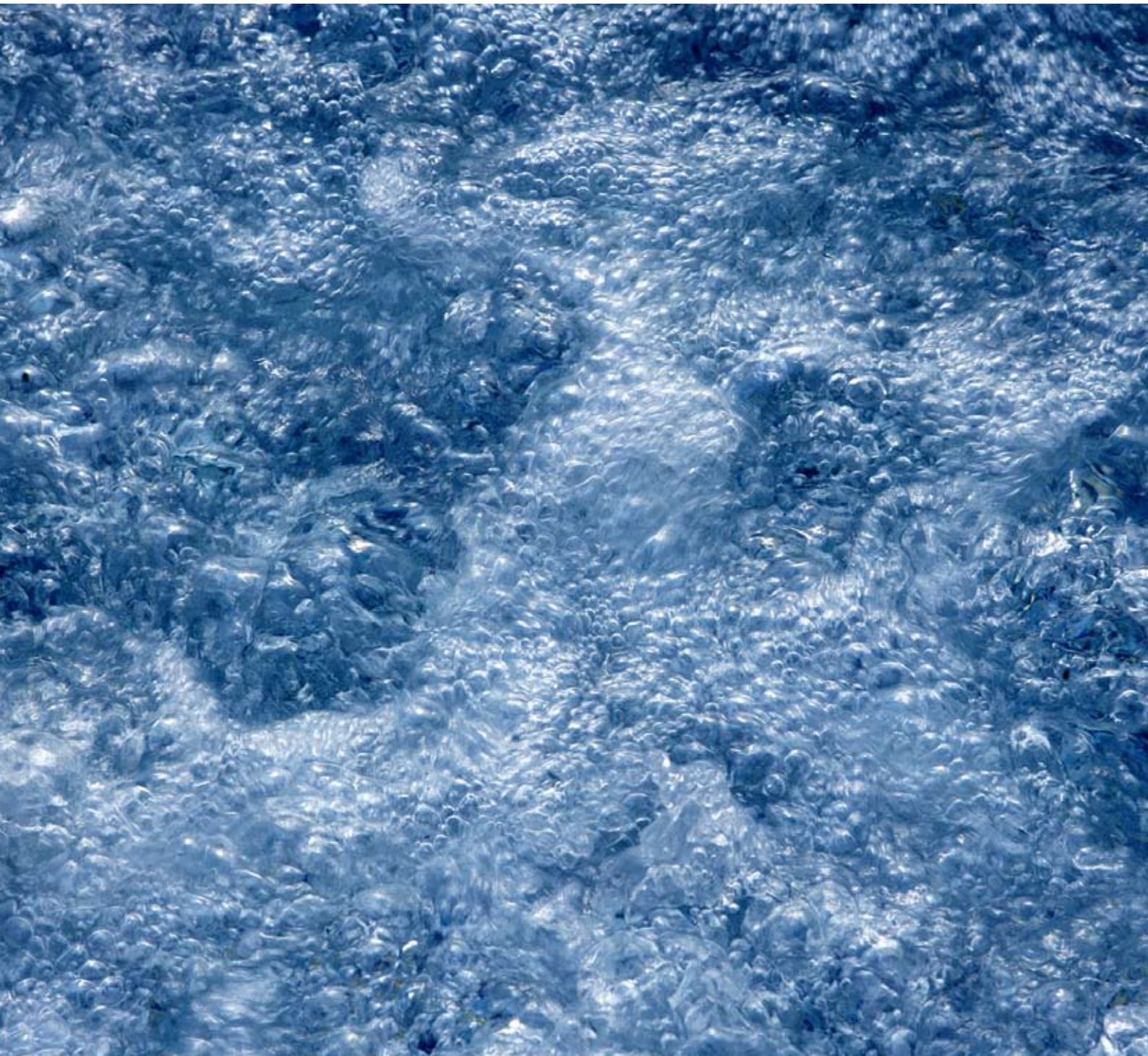


Thermalwasservorkommen im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken

Grundsatzuntersuchung zu thermischen Auswirkungen von Thermalwassernutzungen

Kurzbericht



Thermalwasservorkommen im niederbayerisch–oberösterreichischen Molassebecken

„Grundsatzuntersuchung zu thermischen Auswirkungen von Thermalwassernutzungen“

Expertengruppe „Thermalwasser“ im Auftrag der Ständigen Kommission nach dem Regensburger Vertrag

VORWORT	5
1. ANLASS UND ZIELSETZUNG	6
2. UNTERSUCHUNGSRAUM	7
3. HYDROGEOLOGISCHES MODELL	8
4. ANALYTISCHE BILANZ	11
Abgrenzung des Bilanzgebiets	11
Hydraulische Bilanzierung	12
Thermische Bilanzierung.....	13
Betrachtungen zu thermischen Nutzungen	14
5. NUMERISCHES THERMISCH-HYDRAULISCHES GRUNDWASSERMODELL	15
Vorgehensweise	15
Aufbau und Kalibrierung des 3D-Regionalmodells	15
Erstellung des 3D-Lokalmodells	17
6. ANWENDUNG UND ERGEBNISSE DES 3D-LOKALMODELLS	19
Vorgehensweise	19
Ergebnisse des 3D-Lokalmodells.....	19
7. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	24
BEILAGEN	26
Beilage 1	26
Beilage 2	27
Beilage 3	28

Vorwort

Im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken stellt das Thermalwasservorkommen eine maßgebliche Naturressource dar. Neben ihrer balneologischen Nutzung hat sich zwischenzeitlich auch die rein thermische Nutzung zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor entwickelt. Es liegt daher im öffentlichen Interesse, geeignete wasserwirtschaftliche Maßnahmen zu treffen, die sicherstellen, dass dieses Thermalwasservorkommen möglichst nachhaltig genutzt werden kann. Dies ist eine Verpflichtung, die für die Wasserwirtschaftsverwaltungen in Österreich und Bayern eine große Herausforderung darstellt.

Bereits im Jahre 1998 wurden ein hydrogeologisches Modell und ein zweidimensionales numerisches Grundwassermodell erstellt. Damit war es möglich geworden, die quantitativen Grundwasserhältnisse zu erfassen und die vorhandenen Wassermengen zu bilanzieren. Dieses Modell wird eingesetzt, um Aussagen über mögliche Auswirkungen bestehender und geplanter Anlagen auf die Druckverhältnisse in der geologischen Formation des Malm zu treffen.

Die zunehmende Anzahl von Anträgen auf geothermische Nutzung des Thermalwassers machte es erforderlich, auch die mit dem Entzug von Wärme verbundenen wasserwirtschaftlichen Fragen in stärkerem Ausmaß als bisher zu berücksichtigen. Gestützt auf die Ergebnisse eines 2002 in München veranstalteten internationalen Workshops wurde die Expertengruppe „Thermalwasser“ von der Ständigen Gewässerkommission

nach dem Regensburger Vertrag beauftragt, eine auf einem numerischen, thermisch-hydraulischen Grundwassermodell aufbauende Grundsatzstudie in Auftrag zu geben und deren Erarbeitung fachlich zu begleiten. Die nunmehr vorliegenden Ergebnisse der Grundsatzstudie, die von einer Arbeitsgemeinschaft deutscher, österreichischer und schweizerischer Hydrogeologen und Geophysiker, der ARGE TAT, erstellt wurde, führen zu einem besseren Verständnis der thermisch-hydraulischen Zusammenhänge im untersuchten Bereich und liefern wertvolle Hinweise zum Betrieb geothermischer Anlagen.

Die Nutzung des Thermalwasservorkommens erfolgt seit vielen Jahren auf gemeinsam abgestimmten Grundlagen. Nicht ohne Stolz kann auf die vorbildliche und erfolgreiche gemeinsame Bewirtschaftung dieses so bedeutenden grenzüberschreitenden Grundwasservorkommens durch Bayern und Österreich hingewiesen werden. Die Tatsache, dass die vorliegende Untersuchung durchgeführt wurde, beweist einmal mehr die hohe Qualität dieser Zusammenarbeit.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden dazu beitragen, dass das Thermalwasser noch effizienter bewirtschaftet und genutzt werden kann.

An dieser Stelle darf der Expertengruppe „Thermalwasser“ für ihre Tätigkeit im Rahmen der Projektbegleitung und der ARGE TAT für die Erstellung der Grundsatzstudie bestens gedankt werden.



