Geothermiebohrung Bassersdorf

Autor(en): **Sieber, Nik**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **1 (1996)**

Heft 1

PDF erstellt am: **27.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-219182

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol.	Vol. 1	Nr. 1	S. 77-93	Juni 1996

Geothermiebohrung Bassersdorf

mit 6 Figuren und 1 Tabelle

NIK SIEBER*

1. Einleitung 77
2. Bohrtechnik und Bohrlochuntersuchungen 78
3. Geologisch- stratigraphische und hydrogeologische Situation 80
4. Ergebnisse der Untersuchungen in der OMM 84
4.1 Hydrogeologische Untersuchung in der OMM 84
4.1.1 Allgemeines 84
4.1.2 Folgerung aus den Versuchen 84
4.1.3 Leistungscharakteristik des Brunnens 86
4.1.4 Gegenseitige Beeinflussung der Bohrungen Kloten und Bassersdorf 88
4.2 Thermische Verhältnisse 89
4.2.1 Erdwärmenutzung 91
4.2.2 Synthese der hydrogeologischen Untersuchungsergebnisse in der OMM 91
Literaturverzeichnis 92

1. Einleitung

Als 1991 während der Planung für ein neues Krankenheim in Bassersdorf das Energiekonzept entwickelt wurde, galt es alle möglichen Energieträger unter verschiedenen Aspekten miteinander zu vergleichen. Zentrales Anliegen und eine Bedingung der Baukommission war, dass ein umweltfreundlicher Energieträger zum Einsatz kommen sollte. Insbesondere dem Aspekt der Luftreinhaltung wurde grösste Aufmerksamkeit geschenkt. Aus diesem Grund wurde schliesslich der geothermischen Energie gegenüber der Holzfeuerung der Vorzug gegeben. Dass sich die Baukommission für diese recht unkonventionelle Methode der Energiegewinnung entscheiden konnte war nicht selbstverständlich. So waren neben höheren Kosten vorallem beträchtliche Risiken eines Misserfolges bei der Erbohrung des Tiefengrundwassers in Kauf zu nehmen.

Nachdem eine Vorstudie zeigte, dass die Erfolgsaussichten gegeben waren, wurden die Arbeiten für das monovalent auf Grundwasser der Oberen Meeres Molasse (OMM) basierende Energiesystem konzipiert. Als Kernstück der Anlage war dabei eine Bohrung in eine Tiefe von ca. 530 m vorgesehen. Dem dort erwarteten Wasser sollte mittels Wärmepumpe die für den gesamten Wärmebedarf des Krankenheimes benötigte Energie entzogen werden.

* Sieber Cassina + Partner AG, Langstrasse 149, 8004 Zürich

In einem Detailprojekt wurden die Randbedingungen für die Bohrung definiert. Im Rahmen des Projektes Energie 2000 des Bundesamtes für Energiewirtschaft hat 1991 die Möglichkeit bestanden, eine Risikogarantie in Anspruch zu nehmen. Dazu mussten die Randbedingungen für Erfolg resp. Misserfolg bezüglich der Wassermenge, der Temperaturen und der Salinität des Wassers zum voraus definiert werden. Der Bund gewährte zusätzlich zur Risikogarantie einen Beitrag an die Bohrkosten.

Es bot sich unerwartet die Gelegenheit, zusammen mit dem geologischen Institut der Universität Bern und der Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) die Bohrung ins Liegende der OMM um ca. 250 m in die Untere Süsswassermolasse (USM) zu vertiefen und ein gemeinsames erdwissenschaftliches Untersuchungsprogramm durchzuführen, basierend auf umfangreichen geologischen, geophysikalischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Messungen im Bohrloch.

Nachfolgend soll nur auf die Aspekte der Geothermie eingegangen werden. So wird der Schwerpunkt des Berichtes auf der OMM als Aquifer liegen. Die ausführlichen wissenschaftlichen Resultate sind als Technischer Bericht 94-01 der Nagra (Blaser et al. 1994) publiziert.

Die Zielsetzung war wie oben beschrieben die Gewinnung von geothermischer Energie. Zudem waren die Auswirkungen der Grundwasserentnahme auf die sich in ca. 3.2 km entfernt befindende Geothermiebohrung Kloten abzuklären, einer Geothermiebohrung, welche ebenfalls bis an die Basis der OMM reicht.

2. Bohrtechnik und Bohrlochuntersuchungen

Die Bohrarbeiten für die Geothermiebohrung (Endteufe 553 m) dauerten ca. 2 Monate, die Vertiefung mit dem Seilkernbohrgerät auf 800 m nahm noch zusätzlich ca. 1 Monat in Anspruch. Nach Abschluss der von der Nagra vorgesehenen Testarbeiten wurde der Brunnen verfiltert, so dass er nach ca. 4 Monaten betriebsbereit war.

Der Bohrbetrieb erfolgte rund um die Uhr in zwei Schichten. Es wurde mit Rollenmeissel gebohrt in folgenden Durchmessern:

für:	mit:	bis:
Standrohr 20" (508/495 mm)	24" (609 mm)	18 m Teufe
Futterrohr 13 3/8" (339/317 mm)	17 1/2" (444 mm)	265 m Teufe
Schlitzbrückenfilter verzinkt 9 5/8" (244/231)	12 1/4" (311 mm)	553 m Teufe

Für die Spülung wurde eine Ton-Süsswasserspülung verwendet mit Leitungswasser, Bentonit und Polymer. Diese sulfatfreie, weitgehend umweltverträgliche Spülung ist biologisch abbaubar. In der OSM konnte auf die Bentonitzugabe verzichtet werden, da sich die Spülung mit den feinen Partikeln der dort erbohrten Mergel- und Tonvorkommen anreicherte («selbstgehende Spülung»).

Während den Kernentnahmen in der USM wurde festgestellt, dass das scheinbare Schichtfallen anhand der Bohrkerne ca. 30° statt erwartungsgemäss 2 - 3° betragen hatte. Aus diesem Anlass wurde eine Bohrlochvermessung mit einem Gyro-Tool durchgeführt. Diese Messung zeigte bereits im oberen Teil der Bohrung einen star-

