

Ergebnisse von Durchlässigkeitsuntersuchungen an permotriassischen Gesteinen der Pfälzer Mulde

FRANK BITZER

Kurzfassung: An Bohrkernen aus dem Zechstein und Unteren Buntsandstein des Nordrandes der Pfälzer Mulde wurden in Triaxialzellen Versuche zur Bestimmung der vertikalen hydraulischen Leitfähigkeiten durchgeführt. Die Versuche dienten der Ergänzung und Verbesserung der bislang wenigen verfügbaren Daten zu geohydraulischen Kennwerten für diesen hydrogeologischen Teilraum.

Die Versuchsanordnung wird erläutert; auf Probleme bei der Versuchsdurchführung wird hingewiesen. Die Ergebnisse werden diskutiert und bisher ermittelten Werten gegenüber gestellt.

Der ermittelte Wertebereich der vertikalen hydraulischen Leitfähigkeiten liegt zwischen etwa 3×10^{-6} m/s bis 2×10^{-9} m/s (Medianwerte). Er gilt für den durch die Gesteinsmatrix bedingten Anteil der Gebirgsdurchlässigkeit. Das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler hydraulischer Leitfähigkeit kann in den Größenordnungen von etwa $1:10^1$ bis $1:10^3$ angesetzt werden. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die räumliche Verteilung der Permeabilitäten im Untersuchungsgebiet bereits sehr kleinmaßstäblich durch sedimentäre und diagenetische Faziesvariationen beeinflusst wird.

Abstract: At drill cores from the Upper Permian (Zechstein) and the Lower Bunter of the northern Palatinate Syncline experiments were accomplished in triaxial cells to determine the vertical hydraulic conductivity. The experiments served for the addition and improvement of the past data set of geohydraulic parameters.

The experimental assembly is described and it is referred to problems during the investigational procedure. The results are discussed and compared with so far published data.

The range of the determined values of vertical hydraulic conductivity lies between approximately 3×10^{-6} m/s to 2×10^{-9} m/s (median values). It applies to the portion of the rock permeability due to the rock matrix. The ratio of vertical to horizontal hydraulic conductivity can be set in the orders of magnitude from approximately $1:10^1$ to $1:10^3$. The results let assume that the spatial distribution of the permeability in the area of interest is affected already by very small scale sedimentary and diagenetic facies variations.

1. Einleitung

Die Kenntnis geohydraulischer Kennwerte, insbesondere der hydraulischen Leitfähigkeit, ist für die Bearbeitung vieler hydrogeologischer Fragestellungen eine notwendige Voraussetzung: z.B. für rechnerische Abschätzungen von Schutzzonenabständen oder Bilanzierungen des Grundwasserhaushaltes. Die Entwicklung hydrogeologischer Modellvorstellungen setzt zumindest eine plausible Abschätzung geohydraulischer Kennwerte voraus.

Häufig stellt im Vorfeld geplanter Grundwasserentnahmen die Abschätzung der vertikalen Durchlässigkeiten und ihrer räumlichen Verteilung eine wichtige Planungshilfe dar. Sie ermöglicht rechnerische Abschätzungen zu Reichweite und Ausmaß von Grundwasserabsenkungen beispielsweise durch Trinkwassergewinnungsanlagen und erlaubt deren ökologisch verträgliche Gestaltung. Maßgeblich für die laterale und vertikale Differenzierung von Brunneneinzugsgebieten ist das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Komponente der Gebirgsdurchlässigkeit (z.B. BITZER 2004). Weiterhin ist die begründete Abschätzung der vertikalen hydraulischen Leitfähigkeiten eine Voraussetzung bei der Dimensionierung von Wasserhaltungen, z.B. im Rahmen von Tiefbaumaßnahmen, und zur Konzeption von Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen bei Grundwasserschadensfällen.

Für den Verbreitungsbereich des Zechstein und Buntsandstein der Pfälzer Mulde, der in Rheinland-Pfalz einen der bedeutendsten Grundwasserbewirtschaftungsräume darstellt, wurden bereits im Rahmen früherer Arbeiten (z.B. SEILER 1968, EINSELE 1969, EINSELE & SCHIEDT 1971, HEITALE 1972, LGB & LfW 2004) Gebirgsdurchlässigkeiten mit methodisch unterschiedlichen Ansätzen abgeschätzt. Diese Arbeit gibt einen zusammenfassenden Überblick über die bisherigen Untersuchungsergebnisse und ergänzt den Datensatz durch Ergebnisse aktueller, an Bohrkernen durchgeführter Untersuchungen zu den vertikalen hydraulischen Leitfähigkeiten.

Der Vergleich bislang ermittelter Durchlässigkeitswerte ist dabei nur eingeschränkt möglich, da diese methodisch unterschiedlich bestimmt wurden und die untersuchten Gesteinskörper verschiedenen geologischen Positionen entstammen.

Zum Beispiel können die aus Versickerungsversuchen im z.T. 10er Meter mächtig aufgelockerten oberflächennahen Bereich ermittelten Durchlässigkeiten durch eine Entwicklungsgeschichte beeinflusst sein, die bei Durchlässigkeitsversuchen z.B. an Bohrkernproben aus größeren Tiefen keine Rolle spielen (s. auch HEITALE 1968). Auch ist angesichts sowohl Poren- als auch Kluft-gestützter, wasserwegsamere Hohlräume deren Bedeutung und Wirksamkeit je nach Betrachtungs- bzw. Untersuchungsmaßstab unterschiedlich zu bewerten. Bei einem direkten Vergleich der ermittelten Werte ist also der mögliche Einfluss von Skaleneffekten zu berücksichtigen (vgl. auch MENZEL 1980).

Labor- und Feldversuche von HEITALE (1968, 1972) erbrachten eine erste Datenbasis für die Abschätzung der mittleren Durchlässigkeiten des Buntsandsteingebirges der Pfälzer Mulde sowie der auflagernden Deckschichten. Markierungsversuche von SEILER (1968) lieferten Anhaltspunkte zu den Größenordnungen Kluft- und Poren-gestützter Anteile der Gebirgsdurchlässigkeiten. Er konnte ferner für ausgewählte Standorte die Größenordnung der Abstandsgeschwindigkeiten sowie den Anteil der Kluft-gestützten Durchlässigkeiten abschätzen. Weiterhin wurde erkannt, dass die Wirksamkeit wasserwegsamere Klüfte auf den Tiefenbereich bis ca. 100 m beschränkt ist. Gesteinsphysikalische Untersuchungen von SVOBODA (1979) ergänzten den Datensatz für einzelne Schichtglieder des Unteren und Mittleren Buntsandstein.

