

Zu Pumpversuchen in Tiefbrunnen – eine idealisierte Betrachtung für den Buntsandstein der Pfälzer Mulde

FRANK BITZER

Kurzfassung: Der Buntsandstein der Pfälzer Mulde stellt einen der bedeutenden Trinkwassergewinnungsräume in Rheinland-Pfalz dar. Das Grundwasser wurde in den letzten Jahrzehnten in zunehmend größeren Tiefen erschlossen. Die Brunnenbauwerke erreichen Tiefen bis ca. 350 m.

Die in den Tiefbrunnen durchgeführten Pumpversuche dienten zunächst der Ermittlung von Brunnen-spezifischen Ergiebigkeiten. Ergebnisse von Beobachtungen an flachen Grundwassermessstellen wurden auch hinsichtlich der vertikalen geohydraulischen Gliederung der Schichtenfolgen interpretiert.

Es werden zwei Standorte vorgestellt, an denen Grundwasser des Buntsandstein durch Tiefbrunnen erschlossen wird. Die Beobachtungen und Ergebnisse durchgeführter Pumpversuche werden kurz dargelegt.

Anhand eines Konzeptmodells, das hinsichtlich Geometrie und hydraulischer Randbedingungen als stark vereinfachter, aber realitätsnaher Beispielbereich für den Buntsandstein der Pfälzer Mulde angesehen werden kann, wurden die in flachen Grundwassermessstellen theoretisch zu erwartenden Reaktionen bei Pumpversuchen in Tiefbrunnen modellgestützt berechnet. Die Umsetzung erfolgte mit einem finite-Differenzen-Modell. In verschiedenen Rechenläufen wurden die Kenngrößen Durchlässigkeit und Speicherkoeffizient systematisch verändert. Aus den Ergebnissen lassen sich Mindestanforderungen an die Dauer und die Förderraten ableiten, um Informationen über das hydraulische System zu gewinnen. Die Modellergebnisse weisen ferner darauf hin, dass die Beobachtungsergebnisse bei den üblicherweise eingesetzten einfachen Messstellenkonfigurationen nicht geeignet sind, Rückschlüsse auf die vertikale Strukturierung des erschlossenen Grundwasserleitersystems zu ziehen.

Abstract: The Bunter of the Palatinate syncline is one of the important groundwater reservoirs in Rheinland-Pfalz. In the last decades the groundwater has been exploited in increasingly greater depth. Wells reach to about 350 m below surface.

Pumping tests in deep wells have been primary realised to derive from productivity parameters. But test results have also been interpreted in terms of the vertical hydraulic structure of the Bunter succession.

Two locations characteristic of deep wells will be presented. A short summary is given of the observations and the results of the performed pumping tests.

A conceptual model has been created which is thought to be representative of parts of the Palatine Bunter in terms of hydrogeology and geohydraulics. On this base a three-dimensional finite-difference groundwater model was used to calculate the theoretically expected reaction of pumping tests for well-neighbouring shallow obser-

vation wells. Several runs with systematically variations of conductivity and storage coefficient were done. The results give an idea about the minimum duration and necessary pumping rates to get informations about the hydraulic system. Additionally the model results point out that the examined observation configuration is not qualified to allow interpretations of the vertical aquifer structure.

Inhalt

1. Einleitung
 2. Zielsetzung und Vorgehensweise
 3. Fallbeispiele
 4. Konzeptmodell
 - 4.1. Geohydraulische Kenngrößen
 - 4.2. Modellanwendung
 - 4.3. Ergebnisse
 5. Diskussion
- Schriften

1. Einleitung

Der Buntsandstein der Pfälzer Mulde mit bis ca. 500 m Mächtigkeit stellt einen der bedeutenden Trinkwassergewinnungsräume in Rheinland-Pfalz dar. Die geographische Lage dieses flächenmäßig größten ausstreichenden Buntsandsteingebietes in Südwest-Deutschland ist unter Berücksichtigung der bestehenden Gliederung hydrogeologischer Teilräume in der Abb. 1 dargestellt.

Die zusammenhängenden Waldflächen im östlichen Teil der Pfälzer Mulde („Pfälzer Wald“) sowie im nördlichen Übergangsbereich zur Pfälzer Moorniederung („Sickinginger Höhe“) stellen wichtige Grundwasserneubildungsgebiete dar, da hier sehr gute Voraussetzungen für die Bildung eines anthropogen weitgehend unbeeinflussten Grundwassers bestehen. Unerwünschte Stoffe, die sich in Gebieten höherer Besiedlungsdichte, intensiver landwirtschaftlicher Nutzung sowie im Umfeld von Industrie und Gewerbe oder militärisch genutzten Flächen häufig im Grundwasser finden, sind in den Grundwässern aus diesem Bereich der Pfälzer Mulde meist nicht bekannt.

Die hydrogeologische Gliederung der Schichtfolgen des Buntsandstein der Pfälzer Mulde orientiert sich im Wesentlichen an deren lithologisch-fazieller Ausbildung sowie der in der Regel abgeschätzten resultierenden Gebirgsdurchlässigkeit (die sich auf durchflusswirksame Kluft- und Restporenvolumen verteilt) und der Speichereigenschaft. Eine ausführliche Beschreibung der Schichtfolgen und deren hydrogeologische Bewertung gibt HEITELE (2001).

Für großräumige Betrachtungen ist eine Zusammenfassung aufeinander folgender Grundwasserleiter mit vergleichbaren geohydraulischen Eigenschaften möglich (vgl. LGB & LfW Rheinland-Pfalz in Vorb. sowie HEITELE & HOHBERGER 1985). Nach den bisherigen Erkenntnissen erscheint eine Gliederung in Grundwasserleitergruppen angebracht, die von den Schlossberg-Schichten (früher Untere Karlstal-Schichten) und den Oberen Karlstal-Schichten abgetrennt werden (Tab. 1).

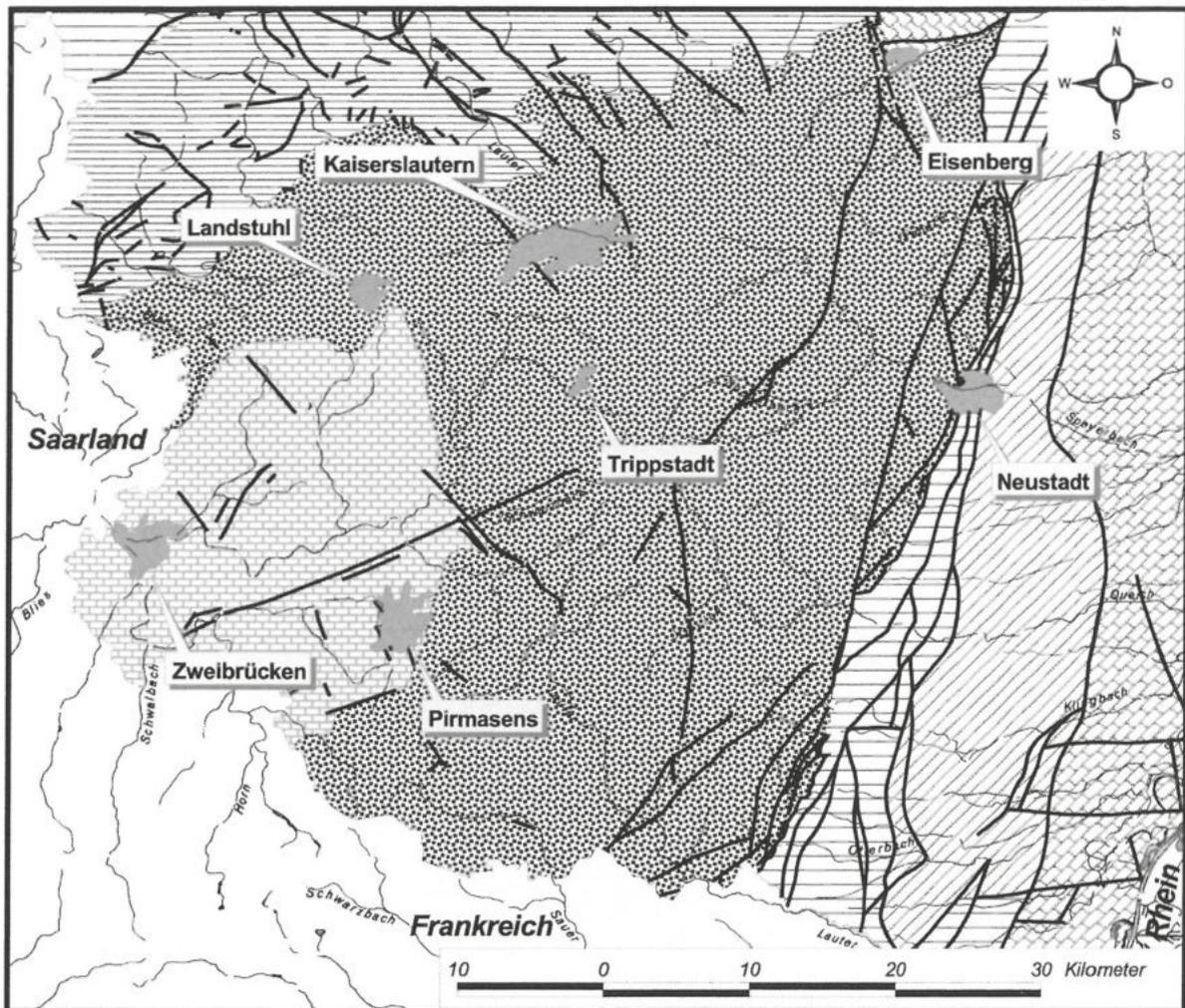
Eine vereinfachende Zusammenfassung der Grundwasserleiter und -geringleiter auf der Basis bislang publizierter Ergebnisse gibt Tab. 1.

Die Buntsandstein-Schichten innerhalb der großräumig nach Südwesten abtauchenden Pfälzer Mulde sind überwiegend flach gelagert. Sie können lokal durch Verwerfungen mehr oder weniger stark gestört sein. Im „inneren Teil“ bzw. dem Zentrum der Pfälzer Mulde sind Sprunghöhen im Meter- bis Zehnermeter-Bereich bekannt –

Tab. 1: Grundwasserleiter des Buntsandstein der Pfälzer Mulde.

Gruppe	Schichtenfolge	Lithologie	Mittlere Mächtigkeit	GwLeitertyp (vereinfacht)	Durchlässigkeiten [m/s]			hydrogeologische Gliederung
					10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	
Oberer und Mittlerer Buntsandstein	Voltziesandstein	Schluff-/Tonstein und Sandstein	15 m	Grundwasserleiter				Grundwasserleiter-Gruppe 3
	Zwischenschichten	stark schluffiger Fein- bis Grobsandstein, z.T. geröllführend	50 m					
	Obere Felszone	lokal geröllführender Mittel- bis Grobsandstein, z.T. Ton-/Schluff-Lagen	15 m					
	Obere Karls-tal-Schichten	z.T. wenig verfestigter dünn-schichtiger Mittelsandstein, geringer Ton-/Schluff-Anteil	35 – 50 m	Grundwasserleiter bis Grundwasser-geringleiter				möglicher Trennhorizont ?
	Karlstal Felszone	gebankter und klüftiger Mittelsandstein	35 m	z.T. ergiebiger Grundwasserleiter				Grundwasserleiter-Gruppe 2
Unterer Buntsandstein	Schlossberg-Schichten	z.T. wenig verfestigter dünn-schichtiger Mittelsandstein, geringer Ton-/Schluff-Anteil	50 – 80 m	Grundwasserleiter bis Grundwasser-geringleiter				möglicher Trennhorizont ?
	Rehberg-Schichten	wechselnd geröllführende und schluffige, z.T. klüftige Mittel- bis Grobsandsteinbänke, mächtige Einschaltungen dünn-schichtigen Sandsteins	100 – 140 m	ergiebiger Grundwasserleiter				Grundwasserleiter-Gruppe 1
	Trifels-Schichten	gut geschichteter und z.T. stark klüftiger Sandstein, Ton-/Schluff-Einschaltungen, z.T. geröllführend, gebankt	40 – 120 m					
Zechstein	Stauf-Schichten	braunroter Fein- bis Grob-sandstein, Ton-/Schluff-Gehalt, geröllführend, massig, z.T. stark entfestigt	bis 100 m	Grundwasserleiter bis Grundwasser-geringleiter				

* aus LGB & LfW (in Vorb.)



am nordwestlichen Rand der Pfälzer Mulde werden z. T. bis 100 m beobachtet bzw. erwartet. Die Kluft- und Verwerfungsflächen stehen meist steil bis saiger; die Hauptstreichrichtungen der Kluftflächen sind Nordost-Südwest, Nordnordost-Südsüdwest und Nordwest-Südost (s. auch Abb. 1).

Tektonisch bedingt kann das Grundwasser lokal gespannt sein. Zum Teil bestehen schwebende Grundwasserleiter. In diesen Bereichen ist eine geohydraulische Gliederung in Grundwasserstockwerke im Sinne der DIN 4049 möglich.

Um die im Rohwasser oberflächennaher Wasserfassungen (meist Quellen) mitunter auftretenden mikrobiologischen Beeinflussungen und die damit verbundenen Risiken zu umgehen, wurden bei den Trinkwassererschließungen der vergangenen Jahrzehnte bevorzugt Brunnenbauwerke errichtet, die gezielt tiefer liegende und damit besser geschützte Grundwasserleiter des Buntsandstein erschließen (vgl. HEITTELE 2002).

So bestehen heute historisch bedingt in einigen Gewinnungsgebieten unmittelbar benachbart Fassungsanlagen unterschiedlichen Alters. Sie befinden sich oft in nur wenigen 10er bis ca. 100 Metern Abstand und erschließen das Grundwasser aus Leiterhorizonten (Schichtfolgen) verschiedener Tiefenniveaus.