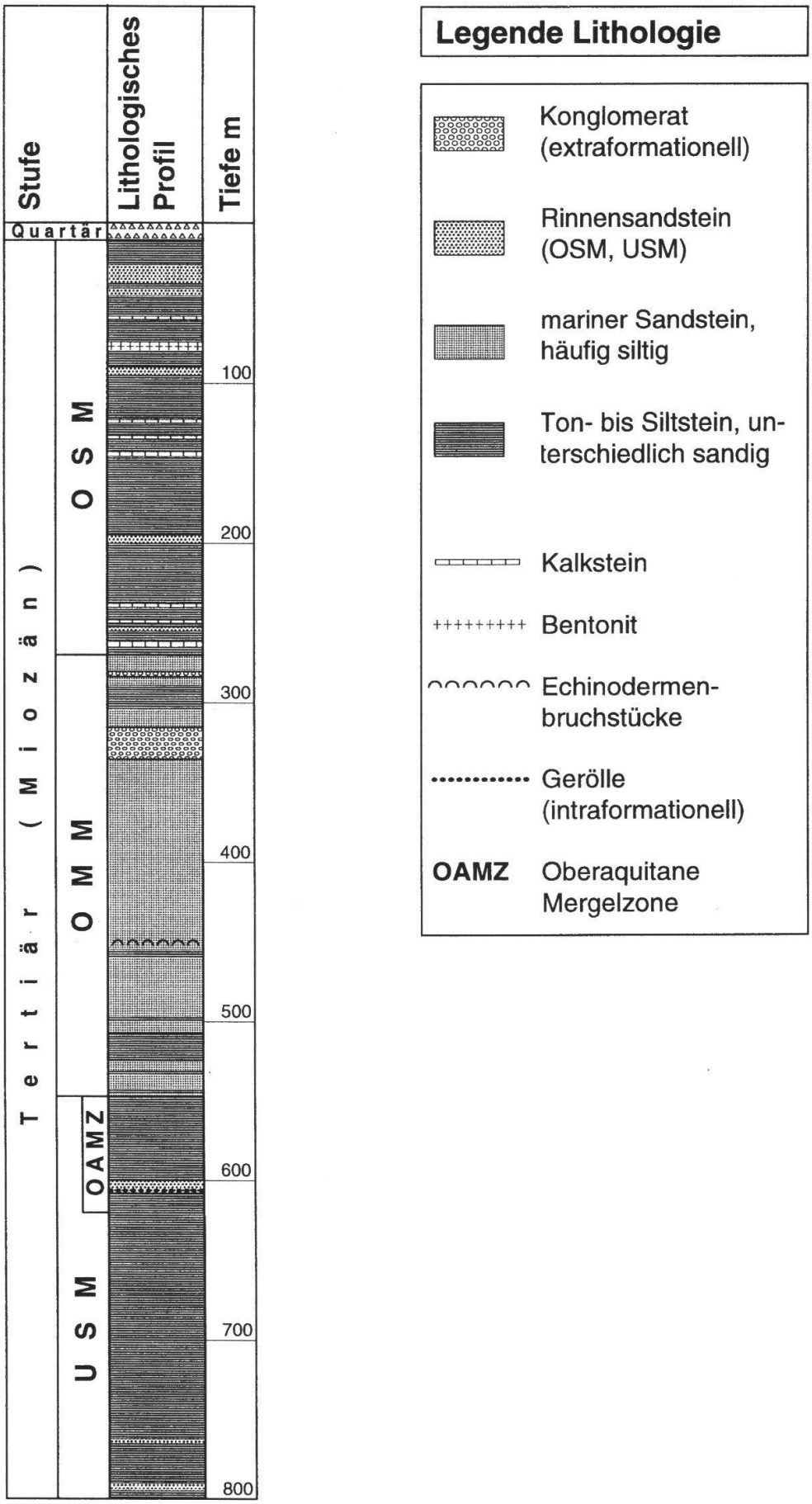

Fig. 1: Lithologisches Übersichtsprofil der Geothermiebohrung Bassersdorf.

ken Neigungsaufbau, der sich ab ca. 500 m Bohrteufe bei ca. 30° stabilisierte. Daraus resultierte eine horizontale Abweichung von 250 m an der Bohrlochsohle bei 800 m Bohrteufe.

Im Rahmen der Projekterweiterung durch die Nagra wurde es möglich, ausgedehnte Bohrlochmessungen durchzuführen. Folgende Versuche und Messungen wurden von verschiedenen Spezialfirmen durchgeführt:

- Pumpversuche: 2 Kurzzeitversuche à je ca. 13 Stunden, 1 Langzeitversuch von 31 Tagen
- Fluid Logging: Flowmetermessungen, Temperatur/Leitfähigkeits - Logs
- Geophysikalisches Bohrloch-Logging:
  - Dual Focussed Electric
  - Integrated Sonic
  - Gamma Ray, Compensated Density und Caliper
  - Gamma Ray und Neutron Porosity
  - Spontaneous Potential
- Bohrlochvermessung: Gyro Tool, Neigungsmessungen mit Dipmeter
- Kalibermessungen zur Abschätzung des Filterkiesbedarfs.

Nach Beendigung der Meisselbohrarbeiten wurde ein erster Kurzzeitpumpversuch gefahren. Die detaillierten Auswertungen ergaben deutliche Hinweise auf einen relativ starken Skineffekt (s = 4.9) in der Bohrlochwand. Daraufhin wurde beschlossen zur Erhöhung der Produktivität eine Säuerung mit konzentrierter Salzsäure vorzunehmen.

Vor der Säuerung wurden Untersuchungen über das Verhalten der verschiedenen Gesteine der OMM bei der Reaktion mit konzentrierter Salzsäure am Tonmineralogischen Labor des Institutes für Geotechnik an der ETH- Zürich durchgeführt (Nüesch 1993). Die Resultate dieser Untersuchungen haben ergeben, dass die in der OMM angetroffenen Mergel quellfähig sind und bei einer Säuerung mit einer Freisetzung von weniger als 25 % der von der Salzsäure erreichten Gesteinsmenge zu rechnen ist. Die für die Produktivität massgebende Makroporosität der Sandsteine wird durch eine Säuerung bei geringer Materialfreisetzung deutlich erhöht.

Nach Abschluss aller Bohrlochtests wurden die verzinkten 9$^{5}/_{8}$" Filterrohre gemäss Schema in 265.5 m Teufe an die unbehandelte 13$^{3}/_{8}$" Verrohrung gehängt. Durch Kunststofführungen zwischen den verzinkten Filterrohren und der schwarzen 13$^{3}/_{8}$" Verrohrung sollte verhindert werden, dass ein kathodisches Element zwischen den Metallen unterschiedlicher Wertigkeit entsteht welches zu Korrosion und damit häufig zu Lochfrass führen kann. Die Filterverrohrung wurde mit 13.4 m^3 Quarzsand (Körnung Ø 5 - 8 mm) hinterfüllt und gegen oben mit Zement abgedichtet.

3. Geologisch- stratigraphische und hydrogeologische Situation

Paläogeographisch lag der Raum Bassersdorf während der USM ausserhalb der eigentlichen Schuttfächer im Bereich der beckenaxialen Schwemmebenen welche durch verschiedene, beckenparallel von SW nach NE verlaufende Flussysteme drainiert wurden (Keller et al. 1990). Schwermineralogische Untersuchungen in der Bohrung Bassersdorf zeigen, dass das Material im Aquitan hauptsächlich von der Napfschüttung geliefert wurde. Am Übergang zur «Oberaquitanen Mergelzo-

ne» kam es zu einer Ablösung durch Material aus der Hörnlischüttung, mit einer einzelnen Interferenz der Napf-Schüttung.

Eine erhöhte Subsidenz des Molassebeckens und ein weltweiter eustatischer Anstieg des Meeresspiegels (Naef et al. 1985 und Sinclair 1991) führten an der Wende Aquitan/Burdigalian zu einer marinen Überflutung von SW her. Neben der Napf-Schüttung beeinflussten neu die Hörnli- und die Bodensee- Schüttung das Gebiet. Die neusten Untersuchungen der Uni Bern weisen den unteren OMM-Abschnitt der Bodensee-, den oberen Bereich den Interferenzen von Bodensee- und Hörnli-Schüttung zu, wogegen früher (Büchi et al. 1965) die ganze OMM-Abfolge der Napf-Schüttung zugeschrieben wurde.

Nach der an der Wende Burdigalian/Langhian erfolgten Regression des OMM-Meeres (Keller 1989 und Berger 1992) bildete sich im Molassebecken erneut ein fluviatiles Entwässerungssystem aus. Im Gegensatz zur USM erfolgte nun aber die Entwässerung von NE nach SW. Auch dominieren bis in die jüngste erhaltene OSM die Schuttfächer des Napf und Hörnli. Bassersdorf befand sich paläogeographisch bereits ausserhalb des eigentlichen Hörnli-Schuttfächers in der beckenaxialen Überschwemmungsebene, wurde aber mit Ausnahme von drei Interferenzen des E-W-Glimmersandflusses ausschliesslich mit Sedimenten der Hörnli-Schüttung beliefert.

Tektonisch liegt die Bohrstelle in der wenig beanspruchten, flachliegenden autochthonen Molasse (Trümpy 1980). Die Schichten fallen mit rund 3% Gefälle in SE-Richtung ein. Nur wenig südlich von Bassersdorf geht das Schichtfallen in eine annähernd horizontale Lagerung einer flachen, von Zürich nach Kyburg verlaufenden Muldenstruktur über. Der ungestörte Verlauf von Isohypsen auf dem Niveau des Küsnachter Bentonites in der OSM, die anhand von Bentonit- und andern Leithorizonten von Gubler (in Vorb.) konstruiert wurden, schliessen grössere vertikale Schichtversetzungen an Bruchstörungen aus. Anzeichen von Diskordanzen innerhalb der Molasse wurden keine beobachtet.

Das **Quartär** ist für die Geothermiebohrung nur von untergeordneter Bedeutung. Die Parzelle befindet sich im Übergangsbereich zwischen Moränen- und Bachschuttablagerungen zu Rückzugsschottern, welche die oberflächennahe Talfüllung bilden. Diese führen bei relativ guter Durchlässigkeit ($k = 2 \times 10^{-4}$ und 5×10^{-4} m/s) reichlich Grundwasser, welches in verschiedenen Fassungen genutzt wird. In der Bohrung wurde bereits nach nur 8 m Quartär die OSM aufgeschlossen.