Die Auswertung von Pumpversuchen im regionalen Maßstab (LGB & LfW 2004) gab einen Überblick über die räumliche Verteilung der mittleren horizontalen Gebirgsdurchlässigkeiten. Ferner ergaben sich Hinweise auf systematische, d.h. Stratigraphie-gebundene Variationen der mittleren Gebirgsdurchlässigkeiten: Sie sind im Unteren Buntsandstein gegenüber den hangenden Schichtfolgen des Buntsandstein offenbar geringfügig erhöht.

Das Umweltamt der Stadt Kaiserslautern stellte dankenswerterweise die Bohrungen zur Verfügung und gab die Bohrkern zur Beprobung frei. Besonderer Dank gilt Herrn Ewald Sieben (LGB) für die labortechnische Betreuung und Durchführung der Versuche.

2. Probematerial und Methodik

Die aktuellen Untersuchungen dienten der Bestimmung der vertikalen hydraulischen Leitfähigkeiten. Sie wurden an Proben aus Kernbohrungen im Großraum Kaiserslautern im Labor des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) durchgeführt (Abb. 1).

Bei der Auswahl der Kernabschnitte wurde darauf geachtet, dass – soweit makroskopisch erkennbar – die Probenkörper keine erweiterten Trennflächen, Schichtfugen oder sekundäre Hohlräume aufwiesen. Gezielt wurden jedoch auch Bereiche unterschiedlichen sedimentären Gefüges beprobt (z.B. Einschaltungen von siltigen oder konglomeratischen Lagen), um gegebenenfalls Hinweise auf Einflüsse von Korngrößenwechsel, d.h. im weitesten Sinne Faziesvariationen, auf die vertikale Durchlässigkeit zu erhalten. Die Auswahl der Proben erfolgte mit dem Ziel, den Matrix-bedingten durchflusswirksamen Anteil, d.h. die minimalen vertikalen Gebirgsdurchlässigkeiten zu ermitteln.

Die untersuchten Proben stammen aus Kernbohrungen, die die Schichten des Unteren Buntsandstein (Trifels-Schichten) sowie des Zechstein (Stauf-Schichten) durchörterten. Der Grenzbereich beider Schichtfolgen weist häufig durch bis Zentimeter große kavernös erscheinende Lösungshohlräume erhöhte Durchlässigkeiten auf (Lösung und Abfuhr karbonatisch-dolomitischen Bindemittels, KONRAD 1985).

Die Trifels-Schichten sind im Untersuchungsgebiet im Allgemeinen als massige, mittel- bis grobsandige, geröllführende rote Quarz-Sandsteine mit Bankdicken bis zu etwa 4 m ausgebildet. Der Feldspatgehalt liegt mitunter über 10% (KONRAD 1985). Der Sandstein ist im Wesentlichen durch Quarzzement mäßig bis gut verfestigt. Die Stauf-Schichten sind in den höheren Schichtfolgen als überwiegend locker bis mäßig gebundener, Ton- und Schluffanteil enthaltenden Sandstein (Fein- bis Mittelsand) ausgebildet. Oft Zentimeter dicke eingeschaltete „Eisenschwarten“ werden als schichtspezifisch und stratigraphisch nutzbar angegeben; dies kann jedoch von den eigenen Beobachtungen her nicht bestätigt werden. Die beprobten Kernabschnitte enthielten keine „Eisenschwarten“.

Die Probenkörper wiesen einen Durchmesser von ca. 11 cm auf. Die Wandungen waren durch die Bohrung unterschiedlich stark vorgeprägt (Bohrspuren, z.T. Rillen und Riefen) und wurden nicht nachbearbeitet. Die Probekörper wurden mit einer Gesteinsäge auf eine Länge von ca. 12 cm eingekürzt. Die Grundfläche der Probenzylinder betrug jeweils ca. 95 cm².

Die Versuchsapparatur bestand aus sechs einzeln regelbaren Triaxialzellen (Eigenbau des Landesamtes für Geologie und Bergbau). Diese ermöglicht die Durchführung von Durchlässigkeitsversuchen in Anlehnung an DIN 18130 (vgl. auch FBAB 2002). Der Versuchsaufbau und -ablauf kann wie folgt zusammengefasst dargestellt werden:

- Einbau der Probenkörper durch Ummantelung mit einer Gummimanschette auf der Probenwandung sowie Filtersteinen am Boden und Top. Auf der Gummimanschette lag in der Regel ein etwa 3-fach höherer Druck (Wassersäule) als der Probeninnendruck an, um Umläufigkeiten an der Probenwandung zu verhindern. Die Dichtigkeit des Systems wurde durch Einfärbung des Wassers im Druckgefäß kontrolliert.
- Durchströmung der Probenkörper mit destilliertem, gekochtem (entlüftetem) Wasser von unten nach oben bei ca. 20°C.
- Die Proben wurden bei konstant anliegenden Druck von 0,1 bar (bis 0,3 bar) durchströmt. Dies entspricht einem ungefähren hydraulischen Gefälle von $i = 8$ (bis 24). Die Versuche wurden somit im oberen Teil des linearen Bereiches durchgeführt (vgl. MATTHESS & UBELL 1983). Die Durchflussraten lagen in der Größenordnung von 0,03 cm³/Minute.