Hydrogeologische Teilräume

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

 Störungen / Verwerfungen

 Städte

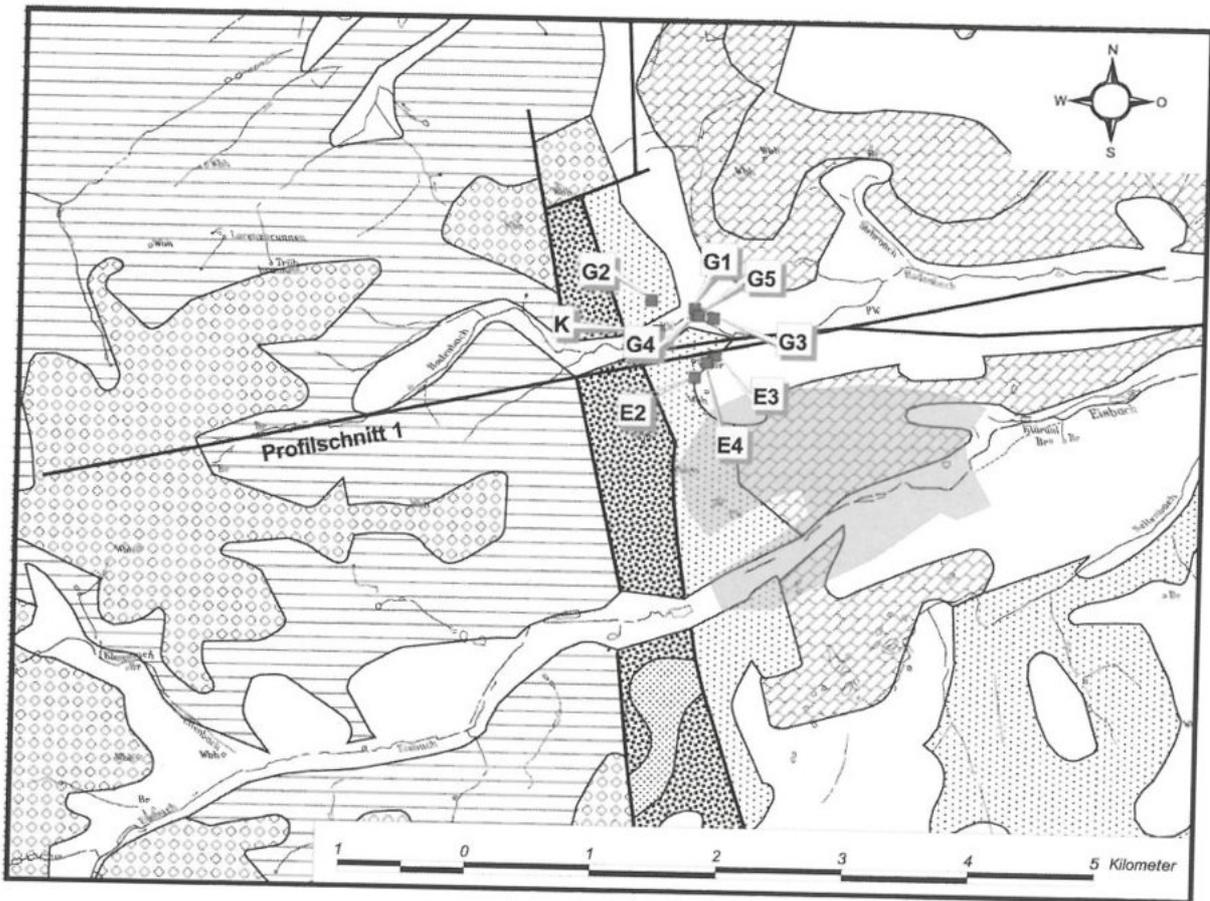
Abb. 1: Das Pfälzer Buntsandsteingebiet (Südwestdeutscher Buntsandstein) und die angrenzenden hydrogeologischen Teilräume sowie das Störungsmuster auf der Basis der GÜK 300 (DITTRICH et. al. 2003) mit Gewässernetz.

Während die Tiefbrunnen der jüngsten Generation bei Abdichtungsstrecken von z. T. 100 bis 150 m mitunter Erschließungstiefen von 300 bis 350 m aufweisen, sind Brunnen älteren Datums meist nur wenige bis 10er Meter tief abgedichtet und erreichen Tiefen von etwa 50 bis 100 m.

Um bei direkt benachbarten Brunnen unterschiedlicher Erschließungstiefen mögliche gegenseitige Beeinflussungen sowie evtl. ökologisch relevante Auswirkungen (z. B. Grundwasserabsenkungen, Abflussminderungen in Vorflutern) zu minimieren, wurden beim Bau der jüngeren Tiefbrunnen – soweit möglich – als grundwassergeleitend eingeschätzte Schichtfolgen, dies sind im Wesentlichen die Schlossberg-Schichten (s. Tab. 1), gezielt als mögliche Trennhorizonte genutzt.

2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Um die hydraulische Wirksamkeit als geringer durchlässig eingeschätzter Schichten zu prüfen, wurden meist Pumpversuche in den Tiefbrunnen durchgeführt und die Grundwasserspiegel in benachbarten flacheren Brunnen und Messstellen sowie die Schüttungen benachbarter Quellen bzw. Abflüsse in den Gewässern beobachtet.



Um jedoch belastbare Einschätzungen hinsichtlich der hydraulischen Wirksamkeit möglicher Trennhorizonte ableiten zu können, erfordert bereits die Planung solcher Pumpversuche vorab eine Modellvorstellung über den zu erwartenden Einfluss geohydraulischer Kenngrößen auf die resultierende zeitlich-räumliche Entwicklung des Grundwasserströmungsfeldes während eines Pumpversuchs.

Bislang wurde bei der Planung und Auswertung von hydraulischen Tests im Buntsandstein der Pfälzer Mulde bei Standorten mit vertikal differenzierter Erschließung des Grundwassers (Flach- und Tiefbrunnen; s. Kap. 3) auf den Einsatz numerischer Methoden verzichtet. Die Gründe hierfür lagen u. a. in dem für einzelne Standortbetrachtungen hohen Aufwand und meist unzureichenden Kenntnisstand der hydrogeologischen Randbedingungen für modellgestützte Abschätzungen.

Anhand von zwei Fallbeispielen sollen die zuvor skizzierten hydrogeologischen Verhältnisse einer tiefendifferenzierten Grundwasserentnahme anhand konkreter Standorte verdeutlicht werden.

In der Folge wird ein idealisiertes, d. h. stark vereinfachtes hydrogeologisches Modell (Konzeptmodell) vorgestellt und in einem numerischen 3d-Grundwasserströmungsmodell umgesetzt (Programmcode MODFLOW).

Mit diesem Modell wurden verschiedene Pumpversuchsszenarien simuliert und die zeitlich-räumliche Entwicklung des Grundwasserströmungsfeldes bei systematischer Variation sensitiver Kenngrößen beobachtet und ausgewertet.



Abb. 2: Geologische Übersicht für den Raum Eisenberg/Göllheim auf Basis der GÜK 300 (DITTRICH et. al. 2003) mit Gewässernetz. Die dargestellten Brunnen sind im Text erläutert; weitere Fassungsanlagen in Entfernungen größer 1 km sind nicht dargestellt. Der Profilschnitt 1 ist in Abb. 3 dargestellt. Quartär: Löß, Lößlehm, Sand- und Schwemmlöß; fluviatile Sedimente und ältere Terrassen (kiesiger Sand bis sandiger Kies). Tertiär: Tertiär des Mainzer Beckens (Kalkstein, Tonmergel, Ton); Rheingraben: Kies, Sand und Ton (u. a. Eisenberger Ton und Klebsand). Buntsandstein: Mittlerer und Oberer Buntsandstein – smo (Mittel- bis Grobsandstein); Unterer Buntsandstein, Schlossberg- und Rehberg-Schichten – sRS (Grob- bis Feinsandstein); Unterer Buntsandstein, Trifels-Schichten – sT (Mittel- bis Grobsandstein). Zechstein: Stauf-Schichten – zST: (Fein- bis Grobsandstein, schluffig). Rotliegend: Nahe-Subgruppe – rn (i. w. Ton-, Silt- und Feinsandstein).

Die Ergebnisse der Berechnungen geben Hinweise für die Planung künftiger Pumpversuche. Sie sollen einen Eindruck vermitteln über die Grenzen, der aus solchen Pumpversuchen ableitbaren Aussagen zum untersuchten Fließsystem – insbesondere im Hinblick auf die Wirksamkeit möglicher Trennhorizonte.

Auf die für die wasserwirtschaftliche Nutzung relevanten Aspekte der Ergebnisse, z. B. betreffs der Abgrenzung von Einzugsgebieten, Fragen hinsichtlich Schutzzonen, Anforderungen an ein Grundwassermonitoring bei Entnahmen aus tieferen Aquifersystemen, wird in diesem Beitrag nicht eingegangen.

3. Fallbeispiele

Im Folgenden werden zwei Standorte vorgestellt, deren Tiefbrunnen als charakteristisch für die Erschließung tiefen Grundwassers im Buntsandstein der Pfälzer Mulde angesehen werden können. Es wird aufgezeigt, wie beim Ausbau der Tiefbrunnen die als geringer durchlässig eingeschätzten Schichten berücksichtigt wurden und welche Bedeutung ihnen bei der Bewirtschaftung des tiefen Grundwassers zugemessen werden kann.

Die Lage der beiden Betrachtungsgebiete ist in den Abb. 1, 2 und 4 dargestellt.

Raum Eisenberg /Göllheim

Das Betrachtungsgebiet liegt am nordöstlichen Rand des hydrogeologischen Teilraums „Südwestdeutscher Buntsandstein“.

Bedingt durch die Lage am Rheingrabenrand und den Übergangsbereich zum Mainzer Becken ist die Landschaft durch ein belebtes Relief geprägt (Abb. 3).

Die Topographie fällt großräumig in östliche Richtung ab. Das tiefste Niveau wird im Bereich Eisenberg im Tal des Eisbach mit ca. 170 m ü NN erreicht.

Die oberirdischen Gewässer haben, bedingt durch Gesteinswechsel, Tektonik und das oft steile Relief, abschnittsweise keinen hydraulischen Anschluss an das Grundwasser des Buntsandstein.

Der Buntsandstein taucht nach Norden und Osten vermutlich entlang von Staffelbrüchen unter die jüngeren sandig-schluffigen bis mergelig-tonigen Ablagerungen des Mainzer Beckens und der Rheingrabenrand- und Zwischenscholle ab (SCHÄFER 2000).

Westlich des Randgraben-Störungssystems ist die Mächtigkeit des Buntsandstein erosiv teilweise stark reduziert. Bereichsweise wurde er vollständig ausgeräumt, so dass dort die tonig-schluffig-sandigen Ablagerungen des Unterperm (Nahe-Subgruppe) flächig und die Fein- und Grobsandsteine der Stauf-Schichten (Zechstein) lokal austreichen.

Der Großraum Grünstadt/Eisenberg liegt etwa in der Verlängerung bzw. Fortsetzung der Achse der Pfälzer Mulde (vgl. HEITTELE 2001).

Auf der Basis bekannter Bohraufschlüsse (Bohrarchiv des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz) lässt sich im Bereich der Randscholle eine großräumig nach Osten gerichtete Grundwasserfließrichtung ableiten.

Die potenziellen Grundwasserneubildungsgebiete (Buntsandstein, Zechstein und Unterperm) reichen nach Westen bis in den Bereich der oberirdischen Wasserscheide zur Pfälzer Moorniederung.

Die in Abb. 2 dargestellten Brunnen G1 bis G4 sowie E2 und E3 weisen Tiefen von ca. 100 bis 120 m auf. Die Abdichtungsstrecken reichen meist bis ca. 10 m unter Gelände.

Zur Sicherung der örtlichen Wasserversorgungen wurden 1987 der Brunnen G5 mit einer Endteufe von 350 m sowie 1994 der Brunnen E4 mit einer Endteufe von 302 m niedergebracht. Die Abdichtungsstrecken reichen bis 130 m (G5) bzw. 152 m unter Gelände (E4), d. h. deutlich unterhalb des Erschließungsniveaus der älteren Flachbrunnen.

Nach den Bohraufzeichnungen (G5 und E4) ist von einer zusammenhängenden Abfolge grundwasserleitender Fein- bis Grobsandsteine auszugehen, in die vergleichsweise geringmächtige Schichten von Feinsand- bis Schluffsteinen eingeschaltet sind. Hinweise auf lateral aushaltende, hydraulisch wirksame Trennhorizonte liegen nicht vor. Das Grundwasser ist nicht gespannt.

Die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse sind anhand des schematischen Profilschnittes in der Abb. 3 dargestellt.

Bei einem 13-tägigen Pumpversuch im Brunnen E4 wurden 5 l/s bzw. nach ca. 4 Tagen 10 bis 11 l/s gefördert und in diesem Zeitraum die zwischen 50 bis 70 m entfernten Brunnen E2 und E3 bzw. G1, G3 bis G5 (Abstand ca. 370 m) beobachtet.

Das Ergebnis des Pumpversuchs ergab keine Hinweise auf eindeutig durch die Entnahme bedingte Änderungen der Grundwasserstände in den beobachteten Brunnen (unspezifische Grundwasserstandsschwankungen).