SC Dipl.-Ing. Wilfried Schimon
Leiter der Sektion Wasser
im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt- und Wasserwirtschaft



Dr. Ing. Martin Grambow
Ministerialdirigent
Leiter der Abteilung Wasserwirtschaft im
Bayerischen Staatsministerium für Umwelt,
Gesundheit und Verbraucherschutz

1. Anlass und Zielsetzung

Im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken erstreckt sich ein regional ausgedehntes und bedeutendes Thermalwasservorkommen in den Karbonatgesteinen des Oberjura (Malmaquifer), welches von Regensburg bis in den Bereich westlich von Linz reicht. Die Nutzung dieses Thermalwasservorkommens entwickelte sich in den letzten Jahrzehnten zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor für diese Region. Da beiderseits der Staatsgrenze das Thermalwasser intensiv genutzt wird, ist das Vorkommen im niederbayerisch-oberösterreichischen Grenzraum von besonderer wasserwirtschaftlicher Bedeutung.

Daher wurden bereits im Jahr 1998 für dieses Thermalwasservorkommen ein hydrogeologisches Modell und ein 2D-Grundwasserströmungsmodell (DETAIL-MODELL 1998) erstellt. Dieses Modell erlaubt die Erfassung der Grundwasserströmungsverhältnisse im Malmaquifer und eine Bilanzierung der Thermalwassermengen. Es stellt eine wesentliche Grundlage für die wasserwirtschaftliche Beurteilung von Thermalwassernutzungen in diesem Raum dar.

Im Zusammenhang mit einer zunehmenden Anzahl geothermischer Nutzungen ergab sich eine Reihe von thermisch-hydraulischen Fragestellungen. Im Rahmen eines internationalen Workshops „Grundsatzfragen zur nachhaltigen Nutzung der Geothermie im Malmkarst des niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebeckens unter wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten“ (München, Februar 2002) wurden diese Fragestellungen diskutiert.

Eine nähere Untersuchung folgender Themenbereiche – vorerst auf regionaler Ebene – wurde als vordringlich erachtet:

- die Auswirkungen der durch die Reinjektion bewirkten Verminderung der Temperatur auf die Druckverhältnisse, die hydraulischen Parameter Leitfähigkeit und Speicherkoeffizient, die Wasserqualität und den Gasgehalt
- die Auswirkungen der Reinjektion auf die räumliche und zeitliche Entwicklung der Temperaturfront
- die Auswirkungen unterschiedlicher Reinjektionstemperaturen auf das Temperaturgeschehen im Untergrund
- die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsweisen geothermischer Anlagen

Die Komplexität der Themenbereiche machte die Untersuchung mit einem numerischen, dreidimensionalen, thermisch-hydraulischen Grundwassermodell erforderlich.

Im Mai 2005 wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt, dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und dem Land Oberösterreich das Projekt „Grundsatzuntersuchung zu thermischen Auswirkungen von Thermalwassernutzungen im zentralen, grenznahen Bereich des niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebeckens“, kurz „Thermische Auswirkungen von Thermalwassernutzungen“ beauftragt. Das Projekt wurde von der Arbeitsgemeinschaft „Thermische Auswirkungen von Thermalwassernutzungen“ (ARGE TAT – Geoteam GmbH, Hydroconsult GmbH und Geowatt AG) durchgeführt und von der Expertengruppe „Thermalwasser“ fachlich begleitet. Das Vorhaben wurde im Rahmen des INTERREG III A-Programms zu 50 % von der EU kofinanziert. Die vollständigen Ergebnisse der Untersuchungen sind in dem von der ARGE TAT erstellten Endbericht vom 08.10.2007 dargestellt.

Generelles Ziel des Projekts war die Erarbeitung von Grundlagen, wie das Thermalwasservorkommen im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken geschützt und die natürlichen wasserwirtschaftlichen und geothermischen Verhältnisse im Sinne einer nachhaltigen, gemeinsamen Bewirtschaftung so weit wie möglich erhalten werden können.

Die Ergebnisse des Projekts sollten auch zu einem besseren Verständnis der grundlegenden thermisch-hydraulischen Systemzusammenhänge im Malmaquifer beitragen und Hinweise für die Ausarbeitung weitergehender Bewirtschaftungsstrategien geben. Da die geothermische Nutzung des Thermalwassers in Form von Dubletten zu erfolgen hat, sollten die hydraulisch-thermischen Wechselwirkungen zwischen Entnahme- und Reinjektionsbrunnen den Schwerpunkt der Untersuchungen bilden. Die Erstellung eines Prognoseinstruments war nicht Ziel des Projekts.

Im Rahmen des Projekts sollte auch abgeschätzt werden, welcher Vorrat an Wärme vorhanden ist und in welchem Ausmaß die Regeneration der entzogenen Wärmemenge erfolgt.

2. Untersuchungsraum

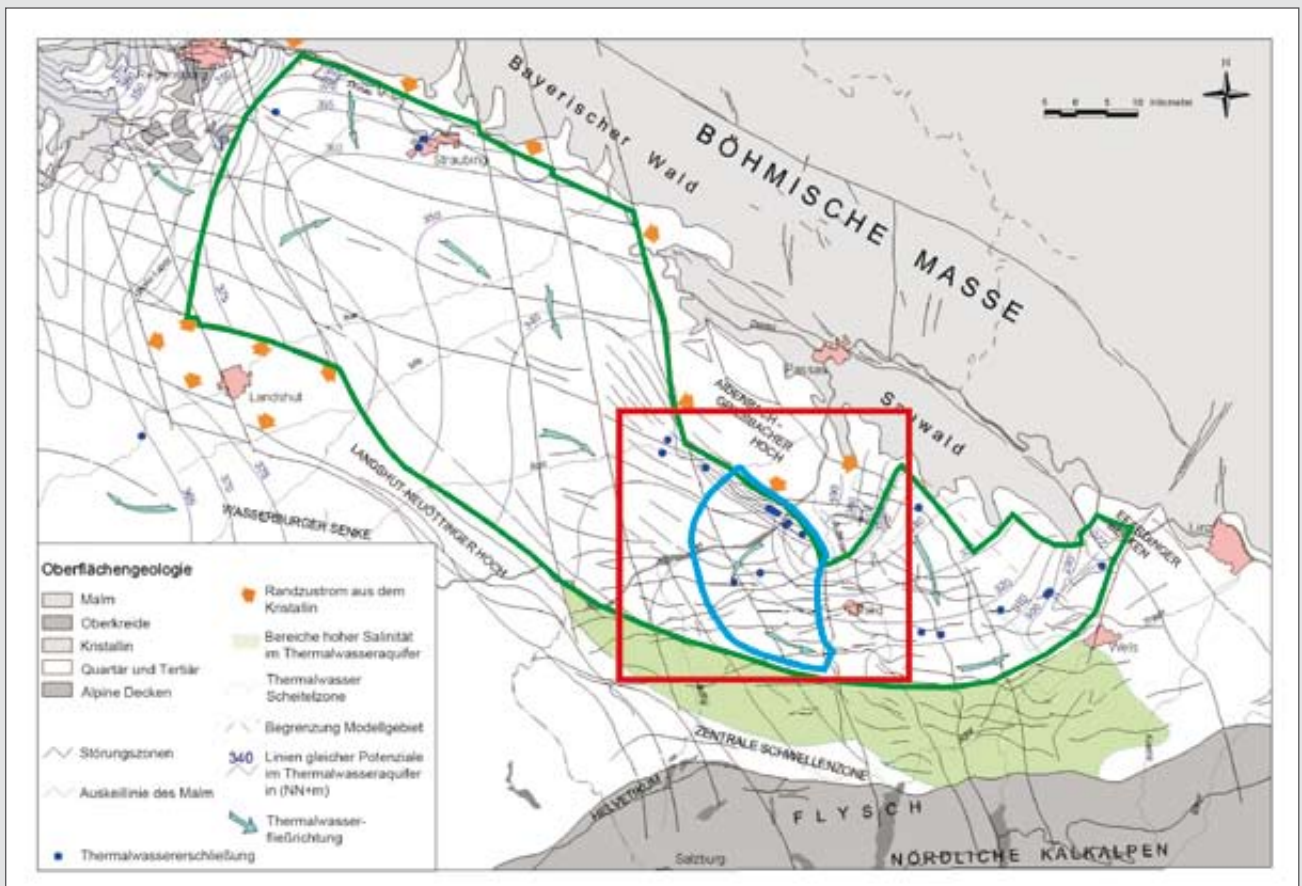


Abb. 2.1: Übersichtskarte mit Grenze des Untersuchungsraums (rot); ergänzt um die Ränder des DETAILMODELL 1998 (grün) und des 3D-Regionalmodells aus Kapitel 5 (blau)

Um den Bearbeitungsaufwand in Grenzen zu halten, war es erforderlich, die Untersuchungen in Abhängigkeit von der Fragestellung und der zu erzielenden Genauigkeit auf immer kleinere Teilgebiete des DETAILMODELL 1998 zu beschränken.