Hydrogeologische Teilräume

-  Perm der Nahe- und Primsmulde
-  Permokarbon des Pfälzer und Saarbrücker Sattels
-  Rheingrabenrandscholle
-  Rheingrabenwischenscholle
-  Südwestdeutscher Buntsandstein
-  Südwestdeutscher Muschelkalk und Keuper
-  Tertiär des Mainzer Beckens

-  Störungen / Verwerfungen
-  Städte

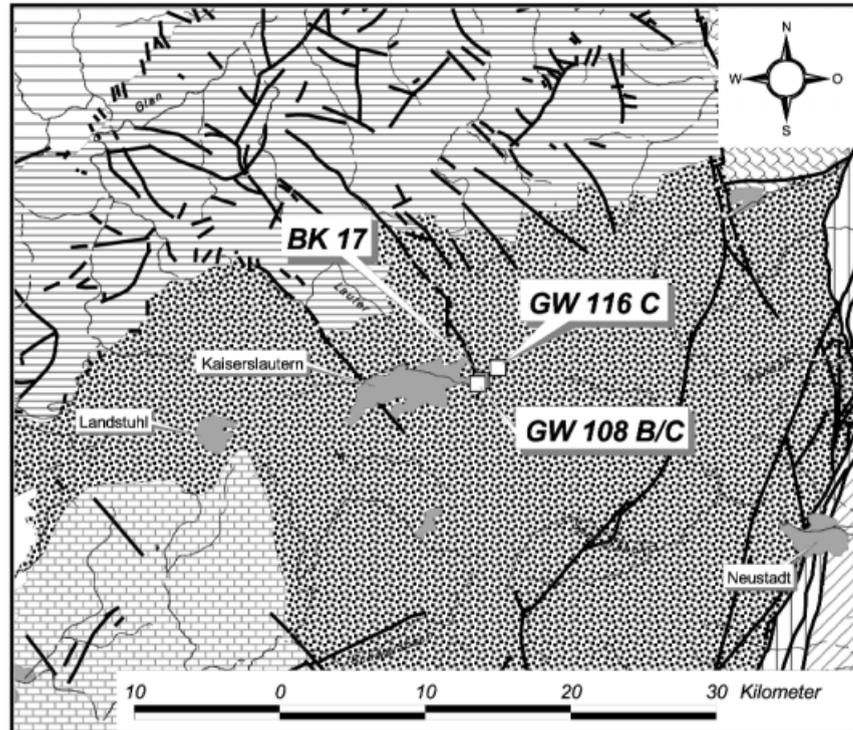


Abb. 1: Lage der Beprobungspunkte auf Kartenbasis der hydrogeologischen Teilräume. Nicht separat ausgehalten und dem Buntsandstein in dieser Darstellung zugeschlagen ist der am nördlichen Rand Pfälzer Mulde ausstreichende und im Untergrund nachgewiesene Zechstein (Stauf-Schichten).

- Die Menge des die Probenkörper durchströmenden Wassers wurde in einer Bürette gemessen (aufgrund der sich in der Bürette aufbauende Wassersäule – Zulauf von unten – nahm der wirksame hydraulische Gradient in jedem Versuchsdurchlauf um 5 bis 10% ab; dieser Einfluss wurde bei der Auswertung berücksichtigt).
- Alle Probenkörper wurden zunächst ohne Druckbeaufschlagung im Wasserbad vorge-sättigt.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte unter der vereinfachenden Annahme konstanter Druckhöhe (vgl. DIN 18130 und WIEDERSPAHN 1997). Danach ergibt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k zu:

$$k = \frac{Q \times l}{A \times h}$$

Die Durchflussmenge Q wird in der Bürette abgelesen, l entspricht der Probenhöhe (bzw. Entfernung der Ansatzpunkte der wirksamen Druckhöhen), A der durchströmten Fläche des Probenkörpers und h der wirksamen Druckdifferenz). Ferner wurde nach DIN 18130 eine Korrektur der Werte bezogen auf eine Temperatur von 10°C durchgeführt.

Die Tab. 1 gibt einen Überblick über die beprobten Tiefenbereiche der Bohrungen sowie petrografische Übersichtsbeschreibungen der Probenkörper (s. auch Abb. 6).

Die Abb. 3 zeigt eine Triaxialzelle der Versuchsapparatur sowie einige der untersuchten Proben. Die ermittelten Werte werden im Folgenden präsentiert und bisherigen Abschätzungen der Gebirgsdurchlässigkeiten gegenüber gestellt (Abb. 2, 6 und 7).

3. Ergebnisse

Von 15 entnommenen Proben konnten 14 untersucht werden (eine Probenfraktur geschah beim Einbau in die Versuchsapparatur). Die Stauf-Schichten sind durch 4 Proben vertreten. Insgesamt wurden an den Proben 99 Versuchsreihen durchgeführt, dabei 997 Einzelwerte ermittelt und pro Versuchsreihe im Mittel etwa 10 Einzelwerte genommen.

Probleme bestanden bei der Versuchsdurchführung anfangs durch die in den Poren-räumen der Proben trotz Vorsättigung und vergleichsweise hoher Durchflussmengen und -zeiten weiterhin enthaltene Luft. Diese wurde als Bläschen in den Ablaufschläuchen direkt und durch in der Regel monoton abnehmende Messwerte indirekt festgestellt (s. auch Abb. 4). Diese Problematik bestand im Wesentlichen bei den geringer durchlässigen Proben. Um die Luft auszutreiben wurden wiederholt Änderungen der Druckbedingungen herbeigeführt (vergleichbar Druckstößen in der Probe). In einigen Fällen wurden die Proben ausgebaut und nochmals eingebaut, um auch evtl. Einbau-fehler auszuschließen. Bei der Auswertung wurden nur die Versuchsreihen berücksichtigt, in denen eine hohe Reproduzierbarkeit der Werte gegeben war und deren Schwankungsbereich der Werte in der Regel eine Größenordnung nicht überschritt (Abb. 4). Es verblieb ein auswertbarer Datensatz von 512 Einzelmessungen. Bei der Probe BK 108 C (100 bis 101 m) führte keine der durchgeführten Versuchsreihen zu ausreichend repro-duzierbaren Messergebnissen.

Mitunter ließ sich im Verlauf einer Versuchsreihe in den ersten etwa 4 Messungen eine systematische Abnahme der ermittelten Durchlässigkeiten und schließlich das Erreichen eines engen Wertebereiches feststellen (s. a. Abb. 4). Die Ursachen hierfür sind nicht zweifelsfrei geklärt. Es kann jedoch weitgehend ausgeschlossen werden, dass trotz relativ hoher hydraulischer Gradienten solche Versuchsreihen durch Fließprozesse im postlinearen Bereich beeinflusst wurden. Abbildung 5 zeigt für die Probe

Tab. 1: Petrographische Übersichtsbeschreibung der Proben.