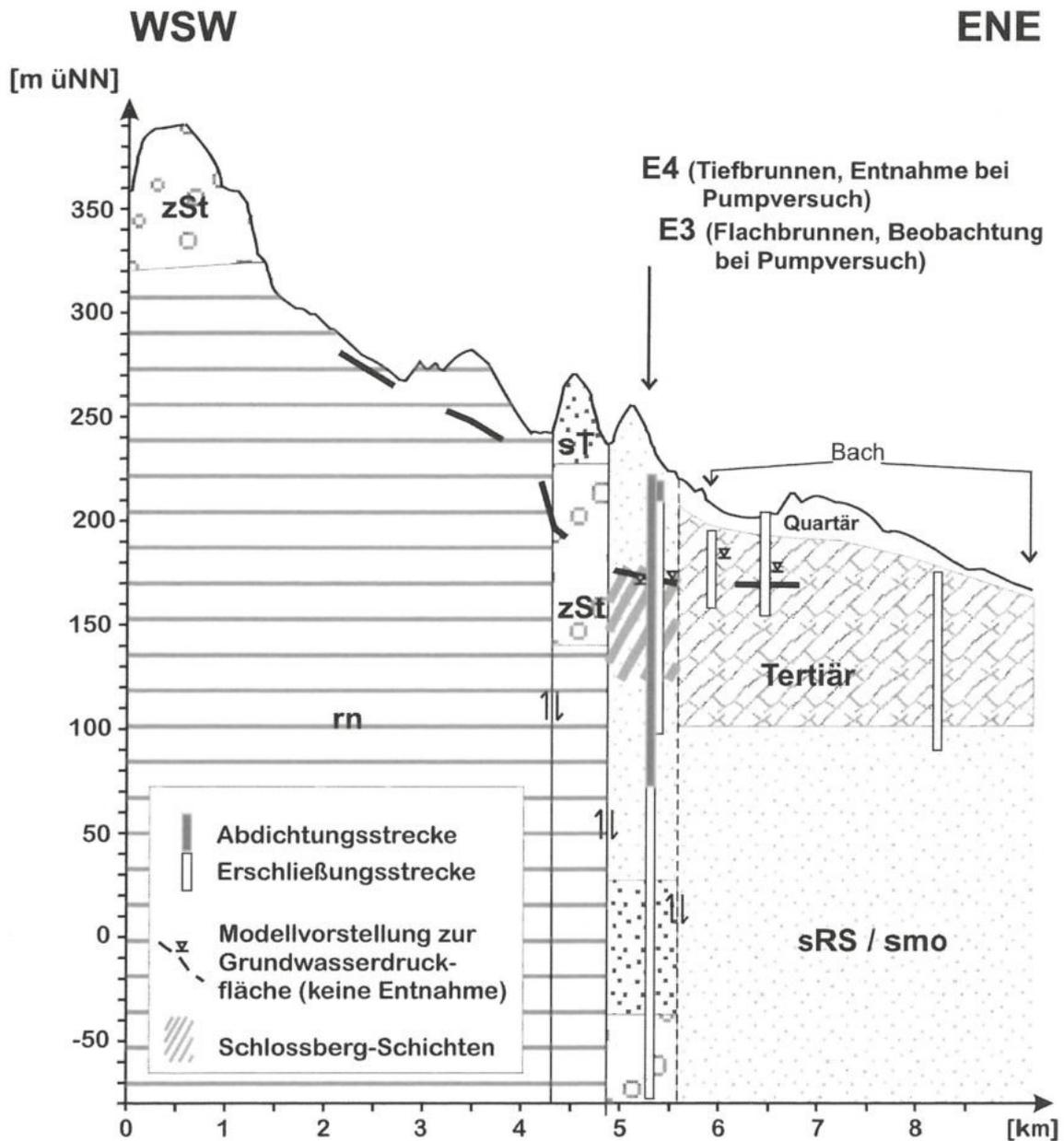


Abb. 3: Geologisch-hydrogeologischer Profilschnitt 1 (schematisch, Lage des Profils sowie verwendete Kürzel s. Abb. 2. Erläuterungen zu den Brunnen im Text).

Das hinsichtlich der angestrebten Brunnenleistung positive Versuchsergebnis wurde vom fachtechnisch begleitenden Gutachter als Nachweis einer hydraulisch wirksamen Grundwasserstockwerksgliederung interpretiert, bei dem das durch die älteren, flacheren Brunnen G1, G3 und G4 sowie E3 erschlossene Grundwasserleiter-niveau, von dem tieferen, durch den Brunnen E4 erschlossenen und getesteten Grundwasserleiter hydraulisch entkoppelt ist (Annahme der Schlossberg-Schichten als Trennhorizont).

Bereich des Oberen Moosalb-Tals

Das Betrachtungsgebiet liegt wenige Kilometer nordwestlich von Trippstadt, im zentralen Bereich der Pfälzer Mulde. Die weitgehend ungestörte Lagerung der Buntsandstein-Schichten ist durch die nach Westen einfallende Muldenachse geprägt (vgl. Abb. 1).

Das Relief ist ausgeprägt; die Anhöhen erreichen bis ca. 400 m ü NN. Das Sohl-niveau der Täler liegt in diesem Bereich relativ einheitlich bei ca. 275 m ü NN. Das Ero-sionsniveau verläuft dort innerhalb der Karlstal- bzw. über weite Bereiche in den Schlossberg-Schichten.

Ende der 80er, Anfang der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurden zur Si-cherung der regionalen Wasserversorgung die Tiefbrunnen 1 bis 3 mit Endteufen bis etwa 330 m im oberen Moosalb-Tal gebaut. Alle Brunnen erschließen die Basis des Mitt-leren sowie die komplette Abfolge des Unteren Buntsandstein und stehen in den Stauf-Schichten (Zechstein). Die Restmächtigkeiten der Schlossberg-Schichten erreichen im Bereich der Brunnen etwa 25 bis 35 m (Abb. 4).

Zur Beobachtung möglicher Reaktionen der Grundwasserstände auf die Entnah-men wurden im Abstand bis zu ca. 400 m von den Brunnen in der Talniederung Flach- und Tiefmessstellen installiert. Die Flachmessstellen sind im Niveau der Talaue verfil-tert (Quartär); ihre Grundwasserstände werden im Wesentlichen durch den Pegel der Gewässer bestimmt (d. h. keine messbaren Reaktionen auf die Grundwasserentnah-men). Die Tiefmessstellen hingegen erschließen etwa die obersten 30 m der Rehberg-Schichten. Sie zeigen seit Inbetriebnahme der Brunnen z. T. sinkende Druckhöhen (bis ca. 1 m innerhalb von 3 Jahren). Die Messstellen konnten aus Maßstabsgründen nicht in Abb. 4 dargestellt werden. Die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse sind an-hand des schematischen Profischnittes in Abb. 4 ausgewiesen.

Bei einem 14-tägigen Leistungspumpversuch im Tiefbrunnen 3 reagierten bei einer Entnahme von ca. 36 l/s sowohl die Tiefmessstellen mit Absenkungsbeträgen bis 2 m als auch die Wasserspiegel in den Tiefbrunnen 1 und 2 (Absenkung bis 3,5 m). Ferner zeigten benachbarte Quellen Schüttungsminderungen bis 20%, die auf den Pumpver-such zurückzuführen waren.

Die Beobachtungen des Pumpversuchs zeigen eine sowohl in der Tiefe als auch oberflächennah feststellbare, rasche Reaktion auf die kurzzeitig hohe Entnahme. Sie geben somit keine Hinweise auf eine zwischen der (Tiefen-)Entnahme und oberflä-chen näheren Beobachtungspunkten hydraulisch dämpfend oder trennend wirksame Schicht bzw. Schichtenfolge.

4. Konzeptmodell

Das im Folgenden erläuterte Konzeptmodell enthält, in vereinfachter Form, die wesentlichen, in den Fallbeispielen wirksamen hydrogeologischen Einflussfaktoren bzw. relevanten Randbedingungen.

Es bildet die Grundlage für den Aufbau und die anschließende Anwendung des nu-merischen Modells. Mit diesem sollen die sich bei Anregung des Aquifers, d. h. bei Pumpversuchen einstellenden Grundwasserströmungsverhältnisse vereinfachend rechnerisch abgeschätzt werden.

Das Ergebnis der rechnerischen Betrachtungen soll:

- Hinweise auf relevante und bei Pumpversuchen in Tiefbrunnen zu berücksich-tende Größenordnungen (zeitlich-räumliche Aspekte, Einflüsse von Kenngrößen) geben und

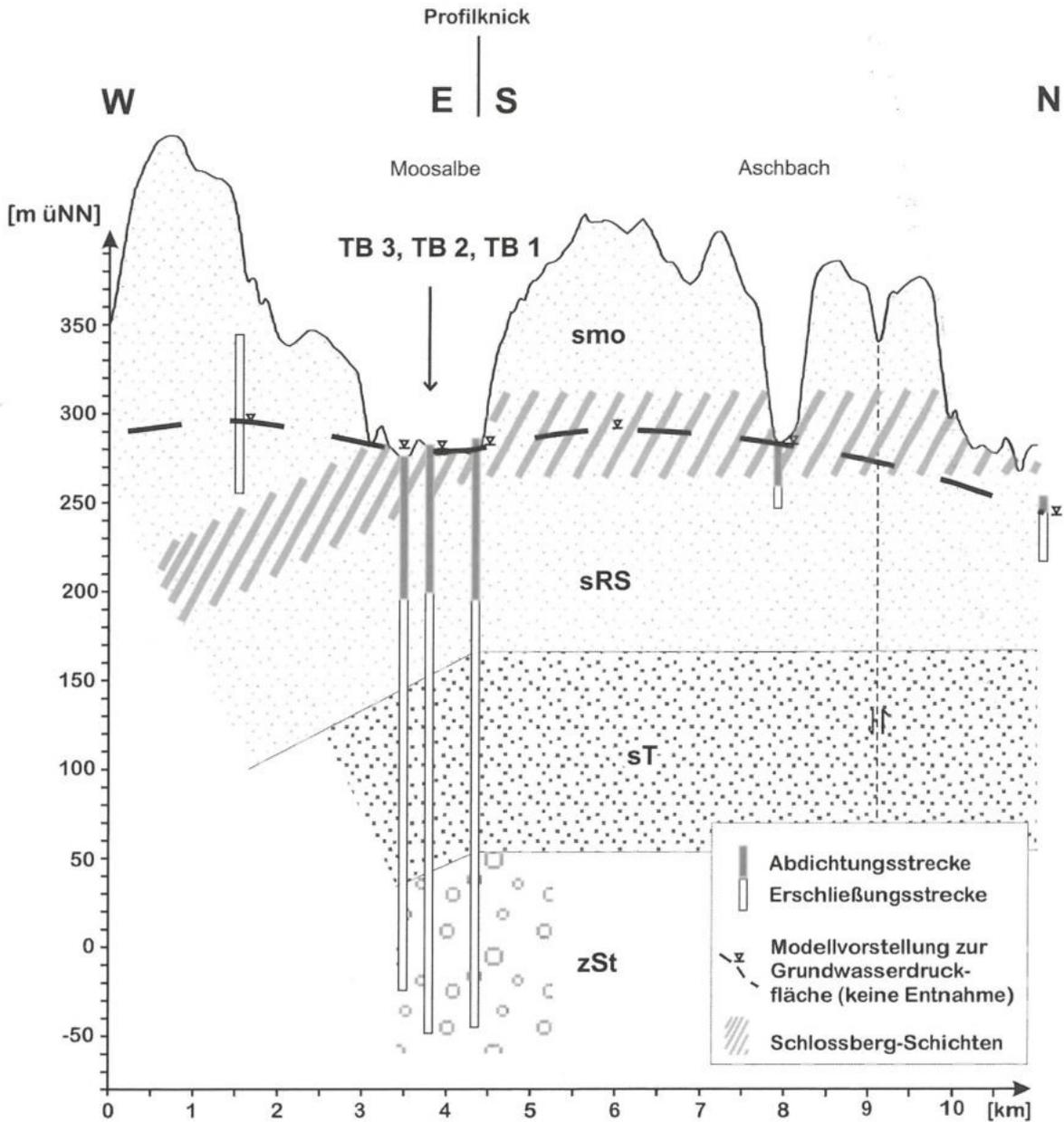


Abb. 4: Geologisch-hydrogeologischer Profilschnitt 2 im Bereich Moosalb-Tal (schematisch, verwendete Kürzel s. Abb. 2. Erläuterungen zu den Brunnen im Text).

- auf vergleichbare hydrogeologische Verhältnisse im Buntsandstein der Pfälzer Mulde mit entsprechenden Einschränkungen übertragbar sein.

Es möge ferner das Verständnis der Grundwasserströmung bei vertikal differenzierter Nutzung mächtiger Grundwasserkörper unterstützen.

Für die modelltechnische Umsetzung des Konzeptmodells wurde das Programm PMWIN (KINZELBACH & CHIANG 2003), ein 3-dimensionales Finite-Differenzen-Modell verwendet.

Ausgangsbasis der nachfolgenden Betrachtungen ist ein rechtwinkliges Blockmodell:

- Als vertikale Ausdehnung des rechtwinkligen Modellraums wurden 470 m angesetzt. Dieser Wert orientiert sich an den bekannten bzw. abgeschätzten Maximalmächtigkeiten des Buntsandstein in der Pfälzer Mulde.
Der Modellraum wurde vertikal in 7 ebene Modellschichten gegliedert. Die 1. (oberste) und die 7. Schicht weisen eine Mächtigkeit von 70 m bzw. 150 m auf. Die Mächtigkeit der dazwischen liegenden Schichten beträgt jeweils 50 m. Die Basis der Modellschicht 6 hat das Bezugsniveau 0 m (s. Abb. 5).
- Die laterale Ausdehnung des Modellraums beträgt 6 km x 10 km. Die Längsseiten des Modellraums (alle Schichten) sowie die Modellschichten 2 bis 7 entlang ihrer Querseiten sind durch Trennstromlinien begrenzt (d. h. keine randlichen Zu- und Abflüsse).
Die Querseiten der 1. Schicht wurden als Gewässer angenommen, die den aus der Grundwasserneubildung resultierenden Grundwasserabstrom aufnehmen.
Mit der Dimensionierung des Modellgebiets wird berücksichtigt, dass Brunnen großer Erschließungstiefen von der Fassungsanlage weit entfernt liegende Einzugsgebiete aufweisen können.
Mit der Breite des Modellraums von 6 km werden ausreichende Abstände zum Modellbrunnen eingehalten, um die Strömungsverhältnisse in dessen Umfeld durch diese Ränder nicht zu beeinflussen.
Die horizontale Diskretisierung (Modellzellenlänge) beträgt Brunnennah 10 m und mit zunehmender Entfernung bis 100 m.
- Der Modellbrunnen, für den unterschiedliche Szenarien berechnet wurden, liegt bei den Koordinaten 2,8 km/6,5 km (s. Abb. 5).
In den berechneten Szenarien wurden unterschiedliche Erschließungstiefen und -strecken angesetzt (Modellschichten 4 bis 6; s. auch Abb. 9 und 12).
- Die Messstellen zum Beobachten des sich je nach Szenario im Umfeld des Modellbrunnens ausbildenden Potentialfeldes befinden sich im An-, Ab- und Seitenstrom (jeweils 3 Stück) bis in 125 m Entfernung. Sie wurden in den Modellschichten 1 und 2, d. h. bis in 120 m Tiefe umgesetzt (Tab. 2, Abb. 5).

Die Grundwasserbilanz innerhalb des Modellraums wird durch folgende Randbedingungen bestimmt:

- **Grundwasserneubildung:** Die Böden der meist zu einer Sandauflage verwitternde Buntsandstein-Oberfläche weisen im Allgemeinen geringe Feldkapazitäten auf und begünstigen eine schnelle Versickerung des gefallen Niederschlags.
Als mittlere Niederschlagssummen im Bereich des Pfälzer Waldes werden Werte im Bereich von 850 bis 950 mm/a angesehen (HEITEL 2002). Aus den mittleren Niedrigwasserabflussspenden des Schwarzbach, der den regionalen Vorfluter des zentralen Pfälzer Waldes darstellt, wurden mittlere Grundwasserneubildungshö-

Tab. 2: Angaben zu den berechneten Szenarien.

