

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim

K. Bram, G. Wirsing, E. Brost, P. Elsass & T. Wonik

Stichwörter

Geoelektrische Tiefensondierung, Reflexionsseismik, Bohrlochgeophysik, Grundwasser-
versalzung, Oberrheingraben

Zusammenfassung

Das Grundwasser im quartären Kiesaquifer des Oberrheingrabens weist südlich des Kaiserstuhls bereichsweise stark erhöhte Chloridkonzentrationen als Folge des - zwischenzeitlich eingestellten - elsässischen und badischen Kalibergbaues auf. Der interne Aufbau des Grundwasserleiters, die Morphologie seiner Basis sowie die Verteilung der Salzkonzentration im Grundwasser bilden wichtige Eingangsparameter für Modellbetrachtungen zur Ausbreitung der Chloridbelastung und zur Prognose ihrer Verlagerung. Dazu lieferten grenzüberschreitende geoelektrische, reflexionsseismische und bohrlochgeophysikalische Messungen in Verbindung mit Bohrergebnissen und hydrochemischen Untersuchungen wichtige Informationen.

Der Kontrast des spezifischen elektrischen Widerstandes von über 100 Ωm zu weniger als 20 Ωm in der grundwassererfüllten kiesigen Abfolge des Quartärs stellt den Übergang von Süßwasser zu Grundwasser mit erhöhten Chloridgehalten dar. Spezifische elektrische Widerstände von 3 - 30 Ωm sind in der Sohlenschicht fast im gesamten Untersuchungsgebiet

Anschriften der Verfasser:

K. Bram & T. Wonik

Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover (GGA), Stilleweg 2, D-30655 Hannover

G. Wirsing

Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Albertstr. 5, D-79104 Freiburg i. Br.

E. Brost

Forstgrund 2, D-30629 Hannover

P. Elsass

Service Géologique Régional Alsace, Lingolsheim (BRGM), Lingolsheim-BP177, F-67834 Tanneries cedex

verbreitet. Während spezifische Widerstände von 20 - 30 Ωm typisch für tonig mergelige Ablagerungen sind, sind spezifische Widerstände von 3 Ωm - 10 Ωm mit ziemlicher Sicherheit Ausdruck erhöhter Salzgehalte im Porenwasser.

In den reflexionsseismischen Messungen zeichnet sich die Aquiferbasis im gesamten Untersuchungsgebiet durch ein charakteristisches Reflexionsband mit großen Amplituden aus. Ihre Tiefenlage variiert zwischen etwa 120 m und 180 m unter Gelände. Im Bereich der durch die seismischen Untersuchungen und die anschließend abgeteufte Bohrung Balgau PM1 nachgewiesenen Aufwölbung tertiärer Festgesteine, dem „Balgauer Dom“, beträgt sie nur knapp 100 m. Bei Hartheim liegt die Aquiferbasis rund 40 m tiefer als früher angenommen wurde. Das vorhandene seismische Datenmaterial ermöglicht keine eindeutige Abgrenzung lithologischer Einheiten innerhalb der quartären Lockersedimente. Variationen des Reflektivitätsmusters geben jedoch einen groben Hinweis auf unterschiedliche lithologische Einheiten. Fehlende seismo-lithologische Charakterisierungsmerkmale erlauben keine darüber hinaus gehende Identifizierung.

Die anhand der geoelektrischen Tiefensondierung ermittelte Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände sowie die durch die Reflexionsseismik erfassten Reflektoren ergänzen sich innerhalb der Fehlergrenzen beider Verfahren sehr gut. Die z.B. aus den Bohrungen Balgau PM1 und Bremgarten GWM1 gewonnenen geologischen Informationen erlauben nicht nur eine vor allem bei oberflächennahen, hochauflösenden seismischen Messungen wichtige Teufenkalibrierung sondern auch eine lithologische Zuordnung der beobachteten Reflektivität.

Combined geophysical investigations of the aquifer structure and the chloride content of groundwater in the Southern Upper Rhine Graben between Breisach and Fessenheim

Key words

Geoelectric measurements, reflection seismics, well logging, groundwater salinity, Upper Rhine Graben

Abstract

Due to former potash mining activities, groundwater in the quaternary aquifer of the Southern Upper Rhine Graben south of the Kaiserstuhl locally contains high chloride concentrations. We used cross-border geoelectric, reflection seismic and well logging investigations in combination with lithological and hydrochemical data from new observation wells, in order to get more detailed information about the internal structure of the aquifer and of its

substratum as well as about the chloride content of groundwater. These data are important input parameters for the numerical modelling of the present day distribution of the chloride brines as well as their future propagation.

Within the quaternary gravel aquifer the transition from fresh water to groundwater with elevated chloride concentrations is reflected by contrasting specific electric resistivities between more than 100 Ωm and less than 20 Ωm . Within the substratum, the specific resistivities range from 3 to 30 Ωm throughout the investigation area. Specific resistivities of 20 to 30 Ωm are characteristic for clayey and marly sediments whereas resistivities between 3 and 10 Ωm most probably reflect pore solutions with elevated chloride concentrations.

The substratum of the aquifer is marked by a characteristic band of high amplitude reflections in seismic measurements. Its depth varies between 120 m und 180 m below surface. Locally, as for example in the area of the so called Balgauer Dome, it reaches up to 100 m below surface. Near Hartheim, the base of the aquifer is about 40 m deeper than previously thought. Due to the lack of seismo-lithologic characteristics, the reflection seismic data do not allow to differentiate between the known hydrogeological units within the gravel sequence. However, some evidence of layering is given by different patterns in reflectivity.

Within the error margin of the methods used, the distribution of the specific electric resistivity as well as the identification of characteristic seismic reflectors complement one another in terms of the location of highly concentrated chloride brines in the subsurface and of the geometry of the aquifer. Lithological well log information leads to an improvement in depth correlation of seismic data as well as in correlation of observed reflectivity with the lithologic sequence.

Reconnaissance géophysique par méthodes combinées de l'aquifère quaternaire et de la salinité des eaux souterraines dans le sud du Fossé rhénan entre Breisach et Fessenheim

Mots clés

sondages électriques, sismique réflexion, diagraphies, salinité, Fossé rhénan supérieur

Résumé

Les eaux souterraines des alluvions quaternaires du Fossé rhénan supérieur au Sud du Kaiserstuhl sont localement affectées de concentrations en chlorures très élevées, dont l'origine est attribuée aux anciennes exploitations de potasse en Alsace et au pays de Bade. Pour pouvoir modéliser l'écoulement de la nappe et faire des prévisions sur la propagation

de la pollution saline, il est nécessaire de bien connaître la structuration de l'aquifère, la morphologie du substratum et la répartition actuelle de la salinité dans les eaux souterraines. C'est dans cet objectif qu'ont été réalisées des campagnes transfrontalières de géophysique électrique, de sismique réflexion haute résolution et de diagraphies en forage, en accompagnement du forage de nouveaux piézomètres et d'études hydrogéochimiques.

Le passage des eaux douces à des eaux souterraines chargées en chlorures est marqué par un contraste dans les résistivités électriques des alluvions quaternaires saturées qui baissent de 100 Ω m environ à moins de 20 Ω m. Le substratum tertiaire montre généralement des résistivités de 3 à 30 Ω m sur l'ensemble du secteur. Comme les sédiments marneux sont habituellement caractérisés par des résistivités de l'ordre de 20 à 30 Ω m, des résistivités de 3 à 10 Ω m sont une indication assez fiable d'une salinité élevée des eaux contenues dans la porosité de ces formations.

Sur les profils de sismique réflexion, le substratum de l'aquifère est marqué dans le secteur d'étude par un réflecteur de grande amplitude très caractéristique. Sa profondeur varie généralement de 120 à 180 m sous la surface du sol. Elle se réduit à 100 m à l'aplomb d'un dôme diapirique du substratum tertiaire mis en évidence par la sismique puis confirmé par le forage du piézomètre PMI à Balgau (Alsace), baptisé "Dôme de Balgau" A Hartheim (Bade), le substratum est plus profond de 40 m par rapport aux cartographies basées sur les campagnes de recherche sismique antérieures. Les données de sismique haute résolution ne permettent pas d'identifier avec certitude les séquences lithologiques connues dans les alluvions. On devine bien la succession de séquences différentes d'après des différences dans la réflectivité des alluvions, mais l'absence de marqueurs sismo-lithologiques caractéristiques ne permet pas d'aller plus loin.

La distribution des résistivités électriques obtenues avec les sondages électriques complète très bien, dans la limite des incertitudes inhérentes aux deux méthodes, la localisation des réflecteurs identifiés par la sismique réflexion. Les données géologiques acquises notamment grâce au forage des piézomètres de Balgau PMI et de Bremgarten GWMI permettent non seulement le calage en profondeur des mesures de sismique haute résolution, mais aussi de corrélérer les réflectivités avec des faciès lithologiques.

1. Einleitung

Der Oberrhein Graben bildet den zentralen und bedeutendsten Teil des NNE – SSW verlaufenden westeuropäischen Riftsystems, das von der Nordsee bis zum Mittelmeer reicht (Abbildung 1a). In diesem Graben von ca. 300 Kilometer Länge und durchschnittlich 30 Kilometer Breite wurde im Pliozän und Quartär eine mächtige Abfolge aus Kiesen und Sanden abgelagert. Die Lockersedimentfüllung erreicht im so genannten Heidelberger Loch bei Heidelberg ihre maximale Mächtigkeit von mindestens 300 Meter (BARTZ 1974). Ein weiterer Bereich erhöhter Absenkung während des Quartärs liegt südwestlich

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingraben zwischen Breisach und Fessenheim

des Kaiserstuhles im so genannten Becken von Geiswasser, wo die Kiese und Sande ca. 240 m mächtig sind (THEOBALD 1948). Die pliozänen und quartären Lockersedimente der Grabenfüllung beinhalten mit ca. 45 Mio m³ das bedeutendste Grundwasservorkommen Mitteleuropas. Es wird von den drei Anrainerstaaten Schweiz, Frankreich und Deutschland genutzt und deckt ca. 80 % des regionalen Grundwasserbedarfes. Aufgrund dieser herausragenden Bedeutung wurden zwischen Karlsruhe und Basel die Qualität und die Strömungsverhältnisse des Grundwasservorkommen in den vergangenen Jahren in mehreren grenzüberschreitenden Studien intensiv untersucht (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ, RÉGION ALSACE 1996; RÉGION ALSACE 2000).