	BK17 44-45m	BK17 45-46m	GW108B 28-29m	GW108B 29-30m	GW108B 64-65m	GW108B 65-66m	GW116C 26-27m	GW116C 27-28m	GW116C 66-67m	GW116C 88-89m	GW116C 89-90m	BK17 71-72m	GW108C 105-106m
Stratigraphie	T	T	T	T	T	T	T	T	T	S	S	S	S
Feinsandstein										X	X	X	X
Mittelsandstein	X	X	X	X	X	X	X	X	X	(X)	(X)		
Grobsandstein	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)		(X)				
Fein- bis Mittelkies führend	(X)	((X))	(X)		((X))	(X)	(X)			(X)	(X)		(X)
Fein- bis Grobkies führend				X									
Komponentenrundung	0 +	0 +	0 +	0 +	+	0 (+)	0 +	0	0 (+)	(+)	+	+	(X)
Sortierung	0 +	0 +	0 +	0	+	0 +	+(+)	+	0 +	+(+)	+(+)	+	+
Kornkontakte konvex-konvex	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Quarzzementstege makroskopisch erkennbar	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
subparallele Schichtung	X		X	X	X				X				
ohne erkennbare Schichtungsmerkmale		X				X	X	X		X	X	X	X
Millimeter große Lösungshohlräume (mit „Eisenmulm“ verfüllt)	((X))	((X))	((X))				(X)	((X))					
Bleichungshöfe			(X)	((X))								((X))	(X)
wolkig-fleckiges Erscheinungsbild										X		X	X
schwach karbonatisch										X	X	X	X
Bioturbation											X		

X, (X), ((X)): Merkmal ausgebildet, schwach ausgebildet, sehr schwach ausgebildet

0, + (+): mäßig, gut (sehr gut)

T, S: Trifels- / Stauf-Schichten

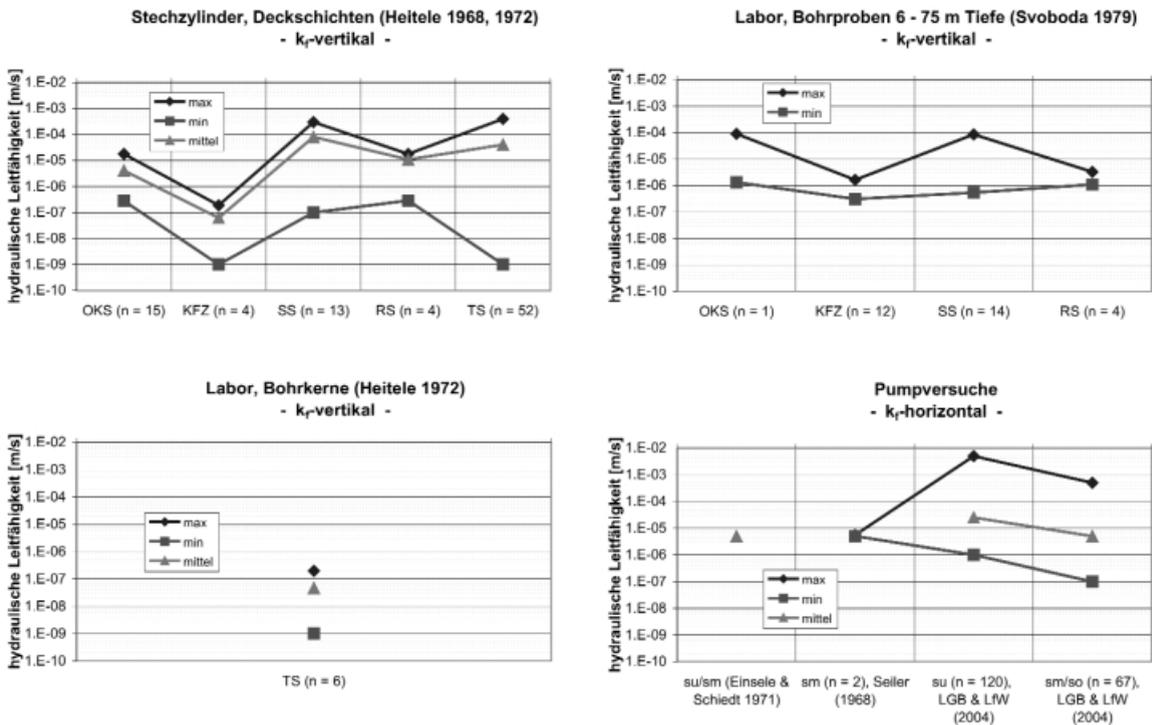


Abb. 2: Zusammenstellung bisheriger Ergebnisse von Untersuchungen zur Durchlässigkeit des Buntsandstein der Pfälzer Mulde. Abkürzungen: su/sm/so = Unterer/Mittlerer/Oberer Buntsandstein, TS/RS/SS = Trifels-/Rehberg-/Schlossberg-Schichten, KFZ = Karlstal-Felszone, OKS = Obere Karlstalschichten.