Szenarien	Entnahme Modellbrunnen			Modellmessstellen	
	Entnahmen [l/s]	in Modellschicht	Erschließungsbereich [m] über Bezugsniveau	in Modellschicht	über Bezugsniveau [m]
A, 1, I	5, 10, 20, 30, 50, 70	4 - 6	0 - 150	1 - 2	>200
B, 2, II		4	100 - 150		
C, 3, III		4 - 5	50 - 150		

s. Abb. 5

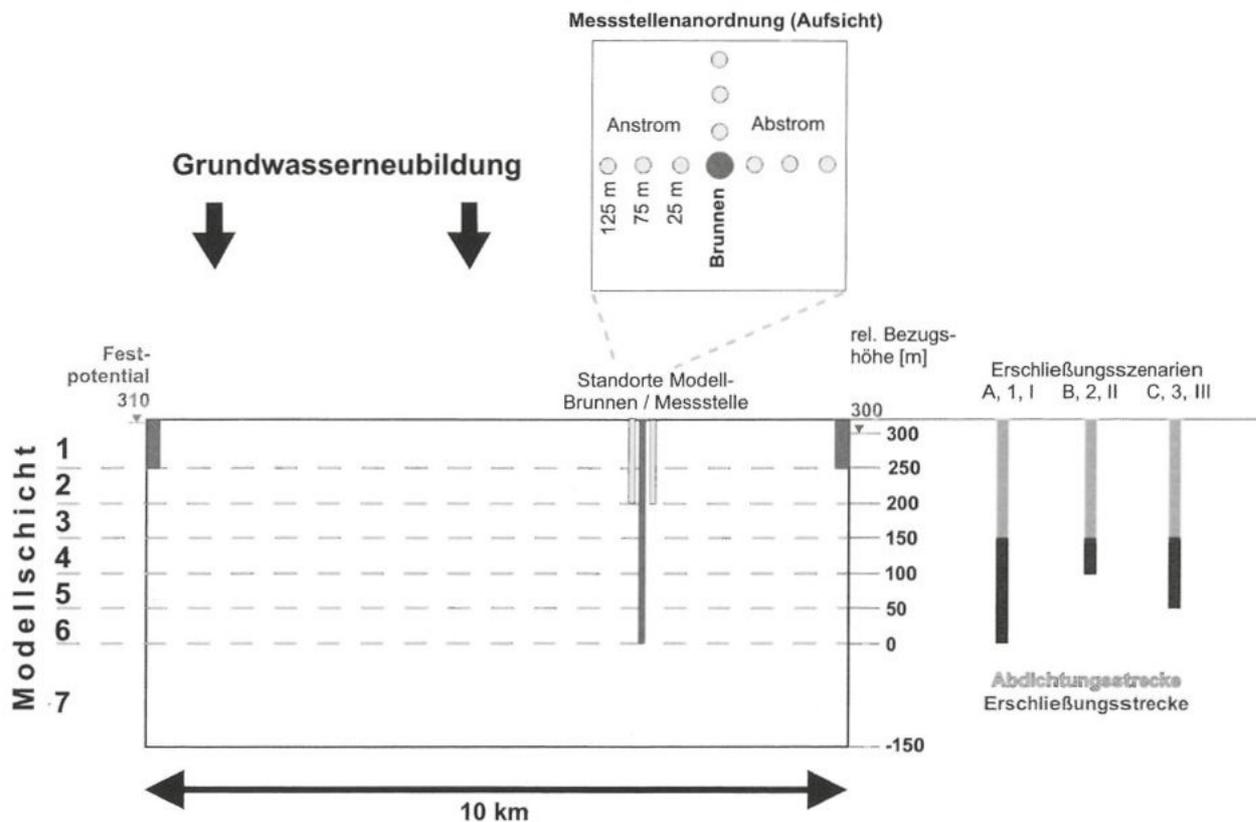


Abb. 5: Strukturierung des Modellraums und Randbedingungen.

hen von 173 bis 183 mm/a abgeschätzt (HEITELE 2002). Dieser Wert entspricht in seiner Größenordnung dem im Hydrologischen Atlas Deutschland (BMU 2003) angegebenen.

Aktuelle Abflussauswertungen nach dem Natermann-Verfahren (LGB & LfW in Vorb.) geben Hinweise auf eine vertikal differenzierbare Grundwasserneubildung. Demnach entfallen im Mittel ca. 60 mm/a auf die im Wesentlichen dem sog. Quellstockwerk zugehörigen Grundwasserleiter bzw. Aquifere, die meist über Quellhorizonte entwässern. Für den tieferen, flächenhaft zusammenhängenden Grundwasserkörper kann danach eine mittlere Grundwasserbildung bis ca. 250 mm/a angenommen werden.

Für die Modellrechnungen, die sich auf den tieferen zusammenhängenden Grundwasserkörper beziehen, wird eine Grundwasserneubildung von 180 mm/a angesetzt (konservativer Ansatz). Damit wird der Einfluss von Tiefenentnahmen auf das oberflächennahe Grundwasser (Absenkung) tendenziell überschätzt.

Die Grundfläche des zuvor erläuterten Modellgebiets beträgt 60 km². Unter Ansatz einer (vereinfachend) einheitlich, flächenhaft wirksamen Grundwasserneubildungsrate von 180 mm/a steht im Modellraum ein Dargebot von ca. 342 l/s zur Verfügung.

- **Grundwasserabstrom:** Die Querseiten des Modellraums in der 1. (obersten) Modellschicht sind durch Randbedingungen der 3. Art (Cauchy-Bedingung) bestimmt. Sie stellen die modell-technische Umsetzung von großräumig den Grundwasserabstrom aufnehmenden Vorflutern dar. Das an diesen Rändern angesetzte

äußere Potenzial wird durch einen Widerstand im Aquifer wirksam (vgl. KINZELBACH & RAUSCH 1995). Da die meisten Bäche im Buntsandstein der Pfälzer Mulde bedingt durch Lithologie und Relief bzw. Fließgeschwindigkeit selten wirksame Kolmationsschichten entwickeln bzw. erwarten lassen, wurde kein wirksamer Widerstand angesetzt. Die Ränder wirken damit über die angesetzten Potenziale bei 300 m bzw. 310 m Bezugshöhe wie Festpotenziale. Über sie erfolgt der Abstrom des im Modellraum neugebildeten und nicht durch den Brunnen entnommenen Grundwassers.

- **Grundwasserentnahme:** In den Berechnungen wurden bei verschiedenen Erschließungsszenarien Entnahmen zwischen 5 bis 70 l/s am Modellbrunnen umgesetzt. Sie können damit bis zu etwa 20% des im Modellraum durch Grundwasserneubildung bereitgestellten Dargebots erreichen. Die Entnahmen wurden in den Modellschichten 4 bzw. 4 und 5 oder 4 bis 6 realisiert (s. Tab. 2, Abb. 5). Finden keine Entnahmen statt, so strömt das im Modellgebiet neugebildete Grundwasser über die Ränder an der Querseite der 1. Modellschicht vollständig ab (Modellvorflut).

Die Geometrie und Dimensionierung des Modellraums sowie die Wahl der Randbedingungen wurden sehr einfach gewählt, werden jedoch im Hinblick auf die Zielsetzung der Betrachtungen als ausreichend realitätsnah bewertet.

Grundsätzlich vergleichbare Verhältnisse, d. h. flächenhafte Grundwasserneubildung, regionaler Grundwasserabstrom über Gewässer und laterale Begrenzung von Fließsystemen durch Trennstromlinien können für Teilgebiete der Pfälzer Mulde in ähnlicher Weise formuliert werden (vgl. LGB & LfW in Vorb.). Als mögliche reale Vergleichsräume seien die Buntsandstein-Gebiete zwischen den großräumig als regionale Vorflut wirksamen Gewässern Eisbach/Eckbach und Isenach sowie Merzalbe/Rodalb und Moosalbe aufgeführt (der Raum südwestlich Trippstadt; s. Abb. 1).

4.1. Geohydraulische Kenngrößen

Neben der Geometrie und Strukturierung des Modellraums sowie den angesetzten Randbedingungen sind die Ergebnisse der Modellrechnungen maßgeblich von den angesetzten geohydraulischen Kenngrößen und deren räumlicher Verteilung abhängig.

Abgeschätzte und im Modell anzusetzende Werte der Kenngrößen liegen in der Regel nur für wenige Kontrollpunkte vor. Sie ergeben sich in der Fläche üblicherweise im Rahmen der Modellkalibrierung auf Referenzwerte unter Berücksichtigung eines plausiblen Strömungsbildes und einer plausiblen Wasserbilanz.

Im Rahmen der vorliegenden Betrachtungen wurden grundsätzliche Zusammenhänge untersucht, deren Ergebnisse innerhalb gewisser Grenzen übertragbar sein sollen.

Es erfolgte keine Modellkalibrierung, da keine konkreten Standortverhältnisse vorausgesetzt wurden. Die Kenngrößen innerhalb jeder Schicht wurden daher ohne räumliche Variation auf einen Wert festgesetzt. Die gewählten Werte orientierten sich an bestimmten Modellschichten zugewiesenen geologischen Verhältnissen (s. Tab. 3), der Auswertung bekannter und der Berücksichtigung in der Literatur angegebener Werte.

Tab. 3: Angesetzte geohydraulische Kenngrößen.

Hydrogeologische Einschätzung	Modellschicht	$k_{f\text{-horizontal}}$ [m/s]	$k_{f\text{-vertikal}}$ [m/s]	$k_{f\text{-h}} / k_{f\text{-v}}$ (Szenario)	S' (Szenario)
Auflockerungs- und Verwitterungszone des Festgesteins	1	4×10^{-5}	9×10^{-6}	2:1 (I-III) 10:1 (A-C) 100:1 (1-3; C-Trenn)	0,03 (I-III, A-C, 1-3, C-Trenn)
	2		4×10^{-6} 4×10^{-7}		
Festgestein; mit zunehmender Tiefe abnehmende Kluftöffnungsweiten	3	2×10^{-5} 2×10^{-6}	7×10^{-6} 2×10^{-6} 2×10^{-7}		
	4	2×10^{-5}	7×10^{-6}		
	5		2×10^{-6}		
	6		2×10^{-6}		
	7		2×10^{-7}		

* freies Grundwasser (für gespanntes Grundwasser fester Wert 0,001)

Durchlässigkeiten

Der Buntsandstein stellt im Wesentlichen ein Kluft- und Porengrundwasserleitetesystem dar, dessen durchflusswirksame Anteile je nach Schichtenfolge variieren können.

Untersuchungen an Werksteinen aus der Süd- und Westpfalz geben Hinweise auf vergleichsweise hohe durchflusswirksame Restporenvolumen (z. B. WANNER & HÄFNER 1996). In geringer verfestigten bis unverfestigten Schichtfolgen (z. B. die sog. „Kaviarsande“, vgl. HEITELE 2001) sind Eigenschaften eines Porengrundwasserleiters zu erwarten.

Aus bisherigen Pumpversuchsauswertungen ergeben sich bislang keine Hinweise auf ein typisches Doppel-Porositäts-Verhalten (Kluft-Matrix-System).

Die maßgeblichen Wasserwegsamkeiten im Buntsandstein werden nach HEITELE (2001) in erster Linie entlang von Schichtfugen und darüber hinaus entlang der meist etwa senkrecht dazu orientierten Kluft- und Störungsflächen angenommen. Bei gleichmäßigen Trennflächenabständen im Metermaßstab wäre zumindest großräumig von einer vergleichsweise homogenen kluftgestützten Durchlässigkeitsverteilung auszugehen. Im Gelände zahlreich anzutreffende Schichtquellen zeigen weiterhin eine vertikal variierende Durchlässigkeitsverteilung an. Die Größenordnung der an solchen Grenzflächen wirksamen Durchlässigkeitskontraste, ihre räumliche (faziell bedingte) Ausdehnung und Bedeutung für die großräumige Grundwasserströmung wurden bislang noch nicht erschöpfend untersucht.

Auf der Basis der bisherigen Erfahrungen und Kenntnisse wird im Weiteren davon ausgegangen, dass innerhalb eines entsprechend kleinen Maßstabs (= großräumige Betrachtung) der Buntsandstein der Pfälzer Mulde hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften in jeder einzelnen Raumrichtung vereinfachend als annähernd homogen betrachtet werden kann (Annahme der Durchlässigkeitsverteilung als Kontinuumsmodell). Diese Betrachtungsweise ist für einen klaren Störungsbezug aufweisende Standorte nicht gültig.

Hinsichtlich der zu erwartenden Durchlässigkeitsanisotropie gab HEITELE (1972), basierend auf Messungen, das Verhältnis von $k_{f\text{-horizontal}}/k_{f\text{-vertikal}}$ mit 10:1 an. Diese Größenordnung wird für Sedimente auch von LANGUTH & VOIGT (1980) als Orientierungswert genannt. Das Verhältnis wurde zunächst auch für die Berechnungen angesetzt.

Zur Abschätzung der mittleren horizontalen Gebirgsdurchlässigkeiten im Buntsandstein der Pfälzer Mulde wurden an 121 in Brunnen und Bohraufschlüssen durchgeführte Pumpversuche nach der Methode von LOGAN (1964) ausgewertet (Pumpversuchsdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergbau).

Die verwendeten Messpunkte liegen im Bereich der etwa Südwest-Nordost streichenden Achse und damit dem zentralen Bereich der Pfälzer Mulde. Sie erschließen jeweils unterschiedliche Schichtfolgen, so dass eine schichtspezifische Zuordnung der ermittelten Durchlässigkeiten selten möglich ist. Nach LGB & LfW (in Vorb.) ist eingeschränkt eine Zuordnung der mittleren Gebirgsdurchlässigkeiten für Gruppen von Grundwasserleitern möglich und für Werte aus dem Projektgebiet der Hydrogeologischen Kartierung Kaiserslautern in Tab. 1 vereinfacht dargestellt. Die Durchlässigkeiten variieren innerhalb eines relativ engen Wertebereichs.