Neben der im Oberrheingraben gebietsweise vorhandenen Belastung durch Nitrat weist das Grundwasser unter anderem südlich und westlich des Kaiserstuhls im Raum zwischen Fessenheim im Süden und Burkheim im Norden verbreitet erhöhte Chloridkonzentrationen auf (SAUER 1970, 1978; GLA 1997). Diese so genannte „Grundwasserversalzung“ ist überwiegend die Folge des historischen Salzaustrages aus unzureichend abgedichteten Absetzbecken der deutschen und französischen Kaliindustrie (Fessenheimer Insel, Autobahnkiesgrube und Absetzbecken Rheinwärterhaus) sowie aus den Abraumhalden bei Heitersheim und Buggingen (Abbildung 1b). Ein direkter Eintrag chloridhaltiger Lösungen aus den salzführenden oligozänen Pechelbronner Schichten in den quartären Kiesaquifer ist dagegen vernachlässigbar gering (BAUER et al. in prep.).

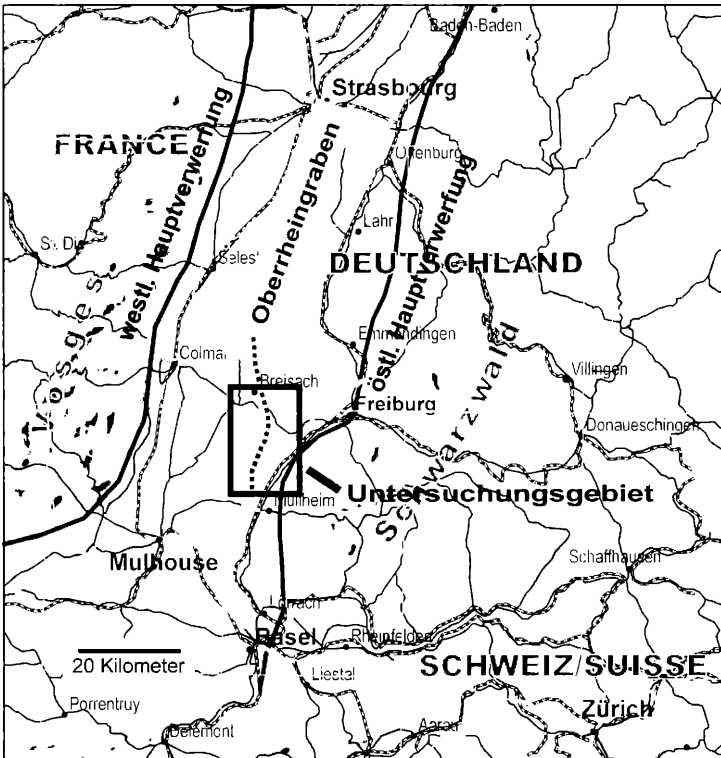


Abb. 1a: Lage des Untersuchungsgebietes im südlichen Oberrheingraben (strichliert: Verlauf des schematischen geologischen Schnittes, siehe Abbildung 2).

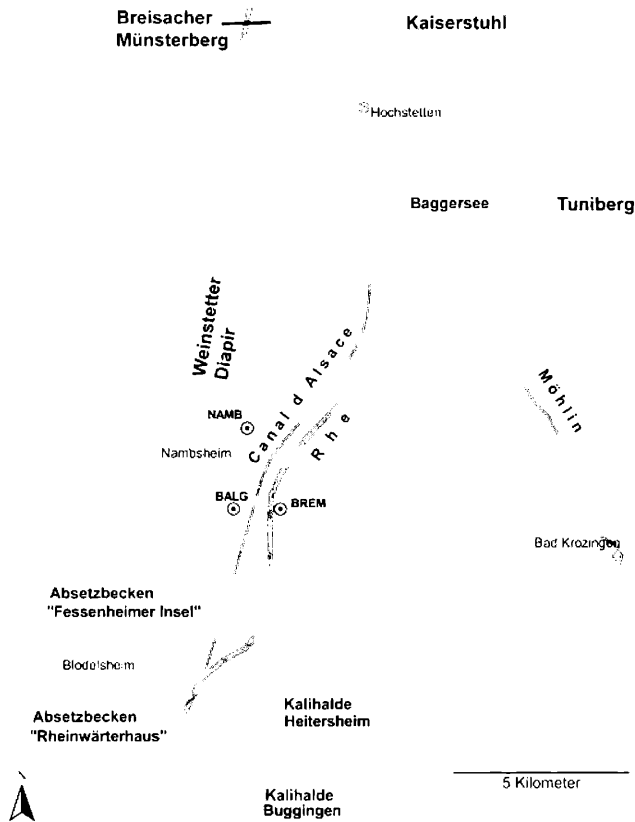


Abb. 1b: Untersuchungsgebiet mit den Chlorideintragsstellen und den Bohrungen Namsheim (NAMB), Bremgarten GWM1 (BREM) und Balgau PM1 (BALG).

Wesentlich für die Ausbreitung chloridhaltiger Lösungen sind die vom Salzgehalt der Porenlösung abhängende Grundwasserdichte und die Aquifergeometrie. Änderungen des Salzgehaltes bewirken aber auch Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes. Dabei zeichnet sich vor allem der Kontakt Salz-/Süßwasser durch eine sprunghafte Änderung des elektrischen Widerstandes des Grundwassers aus. Form und Füllung eines Grundwasserleiters werden dagegen von dessen Mächtigkeit und unterschiedlichen Sedimentationsvorgängen bestimmt. Die lithofazielle und strukturelle Gliederung spiegelt sich im Allgemeinen durch unterschiedliches elastisches Gesteinsverhalten wider. Neben einer direkten Beprobung mittels entsprechender Bohrungen liefert deshalb vor allem eine Kombination geophysikalischer, insbesondere geoelektrischer und seismischer Verfahren wertvolle Grundlagendaten als Eingangparameter für ein detailliertes Grundwasserströmungsmodell (LANG et al. in prep.).

Im Rahmen des von der EU geförderten INTERREG-II Oberrhein Mitte-Süd Projektes „Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fes-

senheim und Breisach“ fanden deshalb in diesem Gebiet neben flächendeckenden hydrochemischen Untersuchungen des Grundwassers auch geophysikalische Messungen statt. Ziel war es, den bislang unzureichend bekannten geologisch-hydrogeologischen Aufbau der quartären Lockergesteinsfüllung und deren Basis zu erkunden sowie die Chloridkonzentrationen im Untersuchungsgebiet zu kartieren. Über die Ergebnisse der geophysikalischen Erkundung wird im Folgenden berichtet.

2. Geologie und Hydrogeologie

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich nahezu symmetrisch beiderseits des Rheins und des auf französischer Seite verlaufenden Canal d'Alsace zwischen Rumersheim und Buggingen im Süden und Burkheim im Norden auf einer Länge von ca. 15 Kilometern. Es liegt in der Inneren und Äußerer Grabenzone des Oberrheingrabens (Abbildung 1a).

Die quartäre Kiesabfolge im südlichen Oberrheingraben wird hauptsächlich auf der Grundlage lithologischer Unterschiede (Gehalt an Kies/Sand/Schluff, Groblagen, Verhältnis zwischen Komponenten alpiner und lokaler (Schwarzwald/Vogesen) Herkunft, Alterationsgrad der Komponenten, Lagerungsdichte) in die drei hydrogeologischen Einheiten Neuenburg-Formation, Breisgau-Formation und Iffezheim-Formation untergliedert (Abbildung 2). Die sandig-kiesigen Sedimente der Neuenburg- und Breisgau-Formation bilden den Hauptgrundwasserleiter, die sandig schluffige Iffezheim-Formation und der Festgesteinsuntergrund die Aquiferbasis (HYDROGEOLOGISCHE KARTE VON BADEN-WÜRTTEMBERG 1977; LGRB 2000).

Die Neuenburg-Formation besteht aus grauen bis rötlichgrauen Kiesen mit wechselnden Sand- und geringen Schluffanteilen. Stellenweise sind in die Kiese Steine und Blöcke bzw. sehr hoch durchlässige Rollkieslagen eingeschaltet. Mit Annäherung an den Rhein nimmt der am Schwarzwald-/Vogesenrand dominierende Anteil an kristallinen Geröllen ab und es überwiegen Gerölle alpiner Herkunft. Die Sortierung nimmt in diese Richtung zu. Innerhalb der Kiesabfolge sind linsenartig sandige Bereiche ausgebildet, die lateral nur über kurze Entfernungen korreliert werden können. Hydraulisch wirksame Trennschichten fehlen innerhalb der Neuenburg-Formation im Untersuchungsgebiet.

Die Breisgau-Formation besteht aus unterschiedlich dicht gelagerten, sandig-schluffigen Kiesen, in die stellenweise geringmächtige Schlufflinsen eingelagert sind. Die Gerölle sind z.T. frisch bzw. bereichsweise mäßig bis sehr stark verwittert. Sie zerfallen dann zu Mittel- bis Grobsand. Allgemein nehmen der Zersetzungsgrad und die Lagerungsdichte mit der Tiefe zu. Aufgrund der lithologischen Ausbildung wird die Breisgau-Formation im rheinnahen Bereich in eine mittel bis hoch durchlässige obere Abfolge (Obere Breisgau-Schichten) und in eine mäßig bis gering durchlässige untere Abfolge (Untere Breisgau-Schichten) unterteilt.