Lithologisch (siehe Fig. 1) lässt sich die in der Bohrung 256 m mächtige **OSM** in Siltsteine mit stark unterschiedlichem Ton- und Sandgehalt sowie Feinsandsteine mit variablem Silt- und Tongehalt einteilen. Es dominieren die Farben Gelb-Beige-Braun und Gelb-Grau. Untergeordnet – im dm-Bereich – treten bräunliche, bituminös riechende Kalke mit lakustrischen Schneckenresten auf, die als fossile Seekreiden gelten. Mit Ausnahme von 3 Interferenzen der beckenaxialen E-W Glimmersand-Schüttungen sind die Sedimente der OSM ausschliesslich der alpinen Hörnli-Schüttung zuzuordnen. In 74 m Teufe konnte der Urdorfer Bentonithorizont (Gubler in Vorb.) identifiziert werden, was eine gute Korrelation mit andern Bohrungen erlaubt.

Die Grenze zur OMM im Liegenden ist scharf ausgeprägt. Ein plötzlicher Farbwechsel von gelbbräunlich (OSM) zu grau (OMM) konnte beobachtet werden. Die

bunten Feinsedimente der OSM, welche auf die subaerischen Bodenbildungen zurückzuführen sind, werden durch graue, marine Sedimente (Feinsande) abgelöst.

Die im ganzen monotone, feinsandige **OMM** wurde zwischen 264-547 m Tiefe mit einer Mächtigkeit von 283 m erbohrt. Die lithologischen Aussagen über die OMM waren jedoch leider für diese Bohrung erschwert, indem die Cuttingausbeute sehr schlecht war.

Ein unterer, von glaukonitischen Feinsandsteinen mit zwischengelagerten grauen Schlammsteinen dominierter Abschnitt weist ca. 80-90 m über dem Dach der USM Einlagerungen von Muschelsandstein und/oder Echinodermenbrekzien auf. Ein oberer, praktisch glaukonitfreier Abschnitt, zeigt rinnenartige Einlagerungen von Konglomeraten in Feinsanden und grauen Schlammsteinen. In der Bohrung Bassersdorf liegt zwischen den beiden Konglomeratbänken eine subaerisch gebildete Einschaltung eines gelben tonigen Siltsteins, die sich möglicherweise mit der durch eine Regression verursachten Zweiteilung des «Helvetien» parallelisieren lässt. Der Aufbau der OMM ist übrigens in der Bohrung Kloten sehr ähnlich und vergleichbar.

Die für die Wasserführung wichtigen Konglomeratbänke wurden zwischen 284-288 m, 316-335 m und 378-380 m angetroffen, wobei die Abgrenzung vorallem nach unten nur mit Hilfe der petrophysikalischen Logs vorgenommen werden konnte. Die schwermineralogische Untersuchung der Uni Bern wie auch von Allen (1985) lassen eine Herkunft der Konglomerate vom Hörnli- und teilweise vom Bodenseefächer vermuten.

Vergleicht man das Auftreten der Konglomerathorizonte in den Bohrungen Kloten und Bassersdorf, so stellt man fest, dass bei ungefähr gleicher Mächtigkeit der OMM der bis zu 40 m differierende Ersteinsatz der Konglomerate nicht mit unterschiedlicher Schichtmächtigkeit begründet werden kann. Vielmehr scheint es sich bei den Konglomeratschüttungen, die alle starke Mächtigkeitsschwankungen aufweisen oder wie bei Lindau -1 gar nicht vorhanden sind, um rinnenförmige Ablagerungen in submarinen Kanälen zu handeln. Dieser Sachverhalt zeigt auch die Problematik einer rein lithostratigraphischen Gliederung der OMM. Die frühere Unterteilung liess die obere Abteilung, das sog. «Helvetien», mit dem ersten Auftreten einer Konglomeratschüttung beginnen. Da die Konglomeratbänke lateral begrenzt zu sein scheinen und nicht überall gleichzeitig einsetzen, stellen sie weder einen lithostratigraphischen Leithorizont dar, noch sind sie für eine chronostratigraphische Unterteilung geeignet.

Die Grenze zur liegenden USM ist fast ebenso deutlich wie die Grenze zur hangenden OSM; es lässt sich ein plötzlicher Farbumschlag von Grau zu Gelbbeige feststellen. Die Sandsteine werden von den in der USM dominierenden bunten Mergeln abgelöst.

Ab 547 m tritt die **USM** auf, wobei ab einer Tiefe von 553 m bis zur Bohrendtiefe bei 800 m gekernt wurde. Dabei dominieren bunte Siltsteine mit unterschiedlichem Sand- und Tongehalt sowie Feinsandsteine mit variablem Silt und Tongehalt. Untergeordnet sind 2 - 3 m mächtige Mittelsandsteine mit Mergelgeröllschnüren oder

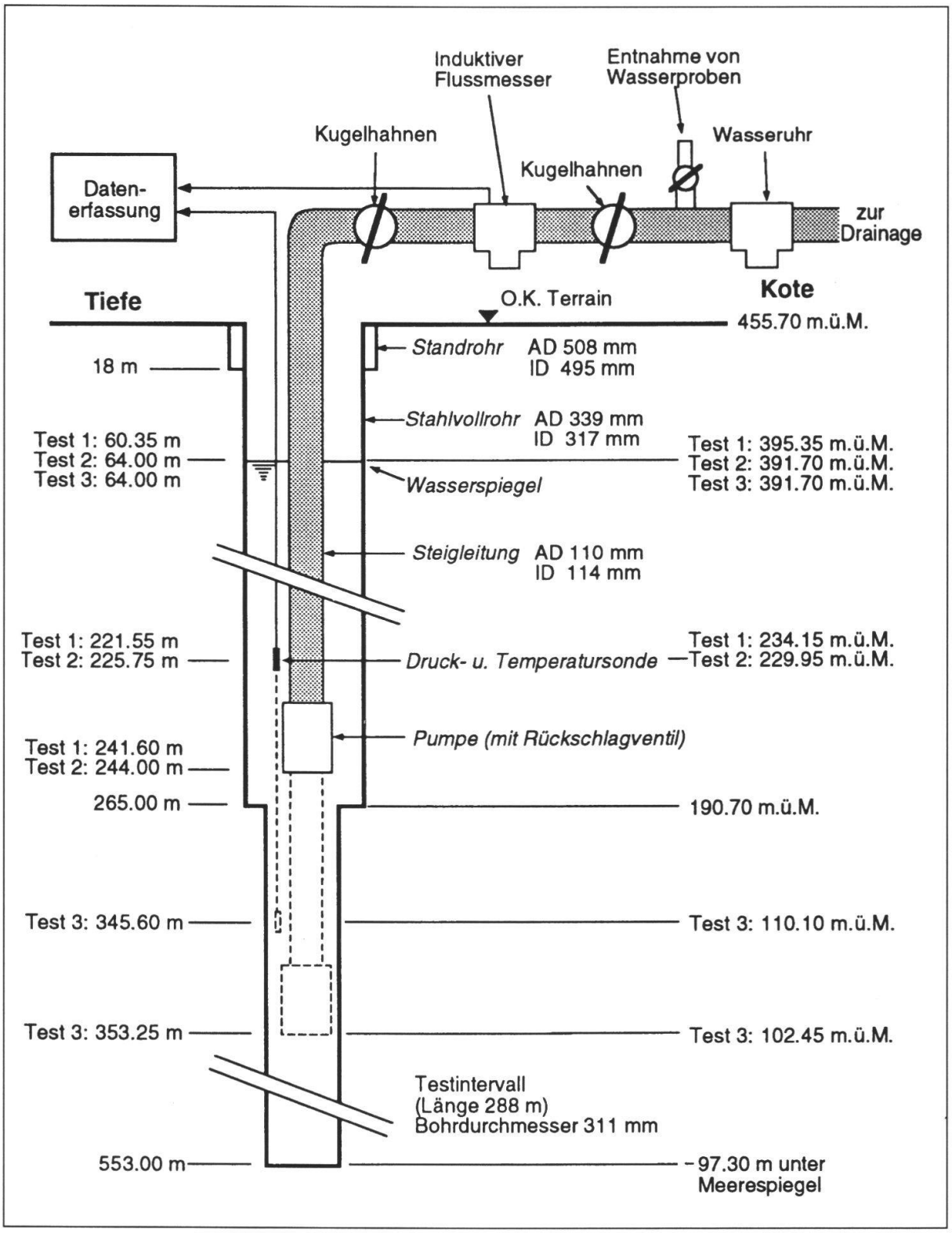

Fig. 2: Testanordnung während der Pumptests - Test 1: Kurzzeit-Pumpversuch vom 01.02. - 02.02.93, Test 2: Kurzzeit-Pumpversuch vom 19.03. - 20.03.93, Test 3: Langzeit-Pumpversuch vom 20.07. - 20.08.93

-lagen erkennbar. Süsswasserkalke wurden nicht erbohrt (detaillierten Angaben zur USM siehe Bericht Blaser et al. 1994).
Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die OMM, da nur diese als Wasserleiter für die geothermische Nutzung von Bedeutung ist.