Die Abb. 6 zeigt die Häufigkeitsverteilung der mittleren Gebirgsdurchlässigkeiten für Aufschlusspunkte aus dem zentralen Bereich der Pfälzer Mulde. Bei Klassenbreiten von einer halben Größenordnung liegen die Werte meist innerhalb eines Bereichs von ca. 1×10^{-6} m/s bis 5×10^{-4} m/s (vgl. HEITTELE 1972). Die Klasse 1 bis 5×10^{-5} m/s zeichnet sich durch ein sehr deutlich ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum aus.

Dieses Ergebnis unterstützt die Annahme einer – für den zentralen Bereich der Pfälzer Mulde geltenden und – im regionalen Betrachtungsmaßstab weitgehend homogenen räumlichen Durchlässigkeitsverteilung. D. h., dass die mittleren Gebirgsdurchlässigkeiten zwischen den einzelnen Schichtfolgen bzw. Grundwasserleitern nur wenig variieren (vgl. Tab. 1).

Eine stratigraphisch auflösende Betrachtung für 17 Aufschlusspunkte (Teilmenge der o. g. Punkte $n = 121$) im Raum Eisenberg/Göllheim (Auswertemethoden nach THEIS & JACOB – Wiederanstieg – sowie nach LOGAN) veranschaulicht diese Einschätzung. Die ermittelten Werte liegen im Bereich von ca. 2×10^{-6} bis 3×10^{-5} m/s. Das in Abb. 7 dargestellte Auswertungsergebnis gibt ebenfalls keine Hinweise auf eine stratigraphisch begründete Differenzierung der ermittelten Durchlässigkeiten der erschlossenen Grundwasserleiter.

Das für die Gesamtheit der untersuchten Aufschlusspunkte dargestellte deutliche Häufigkeitsmaximum in der Durchlässigkeitsklasse von 1 bis 5×10^{-5} m/s (Abb. 6) wird in Näherung als mittlere Gebirgsdurchlässigkeit für die Schichtfolgen des Buntsandstein der Pfälzer Mulde angesetzt. Dieser Wertebereich wird zunächst auch als gültig angesehen für die wasserwirtschaftlich wenig genutzten und als potenzielle Trennhorizonte bevorzugten Schlossberg- und Oberen Karlstal-Schichten, die bei vielen Pumpversuchen (insbesondere im offenen Bohrloch) ebenfalls erschlossen wurden.

Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass die Durchlässigkeiten in den oberflächennahen Grundwasserleitern – bedingt durch Auflockerungs- und Verwitterungsvorgänge – etwas höher sind, als in den Grundwasserleitern unter mächtigerer Bedeckung (vgl. HEITTELE 1972).

In den Modellrechnungen wurden die in Tab. 3 genannten Durchlässigkeiten angesetzt und in den Szenarien umgesetzt.

Speicherkoeffizienten

Als spezifischer Speicherkoeffizient S wird die Änderung des gespeicherten Wasservolumens je Volumeneinheit des Grundwasserraumes bei Änderung der Standrohrspiegelhöhe um 1 m verstanden. Er hat bei Porengrundwasserleitern eine größere Bedeutung als bei Kluftgrundwasserleitern.

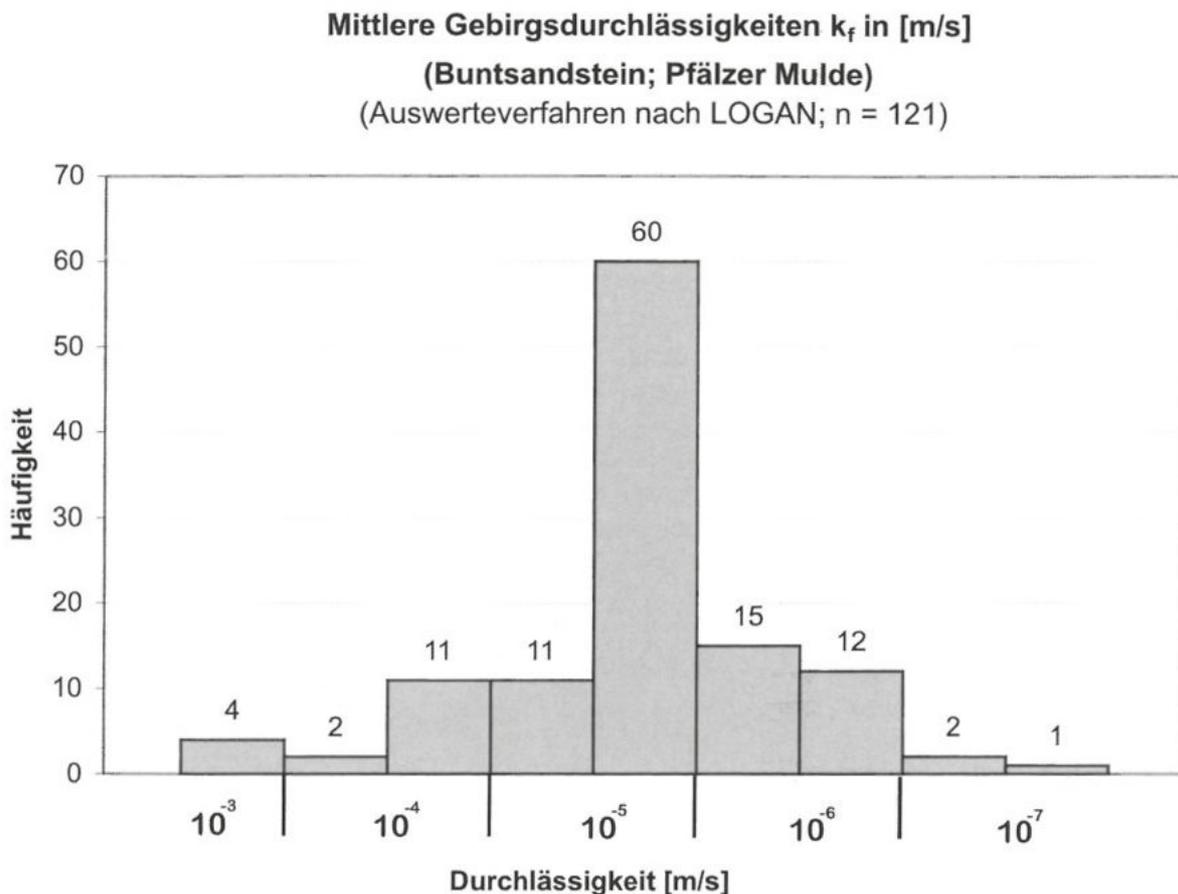


Abb. 6: Nach dem Auswerteverfahren von LOGAN (1964) bestimmte mittlere Gebirgsdurchlässigkeiten für den Buntsandstein der Pfälzer Mulde (ohne stratigraphische Untergliederung). Die verwendeten 121 Messpunkte liegen im Bereich der etwa Südwest-Nordost streichenden Muldenachse.

Für gespanntes Grundwasser liegt der Speicherkoeffizient S in der Größenordnung 10^{-3} bis 10^{-5} . Im freien Grundwasser wirkt sich die Elastizität des Grundwasserleiters nur untergeordnet aus. Der Speicherkoeffizient wird dann dem speichernutzbaren (dränbaren) Hohlraumanteil gleichgesetzt. Seine Größenordnung liegt im Bereich 10^{-1} (BALKE et. al. 2000).

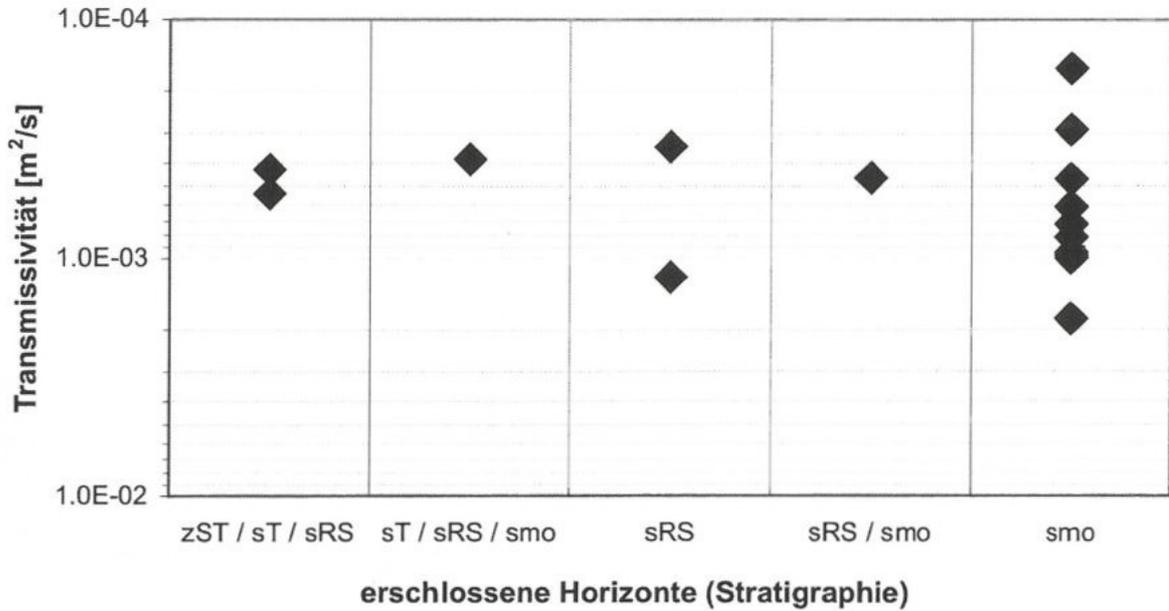
Bei instationären Strömungsverhältnissen erfolgt die Änderung der Druckhöhen u. a. in Abhängigkeit vom spezifischen Speicherkoeffizient.

Die Ableitung der Grundwasserverhältnisse – freies oder gespanntes Grundwasser – ist meist nur durch die Auswertung der Bohrberichte möglich.

Insbesondere Berichte von Bohrungen, die nicht in Tälern mit wirksamer Vorflut niedergebracht wurden, weisen aufgrund beobachteter Spülungsverluste auf zumindest zeitweise bestehende schwebende Grundwasserleiter hin, die den Quellstockwerken nach LGB & LfW (in Vorb.) entsprechen. Die Druckgradienten nehmen in diesen Erschließungsbereichen zur Tiefe hin zu.

Aufwärts gerichtete Druckgradienten (gespanntes Grundwasser) wurden vor allem bei großen Erschließungstiefen in Tälern oder mitunter bei gestörten Lagerungsverhältnissen und ausreichenden Durchlässigkeitskontrasten angetroffen.

Transmissivitäten (n = 17)
- Bereich Eisenberg / Göllheim -



Mittlere Gebirgsdurchlässigkeiten (n = 17)
- Bereich Eisenberg / Göllheim -

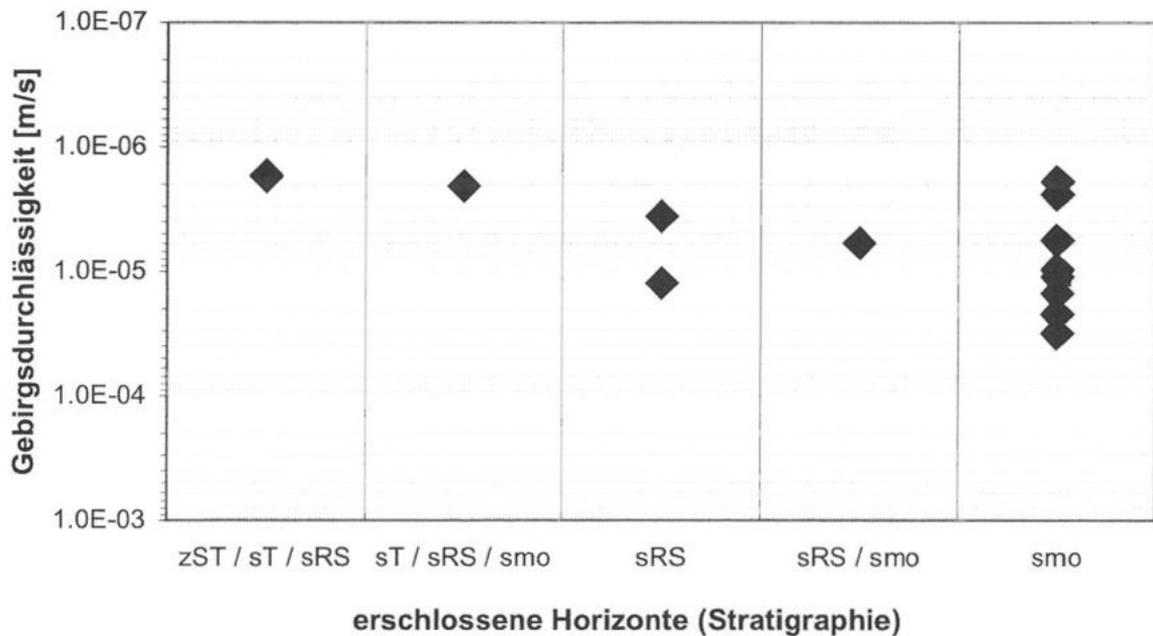


Abb. 7: Durch Auswertung von Pumpversuchen (verschiedene Verfahren) in Bohraufschlüssen und Brunnen (n = 17) berechnete Transmissivitäten und mittlere Gebirgsdurchlässigkeiten für den Raum Eisenberg/Göllheim. Die ermittelten Werte wurden soweit möglich den erschlossenen Grundwasserleitern stratigraphisch zugeordnet (s. Legende Abb. 2).

Vereinfachend kann bei großräumiger Betrachtung (ausgenommen die den Grundwasserabstrom aufnehmenden Vorflutbereiche) das Grundwasser im Buntsandstein der Pfälzer Mulde als freies Grundwasser betrachtet werden. Diese Annahme ist von wesentlicher Bedeutung für die Vorstellung zur Grundwasserneubildung, die bislang – wenn auch räumlich differenziert – als im Wesentlichen flächenhaft wirksam angesetzt werden kann (LGB & LfW in Vorb.).

Im verwendeten Rechenmodell wurden für alle Schichten der Schichttyp „freies bis gespanntes Grundwasser“ verwendet. Somit sind bei dem sich jeweils einstellenden Strömungsfeld beide Zustände vom Modell umsetzbar.