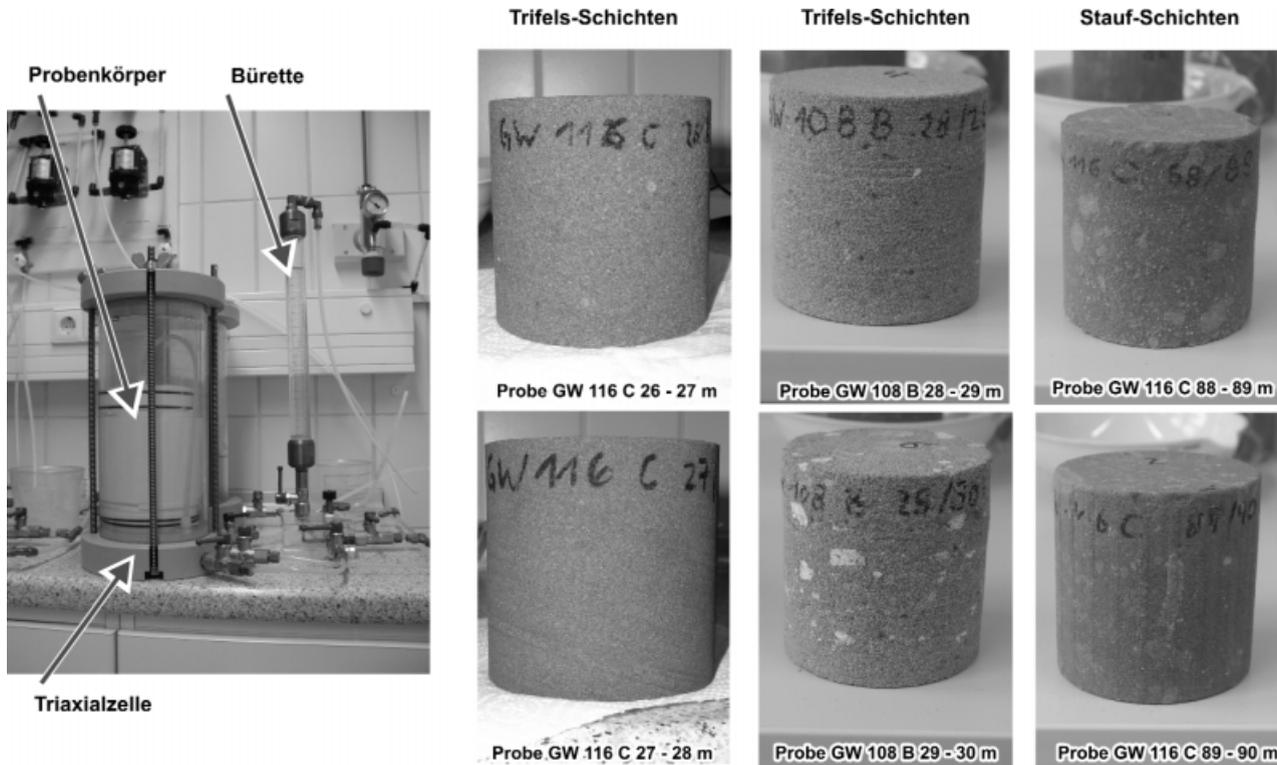


Abb. 3: Links: Einzelne Triaxialzelle der Versuchsapparatur und Messbürette.

Rechts: Sechs Probenkörper (Bezeichnung der Probe, Angabe der Entnahmetiefe, stratigraphische Zuordnung; vgl. Tab. 1). Das Erscheinungsbild der Trifels-Schichten (Links und Mitte) kann deutlich variieren, das obere Bild (Mitte) zeigt einen gut sortierten, subparallel geschichteten grobsandigen Mittelsandstein; das untere Bild (Mitte) zeigt einen geröllführenden (Fein- bis Grobkies), undeutlich subparallel geschichteten Mittel- bis Grobsandstein. Die Proben aus den Stauf-Schichten zeigen ein fleckig-wolkiges Erscheinungsbild; primäre Schichtungsmerkmale fehlen. Beide Proben sind schwach karbonatisch. Die Probe 89 bis 90 m zeigt deutliche Grab-, Wühl- und Stopfspuren.

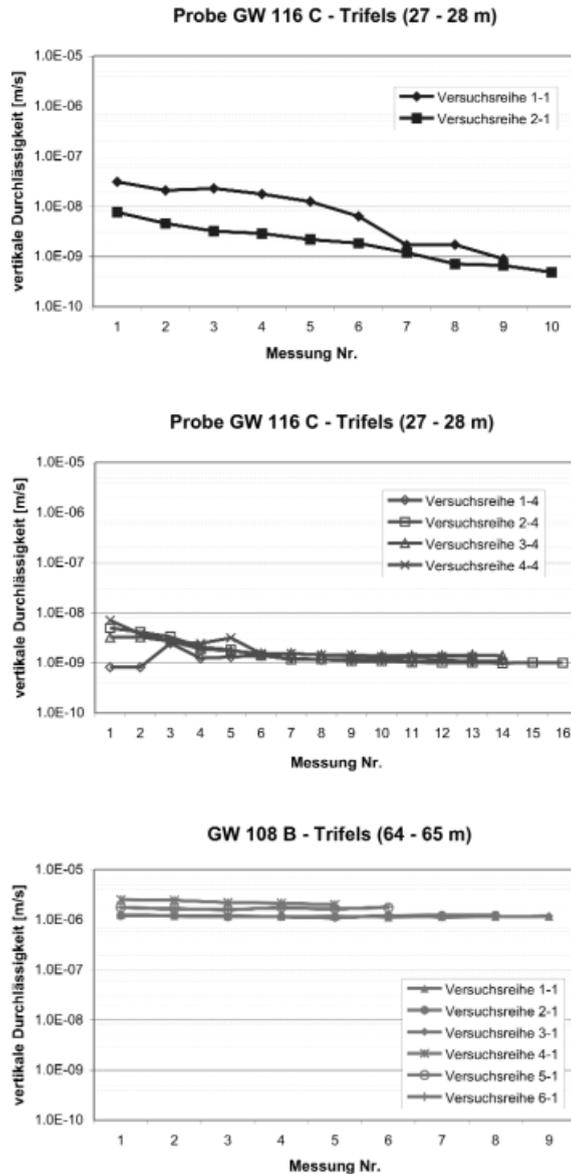


Abb. 4: Darstellung zum Verlauf der Messungen und der Messergebnisse.
 Oben: Die ermittelten Einzelwerte aus den ersten beiden Versuchsreihen weisen eine systematische Abnahme auf (nicht auswertbar). Mitte: Nach Aus- und erneutem Einbau sowie Verwendung von entlüftetem destilliertem Wasser als durchströmendes Medium lässt sich in den folgenden Versuchsreihen eine gute Reproduzierbarkeit der Messwerte erzielen. Unten: Typisch für Proben mit vergleichsweise hohen Durchlässigkeiten (etwa $> 1 \times 10^{-7}$ m/s) ist eine sehr gute Reproduzierbarkeit der in verschiedenen Versuchsreihen ermittelten Einzelwerte.

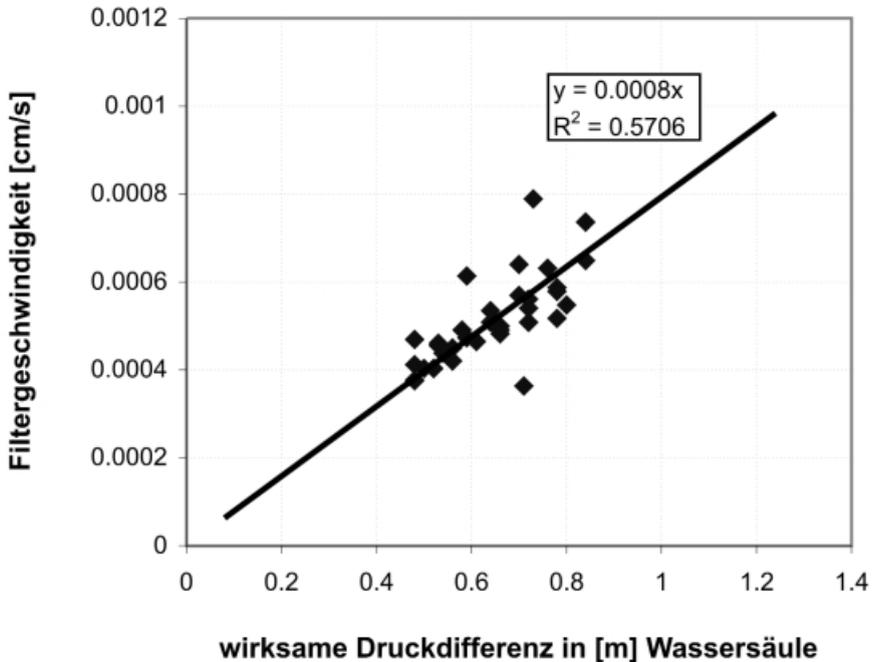


Abb. 5: Aus Durchfluss und Fließquerschnitt ermittelte Filtergeschwindigkeit aufgetragen gegen die bei den Einzelmessungen jeweils wirksame Druckhöhe.