Im ersten Schritt wurde ein Untersuchungsraum so festgelegt, dass einerseits großräumige Strukturen, die

Einfluss auf das Temperaturgeschehen im Untergrund aufweisen können, miterfasst und andererseits Randbedingungen für ein 3D-Regionalmodell festgelegt werden konnten.

Mit dem 3D-Regionalmodell wurde jener Bereich abgebildet, über den die umfangreichsten hydrologischen und hydrogeologischen Informationen vorlagen.

3. Hydrogeologisches Modell

Das im Rahmen des DETAILMODELL 1998 entwickelte Hydrogeologische Modell wurde unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich neu gewonnenen Erkenntnisse und Vorstellungen im Untersuchungsraum aktualisiert.

So konnten im Untergrund drei markante Gesteinschichten, so genannte Leithorizonte, ausgewiesen werden, deren Oberflächen (Top) ausgeprägte Reflektoren für seismische Signale darstellen: Top Kristallin, Top Malm und Top Eozän.

Die geologischen Informationen aus den Tiefbohrungen und den reflexionsseismischen Untersuchungen wurden zu Strukturkarten ausgearbeitet. Diese Karten geben die Oberflächenstruktur einzelner Leithorizonte und deren Lage im Raum wieder.

Anhand dieser Strukturkarten und weiterer geologischer und hydrochemischer Informationen wurden die vertikalen Begrenzungen und somit die Mächtigkeiten der über dem Kristallin gelegenen wichtigsten hydrostratigrafischen Einheiten abgeleitet. Von den ältesten (tiefsten) bis zu den jüngsten (oberflächennahen) Einheiten ergibt sich folgender Aufbau:

- **Kristallines Grundgebirge**

Für die Oberfläche des Kristallin liegt eine Strukturkarte vor. Unterhalb von -5.000 m ü.NN wird keine wesentliche Strömung im Kristallin erwartet und dieses Niveau als Modellbasis angenommen. Die Gesteine des Kristallin sind als schwach wasserdurchlässig anzusehen.

- **Malm (Weißer Jura)**

Für die Oberfläche des Malm liegt ebenfalls eine Strukturkarte vor. Der Malm wird entsprechend seiner Gesteinsbeschaffenheit und damit seiner hydraulischen Funktion in den Tieferen Malm und den Höheren Malm unterteilt:

Der Tiefere Malm setzt sich im Projektgebiet aus nur wenig verkarstungsfähigen, mergelreichen, geschichteten Kalken zusammen. Er hat eine Mächtigkeit von

zumindest 50 m. Im schmalen Nordost-Saum des Aidenbach-Griesbacher Hochs mit auskeilendem Gesamt-Malm (< 50 m) keilt auch der Tiefere Malm aus. Die Gesteine des Tieferen Malm sind nur schwach wasserdurchlässig.

Der Höhere Malm wird im Projektgebiet aus einer verkarsteten Abfolge von Kalken in Riff- bzw. Massenzonierungen aufgebaut. Da die räumliche Verteilung der Verkarstung im Höheren Malm nicht im Detail bekannt ist, wird gemäß der Literaturangaben vereinfachend von einem pauschalen Verkarstungstiefgang von 200 m ausgegangen. Dem Höheren Malm wird daher im Hydrogeologischen Modell in Bereichen mit einer Mächtigkeit des Gesamt-Malm von mehr als 250 m eine pauschale Schichtdicke von 200 m zugewiesen. Auf Grund der Verkarstung ist die Gesteinsabfolge des Höheren Malm stark wasserdurchlässig und bildet deshalb den eigentlichen Thermalwasseraquifer.

- **Cenoman**

Unmittelbar über dem Malm folgt als tiefste Stufe der Oberkreide der Sandstein des Cenoman. Aus früheren Arbeiten ist bekannt, dass diese Schicht zwischen 20 und 30 m mächtig ist. Im Modell wird eine durchschnittliche Mächtigkeit von 30 m angesetzt. Der Sandstein des Cenoman ist wasserdurchlässig und hydraulisch an den Thermalwasseraquifer im Malm gekoppelt.

- **Oberkreide/Eozän**

Die stratigrafische Grenze zwischen Oberkreide und Tertiär ist durch seismische Messungen nicht eindeutig erkennbar. Als nächsthöher gelegener Leithorizont folgt erst die Oberfläche des Eozän (Alttertiär). Auch für diese Oberfläche liegt eine Strukturkarte vor. Die schluffig-tonigen Ablagerungen dieser Schichten sind nur schwach durchlässig. Daher werden im Hydrogeologischen Modell die mehrere hundert Meter mächtigen Schichten der Oberkreide mit den rund 50 m mächtigen Schichten des Eozän zu einer hydrostratigrafischen Einheit zusammengefasst. Die in der Oberkreide regional verbreiteten Sande des

Santon/Campan werden nicht als eigene hydrostratigraphische Einheit ausgewiesen. Sie werden jedoch im Hydrogeologischen Modell als hydraulisch besser leitfähige Bereiche innerhalb der Oberkreide berücksichtigt.

- **Tertiär**

Über dem Eozän folgen bis ca. 30 m unter Gelände die gering durchlässigen, zwischen 500 m und 2000 m mächtigen Gesteine des Tertiär.

- **Quartär**

Als höchstgelegene Schicht werden die Sande und Kiese des Hangendtertiär und des Quartär zusammengefasst. Deren Mächtigkeit wird im Hydrogeologischen Modell mit pauschal 30 m angenommen. Diese Schicht ist Grundwasser führend und stellt das oberste Grundwasserstockwerk dar.

Im Bereich des Rotttals erhält sie über die Campan-sande eine begrenzte vertikale Zusickerung aus dem Thermalwasseraquifer.

Das Blockbild in Abb. 3.1 zeigt den geologischen Aufbau des Untersuchungsraums mit Blick auf den Thermalwasseraquifer im Malm. Deutlich erkennbar sind die großen Sprunghöhen am Pockinger und Rieder Abbruch und die Einsenkung des Braunauer Troges. Im Westen des Braunauer Troges ist die Mattigstörung zu erkennen. Im Nordosten keilt der Malm aus, hier wird

das kristalline Grundgebirge direkt vom Tertiär überlagert.

Die geohydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsraum stellen sich wie folgt dar:

- Die Neubildung des Thermalwassers im Malm erfolgt über unterirdische Zuflüsse aus dem Kristallin des Bayerischen Waldes. Die Höhenlage des Neubildungsgebiets im Kristallin bestimmt die Druckverhältnisse im Malmaquifer. Diese sind auch für die Aussickerungsvorgänge im niederbayerischen Bäderdreieck und für die artesischen Verhältnisse an zahlreichen Brunnen im Untersuchungsraum verantwortlich.
- Im nordöstlichen Teil des Untersuchungsraumes ist daher von einem Potenzialunterschied vom kristallinen Grundgebirge zum Thermalwasseraquifer im Malm auszugehen. Da keine Messungen des Druckpotenzials im Kristallin vorliegen, wurde im Hydrogeologischen Modell eine Potenzialverteilung für das Grundgebirge vorgegeben. Die Potenzialdifferenz zum Malmaquifer wurde im Nordosten mit 10 m angesetzt. In Richtung Südwesten sinkt sie auf Null.
- Im Bereich des Pockinger Abbruchs korrespondiert der Thermalwasseraquifer im Malm zudem über sandige Serien innerhalb der Oberkreide (Santon/Campan) und des tieferen Tertiärs bereichsweise mit oberflächennahen Grundwasserstockwerken.