Verlässliche Werte für das anzusetzende speichernutzbare Hohlraumvolumen n_0 liegen aus labortechnischen Untersuchungen an Werksandsteinen vor (WENZEL & HÄFNER 2003, WANNER & HÄFNER 1996). Sie liegen für unterschiedliche stratigraphische Horizonte in einem relativ engen Wertebereich (ca. 8 bis 15 % effektive Porosität; diese Werte wurde durch Versuche zur Wasseraufnahme ermittelt. Aufgrund der vorangehenden Trocknung der Probenkörper sind die ermittelten Werte als Obergrenze der durchflusswirksamen Hohlraumvolumens zu verstehen). Dieser Wertebereich erscheint gegenüber Literaturangaben für den Buntsandstein relativ hoch. Zum Beispiel gibt HÖLTING (1995) für den unteren Buntsandstein in Nordwest-Hessen 1,0 bis 1,7% an.

Der Speicherkoeffizient S wurde für freies Grundwasser entsprechend der vorangestellten Erläuterungen gleich dem durchflusswirksamen Hohlraumvolumen zunächst mit 3%, der Speicherkoeffizient für gespanntes Grundwasser mit 0,001 angesetzt (Tab. 3).

4.2. Modellanwendung

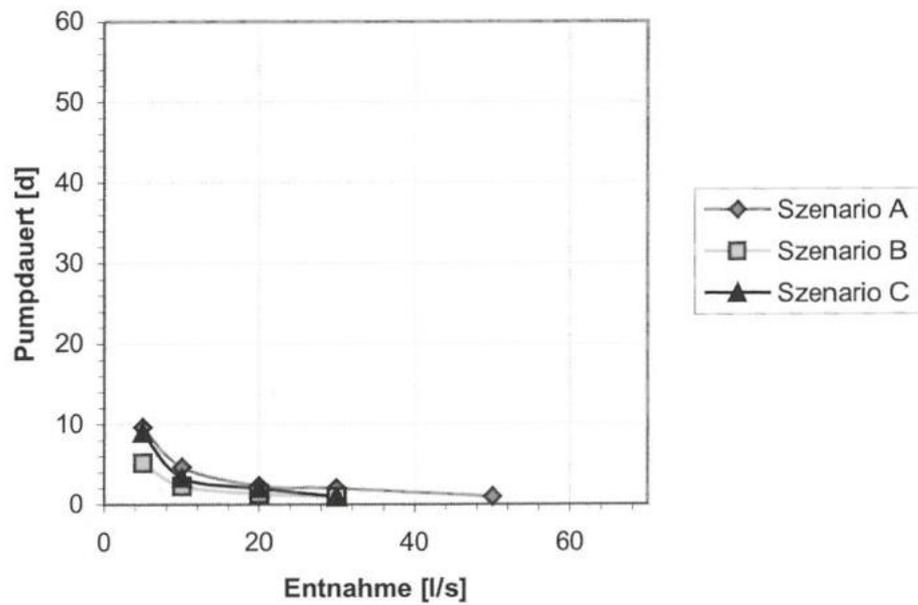
Die Zielsetzung erforderte die instationäre Berechnung der Szenarien. Der simulierte Zeitraum betrug jeweils 168 Tage. Er wurde wie folgt gegliedert: a) keine Entnahme bis $t = 8$ Tage, b) konstante Entnahme bis $t = 141$ Tage und c) keine Entnahme bis $t = 169$ Tage (vgl. Tab. 2).

Zunächst wurden für jedes Szenario die sich entsprechend den angesetzten geohydraulischen Kenngrößen bzw. dem angesetzten Brunnenausbau ohne Entnahmen einstellenden Ausgangsdruckhöhen für alle Modellschichten berechnet.

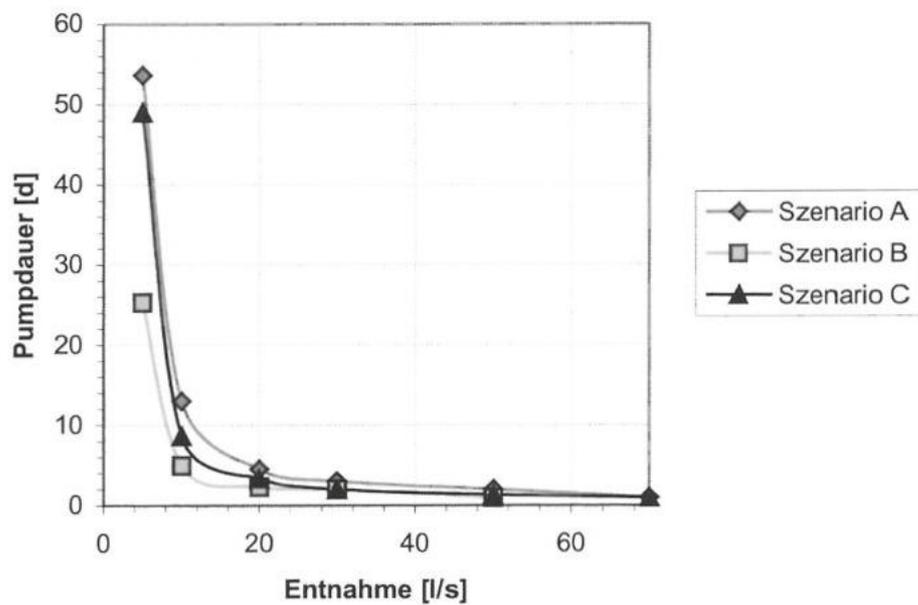
Anschließend wurden die drei untersuchten Ausbauvarianten unterschiedlicher Erschließungstiefen als Szenarien A bis C, 1 bis 3 und I bis III mit unterschiedlichen Förderraten berechnet (vgl. Tab. 2).

Als sensitive Größen wurden das Verhältnis $k_{f\text{-horizontal}}/k_{f\text{-vertikal}}$ sowie der Speicherkoeffizient S (für freies Grundwasser) variiert (s. Tab. 2 und 3). Auf die Umsetzung einer diskreten, geringer durchlässigen Schicht wurde zunächst verzichtet. Diese Vorgehensweise erscheint gerechtfertigt, da weniger die Mächtigkeit einer geringer durchlässigen Schicht als die vertikale minimale Durchlässigkeit die Entwicklung des Strömungsfeldes beeinflusst (vgl. LANGGUTH & VOIGT 1982). Dennoch wurden mit den Szenarien C-Trenn die mögliche Wirkung eines 50 m mächtigen Schichtpakets (Modellschicht 3) abgeschätzt, das gegenüber den im Liegenden folgenden Schichten in 2 bzw. 3 Raumrichtungen um eine Größenordnung geringere Durchlässigkeiten besitzt. Dieses Szenario entspricht etwa der Vorstellung der Schlossberg-Schichten als hydraulisch wirksamen Trennhorizont zwischen den Grundwasserleitergruppen des Unteren und Mittleren Buntsandstein (Tab. 1).

Absenkziel 5 cm (Messstelle)



Absenkziel 10 cm (Messstelle)



Der im freien Grundwasser wirksame Speicherkoeffizient wurde in Anlehnung an die aus Werksteinuntersuchungen gewonnenen Laborwerte mit 0,03 und wahlweise mit 0,1 angesetzt (Tab. 3).

Bei der Auswertung der Rechenläufe wurde berücksichtigt:

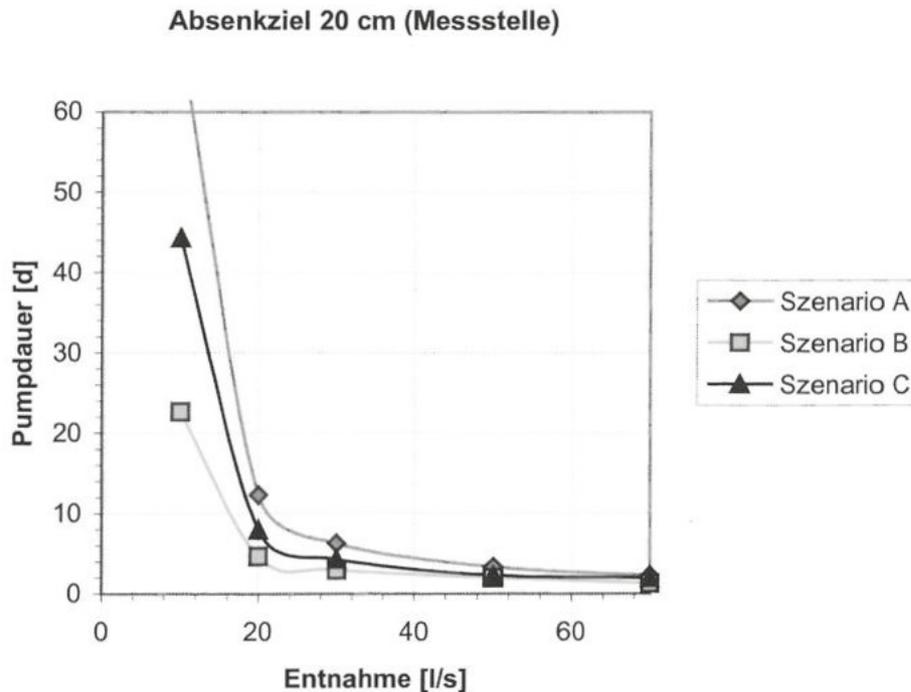


Abb. 8: Vergleich Pumpdauer in Abhängigkeit von Entnahme und vorgegebenem Absenkziel (5 cm, 10 cm und 20 cm) für die Erschließungsszenarien A bis C.

- das sich zum Ende der Pumpphase einstellende Strömungsbild anhand von horizontalen Gleichenplänen in den Modellschichten 1, 4 und 6 sowie Profil-Längsschnitte;
- der zeitliche Verlauf der Absenkungsbeträge an allen Beobachtungsmessstellen;
- die notwendige Pumpdauer bis zum Erreichen definierter Absenkziele an den Modellmessstellen (Absenkziele: 5 cm, 10 cm, 20 cm).

4.3. Ergebnisse

In allen Szenarien hatten sich zum Ende der Förderphase von 133 Tagen noch keine stationären Verhältnisse eingestellt. Die vom Modell im unmittelbaren Umfeld des Brunnens ausgewiesenen Restabsenkungen lagen unabhängig von der Erschließungsvariante zwischen ca. 0,03 cm/d (Entnahme 5 l/s) bis 0,53 cm/d (Entnahme 70 l/s).

Die jeweils zum Erreichen der zuvor genannten Absenkziele in den Messstellen notwendige Pumpdauer erwies sich als weitgehend unabhängig von der Position der Modellmessstellen im An- oder Seitenstrom sowie abstromig des Modellbrunnens (vgl. Abb. 5).

Ursache hierfür sind a) der sich im Modell in Ausgangszustand und bei Entnahme einstellende geringe hydraulische Gradient sowie b) der vergleichsweise große (vertikale) Abstand zwischen den Erschließungsstrecken von Modellmessstelle zu Modellbrunnen in Verbindung mit dem sich bei Entnahme um den Brunnen annähernd kugelförmig ausbildenden Potenzialfeld. Unter diesen Bedingungen sind entnahmebedingte, kleinräumig differenzierbare Grundwasserstandsänderungen in den Messstellen bei in jeder Schicht homogener Durchlässigkeitsverteilung nicht zu erwarten.

Unterschiede in der notwendigen Pumpdauer bis zu 14 Tagen wurden nur bei vergleichsweise geringen Entnahmen bis 10 l/s als Folge unterschiedlicher Entfernungen Modellmessstelle - Modellbrunnen festgestellt (25 m, 75 m und 125 m; s. Abb. 5).

Die ermittelten Pumpzeiten bis zum Erreichen der genannten Absenkziele an den Modellmessstellen sind nur dargestellt, sofern sie im Modellergebnis explizit ausgewiesen bzw. differenzierbar sind (z. B. werden bei Entnahme von 5 l/s während des Simulationszeitraums keine 20 cm Absenkung erzielt – ist kein Ergebnis darstellbar. Bei Entnahme von 70 l/s wird ein Absenkungsbetrag von 5 cm in einem Zeitraum erreicht, der kleiner ist, als die vom Modell berechneten Zeitschritte zwischen 1 und 7 Tagen – das Ergebnis ist bei dieser Auflösung nicht darstellbar).

Die in den Abb. 8, 10 und 11 angegebenen Pumpzeiten stellen jeweils den Mittelwert aus den berechneten Pumpzeiten bis zum Erreichen der Absenkziele an den einzelnen Modellmessstellen dar.

Die Berechnungsergebnisse sind auf die zuvor genannten Absenkziele bezogen; die Vergleichbarkeit der Szenarien ergibt sich somit für die Kenngrößen Pumpdauer (in Tagen) und Förderrate.

Szenarien A bis C

Mit diesen Szenarien sollte untersucht werden, ob und welche Unterschiede sich in der Reaktion der Grundwasserstände bedingt durch unterschiedliche Erschließungstiefen und -strecken bei Pumpversuchen in benachbarten, mit ca. 100 m Tiefe vergleichsweise flachen Messstellen beobachten lassen.

Die Abb. 8 zeigt die vom Modell ausgewiesenen Pumpzeiten für die vorgegebenen Absenkziele.

Beobachtungen:

- Erschließungsbedingte Unterschiede in der notwendigen Pumpdauer bis zum Erreichen des Absenkziels sind erkennbar.
- Sie sind bei im Vergleich geringeren Entnahmen deutlicher und nehmen mit der Höhe des zugrunde gelegten Absenkziels zu.

Die Abb. 9 zeigt das berechnete Strömungsfeld (für die Erschließungsvarianten) bei einer Förderrate von 10 l/s in Profil-Längsschnitten in Höhe des Modellbrunnens zum Ende des Pumpintervalls ($t = 133$ Tage). Bei vergleichsweise geringen Entnahmen zeichnen sich Brunnenausbaubedingte Unterschiede im Strömungsfeld meist nur in der unmittelbaren Umgebung der Wasserfassung ab. Die Reichweite des beeinflussten Strömungsfeldes wird im Wesentlichen durch die Größenordnung der Durchlässigkeitsanisotropie (k_{fh}/k_{fv} -Verhältnis) und das vertikale (absolute) Durchlässigkeitsminimum bestimmt (vgl. Abb. 9 und 12; Szenarien C, 3, C-Trenn).