Die Iffezheim-Formation besteht aus stark schluffig-tonigen, z.T. schwach kiesigen Sanden und Schluffen. Sie bildet die Sohlenschicht des quartären Kiesgrundwasserleiters. Die überwiegend sehr dicht gelagerten kalkfreien Sedimente sind rötlich bis beige bzw. durch Vergleyung grünlichgrau gefärbt. In den beiden im Rahmen des Interreg-Projektes abgeteufte Bohrungen bei Hartheim und Namsbheim wurden im unteren Abschnitt der Iffezheim-Formation völlig zersetzte und dicht gelagerte graue bis grünlichgraue Kiese angetrof-

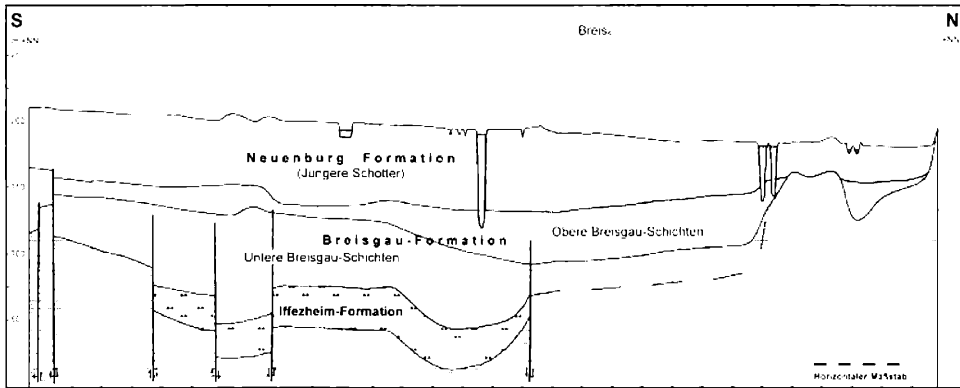


Abb. 2: Schematischer geologischer Längsschnitt (S-N) durch das Untersuchungsgebiet (Schnittverlauf: siehe Abbildung 1a).

fen (REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG, 2002). Die Iffezheim-Formation ist gering bis sehr gering durchlässig.

Der Festgesteinsuntergrund besteht südlich des Kaiserstuhls überwiegend aus gering durchlässigen Tonmergel- und Mergelsteinen des Tertiärs (Oligozän). In der Bohrung Hartheim wurden direkt unter der Iffezheim-Formation grünliche Sande erbohrt, die vermutlich der tertiären Elsässer Molasse zuzuordnen sind. Die z.T. sandig-schluffigen Tonmergelsteine und Mergelsteine des Tertiärs sind sehr gering, die Sande der Elsässer Molasse gering durchlässig.

3. Geophysikalische Erkundung

3.1 Geoelektrische Tiefensondierungen

Seit Anfang 1990 wurden im Gebiet südlich des Kaiserstuhls geoelektrische Gleichstrom-Tiefen-Sondierungen (GTS) zur systematischen Untersuchung der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes durchgeführt (z.B. BROST & SPITZER 1995; BROST 1996) (Abbildung 3). Die Messungen erfolgten überwiegend in der so genannten Schlumbergerkonfiguration. Die Vierpunkt-Anordnung besteht aus jeweils zwei Stromeinspeiseelektroden mit variablem Abstand L und zwei Potenzialfeldelektroden mit relativ geringem Abstand in der Mitte der Auslage. Die maximale Auslagenlänge $L/2$ betrug 800 m, die Richtung der Auslage orientierte sich an den Geländegegebenheiten. Aus einer Sondierungskurve lassen sich im Allgemeinen die Anzahl der Schichten, die Schichtmächtigkeiten und die spezifischen elektrischen Widerstände der Schichten ableiten.

Die Auswertung der Sondierungskurven beruhte sowohl auf einem Vergleich mit Modellkurven (MUNDRY & HOMILIUS 1980) als auch auf dem von MUNDRY & DENNERT (1983) entwickelten 1D-Umkehrverfahren INGESO. Abbildung 4a zeigt eine für das Untersuchungsgebiet typische Sondierungskurve. Bei einer Auslage von $L/2$ gleich 600 m deuten die zwei Dekaden umfassenden Widerstandsänderungen auf einen mehrschichtigen Untergrund hin. Bei freier Variation des Parameters ‚Mächtigkeit‘ sowie Vorgabe von vier

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim

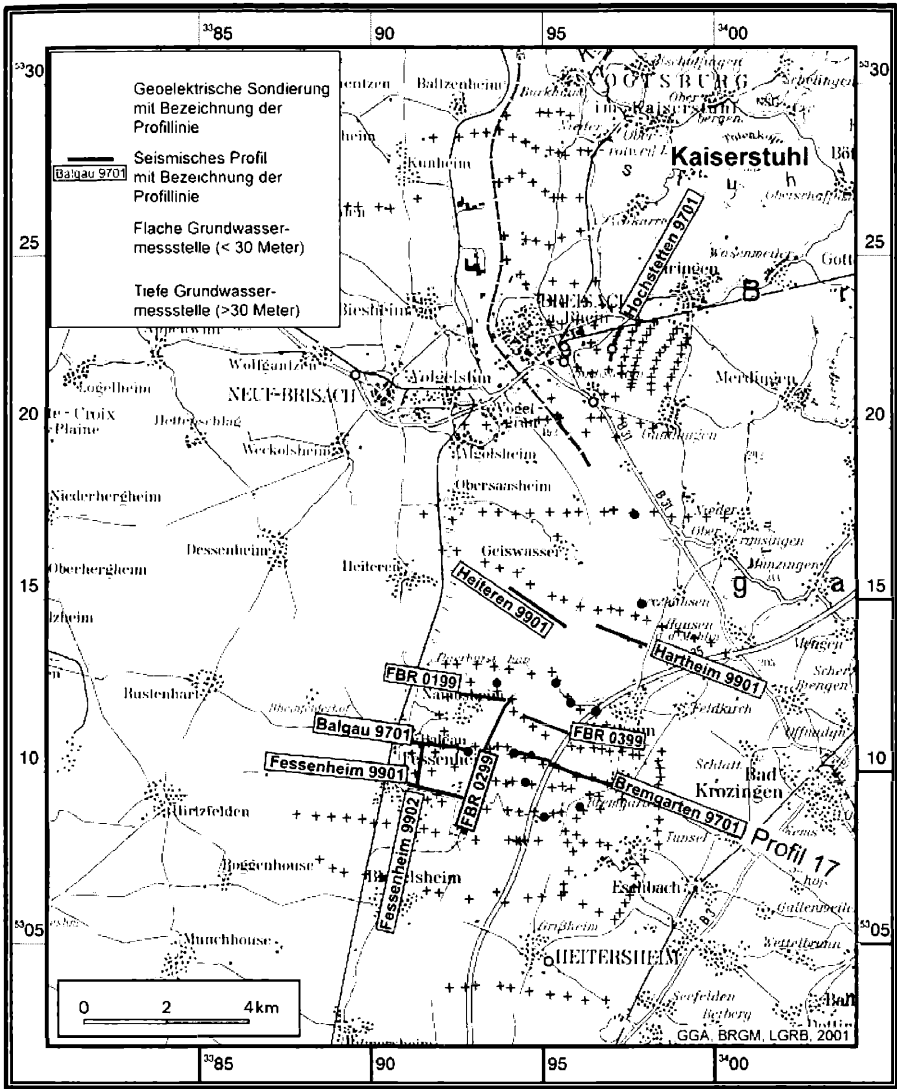


Abb. 3: Lage der geoelektrischen Sondierungspunkte und der reflexionsseismischen Profile.

Schichten passt das von RODEMANN (1997) erweiterte INGESO-Programm GKF2 innerhalb einer Fehlergrenze q von rund 10 % die Parameter befriedigend an die Messwerte an (Abbildung 4b). Die kumulierten Schichtmächtigkeiten, dargestellt als Rechteckkurve, geben die Tiefen der Widerstandsänderungen an.

Die Lage der längs Profilen angeordneten Sondierungspunkte ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Die Ergebnisse der über 320 Sondierungspunkte sind umfassend bei BRAM et al. (2001) dokumentiert.

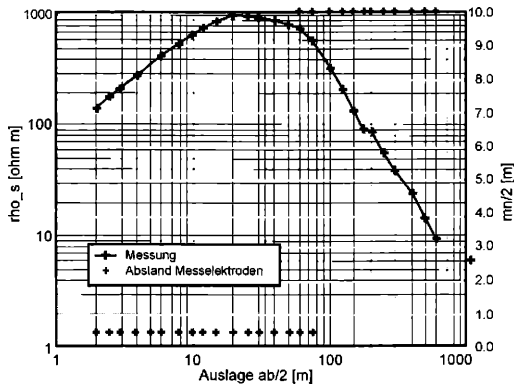


Abb. 4a: Typische Gleichstrom Geoelektrische Tiefsondierungskurve.

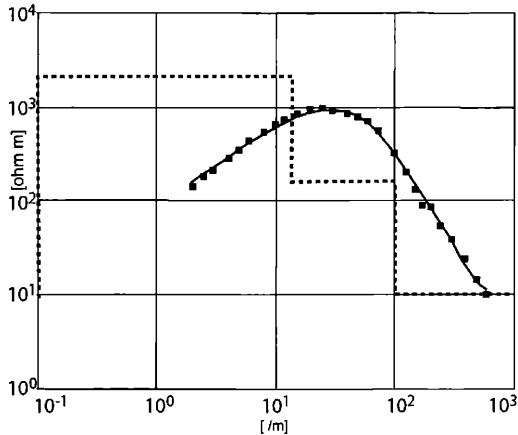


Abb. 4b: Typische Gleichstrom Geoelektrische Tiefsondierungskurve aus dem Untersuchungsgebiet mit 1D-Inversion.