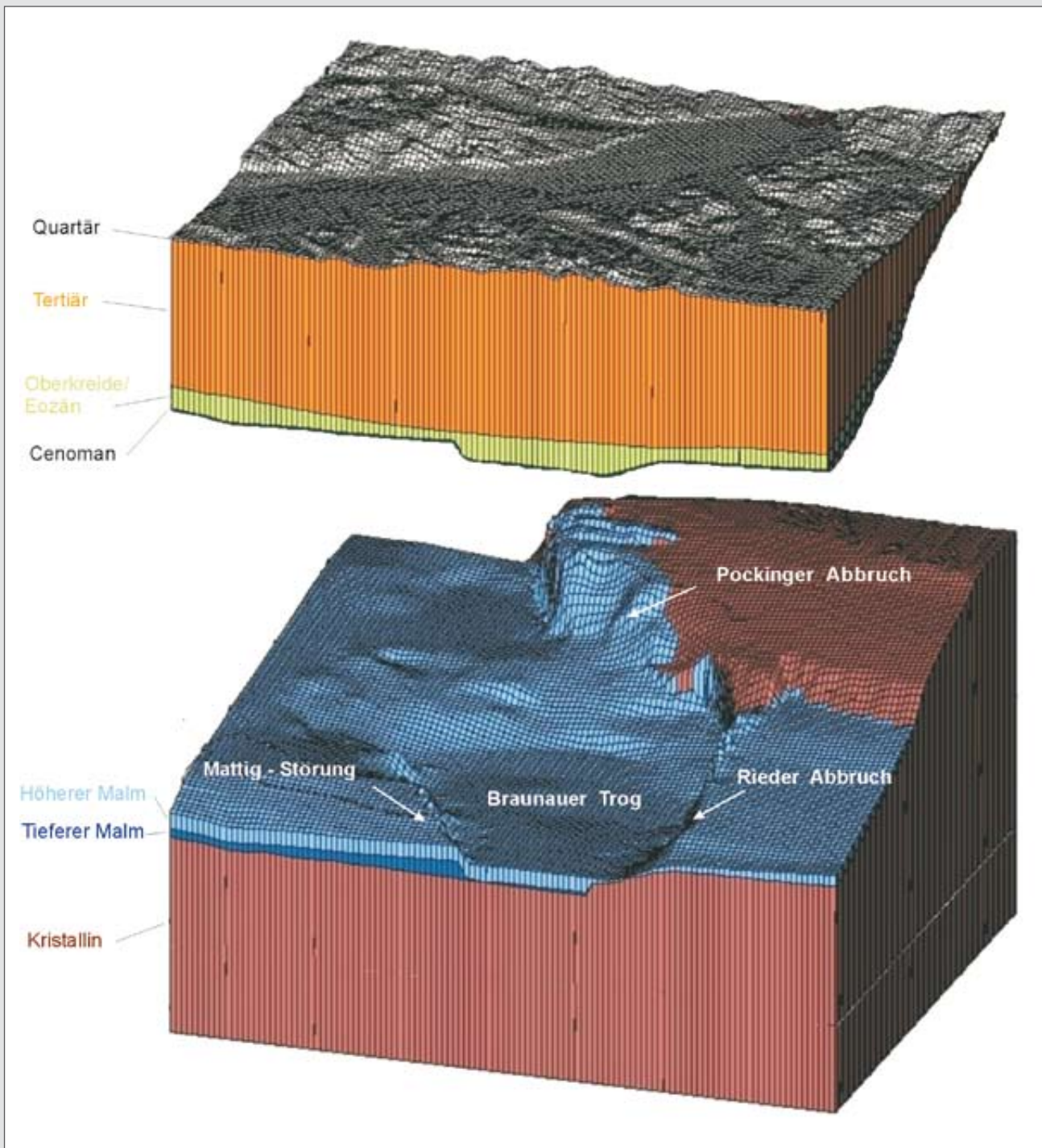


Abb. 3.1: Darstellung der geologischen Einheiten im Untersuchungsraum

4. Analytische Bilanz

Abgrenzung des Bilanzgebiets

Als Grundlage für die numerische Modellierung war eine analytische Bilanzbetrachtung für den Malmquifer vorzunehmen. Hierzu wurde innerhalb des Untersuchungsraums ein Bilanzgebiet anhand des hydrogeologischen Modells und der Ergebnisse des DETAILMODELL 1998 abgegrenzt (Abb. 4.1). Im Nordosten wurde das Gebiet entsprechend der in Kapitel 3 beschriebenen geohydraulischen Verhältnisse anhand der Potenzialverteilung im Kristallin abgegrenzt.

Als zweckmäßige Berandung wurde der Verlauf der 380 m ü.NN Potenziallinie gewählt. Da der Malmquifer

nach Nordosten auskeilt, verbleibt eine Fläche ohne Malmverbreitung. Die westliche und östliche Berandung bilden Randstromlinien, die aus der großräumigen Potenzialverteilung (DETAILMODELL 1998) abgeleitet wurden. Im Südosten folgt die Berandung des Bilanzgebietes dem Verlauf der im DETAILMODELL 1998 ermittelten 312 m ü.NN Potenziallinie im Malmquifer. Entsprechend der Potenzialdifferenz zwischen Kristallin und Malm wurden im Bilanzgebiet drei Teilflächen (1a, 1b und 1c) abgegrenzt und für diese die Zuflüsse aus dem Kristallin ermittelt. Der Malmquifer weist eine Bilanzfläche von 525 km² auf.

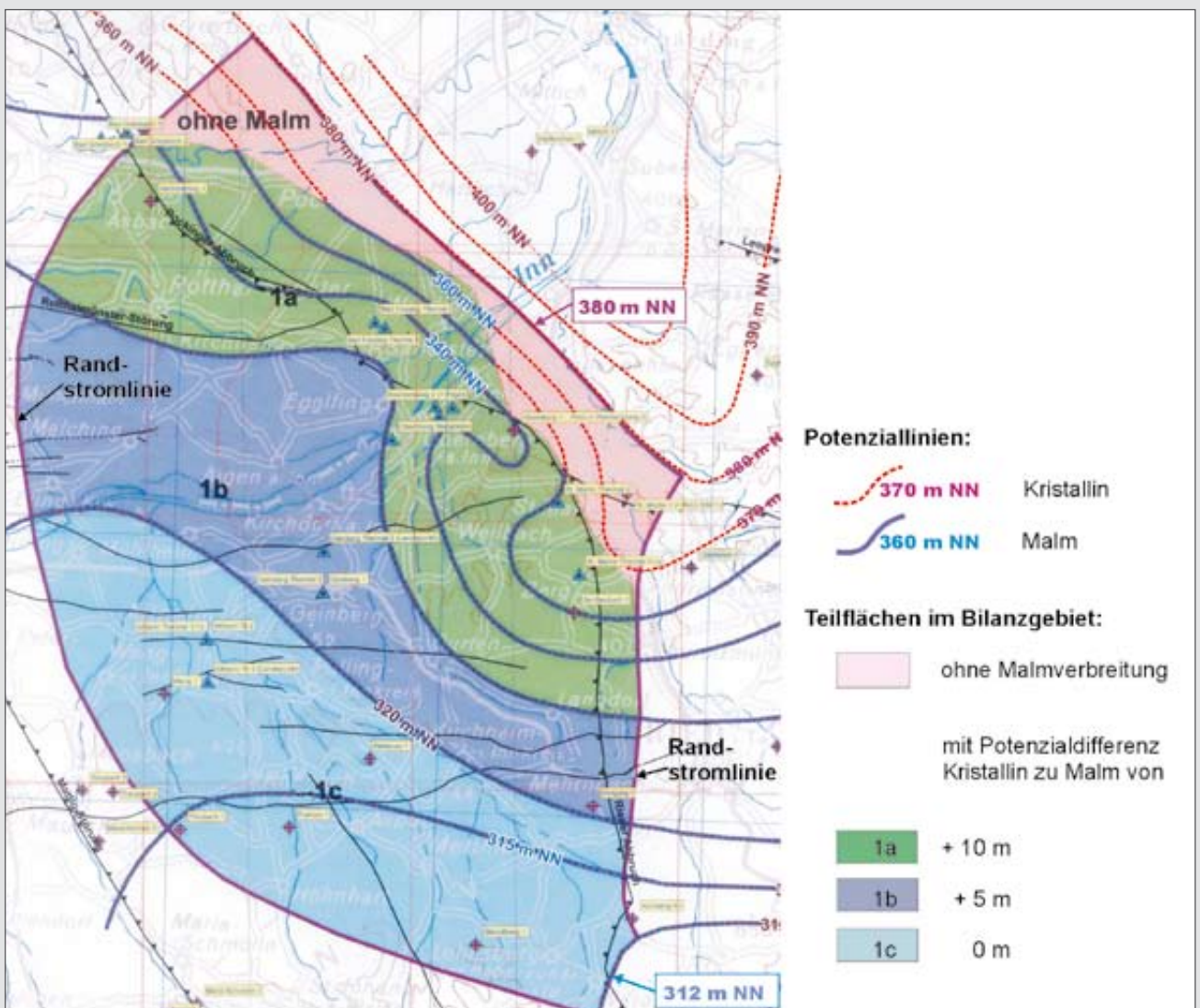


Abb. 4.1: Abgrenzung des Bilanzgebiets

Hydraulische Bilanzierung

Im Rahmen der hydraulischen Bilanzierung werden alle natürlichen Zu- und Abflüsse sowie Entnahmen und Reinjektionen aus bzw. in den Malm erfasst und einander gegenübergestellt (siehe Beilage 1, Tab. 1).