4. Ergebnisse der Untersuchungen in der OMM

Nachfolgend sollen aus einer Fülle von Resultaten nur einige wenige herausgegriffen werden. Insbesondere wird auf die Wiedergabe der geophysikalischen Messungen und deren Resultate verzichten, da diese den Rahmen dieses Artikels sprengen. Die für die geothermische Nutzung wichtigen hydrogeologischen Aspekte werden im folgenden zusammenfassend beleuchtet.

4.1 Hydrogeologische Untersuchung in der OMM

4.1.1 Allgemeines

Um die hydrogeologische Charakterisierung der OMM vorzunehmen und um die Ergiebigkeit der Formation zu testen, wurden im Brunnen zwei Kurzzeit-Pumpversuche von je ca. 1 Tag, ein Fluid Logging mit Flowmeter und ein einmonatiger Langzeit-Pumpversuch durchgeführt. Im Schema Fig. 2 ist die Testanordnung im Brunnen dargestellt. Dabei hatten die Kurzversuche das primäre Ziel, möglichst frühzeitig Informationen über die Ergiebigkeit der Bohrung zu erhalten. Wären diese negativ ausgefallen, so hätte bereits zu diesem Zeitpunkt auf einen weiteren Ausbau der Bohrung verzichtet werden können. Der Langzeitversuch hatte vorallem den Nachweis der Dauerbelastung bei maximaler Ergiebigkeit zu erbringen. Ferner sollte die Beeinflussung der ca. 3.2 km entfernten Geothermiebohrung Kloten getestet werden, weshalb der Versuch ausserhalb der Heizperiode in den Monaten Juli/August 1993 gefahren werden musste.

4.1.2 Folgerung aus den Versuchen

Die durchgeführten hydraulischen Versuche erlauben es eindeutige Schlussfolgerungen im Hinblick auf das Projekt Geothermiebrunnen Bassersdorf zu ziehen und darüber hinaus die gewonnenen Ergebnisse – in Kombination mit den geologischen, hydrochemischen und geophysikalischen Daten – zur Charakterisierung der OMM als Aquifer zu interpretieren.
Für die hydraulische Charakterisierung der OMM sind vorallem die Ergebnisse des Langzeit-Pumpversuches und der Flowmetermessungen massgebend (Fig. 3a-m). Die mit verschiedenen Methoden ermittelten Ergebnisse des Langzeit -Pumpversuches sind in Tab. 1 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Transmissivität für die beiden ausgewerteten Testphasen (RW3a und RWS3) mit Werten von 4.7×10^{-5} bis 5.2×10^{-5} m^2/s sehr konsistent ist. Der gemessene Druckverlauf über den gesamten Test konnte mit folgenden Formationsparameter am besten simuliert werden: Einer Transmissivität von $T = 5.1 \times 10^{-5}$ m^2/s, einer Ruhedruckhöhe von 395 m ü.M., einem spezifischen Speicherkoeffizienten $S_S = 2.2 \times 10^{-6}$ m^{-1} sowie mit einem Skin-Faktor $s = +2.7$. Der aus der Transmissivität abgeleitete Durchlässigkeitsbeiwert $k = T/L$ entspricht dabei einem über die 288 m mächtige OMM-Strecke gemit-

Test-ereignis	Auswertemethode	Trans-missivität T [m²/s]	Durchlässig-keitswert k [m/s]	Druck-höhe h [m]	Skin-faktor s [-]	Reich-weite R [m]	Spez. Speicher-koeff. S_S [m⁻¹]
RW3a	Geradensteigungs-verfahren (COOPER & JACOB, 1946)	5.2E-5	1.8E-7	-	-		-
	Interpret/2	4.7E-5	1.6E-7	-	1.7	~528	2.2E-6[1)]
RWS3	Geradensteigungs-verfahren (HORNER, 1951)	5.1E-5	1.8E-7	392	-	~343	
	Interpret/2	5.1E-5	1.7E-7	395	2.7	~391	2.2E-6[1)]
Simulation	GTFM[2)]	5.1E-5	1.7E-7	395	2.7	-	2.2E-6[1)]

1) Input Wert (geschätzt)
2) GTFM: Simulationsprogramm (GRISAK et.al., 1985 und PICKENS et.al. 1987

Tab. 1: Resultate des Langzeit-Pumpversuches 20. Juli - 20. August 1993

telten Wert von $k = 1.8 \times 10^{-7}$ m/s. Diese Annahme geht davon aus, dass die OMM ein homogenes und isotropes Medium ist. Tatsächlich aber stammen gemäss Ergebnissen des Fluid Loggings (Flowmeter- und Temperaturmessungen) etwa 90% des geförderten Wassers aus der Zuflusszone zwischen 315 und 340 m Teufe. Dies bedeutet, dass in dieser 25 m mächtigen Zone die tatsächliche Durchlässigkeit wesentlich grösser ist. Aus 90% der ermittelten Gesamttransmissivität lässt sich für diese 25 m mächtige Zone ein k-Wert von ca. 1.8×10^{-6} m/s berechnen, d.h. eine Grössenordnung mehr als die rechnerische Durchschnittsdurchlässigkeit für den gesamten Aquifer.
Die Ermittlung der lateralen Ausdehnung des Aquifers und das Erkennen möglicher hydraulisch wirksamer Begrenzungen bzw. die Abklärung möglicher hydraulischer Interferenzen mit der benachbarten Geothermiebohrung Kloten waren wesentliche Ziele des Langzeit-Pumpversuches. Unter Annahme von homogenen Bedingungen innerhalb der gesamten OMM-Strecke beträgt die maximale Reichweite für die Absenkstufe RW3 des Langzeitpumpversuches ca. 500 m. Wird sinnvollerweise davon ausgegangen, dass der Wasserzufluss v.a. aus der oben definierten, 25 m mächtigen und lateral nicht begrenzten Zone erfolgt, so beträgt die theoretische hydraulische Reichweite ca. 1100 m. Diese Werte sind von der Geometrie (Mächtigkeit der durchlässigen Schicht), aber auch vom Speicherkoeffizienten abhängig. Dieser kann aus Einlochbohrungen nicht exakt bestimmt werden, insbesondere dann nicht, wenn Skin-Effekte vorhanden sind. Für die Auswertung wurde ein Speicherkoeffizient von $S \approx 1 \times 10^{-4}$ angenommen. Die rechnerische Reichweite nimmt mit abnehmendem Speicherkoeffizienten und abnehmender Mächtigkeit der durchlässigen Schicht zu.