3.2 Reflexionsseismik

Reflexionsseismische Profile der Kohlenwasserstoffindustrie aus den 1980er Jahren liefern im Bereich südlich des Kaiserstuhls nahezu keine Informationen über oberflächennahe, das Quartär betreffende Strukturen. LUTZ & CLEINTUAR (1999) haben entsprechende Messungen auf französischer Seite umfassend ausgewertet. Als oberste Struktur zeichnet sich dabei die Quartärbasis meist als nahezu ebener Reflektor von unterschiedlicher Qualität ab. Der Tiefenbereich von der Erdoberfläche bis zur Quartärbasis ist nicht aufgelöst.

Bei der Erkundung oberflächennaher geologischer Strukturen haben sich hochauflösende reflexionsseismische Messungen bewährt (z.B. GREEN et al. 1995; WIEDERHOLD et al. 1998; THOMAS et al. 2002). Deshalb wurden zur Klärung von Morphologie und Tiefenlage der Aquiferbasis sowie möglicher lithofazieller Abgrenzungen innerhalb der quartären Ablagerungen südlich des Kaiserstuhls 10 hochauflösende reflexionsseismische Pro-

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingraben zwischen Breisach und Fessenheim

file vermessen. Die kombinierte Bewertung der unterschiedlichen physikalischen Parameter, spezifischer elektrischer Widerstand einerseits und elastisches Gesteinsverhalten bzw. Reflektivität (akustischer Impedanzkontrast) andererseits, führt zu einer Reduzierung der Mehrdeutigkeit der Ergebnisse eines einzelnen Verfahrens. Die seismischen Messungen wurden deshalb vorzugsweise längs geoelektrisch vermessener Profile ausgeführt. Dies ermöglichte eine gemeinsame Interpretation unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Bohrungen in unmittelbarer Profildnähe. Die Lage der Profile ist aus der Abbildung 3 ersichtlich. Tabelle 1 enthält die wichtigsten Profildaten.

Die Abtaste- bzw. der Abstand der seismisch erfassten Unterpunkte (CMP = common mid point) ist einheitlich 5 m. Die seismischen Quellen waren zum einen der Kleinvibrator des GGA-Instituts (BUNESS et al. 1997) sowie seitens der Firma Geophysik GGD Leipzig ein beschleunigtes Fallgewicht vom Typ EWG III. Dementsprechend unterschiedlich sind Frequenzgehalt und Form der seismischen Signale. Der vom Vibrator abgestrahlte "sweep" variierte linear von 40 Hz bis 160 Hz. Die Qualität der Rohdaten nach der Korrelation mit dem Vibratorsignal ist aus der Abbildung 5 ersichtlich. Die einzelnen Bearbeitungsschritte der reflexionsseismischen Daten sind bei BRAM (1998), BRAM et al. (2000) und HARTMANN & SEITZ (2000) dokumentiert.

Tab. 1 Profildaten der hochauflösenden reflexionsseismischen Messungen (GGA: Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover; GGD: Geophysik Leipzig).

Profilbezeichnung	Profillänge	Geophongruppenabstand	Anrengungspunkt-abstand	Anrengungspunkte	Quelle	Datum	Messung durch	TK 25
Bremgarten 9701	3080 m	10 m	10 m	48-309	GGA-Klein-vibrator	7.- 9.10.97	GGA Hannover	8011 Hartheim
Hochstetten 9701	970 m	10 m	10 m	1 - 98	GGA-Klein-vibrator	10.10.97	GGA Hannover	7911 Breisach am Rhein
Balgau 9701	1660 m	10 m	10 m	1 - 167	GGA-Klein-vibrator	13. - 14.10.97	GGA Hannover	3719 Est, Neuf-Breisach (IGN)
Heiteren 9901	1800 m	10 m	10 m	1 - 180	GGA-Klein-vibrator	5. - 7.10.99	GGA Hannover	3719 Est, Neuf-Breisach (IGN)
Fessenheim 9901	1510 m	10 m	10 m	1 - 151	GGA-Klein-vibrator	8. - 9.10.99	GGA Hannover	3719 Est, Neuf-Breisach (IGN)
Fessenheim 9902	1390 m	10 m	10 m	1 - 139	GGA-Klein-vibrator	11. - 12.10.99	GGA Hannover	3719 Est, Neuf-Breisach (IGN)
Hartheim 9901	1620 m	10 m	10 m	1 - 162	GGA-Klein-vibrator	13. - 14.10.99	GGA Hannover	8011 Hartheim
FBR 0199	1500 m	10 m	10 m	148	Fallgewicht EWG III	11. - 16.11.99	GGD Leipzig	3719 Est, Neuf-Breisach (IGN)
FBR 0299	2300 m	10 m	10 m	229	Fallgewicht EWG III	11. - 16.11.99	GGD Leipzig	3719 Est, Neuf-Breisach (IGN)
FBR 0399	1500 m	10 m	10 m	150	Fallgewicht EWG III	11. - 16.11.99	GGD Leipzig	8011 Hartheim

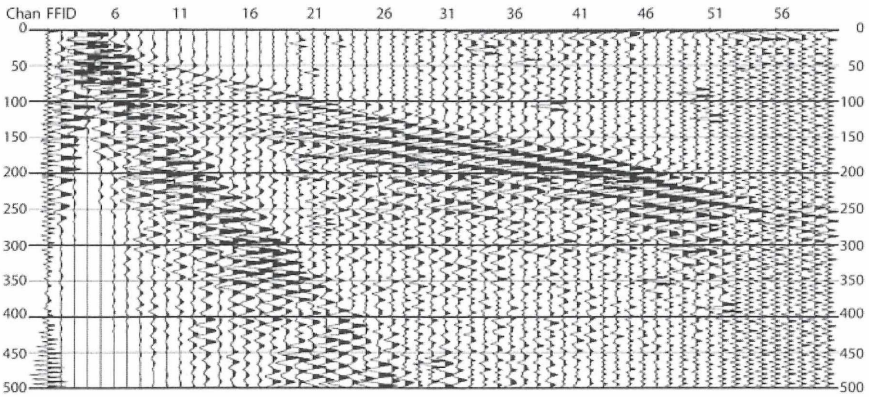


Abb. 5a: Fessenheim 9901, Rohdaten vom Vibratorpunkt 4, Kanal 1 ist mit dem Korrelationssignal belegt.

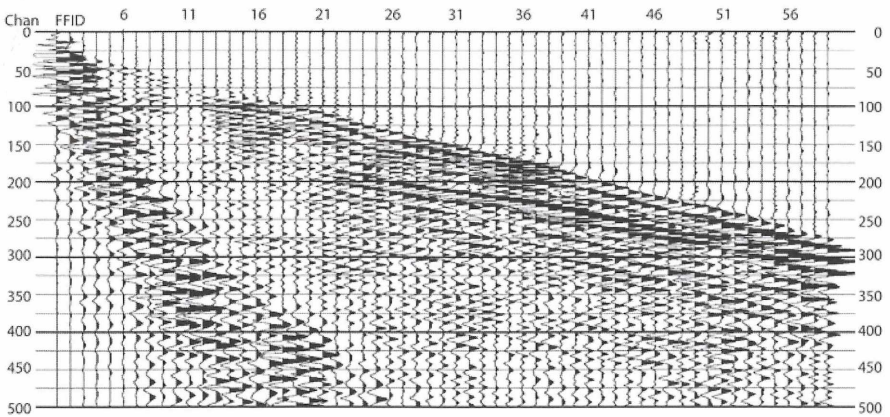


Abb. 5b: Hartheim 9901, Rohdaten vom Vibratorpunkt 62. Der mit dem Korrelationssignal belegte Kanal 1 ist durch einen ersten Bearbeitungsprozess abgetrennt.

3.3 Bohrlochmessungen

Bohrloch-geophysikalische Vermessungen erfolgten in zwölf der bis zu 159 m tiefen Grundwassermessstellen. Ihre Lage ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Entsprechend der Aufgabenstellung standen die Parameter natürliche Gammastrahlung (GR bzw. SGR) und elektrische Leitfähigkeit des Gebirges (IND) sowie Temperatur (TEMP) und Salinität (SAL) des Grundwassers im Vordergrund. Außerdem wurde die vertikale Fließbewegung des Grundwassers in den Messstellen (FLOW) untersucht. Eine Beschreibung der verwen-

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim

deten Messapparatur und der Messverfahren ist bei WONIK & SALGE (2000) zu finden. Die Flowmeter-Messungen (FLOW) erbrachten in den Grundwassermessstellen keine Hinweise auf vertikale Fließbewegungen oberhalb der Detektionsschwelle des Flowmeters. Das Salinitätslog (SAL) liefert tiefenbezogene Informationen über den Gehalt an gelösten Inhaltsstoffen im Grundwasser. Wiederholungsmessungen in zeitlichen Abständen erlauben die Kontrolle zeitlicher Veränderungen der Salinität. Da die Grundwassermessstellen mit PVC-Rohren ausgebaut sind, konnten nur die spezifischen elektrischen Widerstände der Bohrlochflüssigkeit und des Gebirges bestimmt werden.

Die Kiese im Untersuchungsgebiet weisen meist nur geringe Änderungen in den physikalischen Eigenschaften auf. Ein Beispiel ist die Bohrung Bremgarten GWM1 (Abbildung 6). Bis in eine Tiefe von 158 m wurden Kiese mit leicht unterschiedlicher Zusammensetzung erbohrt. Der abrupte Anstieg der natürlichen Gammastrahlung in 158 m Tiefe ist auf den Wechsel zur tonig-schluffigen Iffezheim-Formation zurückzuführen.