Die Zuflüsse von Tiefengrundwasser aus dem kristallinen Grundgebirge wurden über einen Leakage-Ansatz abgeschätzt. Zur Berechnung der Zuflussanteile in die einzelnen Teilflächen wurde jeweils eine mittlere Potenzialdifferenz zwischen Malm und Kristallin angesetzt. Der Gesamtzufluss aus dem Kristallin beträgt rund 180 l/s.

Der Randabstrom des Thermalwassers im Malm in das Ried-Schwanenstadt-Becken wurde nach Darcy mit rund 125 l/s abgeschätzt. Die Druckverhältnisse im Thermalwasseraquifer sowie eine Deckschichtenschwächung aufgrund sandig ausgebildeter Kreideschichten ermöglichen im niederbayerischen Rottal und im Unteren

Inntal einen vertikalen Ausstrom ins Hangende. Dieser Ausstrom wurde ebenfalls über einen Leakage-Ansatz mit den in Beilage 1, Tab. 1 angegebenen Parametern zu rund 20 l/s berechnet.

Im übrigen Bereich des Bilanzgebietes wurde aufgrund der mächtigen tertiären und kreidezeitlichen Deckschichten der Existenz zahlreicher Kohlenwasserstofflagerstätten innerhalb dieser Deckschichten sowie der hydrochemischen und isotopehydrologischen Charakteristik der Thermalwässer ein vertikaler Zustrom aus dem Hangenden ausgeschlossen.

Als mittlere Entnahme- und Reinjektionsmengen der Thermen bzw. Anlagen im Bilanzgebiet wurden die Mengen aus dem Jahr 2004 zum Ansatz gebracht. Bei Gegenüberstellung von Entnahme und Reinjektion ergibt sich eine Netto-Entnahme von 35 l/s aus dem Bilanzgebiet.

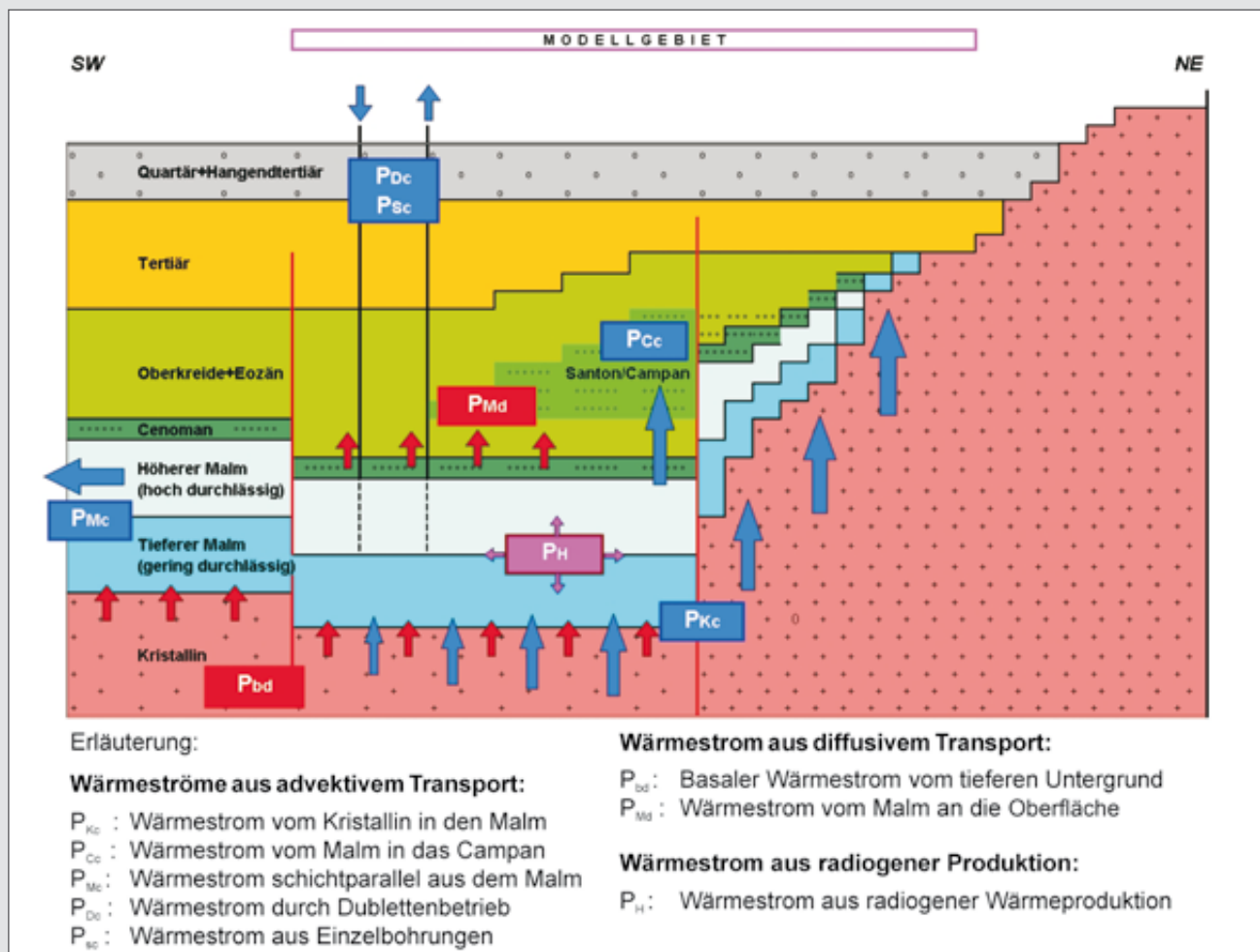


Abb. 4.2: Schematische Darstellung der Wärmeströme im Malm

Thermische Bilanzierung

Wärmeströme werden durch die advektiven und diffusiven Wärmetransportprozesse sowie durch radiogene Wärmeproduktion im Gestein hervorgerufen. Die Advektion ist der Wärmetransport durch die Bewegung des Wassers. Für den betrachteten Malmaquifer ist bei den advektiven Prozessen zwischen natürlichen Verhältnissen und infolge Thermenbetriebs gestörten Verhältnissen zu unterscheiden. Die diffusiven Prozesse werden durch den basalen Wärmestrom aus dem Kristallin sowie den Wärmestrom in das Hangende des Malm bestimmt. Abb. 4.2 zeigt eine schematische Darstellung der durch den diffusiven (rote Pfeile) und advektiven (blaue Pfeile) Wärmetransport bedingten Wärmeströme im Malm für das Bilanzgebiet. Für die thermische Bilanzierung des Thermalwasseraquifers im Malm müssen alle relevanten Wärmeströme quantifiziert werden.

Zur Quantifizierung der advektiven Bilanzkomponenten müssen neben den hydraulischen Parametern auch die Temperaturen der Zu- und Abflüsse bekannt sein. In Beilage 1, Tab. 2 sind die maßgebenden hydraulischen Komponenten mit den jeweils durchströmten Flächen und der mittleren Tiefe definiert. Die mittlere Temperatur des aus dem Kristallin in die einzelnen Teilflächen einströmenden Tiefengrundwassers wurde aus der Oberflächentemperatur ($T_0 = 10\text{ °C}$) und dem Temperaturgradienten für die mittlere Tiefe bestimmt.