GMW116C 26 bis 27 m die Filtergeschwindigkeiten versus wirksamer Druckdifferenz und damit die Gültigkeit der Annahme des linearen Fließbereiches. Im Übrigen hätten aufgrund der Versuchsdurchführung die ersten Messungen, die immer bei höheren hydraulischen Gradienten durchgeführt wurden als die späteren, im postlinearen Bereich geringere Durchlässigkeiten ergeben müssen als am Ende einer Versuchsreihe. Dieser Einschätzung entspricht auch die Beobachtung, dass der oben genannte Effekt nicht bei höheren Durchflussraten bzw. Proben höherer Durchlässigkeiten beobachtet wurde. Weiterhin wurde festgestellt, dass dieser Effekt verstärkt dann auftritt, wenn das die Probe durchströmende Wasser vorher nicht ausreichend entlüftet wurde. Dies legt den Schluss nahe, dass Probenkörper, die die genannte Abnahme der Durchlässigkeit während einer Versuchsreihe zeigten offenbar durch eine unvollständige Wassersättigung beeinflusst waren. Nicht erkennbare kavernöse Hohlräume im Inneren der Probenkörper könnten zusätzlich beeinflussend gewirkt haben. Soweit möglich wurden die Ergebnisse der Versuchsreihen durch Wiederholungsmessungen bei geänderten Druckbedingungen überprüft und abgesichert. Im Idealfall ergab sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messwerte (s. auch Abb. 4).

Die Abb. 6 zeigt die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Durchlässigkeitswerte für alle Proben (Gesamtverteilung der Einzelwerte sowie getrennt für Stauf- und Trifelschichten in Klassen dargestellt; Klassenbreite eine halbe Größenordnung). Danach fällt die Mehrzahl aller Einzelwerte in den Bereich von 5×10^{-8} m/s bis 1×10^{-9} m/s. In diesem Bereich ist die Verteilung annähernd plateauartig. Es deutet sich an, dass bei der

Ergebnisse von Durchlässigkeitsuntersuchungen an permotriassischen Gesteinen der Pfälzer Mulde

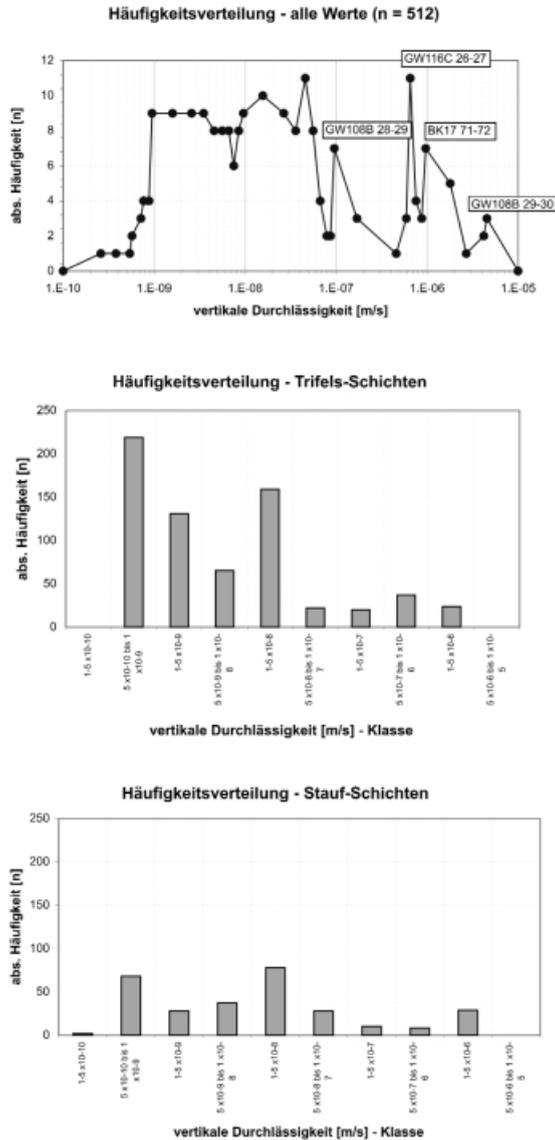


Abb. 6: Häufigkeitsverteilungen der ermittelten vertikalen Durchlässigkeiten. Oben: Einzelwerte, Mitte und unten: Klassen mit Klassenbreite eine halbe Größenordnung und aufgeschlüsselt nach stratigraphischer Zuordnung.

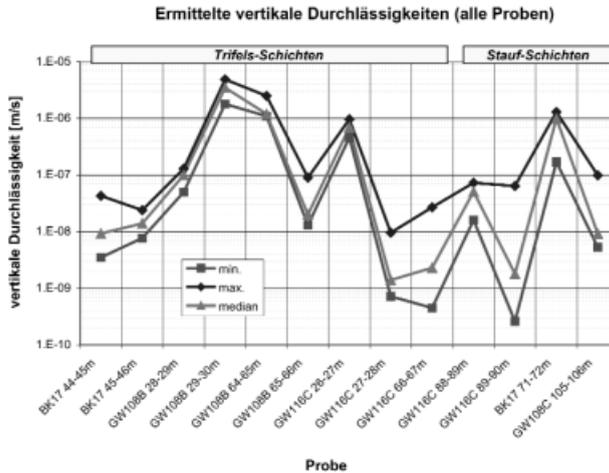


Abb. 7: Darstellung der Messergebnisse: Maximum und Minimum der Einzelwerte sowie Median der ermittelten vertikalen Durchlässigkeiten aller Proben.