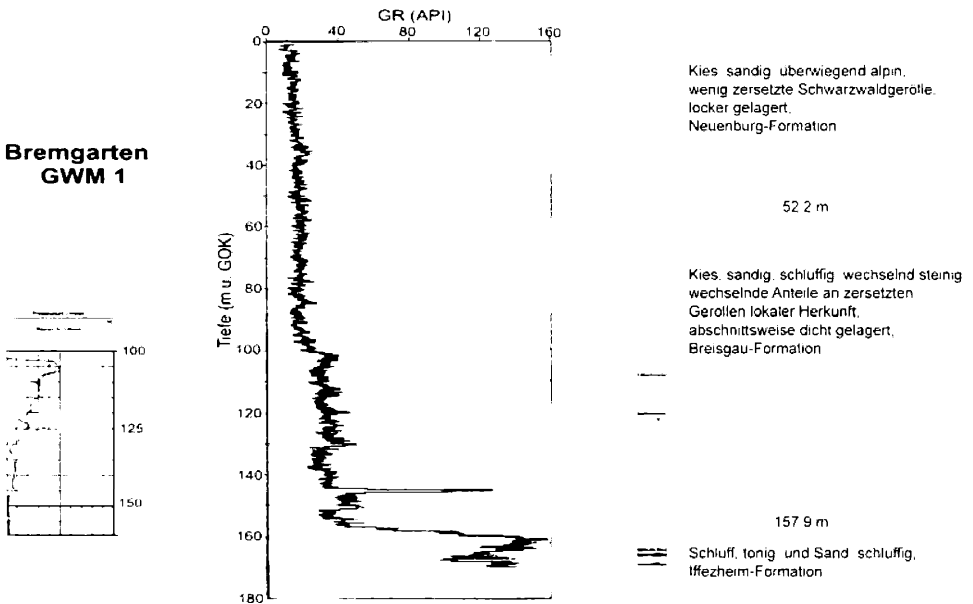


Abb. 6: IND-Log (links), GR-Log (Mitte) und lithologisches Profil (rechts) der Bohrung Bremgarten GWM1. Das IND-Log umfasst den Wertebereich 0 Ω m - 100 Ω m.

4. Ergebnisse

4.1 Geoelektrische Tiefensondierungen

Ergebnisse geophysikalischer Untersuchungen liefern insbesondere in Bezug auf die Potenzialverfahren ein mehrdeutiges Bild des Untergrundes. Eine vergleichende, gemeinsame Bewertung der unterschiedlichen physikalischen Parameter, insbesondere des spezifischen elektrischen Widerstandes und des elastischen Verhaltens bzw. der Reflektivität

(akustische Impedanzkontraste) führt daher im Allgemeinen zu einer Reduzierung der Mehrdeutigkeit der Ergebnisse eines einzelnen Verfahrens. An Hand eines Profils, das das Untersuchungsgebiet von West nach Ost zwischen Balgau und Bremgarten quert, werden die Ergebnisse beispielhaft diskutiert und bewertet (Profil 17 in Abbildung 3). Die gemeinsame Interpretation wird dabei durch die Ergebnisse der auf dem Profil liegenden Bohrungen Balgau (BALG), Bremgarten (BREM) (Abbildung 1b) und der in unmittelbarer Nähe gelegenen Bohrung B4/252 unterstützt.

Die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Tiefe ist für das Profil 17 in Abbildung 7 gezeigt. Die spezifischen Widerstände lassen sich grob in vier Bereiche einteilen. Im unteren Teufenbereich weisen diese, bedingt durch die überhöhte Darstellung, eine beachtliche Morphologie auf.

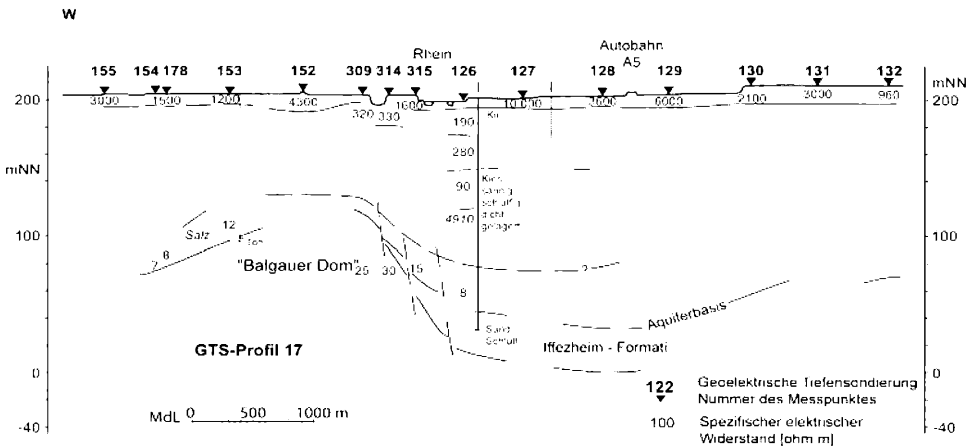


Abb. 7: Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes längs eines von Balgau im Westen nach Bremgarten im Osten verlaufenden Profils (Profil 17 in Abbildung 3).

Charakteristisch für trockene, im gesamten Untersuchungsgebiet direkt unter der Geländeoberfläche verbreitete Kiese sind spezifische Widerstände von mehr als 1000 Ωm . Die folgenden spezifischen Widerstände liegen in der Größenordnung von 90 - 600 Ωm . Sie können den kiesigen Ablagerungen der Neuenburg- und/oder der Breisgau-Formation zugeordnet werden. Der spezifische Widerstand der Kiese ist umso geringer, je größer der Anteil tonig-schluffiger Beimengungen sowie der Salzgehalt des Grundwassers sind. Spezifische Widerstände zwischen 90 Ωm und 200 Ωm lassen sich deshalb durch erhöhte Chloridkonzentrationen im Porenwasser oder zunehmend tonig-schluffige Beimengungen im Kies erklären. Darunter folgt ein Bereich mit spezifischen Widerständen von 3 - 30 Ωm . Diese geringen Widerstände sind fast im gesamten Messgebiet verbreitet. Während spezifische Widerstände von 20 - 40 Ωm für die überwiegend tonig-schluffige Iffezheim-Formation und die darunter folgenden tertiären Ablagerungen charakteristisch sind, muss man bei spezifi-

schen Widerständen unter 20 Ωm mit einem erhöhten Lösungsinhalt im Porenwasser rechnen. Spezifische Widerstände von 3 - 10 Ωm deuten mit ziemlicher Sicherheit auf eine Salzbelastung hin. In weiten Bereichen bildet die meist aus Tonen und Schluffen bestehende Iffezheim-Formation die Aquiferbasis. Sofern die quartären Kiese im unteren Abschnitt der Breisgau-Formation Grundwasser mit erhöhter Chloridkonzentration führen, ist eine Grenzziehung zu den unterlagernden feinklastischen Sedimenten nicht eindeutig möglich. In beiden Fällen variieren die spezifischen elektrischen Widerstände zwischen 10 Ωm und 40 Ωm . Damit bleibt die Interpretation der geoelektrischen Messwerte hinsichtlich der für die Modellierung der hydrogeologischen Verhältnisse wichtigen Parameter Morphologie und Tiefenlage der Aquiferbasis unsicher.

4.2 Bohrlochmessungen

Zur weitergehenden Interpretation der geoelektrischen Messergebnisse dienen Bohrlochmessungen der elektrischen Leitfähigkeit des Gebirges. Abbildung 8 zeigt neben der lithologischen Ansprache das Ergebnis einer 1D-Inversion der Geoelektrischen Tiefensondierung (GTS) 136. Der Messpunkt GTS 136 liegt in unmittelbarer Nähe zur Bohrung B4 (Ro7911/252) und nur etwa 750 m südlich von GTS 130 (Abbildung 7). Die Messungen lassen sich mit einem minimalen Fehler von rund 5% durch ein Dreischichtmodell erklären: Eine Schicht mit einem spezifischen Widerstand von 10100 Ωm für die obersten 2 m, darunter bis zu einer Tiefe von 71 m (ca. 140 m NN) eine Schicht mit einem spez. Widerstand von 170 Ωm und darunter eine unendlich mächtige Schicht mit einem spez. Widerstand von 7 Ωm . Auf Grund des Äquivalenzprinzips in der Geoelektrik sind weitere Lösungen mit ähnlichem Fehler möglich. Die Grenze zwischen zweiter und dritter Schicht kann zwischen 63 m und 78 m liegen, die spezifischen Widerstände für die zweite Schicht schwanken dann zwischen 130 Ωm und 220 Ωm bzw. zwischen 6 Ωm und 8 Ωm für die dritte Schicht. In der rechten Säule sind für den Tiefenbereich von 15 m bis 151 m die Ergebnisse der Bohrlochmessung dargestellt. Dabei wurden die sehr detaillierten Messungen in entsprechenden Abschnitten mit ähnlichen Werten gemittelt. Es ergibt sich eine markante Schichtgrenze bei 77 m. Hier nehmen die spezifischen Widerstände von 80 Ωm auf 30 Ωm ab. Bei 100 m Teufe (ca. 110 m NN) beträgt der spezifische Widerstand 10 Ωm und unterhalb von 115 m (ca. 105 m NN) nur noch 5 Ωm .

Die aus der Bohrlochmessung und den geoelektrischen Messungen an der Erdoberfläche abgeleiteten spezifischen Widerstände stimmen größenordnungsmäßig überein. Die Abweichungen sind in erster Linie durch das unterschiedliche Auflösungsvermögen der Verfahren sowie durch das von den Messungen erfasste unterschiedliche Gesteinsvolumen bedingt.