Des Weiteren sind für die analytische Berechnung der advektiven Wärmeströme thermische und geometrische Parameter der einzelnen geologischen Schichten erforderlich. Diese in Beilage 1, Tab. 3 wiedergegebenen Werte wurden aus einzelnen Messwerten abgeleitet und

als Mittelwerte den jeweiligen Schichten zugeordnet. Für die Verhältnisse im Bilanzgebiet kann man davon ausgehen, dass der advektiv bedingte Wärmestrom P_{Kc} (Wärmestrom vom Kristallin in den Malm) den größten Einfluss ausübt, da Q1 den größten hydraulischen Zufluss darstellt. Der Wärmestrom vom Malm in das Campan (infolge von Q2) sowie der horizontale Wärmestrom über die südöstliche Grenze (infolge von Q3) bleiben im Folgenden unberücksichtigt. Zur Berechnung des Wärmestroms vom Kristallin zum Malm wurde auf die Péclet-Analyse zurückgegriffen. Bei diesem Verfahren wird von einer eindimensionalen, nach oben gerichteten Strömung in einem Aquifer ausgegangen. Ziel dieser Analyse ist die Bewertung der advektiven Komponente (Wärmestrom aus dem Kristallin), wenn die beiden diffusiven Terme, Wärmestrom aus dem Malm an die Oberfläche und basaler Wärmestrom, bekannt sind.

Der Wärmestrom aus dem Malm an die Oberfläche wird hierbei mittels der bekannten Größen mittlere Wärmeleitfähigkeit des Hangenden, Tiefe des Malm und Temperaturdifferenz zwischen Malm und Oberfläche berechnet. Anhand der Funktion, die den Zusammenhang zwischen dem Wärmestrom aus dem Malm an die Oberfläche und dem basalen Wärmestrom beschreibt, kann nun der basale Wärmestrom berechnet werden. Der Wärmestrom durch radiogene Wärmeproduktion im Malm ist aufgrund der geringen spezifischen radiogenen Wärmeproduktion vernachlässigbar. Mit den o.a. analytischen Berechnungen lässt sich schließlich die in Tab. 4.1 dargestellte thermische Bilanz für den Thermalwasseraquifer aufstellen. Bei der Ermittlung der Energieänderungen ΔE wurde von einem Zeitraum von 50 Jahren ausgegangen.

Wärmestrom	Bez.	Wärmestromdichte $q\text{ (W/m}^2\text{)}$	Wärmestrom $P\text{ (W)}$	Zeit (Jahr)	Energieänderung $\Delta E\text{ (GWh)}$
(advektiv)					
vom Kristallin in den Malm	P_{Kc}		$1,15 \cdot 10^7$	50	5.037
vom Malm in das Campan	P_{Cc}	n.b.			–
schichtparallel aus dem Malm	P_{Mc}	n.b.			–
(diffusiv)					
Basaler Wärmestrom	P_{bd}		$6,01 \cdot 10^7$	50	26.324
Wärmestrom vom Malm an die Oberfläche	P_{Md}		$7,16 \cdot 10^7$	50	31.361
(Wärmeproduktion)					
aus radiogener Wärmeproduktion	P_H		$< 2,01 \cdot 10^5$	50	88

n.b. = durch analytische Berechnung nicht quantifizierbar bzw. vernachlässigt

Tab. 4.1: Thermische Bilanzierung für den Malm

Betrachtungen zu thermischen Nutzungen

Der Wärmestrom durch Thermalwasserentnahmen ohne Reinjektion ist analytisch nicht zu bestimmen, da durch die Förderung Zuflüsse induziert werden, deren Temperaturen nicht bekannt sind.

Unter der Annahme, dass ihre mittlere Temperatur dieselbe Temperatur wie das entnommene Thermalwasser aufweist, verursachen sie keinen thermischen Effekt und bleiben daher für die thermische Bilanz unberücksichtigt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass dies eine Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse darstellt.

Im Gegensatz dazu lässt sich der durch Dublettenbetrieb induzierte Wärmestrom einfach quantifizieren, da die Temperatur des entnommenen und des reinjizierten Thermalwassers bekannt ist.

Für die Dubletten im Bilanzgebiet lässt sich ein Wärmestrom von 19 MW und entsprechend der jeweiligen Betriebsdauer im Zeitraum von 2001 bis 2005 eine entzogene Energie von ca. 700 GWh berechnen. Dieser Wärmestrom entspricht bei der Fläche des Bilanzgebietes von 525 km² einer Wärmestromdichte von 36 mW/m².

Wärmestrom	Bez.	Wärmestromdichte q (W/m ²)	Wärmestrom P (W)	mittlere Betriebsdauer (h)	Energieänderung ΔE (GWh)
(advektiv)					
aus Einzelbrunnen	P _{Sc}		n.b		–
durch Dublettenbetrieb	P _{Dc}		1,90•10 ⁷	ca. 36.000	700

n.b. = durch analytische Berechnung nicht quantifizierbar

Tab. 4.2: Energieänderung durch thermische Nutzungen im Bilanzgebiet

Mit einem überschlägigen analytischen Ansatz kann die bereits entzogene Wärme zu dem verfügbaren Wärmevervorrat in Relation gesetzt werden. Die im Malmaquifer des Bilanzgebiets vorhandene Energie (E_{HIP}, „Heat In Place“) wurde hierbei mit

$$E_{HIP} = 5,5 \cdot 10^6 \text{ GWh}$$

abgeschätzt.

Unter der Annahme, dass hiervon ca. 5 % gewinnbar sind, beträgt die nutzbare Energie E_g im Malmaquifer des Bilanzgebietes

$$E_g = 2,7 \cdot 10^5 \text{ GWh}$$

Setzt man die dem Bilanzgebiet zwischen 2001 und 2005 entzogene Energie von ca. 700 GWh in Relation zu diesem Wert, so zeigt sich, dass der verfügbare

Energievorrat bei gleichbleibender Nutzungsintensität theoretisch binnen 2.000 Jahren ausgeschöpft wäre.

Diese Abschätzungen sind jedoch rein theoretischer Natur. Die aus dem Untergrund gewinnbare Wassermenge begrenzt die energetische Nutzung im Thermalwasseraquifer des Malm.

Wegen der komplexen hydrogeologischen Situation im Karst und der deshalb notwendigen Vereinfachungen und Abschätzungen ist weder eine zuverlässige Ermittlung der gewinnbaren Thermalwassermenge noch der nutzbaren Energie möglich.

Aussagen über thermisch-hydraulische Auswirkungen und die Nutzungsdauer von einzelnen Dubletten sind aufgrund dieser Abschätzungen nicht möglich. Dazu sind detaillierte Untersuchungen, z.B. über numerische Modellrechnungen, erforderlich.

5. Numerisches thermisch-hydraulisches Grundwassermodell

Vorgehensweise

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Programme zur thermisch-hydraulischen Modellierung hinsichtlich ihrer Eignung für die gegenständliche Fragestellung untersucht. Zur Projektbearbeitung wurde das Programmpaket FRACTure ausgewählt.

Um den Rechenaufwand für die zu untersuchenden Prognosefälle in vertretbaren Grenzen zu halten, erfolgte die numerische thermisch-hydraulische Modellierung in zwei Arbeitsschritten:

- Erstellung eines 3D-Regionalmodells auf der Basis des vorhandenen DETAILMODELL 1998 (2D-Modell)
- Erstellung eines 3D-Lokalmodells als Ausschnitt aus dem 3D-Regionalmodell zur Berechnung der Prognosefälle

In Beilage 2 ist die Vorgehensweise zur numerischen Modellierung in einem Ablaufplan schematisch dargestellt.

Aufbau und Kalibrierung des 3D-Regionalmodells

Die horizontale Berandung des Regionalmodells wurde entsprechend den Grenzen des in Kapitel 4 beschriebenen Bilanzgebietes festgelegt. Als obere Modellgrenze wurde das Geländeniveau, als untere eine konstante

Basis bei -5.000 m ü.NN angesetzt. Unterhalb dieses Niveaus wird keine wesentliche Strömung in tiefen Gesteinsschichten (Kristallin) und keine thermische Beeinflussung des Malm mehr erwartet.

Die vertikale Gliederung des Regionalmodells (Abb. 5.1) beinhaltet folgende sieben Modellschichten entsprechend der in Kapitel 3 beschriebenen hydrostratigraphischen Einheiten:

- Quartär
- Tertiär
- Oberkreide/Eozän
- Cenoman
- Höherer Malm
- Tieferer Malm
- Kristallines Grundgebirge

Unterhalb des Quartär und Tertiär, d.h. von der Oberkreide/Eozän bis in das Kristallin, sind die im DETAILMODELL 1998 ausgewiesenen Störungszonen als vertikale zweidimensionale Elemente berücksichtigt.