angewendeten Bestimmungsmethode die Ermittlung vergleichsweise geringer Durchlässigkeiten, d.h. etwa $< 1 \times 10^{-7}$ m/s, mit einer stärkeren Streuung der Werte einhergeht. Dabei können die an der einzelnen Probe ermittelten Minima und Maxima bis zu zwei Größenordnungen schwanken (s. auch Abb. 7). Die scharfen relativen Häufigkeitsmaxima bei Werten höherer Durchlässigkeiten (etwa $> 1 \times 10^{-7}$ m/s) lassen sich einzelnen Proben zuordnen, bei denen eine sehr geringe Streuung bzw. besonders gute Reproduzierbarkeit der Messwerte bzw. ermittelten Durchlässigkeiten gegeben war (Proben GW108B 29 bis 30 m, GW108B 64 bis 65 m, GW116C 26 bis 27 m und BK105C 71 bis 72 m; s. Abb. 7).

Die Darstellung der Häufigkeitsverteilung in Klassen, getrennt nach Stauf- und Trifels-Schichten, zeigt nur geringfügige Unterschiede. Beide Darstellungen weisen, wie die Häufigkeitsverteilung aller Werte, die absoluten Maxima im zuvor genannten Wertebereich aus. Jedoch fällt auf, dass das Häufigkeitsmaximum sich nur bei den Proben aus den Trifels-Schichten deutlich aus der Gesamtverteilung heraushebt.

Die in der Abb. 7 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass – bei nur geringer petrographischer Variationsbreite – bereits bei Tiefenschritten von nur 1 m deutliche Durchlässigkeitsunterschiede auftreten können. Die Proben der in dieser Hinsicht auffälligen Bohrungen sind in der Abb. 3 gezeigt. Auf dem Vergleich der makroskopisch erkennbaren petrographischen Merkmale beruhend lässt sich vermuten, dass bereits geringfügige Korngrößen- und Schichtstrukturwechsel (z.B. Feinschichtung des Sediments; GW116C 27 bis 28 m) gegenüber „massigem“ bzw. strukturlosem (homogenem) Gefüge (GW116C 26 bis 27 m) mit einer deutlichen Abnahme der vertikalen Durchlässigkeiten einher gehen können – Unterschied etwa zwei Größenordnungen. Andererseits scheint die makroskopisch beurteilbare Sortierung, bei vergleichbarer Korngröße des dominierenden Materials, offenbar nicht unbedingt ausschlaggebend für die resultierende Durchlässigkeit. Es ist daher nicht auszuschließen, dass möglicherweise die (früh-)diagenetische Entwicklung des Sediments die Durchlässigkeitsentwicklung nachhaltig beeinflusst hat. Im Unteren und Mittleren Buntsandstein der Pfälzer Mulde sind

an die Ablagerungsbedingungen gebundene und im regionalen Maßstab auftretende, markante Diageneseunterschiede als „Felsbänke“ und „Dünnschichten“ beschrieben (z.B. HEITALE 2001, ROHN & KASSEBEER 2003). Diese meist in sehr scharfen Grenzen übereinander folgenden Verfestigungsunterschiede könnten möglicherweise in makroskopisch weniger auffälliger Weise für die beobachteten kleiner maßstäblichen Durchlässigkeitsvariationen verantwortlich sein. Unabhängig von der diagenetischen Entwicklung wäre zu erwarten, dass durch Bioturbation geprägte Abschnitte – betrifft weite Bereiche der Stauf-Schichten, belegt z.B. durch Probe GW116C 89 bis 90 m – eine biogen kontrollierte Homogenisierung des Sediments kurz nach seiner Ablagerung erfahren haben, die den Ausgleich möglicher schichtungsbedingter Durchlässigkeitsunterschiede begünstigt.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die angewendete Methode zur Bestimmung der mittleren, durch die Gesteinsmatrix bedingten Durchlässigkeiten an Festgesteinsproben in Triaxialzellen liefert für Proben mit Durchlässigkeiten etwa $> 1 \times 10^{-7}$ m/s gut reproduzierbare Werte. Bei geringerer Durchlässigkeit der Proben nimmt die Streuung der Messwerte deutlich zu. Als Ursache hierfür wird die mit abnehmender Durchlässigkeit zunehmend erschwerte Entlüftung der Probekörper in Verbindung mit möglichen, innerhalb der Proben vorhandenen, lösungsbedingten Hohlräumen angesehen.

Die zusammenfassende Darstellung bislang ermittelter und veröffentlichter Durchlässigkeitsbeiwerte (Abb. 2) zeigt:

- die aus Pumpversuchen abgeschätzten horizontalen Durchlässigkeiten sind für die Einheiten des Unteren und Mittleren Buntsandstein im nördlichen Bereich der Pfälzer Mulde – insbesondere statistisch abgesichert durch LGB & LfW (2004) – in guter Näherung mit etwa 1×10^{-5} m/s anzunehmen. Oberflächennah sind die Durchlässigkeiten meist deutlich erhöht.
- an Deckschichten, d.h. aufgelockertem oberflächennahen Buntsandstein wurden Mittelwerte vertikaler Durchlässigkeiten von etwa 3×10^{-4} m/s bis 1×10^{-9} m/s abgeschätzt (HEITALE 1968, 1972).
- die an Bohrkernen abgeschätzten vertikalen Durchlässigkeiten (im Wesentlichen SVOBODA 1979) werden im Bereich 1×10^{-4} m/s bis 1×10^{-7} m/s angegeben. Sie erscheinen im Vergleich zu den an Deckschichten (HEITALE 1972) ermittelten Werten zu hoch. Aus diesen Angaben ergäbe sich – legt man eine mittlere horizontale Durchlässigkeit von 1×10^{-5} m/s zugrunde (LGB & LfW 2004) – das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler hydraulischer Leitfähigkeit als mögliche Bandbreite von 10:1 bis 1:100. Geht man von dem nur für die Deckschichten abgeschätzten Wertebereich aus so wäre das Verhältnis im Bereich von 3:1 bis 1:200 anzusetzen.

Die nun ermittelten Werte für die vertikalen Durchlässigkeiten (Median Werte) reichen von 3×10^{-6} m/s bis 2×10^{-9} m/s (Abb. 7). Sie liegen innerhalb des von Heitale (1968, 1972) abgeschätzten Wertespektrums (Abb. 2).