4.3 Reflexionsseismik

Die beiden durch den Rhein getrennten reflexionsseismischen Profile Balgau 9701 (Abbildung 9a) und Bremgarten 9701 (Abbildung 9b) liegen unmittelbar nördlich vom Vertikalschnitt 17 der Widerstandsverteilung (Abbildung 3). Auffallendstes Element in der Stapelsektion der Zeitdarstellung des Profils Balgau 9701 (Abbildung 9a) ist ein relativ schmales, mit großen Amplituden ausgezeichnetes Reflexionsband, das sich, von einigen Bereichen abgesehen (z.B. CMPs um 130 und 190-260), über die gesamte Profillänge ver-

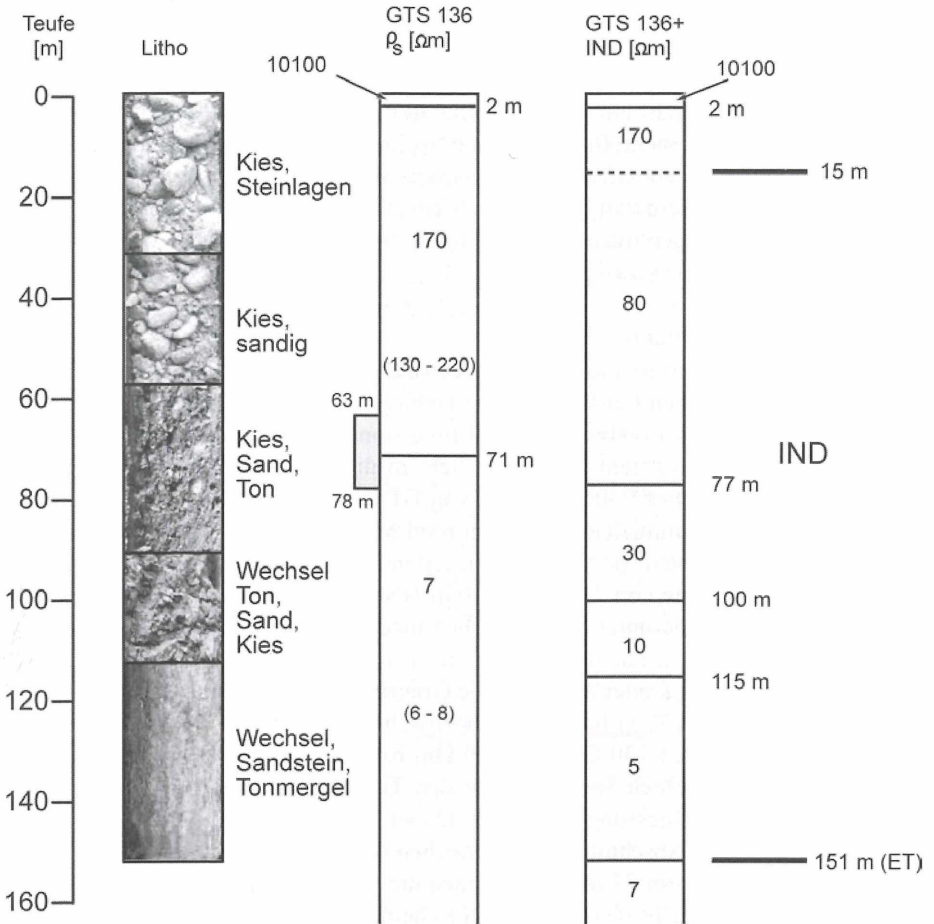


Abb. 8: Vergleich der Ergebnisse einer 1D-Inversion der Goelektrischen Tiefensondierung GTS 136 (Mitte) mit bohrlochgeoelektrischen Messungen (rechts) in der unmittelbar benachbarten Bohrung B4 (Ro7911/252). GTS 136 und Bohrung B4 befinden sich etwa 750 m südlich des Messpunktes GTS 130 des in Abbildung 7 gezeigten Profils 17.

folgen lässt. Die Zweiweglaufzeit nimmt von 130 ms im Westen (CMP 15) auf 95 ms bei CMP 310 ab und beträgt am Profilende bei CMP 330 nur noch etwa 90 ms. Diese Amplituden werden als Reflexion von der Kiesbasis gedeutet. Im Zeitbereich von 0 ms bis 100 ms sind Reflexionen nur schwach ausgebildet. Eine durchgehende, mehr oder weniger horizontale Reflexion bei rund 10 ms lässt sich ab etwa CMP 150 bis zum östlichen Profilende verfolgen. Ansonsten sind in diesem Zeitbereich die Reflexionen meist nur, wie z. B. bei etwa 50 ms (CMPs 10 - 40), über einige Zehner CMP's verfolgbar. Zwischen 60 ms und 100 ms ändert sich im Entfernungsbereich etwa ab CMP 175 bis CMP 300 das Reflektivitätsmuster. Die zwar weiterhin nur über wenige Spuren kohärenten Signale haben jedoch größere Amplituden.

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim

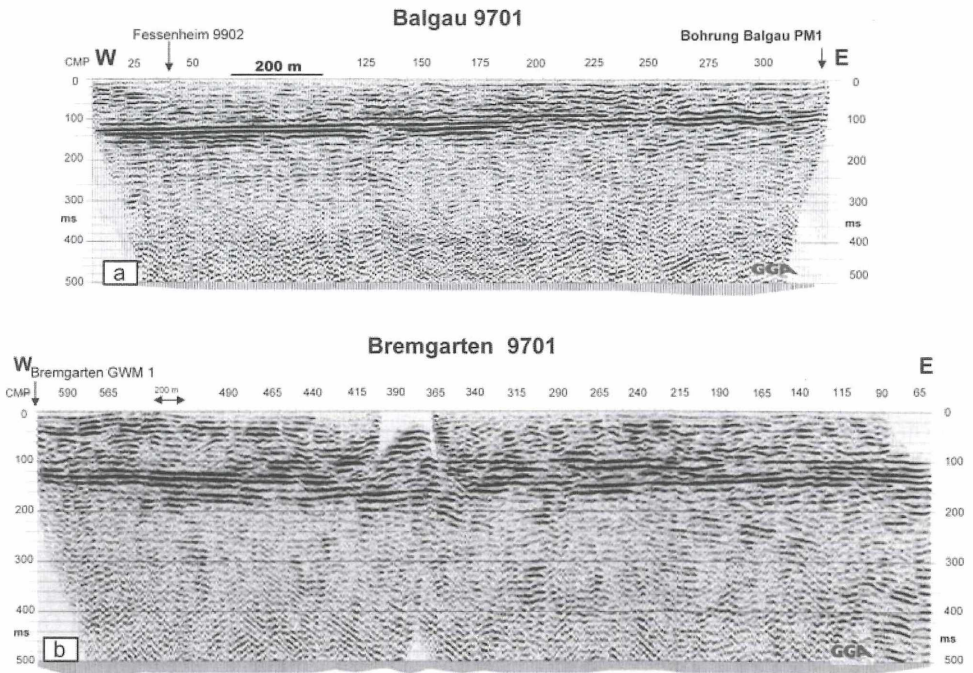


Abb. 9: Stapelsektionen der reflexionsseismischen Profile Balgau 9701 (a) und Bremgarten 9701 (b). Die Laufzeiten in ms entsprechen Zwei-Weg-Laufzeiten.

Im Profil Bremgarten 9701 (Abbildung 9b) markieren kräftige Amplituden bei 120 bis etwa 130 ms einen nahezu horizontal verlaufenden Reflektor im Bereich der CMPs 608 bis 420. Im weiteren Verlauf nach Osten ist eine durchgehende Phasenkorrelation nicht nur wegen der durch die Autobahn bedingten Lücke (CMP 400 - 360) schwierig. Sie dürfte jedoch der bei etwa 130 ms zwischen CMP 340 und CMP 290 beobachteten kräftigen Reflexion entsprechen. Offensichtlich setzt sich dieser Reflektor, bedingt durch eine Störung im Bereich der CMPs 270-265, bei 120 ms fort. Eine weitere Störung bei CMP 140 führt zu einem weiteren Versatz. Der etwa ab CMP 260 von 150 ms bis zum östlichen Profilende auf 140 ms leicht ansteigende Reflektor ist möglicherweise bereits älteren Sedimenten zuzuordnen. Zeitliche Versätze, wie z.B. bei CMP 337, 277 oder 217 oder Änderungen im Signalbild, wie z.B. bei CMP 457 können als junge Störungen gedeutet werden. Der Zeitbereich von 0 bis etwa 100 ms Zweiweglaufzeit (TWT) ist durch zahlreiche, meist nur über wenige Spuren verfolgbare kohärente Signale gekennzeichnet, z.B. der Bereich zwischen den CMPs 180 und 260. Bei 40 ms deutet sich ab etwa CMP 460 eine fast durchgehende Reflexion in Richtung westliches Profilende bis etwa zu CMP 580 an. Der Zeitbereich darunter bis 120 ms ist dort relativ reflexionsarm. Der Bereich 120 ms bis 180 ms ist dagegen über die gesamte Profillänge durch lang aushaltende, nahezu horizontal verlaufende Reflexionen gekennzeichnet.

fende Reflexionen geprägt. Reflektierte Signale mit Laufzeiten über 200 ms sind vor allem im mittleren und östlichen Profilabschnitt sichtbar, wobei ab CMP 240 ein geneigtes Reflexionsband bis auf 400 ms am Profilende abtaucht. Der ab CMP 240 sichtbare und nach Osten abtauchende Reflektor ist der Nordostflanke des Weinstetter Diapirs (ESSLINGER 1968) zuzuordnen.