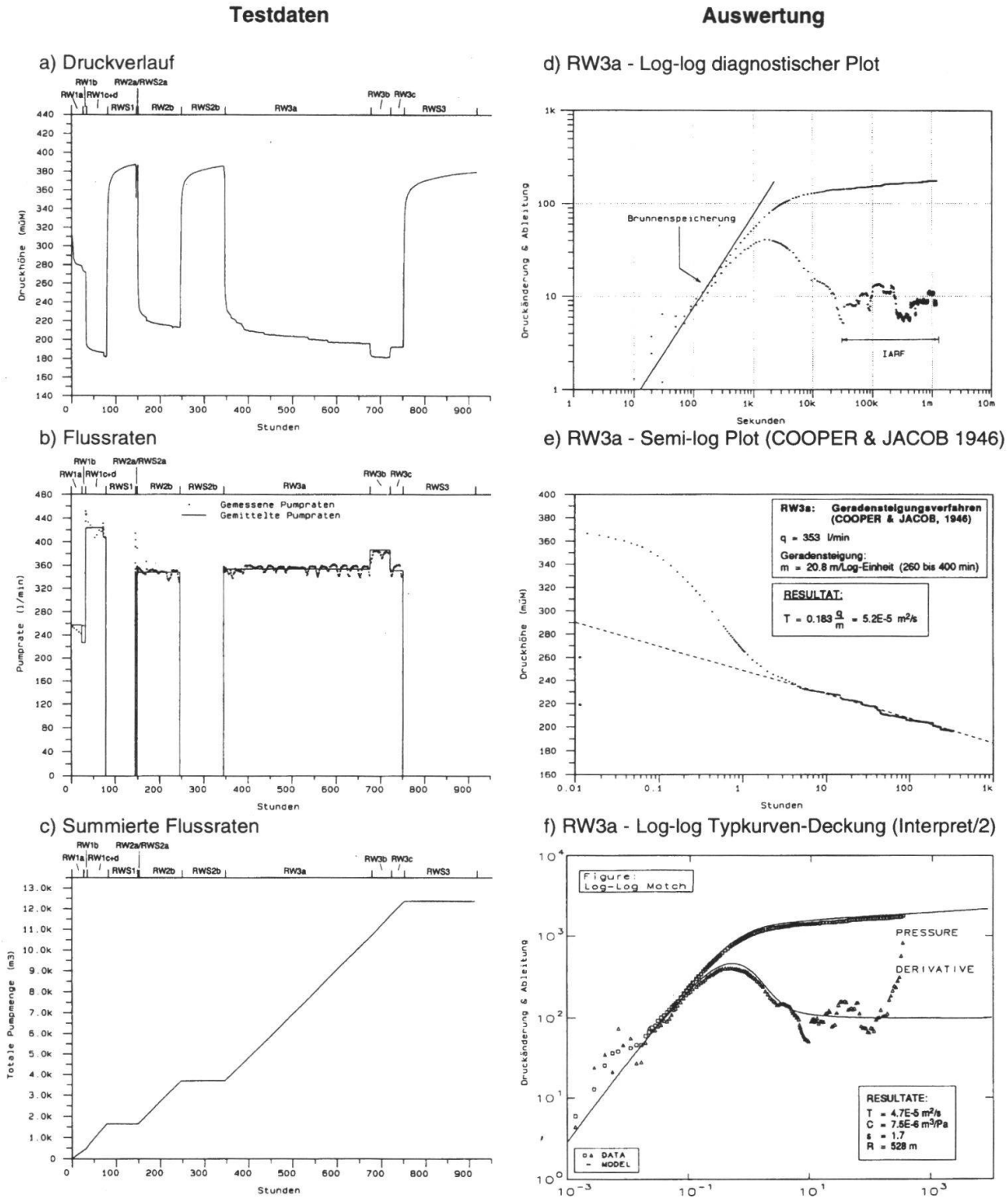

Fig. 3: Testdaten (a-c) und Auswertung (d-m) des Langzeit-Pumpversuchs vom 20.07 - 20.08.1993.

4.1.3 Leistungscharakteristik des Brunnens

Die Brunnenleistung wird mit dem Begriff der spezifischen Ergiebigkeit beschrieben (Quotient Fördermenge q/Absenkung Δh). In Fig. 4 ist das Ergiebigkeitsdiagramm des Brunnens dargestellt.

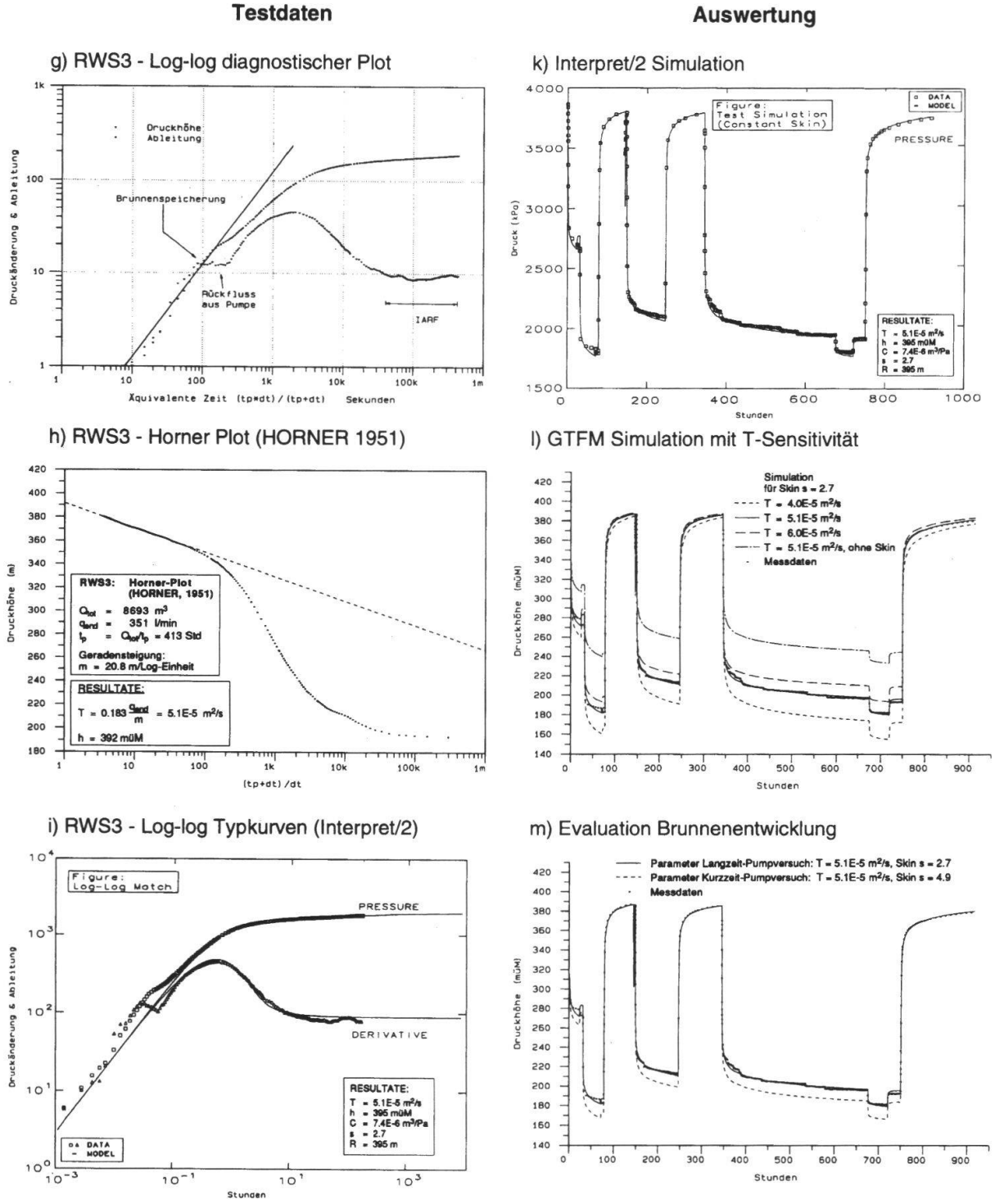

Fig. 3: Fortsetzung

Für die Testphase der Kurzzeit-Pumpversuche und die Anfangsphase des Langzeitversuches mit niedriger und mittlerer Förderrate liegen die dargestellten Punkte für die $q/\Delta h$ - Quotienten praktisch auf einer Geraden. Aus deren Steigung lässt sich eine spezifische Leistung des Brunnens (über eine Länge von 288 m gerechnet) von $C = 0.036$ l/s·m' ableiten. Anders ausgedrückt kann pro Laufmeter Brunnen mit einer Dauerförderrate von 0.036 l/s gerechnet werden, ohne grössere Brunneneintrittsverluste (durch Reibung bzw. Turbulenzen) in Kauf nehmen zu müssen.