Szenarien 1 bis 3 und Szenarien I bis III

Mit diesen Szenarien sollte der Einfluss des k_{fh}/k_{fv} -Verhältnisses auf die zeitlich-räumliche Entwicklung des Strömungsfeldes bei Entnahmen betrachtet werden.

Die Abb. 10 zeigt die vom Modell ausgewiesenen Pumpzeiten für die vorgegebenen Absenkziele bei folgenden k_{fh}/k_{fv} -Verhältnissen: 2:1, 10:1, 100:1 (Szenarien I - III, A - C, 1 - 3). Der Übersichtlichkeit halber ist der Vergleich beider Einflussgrößen nur als jeweilige Reaktionszeit für das Absenkziel 10 cm dargestellt.

Beobachtungen:

- Mit wachsendem k_{fh}/k_{fv} -Verhältnis nehmen die Pumpzeiten bis zum Erreichen des Absenkziels (bei gleicher Förderrate) erwartungsgemäß deutlich zu.

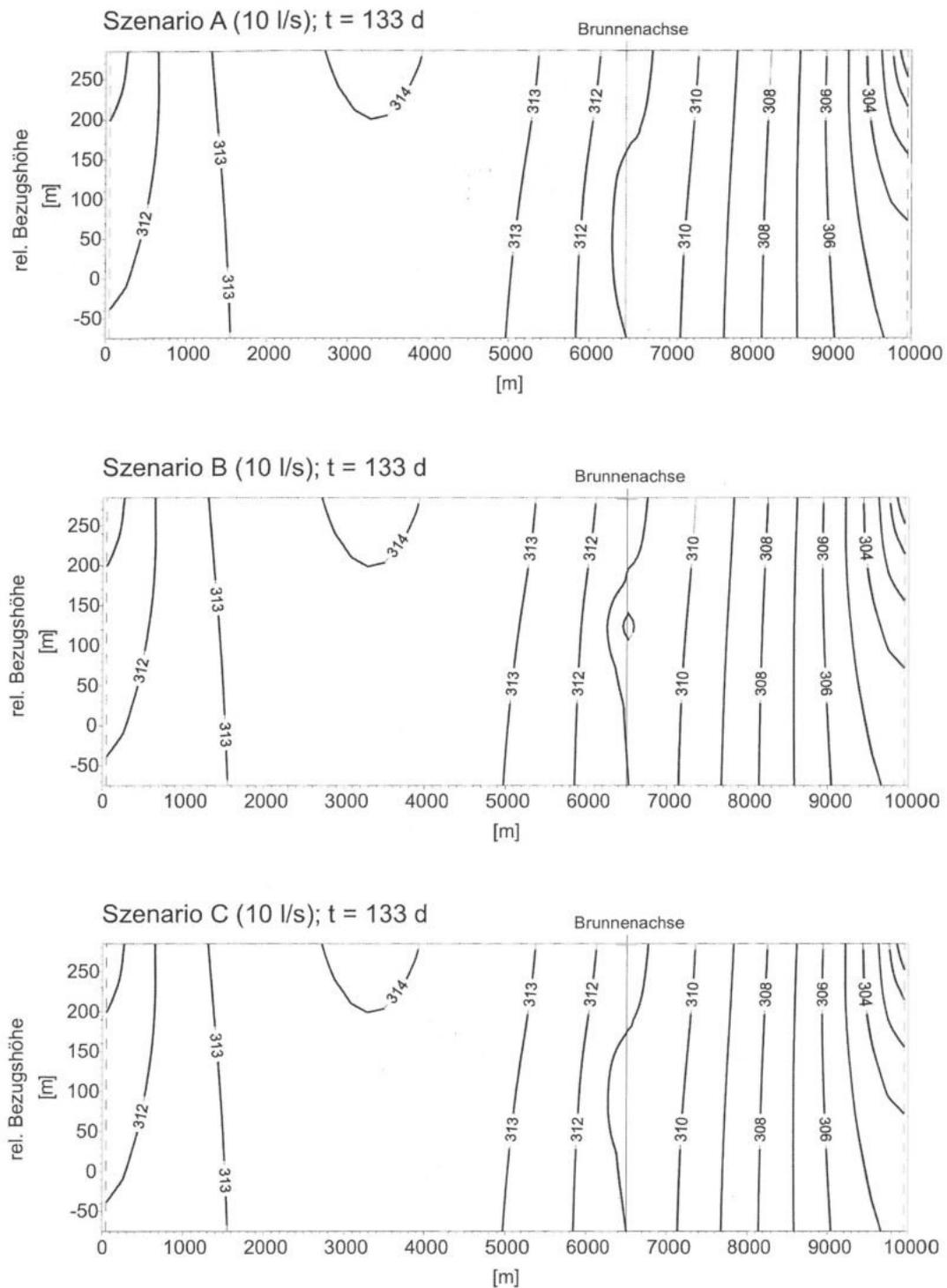


Abb. 9: Vertikal(längs)schnitte durch die berechneten Strömungsfelder für die Erschließungsszenarien A bis C bei Entnahme von 10 l/s nach einer Pumpzeit von 133 Tagen (dargestellt nur für den Bereich innerhalb der Knoten des Modellgitters; keine Grundwasseroberfläche dargestellt). Im Neubildungsgebiet herrschen abwärts gerichtete, an den Vorfluter darstellenden Rändern hingegen aufwärtsgerichtete hydraulische Gradienten. In diesen Bereichen können Bohrungen artesisch gespanntes Grundwasser antreffen. Für den Bereich der angegebenen Brunnenachse wurden mit zunehmender Erschließungstiefe leicht abnehmende Druckhöhen ausgewiesen.

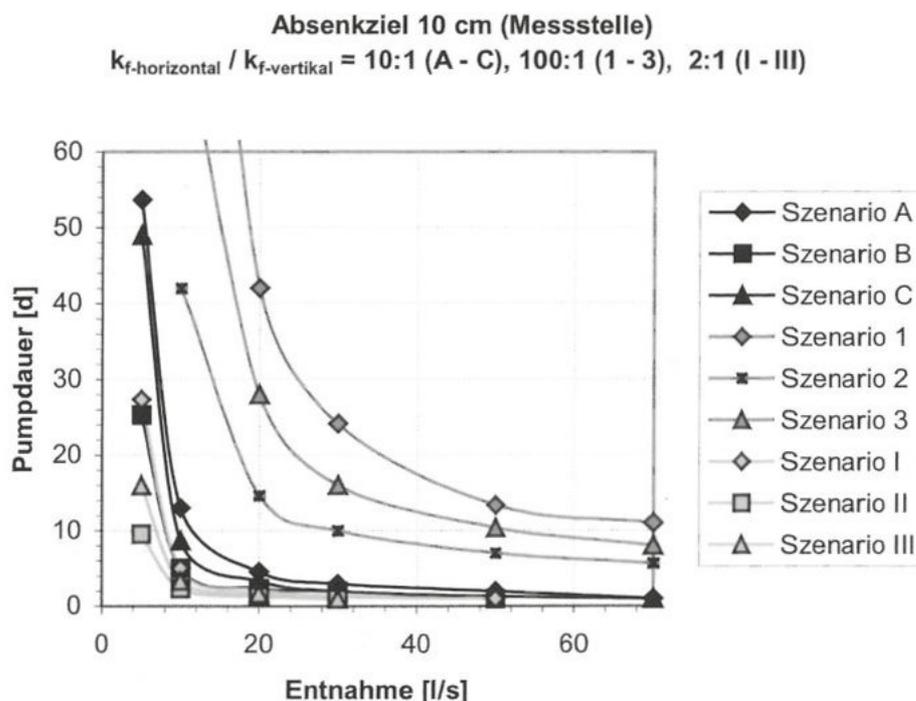


Abb. 10: Vergleich unterschiedlicher Verhältnisse horizontaler bzw. vertikaler Durchlässigkeit (Szenarien A bis C, 1 bis 3, I bis III). Die Pumpdauer bis zum Erreichen eines vorgegebenen Absenkeziels wird maßgeblich durch das Durchlässigkeitsverhältnis bestimmt.

- In der gleichen Weise äußern sich die Unterschiede der Erschließungsvarianten in Form stärkerer Unterschiede in den Pumpzeiten, die auch bei im Vergleich höheren Entnahmen erkennbar bleiben.

Der Vergleich spiegelt die mit höheren k_{fh}/k_{fv} -Verhältnissen und abnehmenden absoluten vertikalen Durchlässigkeiten zunehmende Differenzierung des sich ausbildenden Strömungsfeldes wider (Abb. 10 und 11).

Szenarien C-Trenn und C-S

Mit den Szenarien C-Trenn sollte der Einfluss des im Bereich bis zwei Größenordnungen abweichenden k_{fh}/k_{fv} -Verhältnisses in einer diskreten Schicht auf die zeitlich-räumliche Entwicklung des Strömungsfeldes bei Entnahmen betrachtet werden. Dies entspricht der Annahme der Schlossberg-Schichten als hydraulisch wirksamen Trenn- oder Dämpfungshorizont. Der Vergleich wurde auf das Erschließungsszenario C beschränkt.

Im Szenario C wurde für alle Schichten ein k_{fh}/k_{fv} -Verhältnis von 10:1 umgesetzt. Im Szenario 3 (gleiche Erschließungstiefe und -strecke) beträgt das Verhältnis 100:1; beide Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt.

Mit den Szenarien C-Trenn (basierend auf Szenario C) wurde die hydraulische Wirksamkeit der Modellschicht 3 bei Annahme einer gegenüber den Schichten 4 bis 7 um eine Größenordnung reduzierten Durchlässigkeit geprüft (d. h. in Szenario C-Trenn-v nur für vertikale Durchlässigkeit gültig; bei Szenario C-Trenn-vh für vertikale und horizontale Durchlässigkeit gültig).

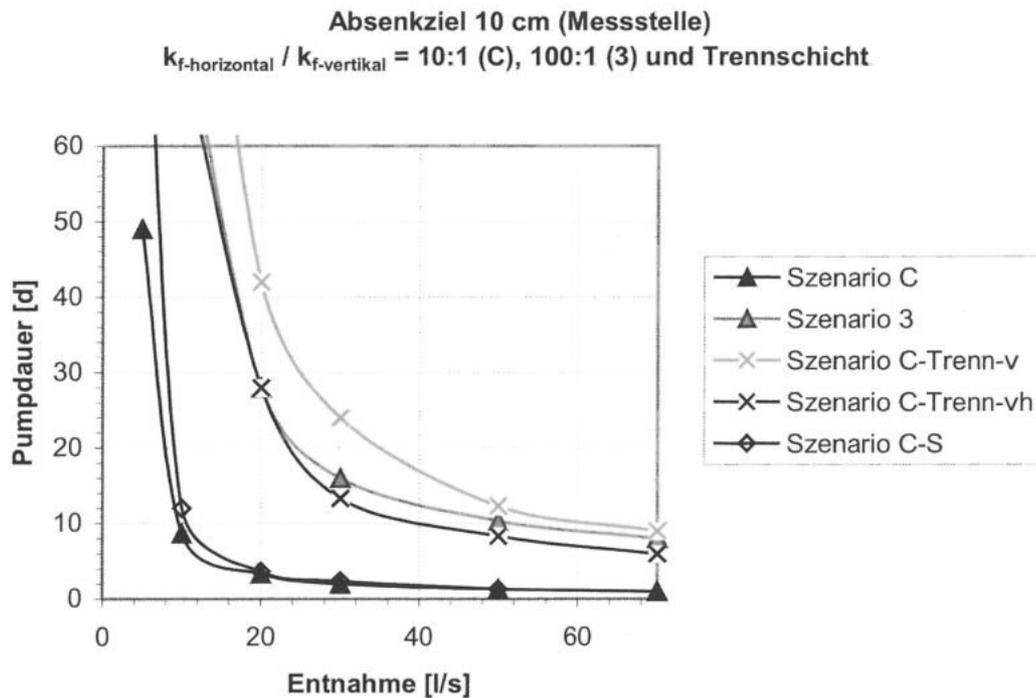


Abb. 11: Einfluss diskreter geringer durchlässiger Schichten im Vergleich zur homogenen vertikalen Durchlässigkeitsverteilung (Szenarien C-Trenn; Erläuterung s. Text). Im Vergleich dazu ist der Einfluss des speicherwirksamen Hohlraumvolumens bei den im Modell bestehenden Verhältnissen als gering einzuschätzen.

Im Szenario C-S wurde (basierend auf dem Szenario C) das speicherwirksame Hohlraumvolumen im Bereich einer Größenordnung von 0,03 auf 0,1 erhöht, was der Annahme eines höheren effektiven Hohlraumvolumens entspricht.

Das Ergebnis der Betrachtungen zeigt vergleichend Abb. 11.

Beobachtungen:

- Die zeitlich räumliche Entwicklung des Strömungsfeldes in den Szenarien 3, C-Trenn-v und C-Trenn-vh zeigt nur geringfügige Unterschiede.
- Maßgeblich für die sich in den Modellmessstellen mit der Zeit einstellenden Grundwasserstände ist das absolute vertikale Durchlässigkeitsminimum. Die Mächtigkeit der geringer durchlässigen Schicht kann bei der zugrunde gelegten Modellgeometrie weitgehend vernachlässigt werden.
- Die Änderung des speicherwirksamen Hohlraumvolumens innerhalb der als plausibel anzusehenden Größenordnung führt zu keiner maßgeblichen Änderung in der zeitlich-räumlichen Entwicklung der Strömungsfeldes.

Die Abb. 12 zeigt, dass in den Szenarien 3 und C-Trenn-vh die sich einstellenden horizontalen Reichweiten des durch die Entnahme beeinflussten Strömungsfeldes deutlich vom Szenario C abweichen (Abb. 9). Dies entspricht den in Abb. 11 für das definierte Absenziel dargestellten zeitlichen Unterschieden.

5. Diskussion

Die Ergebnisse der Modellbetrachtungen haben Bedeutung für Teilgebiete des Buntsandstein der Pfälzer Mulde mit dem Modellraum vergleichbaren hydrogeologischen Verhältnissen.