Die aus Bohrungen und den geoelektrischen Tiefensondierungen erhaltenen Ergebnisse lassen sich besser mit den in Tiefen konvertierten Stapelsektionen vergleichen (Abbildungen 10a bis 10c). Die Quartärbasis steigt vom westlichen Profilende (Profil Balgau 9701) relativ stetig von rund 150 m bis auf 100 m bei CMP 330 an. Kleinere Versätze, wie z.B. bei CMP 260, können als Störungen interpretiert werden. Die Quartärbasis liegt dort somit rund 70 m höher als in der HYDROGEOLOGISCHEN KARTE VON BADEN-WÜRTTEMBERG (1977) postuliert und noch rund 60 m höher als östlich des Rheins durch die Bohrung Bremgarten GWM1 und das seismische Profil Bremgarten 9701 nachgewiesen. Die daraufhin bei CMP 330 angesetzte Bohrung Balgau PM1 bestätigte diese bis dato unbekannte Hochlage der Aquiferbasis (WIRSING et al. 1999a). Sie erbohrte Tertiär in einer Teufe von 106 m unter GOK. Um die räumliche Ausdehnung dieser als ‚Balgauer Dom‘ bezeichneten Hochlage zu erfassen, diente das 1999 vermessene reflexionsseismische Profil FBR 0299 (Lage siehe Abbildung 3). Im Vergleich zur relativ flach ansteigenden nördlichen Flanke fällt die südliche Flanke steil ab (Abbildung 10c). Störungen lassen sich bis in jüngste quartäre Ablagerungen beobachten. Die im Hangenden der Quartärbasis beobachteten Reflexionen lassen sich wahrscheinlich nagelfluhartig verbackenen Kiesen zuordnen, die in der Bohrung Balgau PM1 in einer Teufe von 78 m angetroffen wurden. Die Hochlage der Quartärbasis dürfte auf tektonische Bewegungen im salinaren tertiären Untergrund zurückzuführen sein. Die Sprunghöhe von rund 60 m gegenüber der Tiefenlage der Quartärbasis östlich des Rheins (siehe Profil Bremgarten 9701) deutet auf eine beachtliche junge Störung hin. Sie steht vermutlich im Zusammenhang mit dem unter der Quartärbasis am östlichen Profilende angedeuteten geneigten Reflektor, der der westlichen Flanke des Weinstetter Diapirs (ESSLINGER 1968) zugeordnet wird.

Das geologische Profil der 170 m tiefen Bohrung Bremgarten GWM I (WIRSING et al. 1999b), die sich am westlichen Ende des seismischen Profils Bremgarten 9701 bei CMP 608 befindet, gliedert sich in drei geologische und hydrogeologische Einheiten. Von 0 bis 52 m überwiegen grobe, lockere Kiese alpinen Ursprungs mit wenig zersetzten Schwarzwaldgeröll. Dieser Teufenbereich entspricht der Neuenburg-Formation. Dann folgen bis 158 m Kiese und Sande mit abschnittsweise dicht gelagerten, teilweise zersetzten Schwarzwaldgeröll (Breisgau-Formation). Darunter liegen auch im Gamma-Ray Log (Abbildung 6) gut erkennbare tonige Schluffe und Sande der Iffezheim-Formation. Der tertiäre Festgesteinsuntergrund wurde in der Bohrung Bremgarten GWM 1 nicht erbohrt.

Seismisch lässt sich die Grenze zwischen der Neuenburg-Formation und der Breisgau-Formation im Bereich CMP 580 bis CMP 460 am ehesten durch den in ca. 50 m Tiefe liegenden Reflektor deuten. Die heterogenen Lagerungsverhältnisse der Lockersedimente machen eine eindeutige Zuordnung jedoch fraglich. Die im Allgemeinen zwischen 150 m und 200 m Tiefe beobachteten kräftigen Reflexionen korrelieren mit der Iffezheim-Formation bzw. dem Übergang Iffezheim-Formation zum tertiären Festgestein. Die Tiefendifferenz von etwa 8 m im Bereich der Bohrung lässt sich zwanglos durch die Ungenauigkeit in der Größenordnung von 5% der zur Tiefenkonversion abgeleiteten Durchschnittsgeschwindigkeit erklären.

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim

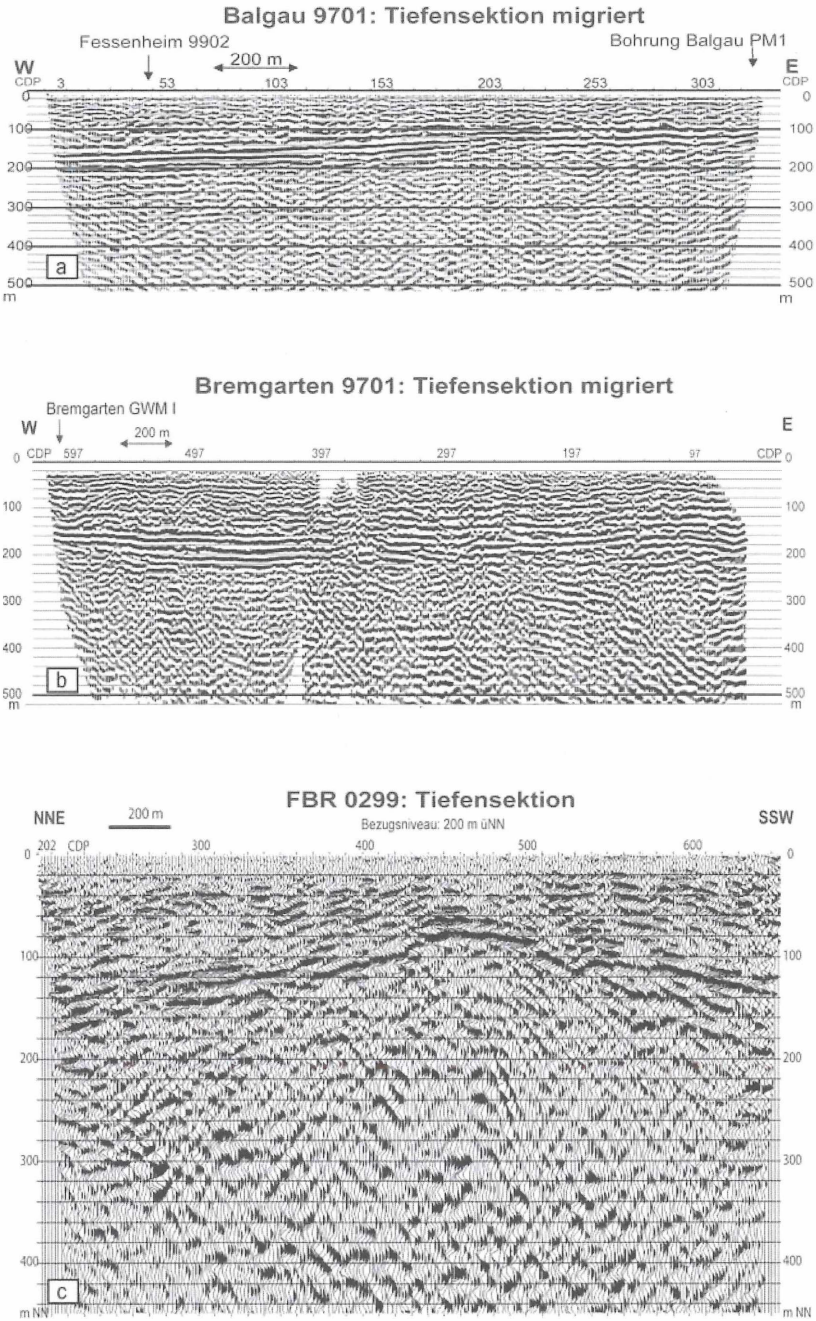


Abb. 10: Tiefenkonvertierte und migrierte Stapelsektionen der Profile Balgau 9701 (a), Bremgarten 9701 (b) und Profil FBR 0299 (c).

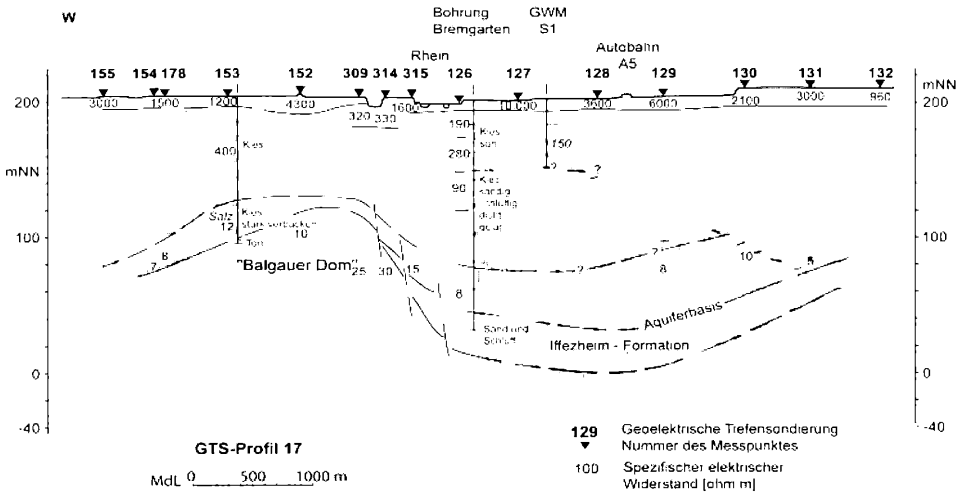


Abb. 11: Vergleich der Ergebnisse der geoelektrischen Tiefensondierungen mit den hochauflösenden reflexionsseismischen Messungen längs der Linie Balgau – Bremgarten. Die geologische Interpretation beruht auf den Ergebnissen der Bohrungen Balgau PM1, Bremgarten GWM1 und S1.