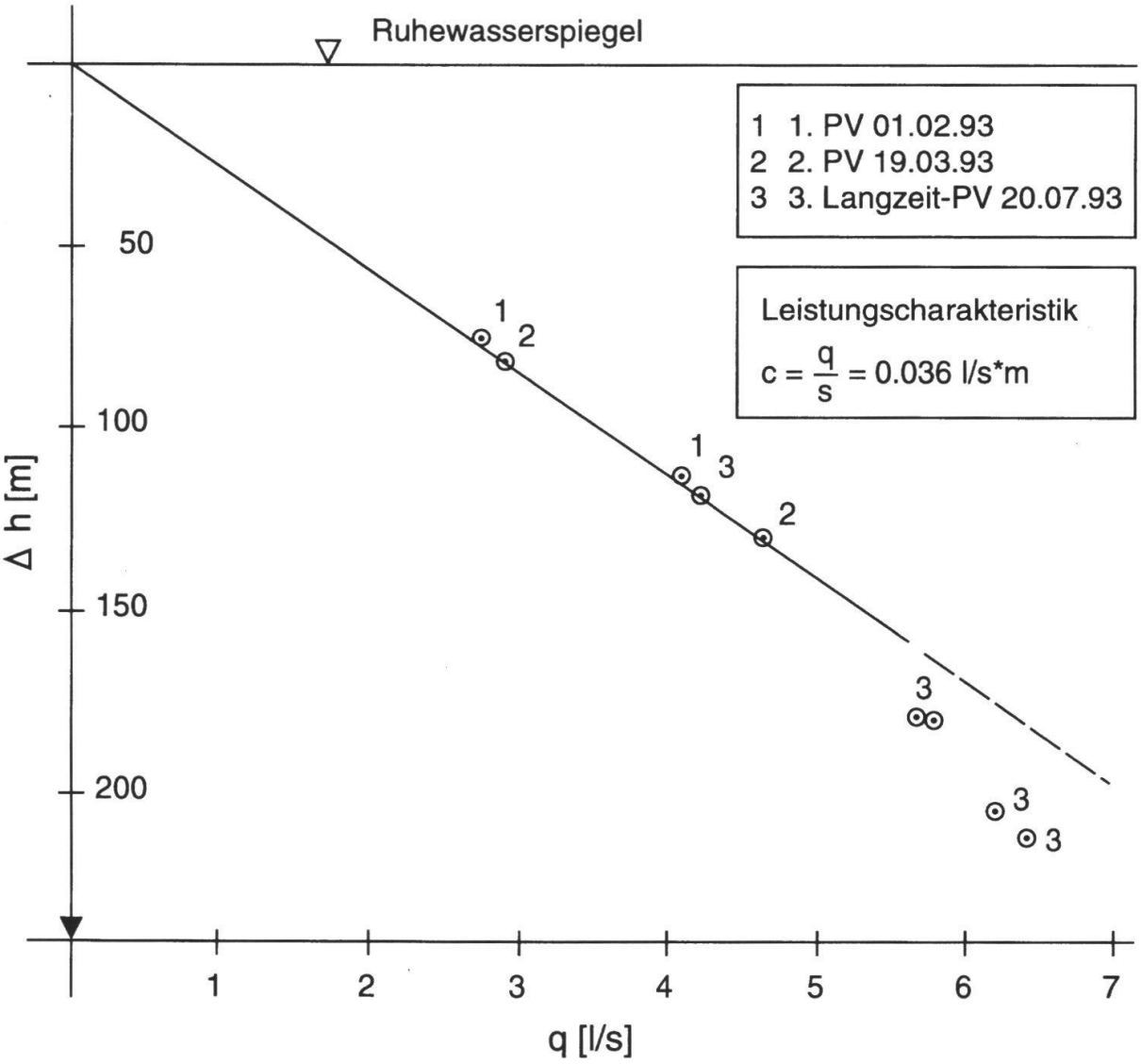

Fig. 4: Brunnencharakteristik Leistungsdiagramm.

Mit zunehmender Förderrate nimmt der Quotient nur geringfügig ab (auf 0.030 l/s*m'). Daraus kann gefolgert werden, dass aus dem Brunnen kurzfristig bis zu 6.6 l/s bzw. rund 400 l/min Wasser gefördert werden können.

Eine Analyse des Langzeitversuches zeigte, dass während den letzten ca. 5 Tagen ein quasi-stationärerer Zustand erreicht worden war, ohne dass eine limitierende äussere Begrenzung des Aquifers nachgewiesen werden konnte. Daraus kann geschlossen werden, dass die Dauerförderrate des Brunnens rund 350 l/min betragen darf. Da aber normalerweise keine ununterbrochene Wasserförderung nötig ist, kann aus der Leistungscharakteristik des Brunnens und aus der Charakteristik des Aquifers gefolgert werden, dass -sofern dies vom Projekt her erwünscht wäre- eine Auslegung der Pumpleistung auf maximal 7 l/s sinnvoll ist.

4.1.4 Gegenseitige Beeinflussung der Bohrungen Kloten und Bassersdorf

Eine Auflage des Konzessionsgebers war es, mögliche Beeinflussungen der bestehenden Bohrung in Kloten nachzuweisen, resp. auf ein Minimum zu begrenzen.

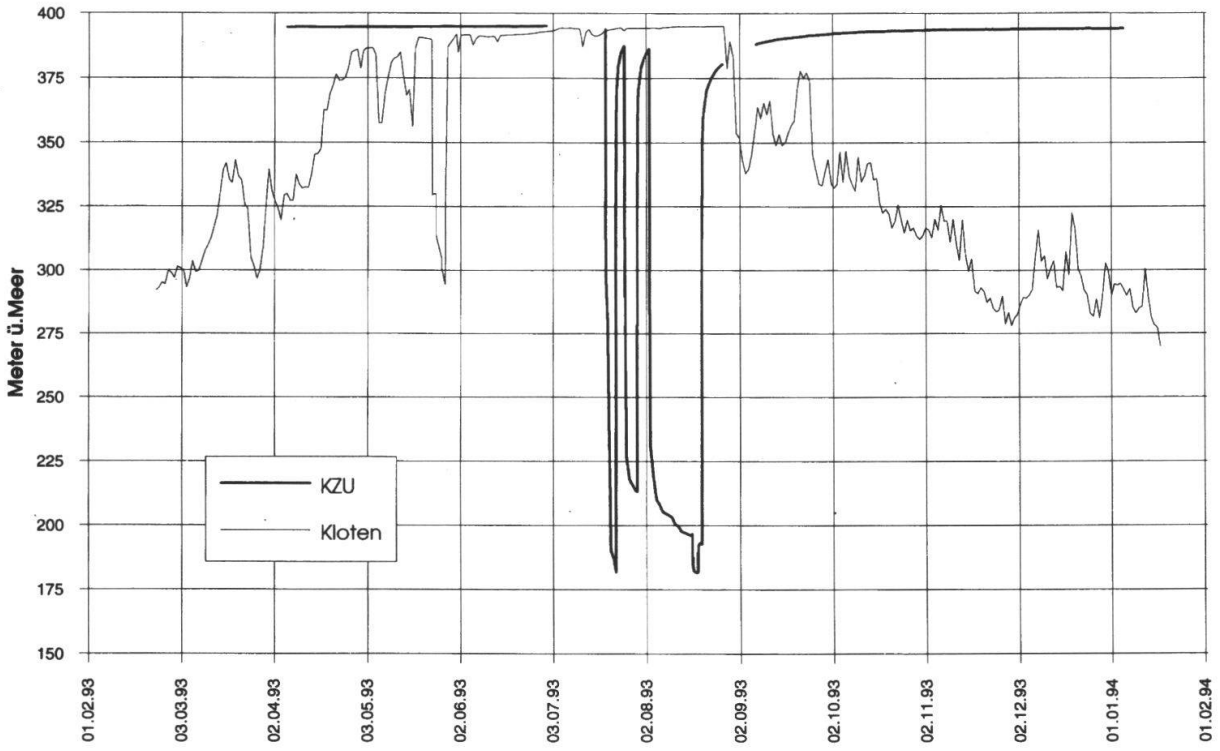

Fig. 5: Gemessene Grundwasserspiegelhöhen in den Bohrungen Kloten und Bassersdorf Februar 1993 bis Januar 1994 (Tagesmittelwerte über den gesamten Absenkungsbereich).

Um in dem seit 1983 in Betrieb stehenden Brunnen Kloten möglichst ungestörte Verhältnisse vorzufinden, musste der Pumpversuch ausserhalb der Heizperiode durchgeführt werden. In beiden Bohrungen wurden die Wasserspiegel mittels Limnigraphen aufgezeichnet (Fig. 5).

