der Ausgangskomponenten (rot hinterlegt: Grundwässer mit geogenen Chloridgehalten)
Figure 3.15	<i>Teneurs en chlorures, strontium et rubidium de piézomètres sélectionnés et des roches de référence (souligné en rouge : eaux souterraines à contribution géologique)</i>
Abbildung 3.16	Korrelationsdiagramm Sr/Rb zu Tritium.....70
Figure 3.16	<i>Diagramme de corrélation entre le rapport Sr/Rb et le tritium</i>
Abbildung 3.17	Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe 0 – 30 m u. GOK76
Figure 3.17	<i>Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche 0 – 30 m de profondeur</i>
Abbildung 3.18	Chlorid - und der Sauerstoff-18 – Werte in der Möhlin zwischen Wehr79 und Mündung in den Rhein (HYDROISOTOP 2004)
Figure 3.18	<i>Valeurs en chlorures et en oxygène 18 dans la Möhlin entre le barrage et la confluence avec le Rhin (HYDROISOTOP 2004)</i>
Abbildung 3.19	Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe 30 – 70 m u. GOK82
Figure 3.19	<i>Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche 30 – 70 m de profondeur</i>
Abbildung 3.20	Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe 70 – 100 m u. GOK..... 84
Figure 3.20	<i>Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche 70 – 100 m de profondeur</i>

Abbildung 3.21	Verbreitung der Chloridkonzentrationen in der Tiefenstufe über 100 m u. GOK	86
Figure 3.21	<i>Cartographie des concentrations en chlorures dans la tranche de plus de 100 m de profondeur</i>	

Kapitel 4 / Chapitre 4

Abbildung 4.1	Modellgebiet und Randbedingungen (links), Modellnetz (rechts)	93
Figure 4.1	<i>Limites et conditions aux limites (à gauche) et le maillage (à droite)</i>	
Abbildung 4.2	Durchlässigkeitsverteilung im oberen Teil (links)	94
Figure 4.2	<i>Perméabilités de l'horizon supérieur (à gauche) et inférieur (à droite) de la formation du Neuenburg</i>	
Abbildung 4.3	Durchlässigkeitsverteilung im oberen Teil (links)	95
Figure 4.3	<i>Perméabilités de l'horizon supérieur (à gauche) et inférieur (à droite) de la formation du Breisgau</i>	
Abbildung 4.4	Berechnete Piezometerhöhenverteilung für den Stichtag 20.10.1986	95
Figure 4.4	<i>Piezométrie calculée pour le jour de référence du 20.10.1986 et échanges nappe-rivières entre Fessenheim et Burkheim</i>	
Tabelle 4.1	Stationäre Wasserbilanz in m³/s	98
Tableau 4.1	<i>Bilan en eau en régime permanent (m³/s)</i>	
Abbildung 4.5	Gemessene und berechnete Piezometerhöhen	100
Figure 4.5	<i>Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 13/021-3 entre 1986 et 2005</i>	
Abbildung 4.6	Gemessene und berechnete Piezometerhöhen	100
Figure 4.6	<i>Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 138/019-0 entre 1986 et 2005</i>	
Abbildung 4.7	Gemessene und berechnete Piezometerhöhen	100
Figure 4.7	<i>Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 3784X0024 entre 1986 et 2005</i>	
Abbildung 4.8	Gemessene und berechnete Piezometerhöhen	101
Figure 4.8	<i>Piézométrie mesurée et simulée au point de mesure 113/020-3 entre 1956 et 1986</i>	
Abbildung 4.9	Berechnete Stromfäden und Salzkonzentrationen (rot: Frischwasser, grün: Salzwasser) im Vertikalschnittmodell unter den Absetzbecken der Fessenheimer Insel nach 20 Jahren mit konstantem Salzeintrag	102
Figure 4.9	<i>Coupe verticale située sous l'île de Fessenheim représentant les lignes de courant et concentrations en sels (eau douce en rouge, eau salée en vert) calculées sur une période 20 ans avec une infiltration constante</i>	
Tabelle 4.2	Salzeintrag über die Halden, die Autobahnkiesgrube und die Fünfbeckenanlage	102
Tableau 4.2	<i>Infiltration en eau salée du côté allemand au niveau des terrils et des lieux Autobahnkiesgrube et Fünfbeckenanlage</i>	