Die seismischen und geoelektrischen Ergebnisse lassen sich durch maßstabsgerechtes Überlagern unmittelbar vergleichen (Abbildung 11). Der aus den reflexionsseismischen Messungen abgeleitete erste Refraktor entspricht der Grenze zwischen hochohmigen (960-10 000 Ωm) trockenen Kiesen und darunterliegenden mittelohmigen (100-300 Ωm) wasserführenden Kiesen. Der Kieskörper lässt sich im vorliegenden Fall aufgrund fehlender Unterschiede in den spezifischen elektrischen Widerständen nicht weiter differenzieren. Die darunter folgende niederohmige Einheit (5-35 Ωm) wird mit einem erhöhten Salzgehalt im basalen Bereich der Breisgau-Formation und den darunter folgenden feinklastischen eopleistozänen und tertiären Ablagerungen erklärt. Die Oberkante dieser aus den geoelektrischen Tiefensondierungen bestimmten Schicht bildet sich seismisch nicht ab. Im Bereich der Bohrung Bremgarten GWM 1 liegt der ausgeprägte Reflektor 150 m unter der Geländeoberkante, rund 30 m unterhalb des postulierten Verlaufs der Grenze mittel- zu niederohmiger Schicht. Aufgrund der geringen Überdeckung am Profilende sind möglicherweise die Reflexionen, die die Grenze zwischen dem grundwasserführenden Kies und der Iffezheim-Formation abbilden, nicht ausreichend aufgelöst, so dass der Reflektor eher die Grenze Iffezheim-Formation zu älterem Tertiär widerspiegeln dürfte. ESSLINGER (1968) leitet aus alten seismischen Messungen und Bohrungen Mächtigkeiten des Quartärs ab, die am Rhein zwischen 225 und 200 m liegen und nach Osten bei Bremgarten auf etwa 125 m unter GOK abnehmen. Letzteres ist im Einklang mit den vorliegenden Ergebnissen.

Danksagung

Die geophysikalischen Untersuchungen erfolgten im Rahmen der von der EU geförderten INTERREG-Initiative 'Oberrhein Mitte – Süd'. Ermöglicht wurden diese Messungen auch durch die Bereitstellung nicht unerheblicher finanzieller Mittel des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover. Wir danken auch den Kollegen G. Brost, G. Druivenga, E. Großmann, S. Grüneberg, F. Hölscher, W. Rode, J. Sauer und W. Südekum für die tatkräftige Unterstützung bei den Feldmessungen.

Eingang des Manuskripts: 31.07.2004

Angeführte Schriften

- BARTZ, J. (1974): Die Mächtigkeit des Quartärs im Oberrheingraben.- In: Illies, J.H. & Fuchs, K.(Hrsg.): Approaches to Taphrogenesis 78 87, 1 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart).
- BAUER, M., EICHINGER, L., ELSASS, P., KLOPPMANN, W., WIRSING, G. (in prep.): Isotopic and hydrochemical study of groundwater flow and salinity in the Southern Upper Rhine Graben. Eingereicht bei Internat. Jour. Earth Sci.
- BRAM, K. (1998): Die Quartärbasis im Bereich Breisach-Bremgarten-Fessenheim abgeleitet aus hochauflösenden reflexionsseismischen Messungen Bericht über die Messungen 1997. - GGA-Bericht, **122 863**, Hannover; [unveröff.].
- BRAM, K., BROST, E. & WONIK, T. (2000): INTERREG II: Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach. – GGA-Bericht, **120 473**, Hannover; [unveröff.].
- BRAM, K., BROST, E., SAUER, J. & WONIK, T. (2001): INTERREG II: Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach: Die geophysikalischen Ergebnisse. Endbericht. – GGA-Bericht, **122 282**, Hannover; [unveröff.].
- BUNESS, H., BRAM, K., DRUIVENGA, G. & GRÜNEBERG, S. (1997): A vibrator system for shallow high-resolution reflection seismics. - *Extended Abstracts* Vol. 1, P154, EAGE, Geneva.
- BROST, E. (1996): Geoelektrische Messungen zur Erforschung der Salzbelastung des Grundwassers in der Rheinebene südlich des Kaiserstuhls. – NLfB/GGA- Bericht, **114 189**, Hannover; [unveröff.].
- BROST, E. & SPITZER, K. (1995): Geoelektrische Messungen zur Erforschung der Salzbelastung des Grundwassers in der Rheinebene südlich des Kaiserstuhls, Gebiet: Breisach am Rhein. - NLfB/GGA-Bericht, **113 876**, Hannover; [unveröff.].

- ESSLINGER, G. (1968): Rezente Bodenbewegungen über dem Salinar des südlichen Oberrheintals. - Diss. TU-Berlin, D 83, 86 S., Berlin.
- GLA (1997): Sachstandsbericht zur Grundwasserversalzung in der Oberrheinebene südlich des Kaiserstuhls. – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Az. 0886.01/96-4763, Freiburg i. Br.; [unveröff.].
- GREEN, A., PUGIN, A., BERES, M., LANZ, E., BÜKER, F., HUGGENBERGER, P., HORSTMAYER, H., GRASMÜCK, M., DE IACO, R., HOLLIGER, K. & MAURER, H. R. (1995): 3-D high-resolution seismic and georadar reflection mapping of glacial, glaciolacustrine and glaciofluvial sediments in Switzerland. - Proceedings SAGEEP, Environmental and Engineering Geophysical Society.
- HARTMANN, B. & SEITZ, R. (2000): Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rhein-nahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach: Hochauflösende Reflexionsseismik. - Ergebnisbericht, 21 S., Geophysik GGD, Leipzig; [unveröff.].
- HYDROGEOLOGISCHE KARTE VON BADEN-WÜRTTEMBERG (1977): Oberrhein-gebiet Bereich Kaiserstuhl Markgräflerland mit Erläuterungen. Geologisches Landesamt und Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ, RÉGION ALSACE (1996): Demonstrationvorhaben zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Grundwassers des deutsch-französisch-schweizerischen Oberrheingraben. 166 S., 25 Abb., 5 Tab., Karlsruhe.
- LANG, U., GUDERA, T., ELSASS, P., WIRSING, G. (in prep): Numerical modelling of chloride propagation in the quaternary aquifer of the southern Upper Rhine Graben. Eingereicht bei Internat. Jour. Earth Sci.
- LGRB (2000): Geologisch-hydrogeologischer Bau im baden-württembergischen Teil des Oberrheingrabens südlich des Kaiserstuhls. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Bericht Az. 0527.01/00-4763 [unveröff.].
- LUTZ, M. & CLEINTUAR, M. (1999): Geological results of a hydrocarbon exploration campaign in the southern Upper Rhine Graben. - Bull. angew. Geol., **4**, Suppl., 3-80.
- MUNDRY, E. & DENNERT, U. (1983): Ein Programm zur Inversion geoelektrischer Sondierungskurven für horizontal geschichteten Untergrund (INGESO 81). – NLfB-Bericht, **92 894**, Hannover.
- MUNDRY, E. & HOMILIUS, J. (1980): Three-Layer Model Curves for Geoelectrical Resistivity Measurements, Schlumberger Array. – Stuttgart (Schweizerbart).
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG (2002): INTERREG II. Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach. Endbericht. – 166 S., 54 Abb., 17 Tab., Anhang, Freiburg.

Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeometrie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim

- RÉGION ALSACE (2000): INTERREG II - Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben - Ergebnisse der Beprobungskampagne 1996/1997. 67 Abb., 15 Tab., Strasbourg.
- RODEMANN, H. (1997): Einfluss von Messfehlern auf die Fehler von Modellparametern bei einfachen 1D-Schlumberger Geoelektrik-Fällen. – In: Jacobs, F. (Hrsg.): Hochauflösende Geoelektrik. VI Arbeitsseminar, Bucha/Sachsen, 4.-6.11.1997; Universität Leipzig.
- SAUER, K. (1970): Hydrogeologische und hydrochemische Voraussetzungen für das Wasserwerk West der Stadt Freiburg i. Br. im Oberrheintal. – gwf-wasser/abwasser, 111, H.9, 494-498, 1 Bild, 2 Tab..
- 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..
- THEOBALD, N. (1948): Carte de la base des formations alluviales dans le sud du fosse rhénan. – Mémoires du service de la carte géologique d'Alsace et de la Lorraine, No. 9, 77 S., 9 Karten, 4 Schnitte ; Lehrmittel-Verlag Offenburg/Mainz.
- THOMAS, R., BRAM, K., FERTIG, J. & SCHWERD, K. (2002): Acquisition and processing of high-resolution reflection seismic data from a survey within the complex terrain of the Bavarian Folded Molasse. - Geophysical Prospecting, **50**, 411-424.
- WIEDERHOLD, H., BUNESS, A. H. & BRAM, K. (1998): Glacial structures in northern Germany revealed by a high-resolution reflection seismic survey. - Geophysics, **63**, 1265-1272.
- WIRSING, G., BRAM, K., BROST, E. & ELSASS, P. (1999a): Ergebnisse geophysikalischer Untersuchungen im Rheingraben südlich des Kaiserstuhls. Bericht LGRB 1429.01/99-4763, 1-14, Freiburg i. Br.
- WIRSING, G., ELLWANGER, D. & ELSASS, P. (1999b): Ergebnisse der geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen an den Bohrungen Bremgarten. - Bericht LGRB 1429.01/99-4763, 16-33, Freiburg i. Br.
- WONIK, T. & SALGE, S. (2000): Eine Apparatur für geophysikalische Messungen in kleinkalibrigen Bohrungen bis 1300 m Teufe. - Geol. Jb., **E 52**: 129-160, Hannover.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 2005

Band/Volume: [95](#)

Autor(en)/Author(s): Bram Kurt, Wirsing Gunther, Brost E., Elsass P., Wonik Thomas

Artikel/Article: [Kombinierte geophysikalische Erkundung der Aquifergeome-trie und der Chloridverbreitung im quartären Grundwasserleiter des südlichen Oberrheingrabens zwischen Breisach und Fessenheim 47-69](#)