Die Aufzeichnungen zeigen, dass der Pumpbetrieb in der Bohrung Bassersdorf den statischen Wasserspiegel in der Bohrung Kloten nicht beeinflusst hat. Umgekehrt wirkte sich die dynamische Absenkung im Brunnen Kloten nicht messbar auf den Ruhespiegel in Bassersdorf aus. Es zeigte sich im Gegenteil, dass trotz der jeweiligen Absenkung durch Pumpen in einem Brunnen sich der jeweils zuvor gestörte Wasserspiegel in der andern Bohrung erholen konnte. Eine nennenswerte Beeinträchtigung der beiden Brunnen untereinander kann aufgrund der direkten Beobachtung ausgeschlossen werden, eine Tatsache, welche auch durch verschiedene numerische und analytische Simulationen bestätigt wurde. Wie in Kap. 4.1.2. dargestellt, erreicht die maximale Reichweite der Absenkung bei Pumpbetrieb im Brunnen Bassersdorf ca. 1100 m, bei einem Abstand der beiden Brunnen von ca. 3.2 km.

4.2 Thermische Verhältnisse

Ausgedehnte Temperaturmessungen sowohl während wie auch nach den Pumpversuchen ergaben Temperaturen zwischen ca. 22.0 - 23.0° C im Förderstrom bei einer gleichzeitigen Auslauftemperatur von 22.9° C. Anhand der Temperaturprofile, welche im Ruhezustand gefahren wurden, konnten die Temperaturgradienten wie folgt bestimmt werden (siehe auch Fig. 6):

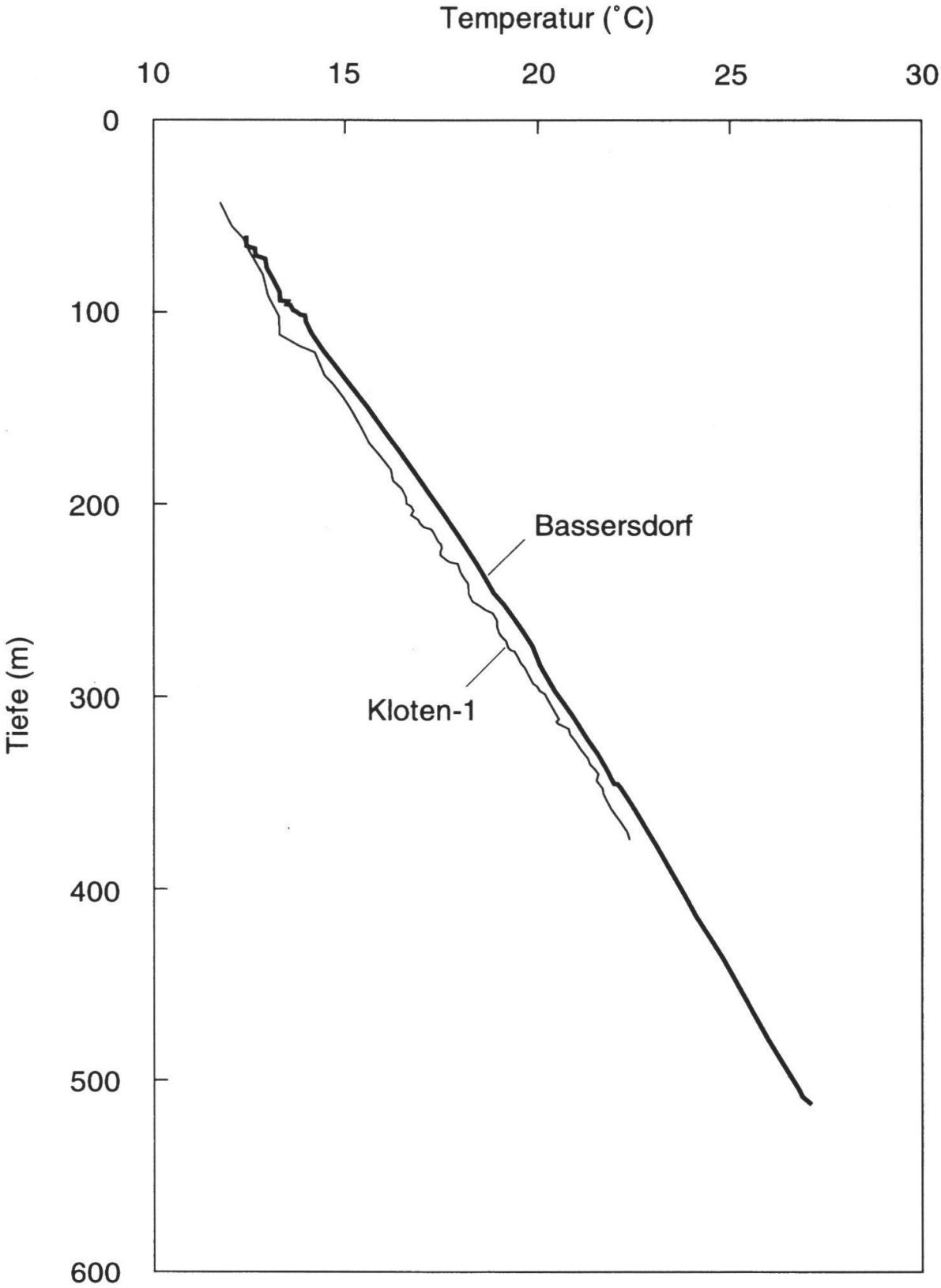

Fig. 6: Gemessener Temperaturverlauf in den Bohrungen Kloten und Bassersdorf.

Strecke (in m Teufe)		Streuung der Temperaturgradienten (K/km)	
OSM	bis 265 m	Glimmersande, bunte Mergel	34.3±1.8
OMM	bis 340 m	Sandsteine, Nagelfluhbänke	30.6±1.9
OMM	bis 543 m	Sandsteine	30.1±1.5
Temperaturgradient (Mittelwert über gesamtes Profil)			31.6±1.0

4.2.1 Erdwärmenutzung

Es ist davon auszugehen, dass die Wärmeentnahme aus dem Untergrund mit der Wärmenachlieferung durch den terrestrischen Wärmefluss im Gleichgewicht stehen muss. Danach soll die thermische Entnahmeleistung P die über eine Fläche F integrierte Wärmestromdichte (= qF) nicht übersteigen.

Bei Normalbetrieb lässt sich eine thermische Austauschfläche von 5.4 km^2 (Bohrung Kloten 3.3 km^2 bei 5.0 l/s, Bohrung Bassersdorf 2.06 km^2 bei 3.1 l/s) berechnen, um die Deckung der thermischen Entnahmen aus den beiden Bohrungen durch den terrestrischen Wärmefluss zu gewährleisten.

Der massgebliche Hauptzufluss zu den Bohrungen wird von den NE von Bassersdorf gelegenen Ausbisszonen der OMM im Gebiet Embrach/Rhein vermutet. Auch bei konservativen Annahmen wird also die Temperatur des dem OMM-Aquifer im Bereich Bassersdorf - Kloten zufliessenden Grundwassers mindestens 10°C betragen. Obwohl zum Erreichen der thermischen Leistung das Grundwasser um 15 K abgekühlt werden muss, braucht das im Aquifer nachströmende Wasser durch den terrestrischen Wärmefluss lediglich um 10 K auf 20° C Kloten) resp. 13 K auf 23° C (Bassersdorf) aufgewärmt zu werden. Dies ergibt eine thermische Einflussfläche, die um den Faktor 1.5 resp. 1.15 kleiner sein kann als die ursprünglich berechnete.

Die in der Bohrung Bassersdorf zur Verfügung stehende geothermische Energie lässt sich unter Annahme der Abkühlung des geförderten Wassers von 22.9° um 17.9 K auf 5° C, bei einem maximalen Förderstrom von 7.0 l/s zu 0.52 MW berechnen. Für die Beheizung des Krankenheimes werden lediglich 3.1 l/s bei einer Abkühlung um 15 K benötigt, was einer Entnahmeleistung von ca. 0.2 MW entspricht. Damit steht hier noch ein Reserve-Energiepotential von ca. 0.2 bis 0.3 MW zur Verfügung.