Um die Simulation numerisch stabil durchführen zu können, wurde im Nahbereich der Brunnen eine Netzverfeinerung bis zu einem Knotenabstand von 40 cm festgelegt. Die im Modellgebiet befindlichen Thermalwasserbrunnen sind nur im Malm als offene Bohrlochstrecke berücksichtigt. Die Brunnen sind als vertikale Linienelemente im 3D-Modell umgesetzt.

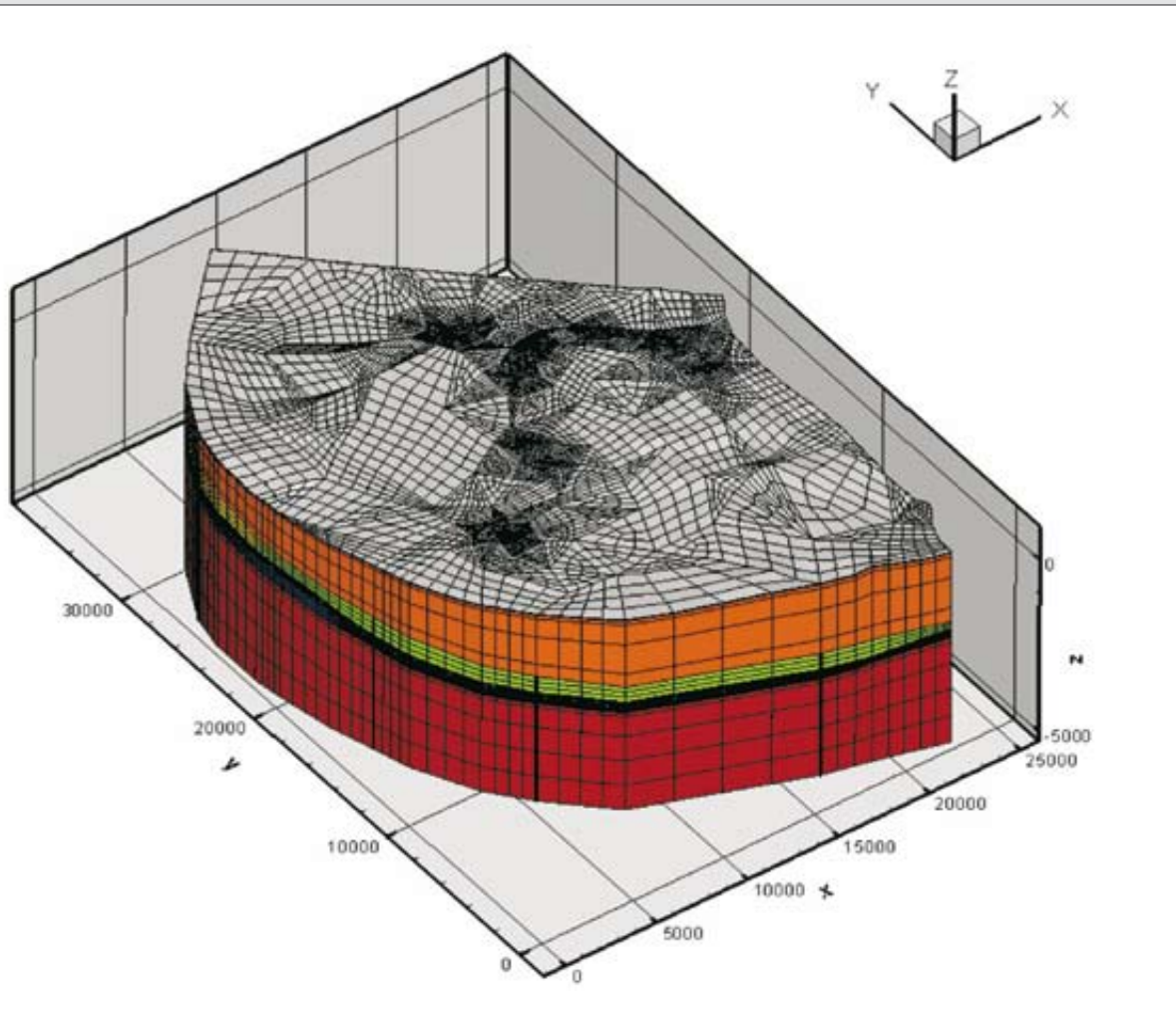


Abb. 5.1: 3D-Regionalmodell mit Topografie der hydrostratigrafischen Einheiten, horizontaler und vertikaler Netzverfeinerung; z-Achse 2,5-fach überhöht

Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Auswirkungen unterschiedlicher hydraulischer und thermischer Gesteinseigenschaften auf das Simulationsergebnis in folgenden Arbeitsschritten überprüft:

- Stationäre hydraulische Kalibrierung: Überprüfung des stationären hydraulischen Potenzials im Malmaquifer für verschiedene hydraulische Leitfähigkeiten.
- Instationäre hydraulische Kalibrierung: Überprüfung der zeitlichen Entwicklung des hydraulischen Potenzials im Malmaquifer als Funktion zeitlich veränderlicher Randbedingungen (Entnahme/Reinjektion).
- Stationäre thermische Kalibrierung: Überprüfung des stationären Temperaturfeldes im Malmaquifer für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine und hydraulische Leitfähigkeiten des Aquifers.

Der Zustand vor 1947, d.h. vor Beginn der Thermalwasserrförderung im Untersuchungsgebiet, konnte mit dem stationären Modell hinreichend genau beschrieben werden. Im gesamten Regionalmodell konnte eine gute Annäherung an die errechneten Potenzialverhältnisse aus dem DETAILMODELL 1998 erzielt werden. Die hierbei zugrunde liegenden Werte für die hydraulischen Leitfähigkeiten liegen innerhalb der im hydrogeologischen Modell als plausibel angesehenen Bandbreite.

Die Ergebnisse der durchgeführten stationären Berechnungen für mittlere Verhältnisse (Zeiträume 1989 bis 1996 und 2003) zeigten eindeutig, dass der hydraulische Zustand des Aquifers durch die Thermalwasserrförderung nicht mehr stationär ist und daher nur mit Hilfe einer instationären Simulation beschrieben werden kann.

Erstellung des 3D-Lokalmodells

Die Reaktion des thermalen Tiefengrundwassersystems im Malm auf unterschiedliche Betriebsweisen (geothermische und balneologische Nutzungen) wurde unter Berücksichtigung verschiedener Lagekonfigurationen der Brunnen in zahlreichen Prognosefällen untersucht (vgl. Kapitel 6). Insbesondere sollte geklärt werden, in welcher Form sich Änderungen der System- und Prozessfaktoren auf das Druck- und Temperaturverhalten im Malmaquifer auswirken.

Die Rechenläufe für die instationäre Kalibrierung starteten mit dem Jahr 1947 und endeten mit dem Jahr 2004.

Ergebnis der iterativ durchgeführten Kalibrierung war eine verfeinerte Aussage zu den hydraulischen Leitfähigkeiten. Der spezifische Speicherkoeffizient konnte mangels geeigneter Daten nicht kalibriert werden.

Der Temperatureinfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit wurde über eine ergänzende Sensitivitätsbetrachtung untersucht.

Die diffusive stationäre thermische Kalibrierung wurde unter der Annahme der Randbedingungen für die Temperatur an der Oberfläche (10 °C) und entlang der nordöstlichen Grenze im Kristallin (tiefenabhängig) durchgeführt. Grundlage der Kalibrierung waren im Bohrloch gemessene Temperaturen des Höheren Malm. Die Werte für den basalen Wärmestrom (Randbedingung an der unteren Modellgrenze) und die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins wurden variiert. Die Kalibrierung zeigte eine gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den gemessenen Temperaturdaten.

Zur Untersuchung des Einflusses der advektiven thermischen Transportprozesse auf das Temperaturfeld erfolgten durch Variation der hydraulischen Leitfähigkeiten ergänzende Sensitivitätsuntersuchungen.

Nach Kalibrierung des 3D-Regionalmodells ergeben sich für die einzelnen hydrostratigrafischen Einheiten die in Beilage 1, Tab. 4 angegebenen thermischen und hydraulischen Parameter.