Abbildung 4.10	Zufluss über die Absatzbecken der Fessenheimer Insel 103
Figure 4.10	<i>Infiltration au niveau des bassins de rétention de l'île de Fessenheim durant la période d'exploitation de 1956 à 1976</i>
Abbildung 4.11	Berechnete Chloridverteilung an der Basis des oberen (links) 104 und unteren (Mitte) Teils der Neuenburg-Formation sowie an der Aquiferbasis (rechts) mit aus Messwerten interpretierten Isolinien für 2006
Figure 4.11	<i>Distribution des concentrations en chlorures simulée à la base de la partie supérieure de la formation du Neuenburg (à droite), à la base de la partie inférieure de la formation du Neuenburg (au milieu) et au substratum de l'aquifère (à gauche). lignes de niveau sont issues d'une interprétation des mesures faites en 2006</i>
Abbildung 4.12	Langjährige berechnete und gemessene Ganglinien von Chloridkonzentrationen 106
Figure 4.12	<i>Chroniques des concentrations en chlorures mesurées et simulées</i>
Abbildung 4.13	Berechnete Piezometerhöhe und Chloridkonzentration 107 an der Messstelle Hochstetten zwischen 2002 und 2006 mit den Auswirkungen durch den Abstau des Möhlinwehr im Jahr 2003
Figure 4.13	<i>Piézométrie et concentration en chlorures au point de mesure Hochstetten de 2002 à 2005 avec l'effet du barrage de Möhlin en 2003</i>
Abbildung 4.14	Berechnete Chloridverteilung an der Basis des oberen (links) 108 und unteren (Mitte) Teils der Neuenburg-Formation sowie an der Aquiferbasis (rechts) für 2056
Figure 4.14	<i>Distribution des concentrations en chlorures en 2056 à la base de la partie supérieure (à droite) et inférieure (au milieu) de la formation du Neuenburg et sur le substratum de l'aquifère (à droite)</i>
Abbildung 4.15	Betrachtete Szenarien zum Salztransport 110
Figure 4.15	<i>Présentation des 3 scénarios</i>
Abbildung 4.16	Berechnete Chloridverteilung an der Basis des oberen (links) 111 und unteren (Mitte) Teils der Neuenburg-Formation sowie an der Aquiferbasis (rechts) für 2021 unter der Annahme von Abwehrbrunnen südlich
Figure 4.16	<i>Distribution des concentrations en chlorures à la base de la partie supérieure (à droite) et inférieure (au milieu) de la formation du Neuenburg et sur le substratum de l'aquifère (à droite) en 2021 en présence des puits de fixation près de Breisach</i>
Abbildung 4.17	Berechnete Absenkungen in der Neuenburg-Formation (links) 113 und der Breisgau-Formation (rechts) unter der Annahme von Sanierungsbrunnen im Bereich der hohen Salzkonzentrationen
Figure 4.17	<i>Rabattements de la nappe calculés au niveau de la formation du Neuenburg (à gauche) et du Breisgau (à droite) consécutifs aux pompages dans la zone à fortes concentrations en chlorures</i>
Abbildung 4.18	Berechnete Chloridverteilung an der Basis des oberen (links) 114 und unteren (Mitte) Teils der Neuenburg-Formation sowie an der Aquiferbasis (rechts) für 2056 unter der Annahme von Sanierungsbrunnen im Bereich der hohen Salzkonzentrationen (Bereich mit Sanierungsbrunnen eintragen)
Figure 4.18	<i>Distribution des concentrations en chlorures à la base de la partie supérieure (à droite) et inférieure (au milieu) de la formation du Neuenburg et sur le substratum de l'aquifère (à droite) en 2056 en présence des puits de dépollution dans les zones à fortes concentrations</i>