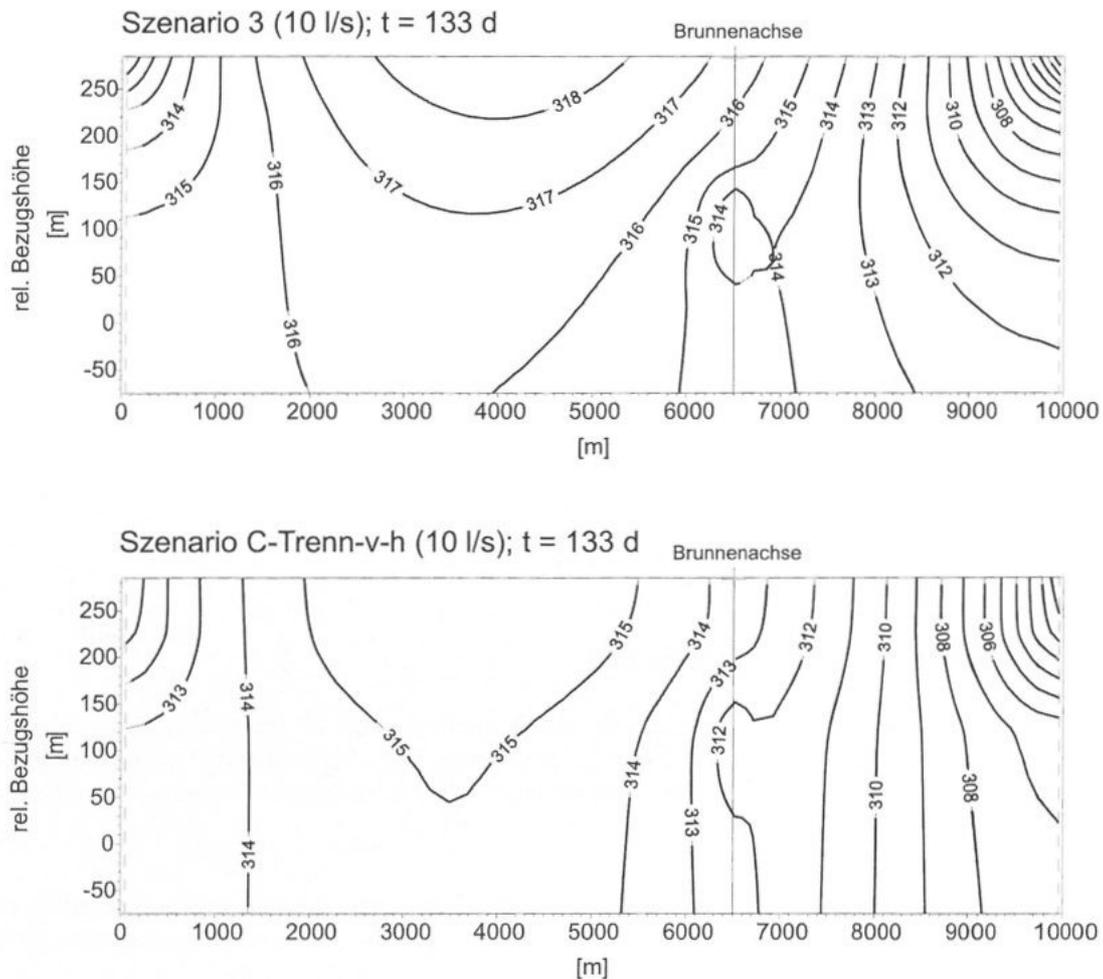


Abb. 12: Vertikalschnitte durch das Strömungsfeld bei homogener Durchlässigkeitsverteilung und einer diskreten Trennschicht (dargestellt nur für den Bereich innerhalb der Knoten des Modellgitters; keine Grundwasseroberfläche dargestellt). Die minimale wirksame vertikale Durchlässigkeit beträgt jeweils 2×10^{-7} m/s. Die Trennschicht (Modellschicht 3) führt ansatzweise zur Ausbildung von zwei unterscheidbaren Fließsystemen, die sich bereits im unbeeinflussten Zustand voneinander unterscheiden.

Sie bieten keine für die Praxis künftiger oder Interpretation bereits durchgeführter Erschließungsmaßnahmen direkt anwendbaren Orientierungswerte, zeigen jedoch die Interpretationsgrenzen für Pumpversuche an und weisen auf deren Optimierungsmöglichkeiten hin.

Bezogen auf die diskutierten Fallbeispiele können folgende Schlüsse gezogen werden:

Raum Eisenberg/Göllheim

- Die Erschließungssituation kann als dem Szenario A (bzw. 1 oder I) vergleichbar angesehen werden.

- Ein Signifikanzkriterium für eine im nächstliegenden, beobachteten Brunnen E3 (Abb. 3) als Reaktion deutbare Absenkung wurde bei den früher durchgeführten Pumpversuchen nicht festgelegt. Dieses hätte ausbaubedingt (Sickerwasserzutritte möglich) vergleichsweise hoch angesetzt sein müssen. Bei einer Anregung mit ca. 10 l/s war die Pumpdauer von 9 Tagen sehr wahrscheinlich viel zu kurz bemessen um eine Reaktion in der Größenordnung von mindestens 5 cm beobachten zu können.
- Durch den im Anstrom des beobachteten Brunnens E3 vergleichsweise steilen hydraulischen Gradienten wurden die sich oberflächennah einstellenden Druckhöhen (gemessenen Grundwasserstände) gestützt. Eine mögliche Reaktion auf die Entnahme in E4 hätte vor diesem Hintergrund im Vergleich längere Pump- bzw. Beobachtungszeiten und/oder höhere Entnahmen erfordert.
- Die Art der Messstellenanordnung bzw. deren Ausbau war ungeeignet, um Rückschlüsse auf diskrete, geringer durchlässige Schichten zu ziehen.

Bereich Oberes Moosalb-Tal

- Die Erschließungssituation kann als dem Szenario A (bzw. 1 oder I) vergleichbar angesehen werden.
- Die seit Beginn der Grundwasserentnahme in den Tiefmessstellen feststellbare Abnahme der Druckhöhen zeigt, dass sich noch keine stationären Strömungsverhältnisse eingestellt haben. Die lang anhaltende Instationarität des Systems wird als Hinweis auf dessen große räumliche Ausdehnung und damit verbundene Trägheit angesehen. Die bisherigen Beobachtungen in diesem Gebiet sind in Übereinstimmung mit den grundsätzlichen Modellergebnissen.
- Die im Rahmen des Pumpversuchs festgestellten raschen Reaktionen auf Grundwasserentnahmen können nach dem Ergebnis der Modellrechnungen als Hinweis auf vergleichsweise hohe vertikale Durchlässigkeiten (bzw. geringe k_{fh}/k_{fv} -Verhältnisse) angesehen werden. Sie werden begünstigt durch die im Bereich der Talachsen in mittleren und größeren Tiefen erwartungsgemäß gespannte Grundwasser (schnellere Druckübertragung). Für dieses Gewinnungsgebiet sind darüber hinaus tektonisch bedingte Zonen lokal erhöhter Durchlässigkeiten nicht auszuschließen.

Für die Planung und Durchführung von Erschließungsmaßnahmen in der hydrogeologischen Praxis bedeuten die Ergebnisse:

1. bei vergleichsweise geringen Entnahmen aus Tiefbrunnen (der im Modell angesetzten Art) können sich in Abhängigkeit eines als signifikant erachteten Absenkeziels (in den Messstellen) Brunnenausbaubedingt erhebliche Unterschiede in der anzusetzenden Pump- bzw. Beobachtungsdauer ergeben (Szenarien A - C, 1 - 3, I - III).
2. Im Rückschluss bedeutet dies: Sind hydraulische Nachweise über oberflächennah mögliche Auswirkungen durch Entnahmen an Tiefbrunnen zu erbringen, so sind für abgesicherte Aussagen Pumpversuche mit vergleichsweise hohen Entnahmen (ca. > 20 l/s) oder entsprechend langen Beobachtungszeiträumen (mehrmonatig) notwendig. Die Festlegung eines zu überprüfenden, als signifikant erachteten Absenkungsbetrags ist für Pumpversuche zur Klärung solcher Fragestellungen ein wichtiger Punkt und sollte unter Berücksichtigung von Grundwasserstandsbeobachtungen im Vorfeld solcher Versuche erfolgen. Die Abhängigkeit der zeitlich-räumlichen Entwicklung des Strömungsfeldes von der sensitiven, in der Regel unbekanntem Größe „vertikale Durchlässigkeit“ schränkt die Möglichkeiten der

Prognose von Mindestpumpzeiten ein (Szenarien A - C, 1 - 3, I - III). Hydraulische Nachweise sind unter diesen Bedingungen in erster Linie durch Langzeit-Beobachtungen möglich.

3. Im Rahmen der Pumpversuchsplanung sind bei der Positionierung flacher Messstellen (häufig Nutzung älterer Flachbrunnen) das wirksame hydraulische Gefälle und der mögliche Einfluss hydraulisch wirksamer Ränder zu beachten. Für dem betrachteten Modell ähnliche Verhältnisse (geringes hydraulisches Gefälle, keine wirksamen hydraulischen Ränder) ist nur die Entfernung Messstelle – Brunnen relevant; sie sollte möglichst gering gewählt werden (im Modell bis 125 m umgesetzt).
4. Die Wirksamkeit diskreter und lateral aushaltender, hydraulisch relevanter Trenn- oder Dämpfungshorizonte ist bei einer Messstellenkonfiguration bzw. Versuchsanordnung, wie sie im Modell zur Beobachtung der sich einstellenden Grundwasserstände nachgebildet ist, nicht unterscheidbar von anderen Möglichkeiten der vertikalen Durchlässigkeitsverteilung. Maßgeblich ist das (meist unbekannt) wirksame absolute vertikale Durchlässigkeitsminimum.

Mit den diskutierten Messstellen–Tiefbrunnen-Konfigurationen lassen sich bei Pumpversuchen hydraulische Reaktionen untersuchen und ggf. beobachten. Aus den Reaktionen ist jedoch eine eindeutige Ableitung der wirksamen Einflussgrößen ohne genauere Kenntnis zum hydrogeologischen Aufbau des Untergrunds nicht möglich. Diskrete, als Geringleiter wirksame Trennschichten (vertikale, lateral aushaltende Inhomogenitäten) sind daher auf diesem Wege nicht identifizierbar.

Für den in vielen Erschließungsmaßnahmen im Buntsandstein der Pfälzer Mulde verfolgten Ansatz, bei Tiefbrunnen Trennschichten als natürlichen Schutz zu nutzen, ist diese Frage erheblich, da eine diskrete Trennschicht im Extremfall zu einer Auftrennung der Grundwasserströmung führen kann. Dies kann Konsequenzen für die Ableitung des erschlossenen Einzugsgebiets sowie die Abschätzung der mittleren Fließzeiten haben und darüber hinaus die notwendige Länge und sinnvolle Lage der Erschließungsstrecke beeinflussen.

Ein Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit von Trennschichten erfordert dieser Fragestellung angepasste Messstellenkonfigurationen, die ein gezieltes bzw. höherauflösendes Messen von vertikalen Druckhöhendifferenzen ermöglicht. Mit der im Modell nachgestellten üblichen Messstellenanordnungen ist dies nicht möglich.

Schriften

- BALKE, K.-D. & BEIMS, U. & HEERS, F.W. & HÖLTING, B. & HOMRIGHAUSEN, R. & MATTHES, G. (2000): Grundwassererschließung – Grundlagen, Brunnenbau, Grundwasserschutz, Wasserrecht. 740 S., (Borntraeger) Berlin, Stuttgart.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg., 2003): Hydrologischer Atlas Deutschland. (fvd) Freiburg.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1994): DIN 4049 – Hydrologie, Teil 1-3. (Beuth) Berlin.
- DITTRICH, D. & FRANKE, W.R. & GAD, J. & HANEKE, J. & REQUADT, H. & SCHÄFER, P. & WEIDNEFELLER, M. (2003): Geologische Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz 1:300 000. (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz) Mainz.
- HEITEL, H. (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.
 - (2002): Geologischer Aufbau und Grundwasserfließvorgänge im Nordwestteil der Pfälzer Triasmulde (Sickingen Höhe und Westpfälzische Moorniederung im Bereich der TK 25, Blatt 6610 Homburg), Teil 2: Hydrogeologische Grundlagen, Hinweise zum unterirdischen Abflussgeschehen und zum Brunnenbau. – Mainzer geowiss. Mitt., **31**, S.223-258, Mainz.
- HEITEL, H. & HOHBERGER, K.-H. (1985): Grundwasserdargebot und mögliche Grundwasserentnahmen im Buntsandstein der Westpfalz. – Westpfalz-Informationen, **65**, S. 21-34, Kaiserslautern.
- HÖLTING, B. (1995): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 441 S., (Enke) Stuttgart.
- KINZELBACH, W. & CHIANG, W.-H. (2003): 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. 346 S., (Springer) Berlin, Heidelberg, New York.
- KINZELBACH, W. & RAUSCH, R. (1995): Grundwassermodellierung – Eine Einführung mit Übungen. 283 S., (Bornträger) Berlin/Stuttgart.
- LANGUTH, H.-R. & VOIGT, R. (1980): Hydrogeologische Methoden. 486 S., (Springer) Berlin, Heidelberg, New York.
- LGB & LfW (in Vorb.): Hydrogeologische Kartierung Kaiserslautern, Maßstab 1 : 50 000. (Landesamt für Geologie und Bergbau sowie Landesamt für Wasserwirtschaft, Rheinland-Pfalz) Mainz.
- LOGAN, J. (1964): Estimating transmissibility from routine production tests of water wells.– Groundwater, **2**, S. 35-37, London.
- ROHDE, H. (1994): Zur Neubearbeitung der Normenreihe DIN 4049 – Hydrologie, Begriffe. – DGM, **38**, 4/5, S. 106-109, Koblenz.
- SCHÄFER, P. (2000): Zur Stratigraphie und Genese der tertiären Sedimente zwischen Eisenberg und Lautersheim im südwestlichen Teil des Mainzer Beckens. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., **82**, S.175-222, Stuttgart.
- WANNER, TH. & HÄFNER, F. (1996): Verwitterungsverhalten von Sandsteinen des Mittleren Buntsandstein an der Burgruine Drachenfels (Südpfalz).– Mainzer geowiss. Mitt., **25**, S.143-182, Mainz.
- WENZEL, A. & HÄFNER, F. (2003): Die roten Werksandsteine der Westpfalz.– IFS-Bericht, **15**, 27 S., (Institut für Steinkonservierung e. V.) Mainz.

Anschrift des Autors:

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

Manuskript eingegangen am 23. 4. 2004