4.2.2 Synthese der hydrogeologischen Untersuchungsergebnisse in der OMM

Die Ergebnisse erlauben die OMM in dieser Region hydrogeologisch zu charakterisieren. Von den geologisch und petrophysikalisch ausgeschiedenen, lithofaziell unterschiedlichen Schichtgliedern innerhalb der OMM konnten zwei auch hydrogeologisch - insbesondere in bezug auf die Durchlässigkeit - signifikant verschiedene Abschnitte definiert werden: Der durchlässige konglomeratische Horizont in 315 - 340 m Teufe und die hydrogeologisch nicht weiter differenzierten, geringdurchlässigen, überwiegend sandigen Schichtglieder mit wechselnden Ton- und Karbonatgehalten. Entlang des Bohrprofiles wurden keine Änderungen der hydraulischen Druckhöhe gemessen. Demzufolge konnten auch keine verschiedenen Aquifere ausgeschieden werden.

Als repräsentative hydraulische Parameter der OMM resultierten aus den Versuchen

- Gesamt-Transmissivität der durchörterten OMM $T = 5.1 \times 10^{-5}\ m^2/s$
- statische hydraulische Druckhöhe (Süsswasser) $h = 395$ m.ü.M.
- (berechneter) spezifischer Speicherkoeffizient $S_S = 2.2 \times 10^{-6}\ m^{-1}$.

Aufgrund der Ergebnisse des Fluid Loggings sind rund 90% der Transmissivität der konglomeratisch ausgebildeten Zone in 315 - 340 m Teufe (Mächtigkeit rund 25 m) zuzurechnen, d.h. also $T = ca.\ 4.6 \times 10^{-5}\ m^2/s$. Daraus lässt sich für diese Zone ein durchschnittlicher Durchlässigkeitsbeiwert für ein homogenes poröses Medium mit unbeschränkter lateraler Ausdehnung von $k = 1.8 \times 10^{-6}$ m/s berechnen.

Aus dem Restanteil Transmissivität von $T = 0.5 \times 10^{-5}\ m^2/s$ ergibt sich für die verbleibenden 263 m OMM unter gleichen Annahmen eine Durchlässigkeit von $k = 1.9 \times 10^{-8}$ m/s, also 2 Grössenordnungen weniger als in der Konglomeratzone.

Beim Langzeitpumpversuch wurde unter Annahme eines homogenen, porösen Mediums mit radialer Strömung eine hydraulische Reichweite von etwa 500 - 1100 m (gesamte durchörterte Strecke bzw. Konglomerathorizont) erreicht. Es gab keine Anzeichen für äussere Aquifer-Begrenzungen oder wesentliche Inhomogenitäten. Die Testauswertungen haben ergeben, dass eine gegenseitige Beeinflussung oder gar Beeinträchtigung der beiden Geothermiebohrungen Bassersdorf und Kloten während des Betriebs ausgeschlossen ist.

Die Auslauftemperatur während dem Langzeitpumpversuch lag bei 22.9° C. Um die geplante Entnahmeleistung von ca. 0.2 MW zu erzielen, müssen ca. 3.1 l/s Wasser auf ca. 8° C abgekühlt werden. Maximal stehen ca. 7 l/s zur Verfügung, woraus sich ein Reserve-Energiepotential von 0.2 - 0.3 MW ergibt.

Aufgrund der Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen handelt es sich beim in der OMM angetroffenen Grundwasser um ein Na-Cl-SO_4-HCO_3-Wasser, d.h. ein Mischwasser des Na-Cl- Typs mit einem gewissen Anteil an eiszeitlich infiltriertem Na-HCO_3-Wasser. Die Mineralisation beträgt 1.5 bis 1.8 g/l. Aufgrund der Tritiumgehalte lässt sich auf einen Anteil von weniger als 2% Bohrspülung und eine mittlere unterirdische Verweilzeit von mehr als 35 Jahren schliessen.

Literaturverzeichnis

BLASER, P., GUBLER, T., KÜPFER, T.,MARSCHALL, P., MATTER, A., MATYAS, J., MEIER, B.P., MÜLLER, W.H., SCHLANKE, S., SCHLUNEGGER, F., SIEBER, N. & WYSS, E. 1994: Geothermiebohrung Bassersdorf, Charakterisierung der Oberen Meeresmolasse und Unteren Süsswassermolasse. Nagra Tech. Ber. NTB 94-1. Nagra, Wettingen.

ALLEN, P.A., MANGE-RAJETZKY, M. & HOMEWOOD, P. 1985: Dynamic paleogeography of the open Burdigalian seaway, Swiss Molasse Basin. Ecl. Geol. Helv. 78/2, 351-381.

BERGER, J.P. 1992: Correlative chart of the European Oligocene and Miocene: Applications to the Swiss Molasse Basin. Ecl. Geol. Helv. 85/3, 573-604.

BÜCHI, U.P., WIENER, G. & HOFMANN, F. 1965: Neue Erkenntnisse im Molassebecken auf Grund von Erdöltiefbohrungen in der Zentral- und Ostschweiz. Ecl. Geol. Helv. 58/1, 87-107.

COOPER JR., H.H. & JACOB; C.E. 1946: A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Amer. Geophys. Union Trans. 27/4, 526-534

GRISAK, G.E., PICKENS, J.F., BELANGER, D.W. & AVIS, J.D. 1985: Hydrologic testing of crystalline rocks during the Nagra deep drilling program. Nagra Tech. Ber. NTB 85-08. Nagra, Wettingen.

GUBLER, T. in Vorb.: Sedimentation und Paläogeographie der Oberen Süsswassermolasse zwischen Luzern und St. Gallen (Arbeitstitel). Diss. ETH Zürich.

HORNER, D.R. 1951: Pressure build-up in wells. Proc. Third World Petrogr. Congr. Sect. II, E.J.Brill, Leiden, 503-523

KELLER, B. 1989: Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. Diss. Univ. Bern.

KELLER, B. 1992: Hydrogeologie des schweizerischen Molassebeckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. Ecl. Geol. Helv. 85/3, 611-652.

KELLER, B., BLÄSI, H.-R., PLATT, N.H., MOLZLEY, P.S. & MATTER, A. 1990: Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal. Nagra Tech. Ber. NTB 90-41. Nagra, Wettingen.

MEGEL, T. & RYBACH, L. 1993: Forschungsvorhaben Aquiferbewirtschaftung. Unpubl 1. Zwischenbericht ETH Zürich v. 09.07.93

NAEF, H., DIEBOLD, P. & SCHLANKE, S. 1985: Sedimentation und Tektonik im Tertiär der Nordschweiz. Nagra Tech. Ber. NTB 85-14. Nagra, Wettingen.

NÜESCH, R. 1993: Geothermiebohrung Bassersdorf: Probenuntersuchung OMM-Gesteine. Unpubl. Ber. Nr.4429 des Institutes für Geotechnik, Zürich v. 11.03.93 z.H. Sieber, Cassina + Partner AG, Zürich.

PICKENS, J.F., GRISAK, G.E., AVIS, J.D. BELANGER, D.W. & THURY, M. 1987: Analysis and interpretation of borehole hydraulic tests in deep boreholes: Principals, model development and applications. Water Resour. Res. 23/7, 1341-1375.

SCIENTIFIC SOFTWARE-INTERCOMP 1989: Interpret/2 Well-Test Analysis Software, Version 1.2. London.

SIEBER CASSINA + PARTNER AG 1985: Geothermiebohrung Überbauung Hohstrasse, Kloten (Geologischer Bericht) Unpubl. SC+P Ber. ZH225/C v. 13.11.85.

SIEBER CASSINA + PARTNER AG 1988: Geothermiebohrung Hohstrasse, Kloten (Bohrlochgeophysik und Isotopenbestimmungen) Unpubl. SC+P Ber. ZH225/D v. 08.01.88.

SIEBER CASSINA + PARTNER AG 1992: Versickerung von Meteorabwasser und geothermisch genutztem Tiefengrundwasser (KZU Krankenheim Im Bächli) Unpubl. SC+P Ber. ZH698/A v. 16.04.92.

SIEBER CASSINA + PARTNER AG 1995: Resultate Färbversuch 1992-1994, Messungen bei der Kläranlage Eich (KZU Krankenheim Im Bächli) Unpubl. SC+P Ber. ZH698/C v. 17.01.95

SINCLAIR, H.D., COAKLEY, B.J., ALLEN, P.A. & WATTS, A.B. 1991: Simulation of foreland basin stratigraphy using a diffusion model of mountain belt uplift and erosion: An example from Central Alps, Switzerland. Tectonics 10/3, 599-620

TRÜMPY, R. 1980: Geology of Switzerland, a guide-book (Part A). Wepf, Basel/New York.