Die Ergebnisse der vorgenannten Untersuchungen erlauben somit eine Abschätzung der vertikalen Durchlässigkeiten ohne die oberflächennah wirkenden Einflüsse der Entfestigung und Verwitterung. Damit besteht nun ein Datensatz, der es – für den Bereich Kaiserslautern – erlaubt die vertikale Gliederung der Grundwasserleiter der Pfälzer Mulde hinsichtlich der vertikalen Durchlässigkeiten auch mit Werten zu charakterisieren. Die Durchlässigkeiten in der mitunter bis etwa 100 m mächtigen Auflockerungszone sind demnach bis zu etwa zwei Größenordnungen höher als in den tieferen, nicht entfestigten Bereichen.

Legt man das Ergebnis der Häufigkeitsverteilungen für die ermittelten Einzelwerte zugrunde (Abb. 6), so kann für die Trifels-Schichten vereinfachend eine vertikale hydraulische Leitfähigkeit im Bereich von etwa 5×10^{-8} m/s bis 1×10^{-9} m/s als wahrscheinlich angesetzt werden. Hieraus ergäbe sich ein Verhältnis von vertikaler zu horizontaler hydraulischer Leitfähigkeit (vgl. LGB & LfW 2004) von 1:200 bis 1:10000. Berücksichtigt man den sich aus den Median Werten ergebenden Wertebereich (s. Abb. 7), so kann das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler hydraulischer Leitfähigkeit zwischen 1:5 bis 1:5000 angenommen werden.

Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich keine Stratigraphie-abhängigen systematischen Unterschiede in der Größenordnung der ermittelten Durchlässigkeiten ableiten. Dies entspricht den relativ einheitlichen Korngrößenspektren und Sortierungen der untersuchten Proben. Vor dem Hintergrund der ermittelten Durchlässigkeiten und der bekannten Grundwasserleitereigenschaften können die Stauf-Schichten für großräumige Betrachtungen vereinfachend mit den Trifels-Schichten geohydraulisch zusammengefasst werden. Die Ursachen von kleinräumigen, deutlich erkennbaren Durchlässigkeitsunterschieden bei nur geringfügigen makroskopisch erkennbaren petrographischen Unterschieden (z.T. kleinräumig über zwei Größenordnungen reichend) werden im Einfluss des Schichtungstyps und der diagenetischen Entwicklung vermutet. Um dies zu bewerten fehlen allerdings bislang entsprechende Untersuchungen. Eine Verbesserung der Modellvorstellungen zur räumlichen Verteilung der geohydraulischen Kenngrößen, vor allem der hydraulischen Leitfähigkeiten, wird künftig eine erweiterte Kenntnis der sedimentären und diagenetischen Entwicklungsgeschichte, d.h. der Aquifergenese voraussetzen.

Schriften

- BITZER, F. (2004): Zu Pumpversuchen in Tiefbrunnen – eine idealisierte Betrachtung für den Buntsandstein der Pfälzer Mulde. – Mainzer geowiss. Mitt., **32**, S. 197–228, Mainz.
- DIN 18130 (1989): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts (DIN 18130). (Beuth) Berlin.
- EINSELE, G. (1969): Hydrogeologische Untersuchungen in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. – Geol. Mitt., **9**, S. 1–74, Aachen.
- EINSELE, G. & SCHIEDT, H.-R. (1971): Brunnencharakteristik, Dauerleistung, Wasserchemismus und Einzugsgebiet der 30 Tiefbohrungen Bliestal, Saarland. – Geol. Mitt., **11**, S. 185–248, Aachen.
- FBAB (Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg) (2002): Grundwassererkundung – Ermittlung von hydraulischen Kennwerten. Unterlagen zum Seminar vom 26.02.2002, Stuttgart.
- HEITEL, H. (1968): Versickerungsvorgänge in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. Diss. Univ. Tübingen, 100 S., Tübingen. – [unveröff.]
- (1972): Versickerung von Niederschlägen in Deckschichten und im Gebirge des pfälzischen Buntsandsteingebietes. – Mainzer geowiss. Mitt., **1**, S. 70–81, Mainz.
 - (2001): Geologischer Aufbau und Grundwasserfließvorgänge im Nordwestteil der Pfälzer Triasmulde (Sickingen Höhe und Westpfälzische Moorniederung im Bereich der TK 25, Blatt 6610 Homburg), Teil 1: Geologischer Aufbau und stratigraphische Stellung der Grundwasserleiter. – Mainzer geowiss. Mitt., **30**, S. 227–270, Mainz.
- KONRAD, (1985): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Rheinland-Pfalz 1 : 25 000, Blatt 6512 Kaiserslautern. 62 S., (Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz) Mainz.

- LGB & LfW (2004): Hydrogeologische Kartierung Kaiserslautern, Maßstab 1 : 50 000. 96 S., 13 Ktn. auf CD-ROM (Landesamt für Geologie und Bergbau und Landesamt für Wasserwirtschaft, Rheinland-Pfalz) Mainz.
- MATTHESS & UBELL (1983): Allgemeine Hydrogeologie – Grundwasserhaushalt. 438 S., (Borntraeger) Berlin-Stuttgart.
- MENZEL, E. (1980): Hydrogeologische Untersuchungen im Oberen Moosalbtal (südlich Kaiserslautern/Pfalz). 88 S., Diss. Univ. Heidelberg. – [unveröff.].
- ROHN, J. & KASSEBEER, W. (2003): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1 : 25 000, Blatt 6712 Merzalben. 88 S., 31 Abb., 5 Tab., 1 Strukturkte., (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz) Mainz.
- SEILER, K. P. (1968): Grundwasserfließvorgänge im klüftigen und porösen Medium des mittleren Buntsandstein im Saarland. 115 S., 23 Abb., Diss. Univ. Tübingen. – [unveröff.].
- SVOBODA, J. (1979): Gesteinsphysikalische Untersuchungen in den Karlstal-Schichten. 93 S., Diplomarbeit Univ. Heidelberg. – [unveröff.].
- WIEDERSPAHN, M. (1997): Versickerung von Niederschlagswasser aus geowissenschaftlicher Sicht. – Schriftenreihe BDG, **15**, 65 S., 23 Abb., 19 Tab., Bonn.

Anschrift des Autors:

Dr. FRANK BITZER, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz,
Emy-Roeder-Straße 5, D-55129 Mainz.

Manuskript eingegangen am 28.2.2007