Abbildung 4.19	Berechnete Chloridkonzentrationen in den Schutzbrunnen bei Breisach 116 und Hochstetten, im Tiefbrunnen Breisach und im Retentionsraum, auf der Basis berechneter Infiltrationsraten des Rheins, links ohne Retention und rechts mit Retention
Figure 4.19	<i>Concentrations en chlorures simulées au niveau du puits Schutzbrunnen près de Breisach et Hochstetten, du puits profond de Breisach et dans la zone de stockage, suite aux infiltrations calculées des eaux du Rhin (à gauche, sans polder, à droite avec stockage dans le polder)</i>
Abbildung 4.20	Berechnete Verteilungen der Chloridkonzentrationen vor der Retention 118 (nach 0 Tagen) und nach 290 Berechnungstagen
Figure 4.20	<i>Distribution des chlorures simulés avant le stockage (jour 0) et 290 jours après stockage</i>

Kapitel 5 / Chapitre 5

Tabelle 5.1	Bewertungsmatrix betrachteter Sanierungs- und Sicherungsszenarien 126
Tableau 5.1	<i>Matrice d'évaluation des scénarios de remédiation et de prévention étudiés</i>

Inhalt der CD-Rom / Contenu du CD-Rom

Endbericht / Rapport final

Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim

Outil de gestion transfrontalier de la pollution saline des eaux souterraines entre Fessenheim et Burkheim

Technische Berichte / Rapports techniques

Geoelektrik / Géophysique

MIEHÉ, J.M (2007): Etude de la salure de la nappe d'Alsace par imagerie électrique. Positionnement transfrontalier de la nappe salée le long du Rhin entre Fessenheim (Haut-Rhin) et le Nord de Breisach (Allemagne). BRGM/RP-55359-FR, 45 p., 14 ill.; Orléans – [unveröff.].

Grundwassermessstellen / Piézomètres

NEUMANN, LEBEDE, SCHWEIZER (2007): Interreg III A Werkzeug zur grenzüberschreitenden Bewertung und Prognose der Grundwasserbelastung mit Chlorid zwischen Fessenheim und Burkheim – Errichtung von Grundwassermessstellen – Mise en place de piézomètres – zweisprachiger Bericht vom 20.12.2007, 10 Seiten; Freiburg i. Br. – [unveröff.].

Bohrlochgeophysik / Diagraphies

TERRATEC (2007): Bohrlochmessungen bei Breisach in den GWM Faule Waag, Geiswasser Tief, Geiswasser Flach und GWM6 Tief, 10 S., 1 CD-ROM, Bericht terratec Büro f. Geologie und Geophysik vom 05.12.2007; Heitersheim – [unveröff.].

Pumpversuche / Essais de pompage

FUNK (2007): INTERREG-III A: Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters bei Breisach: Pumpversuche Faule Waag und Geiswasser 1(flach) und 2 (tief). – Bericht E. Funk, Büro für Hydrogeologie vom 13.12.2007, 4 S.; Staufen – [unveröff.].

Hydrochemie und Isotope / Etudes chimiques et isotopiques

HYDROISOTOP (2007): Ergebnisse der Isotopen- und Spurengasuntersuchungen an Grundwässern zwischen Fessenheim und Breisach. Interreg Projekt IIIA. Bericht vom 20.12.2007; Emmendingen – [unveröff.].

Grundwassermodell / Modèle hydrodynamique

INGENIEURGESELLSCHAFT PROF. KOBUS UND PARTNER (2007): Interreg III A – Projekt Modellierung der Chloridbelastung im Raum Fessenheim/Burkheim. Bericht A303-1; Stuttgart – [unveröff.].

Karten / Cartes

Chloridkonzentrationen / *Concentrations en chlorures*

Tiefenstufe 0 – 30 m / *Tranche de profondeurs de 0 à 30 m*

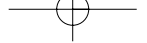
Tiefenstufe 30 – 60 m / *Tranche de profondeurs de 30 à 60 m*

Tiefenstufe 60 – 100 m / *Tranche de profondeurs de 60 à 100 m*

Tiefenstufe über 100 m / *Tranche de profondeurs supérieures à 100 m*

Tabelle / Tableau

Hydrochemie und Isotope / *Etudes chimiques et isotopiques*



Direction régionale de l'environnement
ALSACE