Die Randbedingungen wurden wie folgt festgelegt:

- Aus dem kalibrierten 3D-Regionalmodell wurden übernommen
 - die Potenziale entlang der Nord- und Südberandung
 - die Temperaturen entlang der Nordberandung
 - die Potenzial- und Temperaturrandbedingungen an der Oberfläche
 - die thermische Randbedingung an der unteren Modellgrenze
 - die Ost-West verlaufenden Störungszonen
- Die Ost- und Westberandungen wurden als hydraulische und thermische „no-flow“ Randbedingungen festgelegt.

- Zur Berechnung spezieller Lagekonfigurationen von Brunnen wurde eine virtuelle, Nord-Süd verlaufende Störungszone zusätzlich in das 3D-Lokalmodell eingebaut. Diese verbindet die vorhandenen Ost-West verlaufenden Störungszonen.

Für die einzelnen hydrostratigrafischen Einheiten wurden die dem kalibrierten 3D-Regionalmodell zugrunde liegenden thermischen und hydraulischen Parameter übernommen. Bei der Berechnung der instationären Prognosefälle wurde die hydraulische Leitfähigkeit der Gesteine als Funktion der temperaturabhängigen Viskosität berücksichtigt. Die Diskretisierung des 3D-Lokalmodells wurde entsprechend der Lage der Brunnen in den zu untersuchenden Prognosefällen durchgeführt.

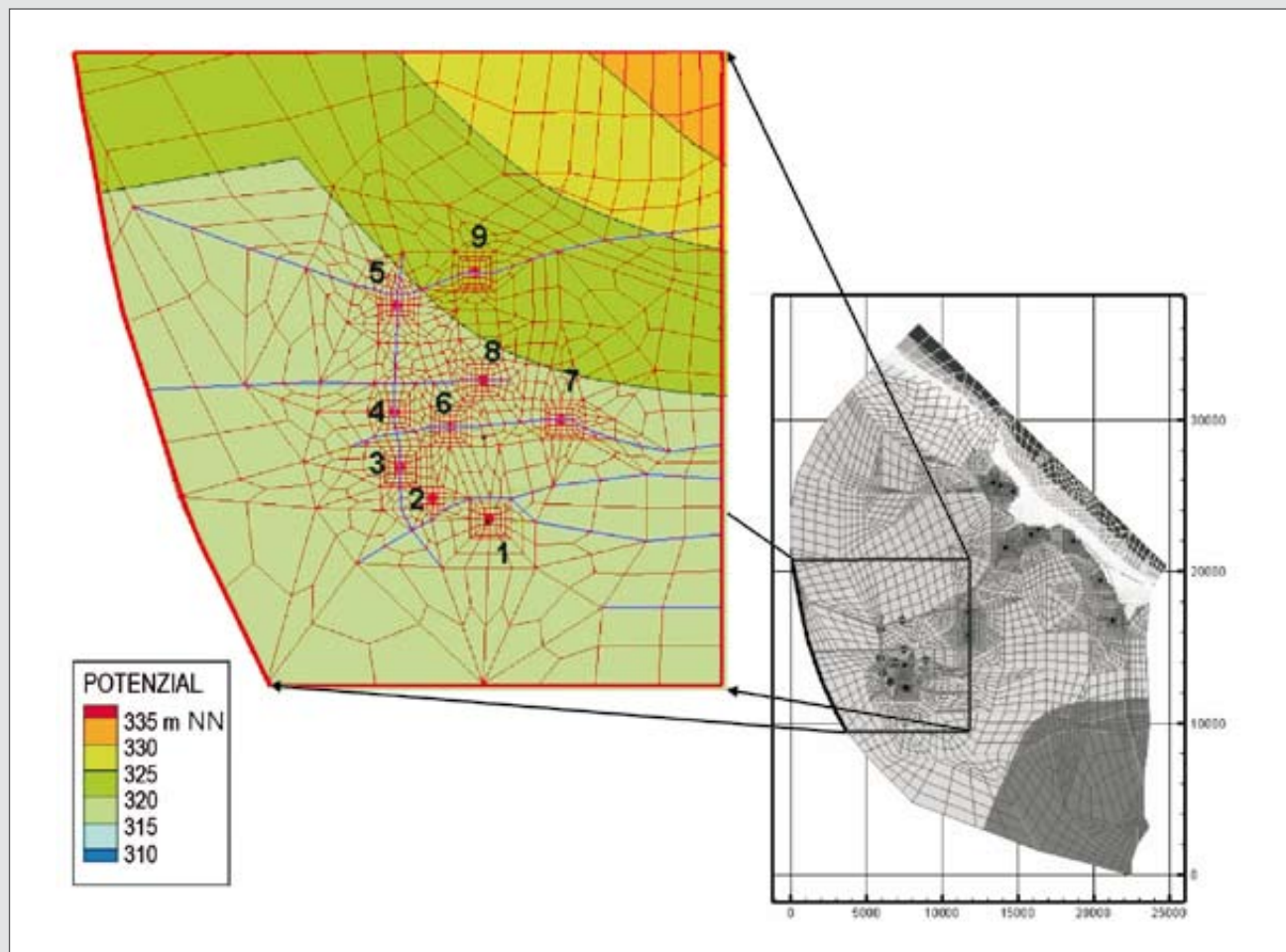


Abb. 5.2: Abgrenzung des 3D-Lokalmodells im Südwesten des 3D-Regionalmodells. Die Störungszonen sind durch blaue Linien dargestellt. Die farbige Isolinien Darstellung zeigt die Ruhepotenziale im Malm des kalibrierten Regionalmodells. Die Lage virtueller Brunnen ist durch rote Punkte dargestellt. Die Zahlen entsprechen der in Kapitel 6 angegebenen Nummerierung der Brunnen.

6. Anwendung und Ergebnisse des 3D-Lokalmodells

Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden ausschließlich die Auswirkungen verschiedener Betriebsweisen und räumlicher Anordnungen von Entnahme- und Reinjektionsbrunnen einer Dublette auf das Druck- und Temperaturverhalten im Malmaquifer untersucht. Dabei wurde einerseits die Lage der Brunnen vorgegeben und die Betriebsweise variiert, andererseits wurde die Betriebsweise vorgegeben und die Lage der Brunnen variiert. Darüber hinaus wurde überprüft, wie sensibel das Druck- und Temperaturverhalten im Malmaquifer auf geänderte Systemparameter reagiert.

Nicht untersucht wurden die möglichen Auswirkungen eines Dublettenbetriebes auf andere Thermalwassernutzungen.

Folgende Lagekonfigurationen wurden bei Brunnenabständen von 1 und 3 km und gemäß dem in Abb. 6.1 dargestellten Schema (Fall A, B und C) im 3D-Lokalmodell berücksichtigt:

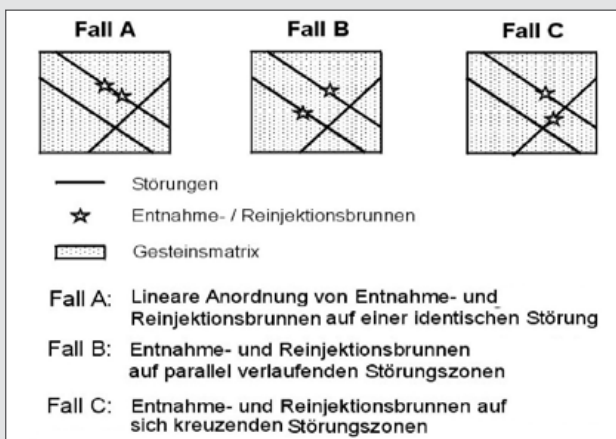


Abb. 6.1: Lagekonfigurationen für Dubletten

Ergebnisse des 3D-Lokalmodells

Die berechneten Auswirkungen auf die Druck- und Temperaturverhältnisse am Top Malm wurden für jeden Prognosefall im Endbericht grafisch dargestellt. Die Darstellungen zeigen den Verlauf der Isopotenzial- bzw. Isotemperaturlinien im Nahbereich der untersuchten Dublette, den Druck- und Temperaturverlauf zwischen Entnahme- und Reinjektionsbrunnen in Form von Schnittdarstellungen und den zeitlichen Verlauf der

Folgende die Betriebsweise geothermischer Anlagen bestimmende Prozessfaktoren wurden im Rahmen der Untersuchungen variiert:

- Volumenstrom (Entnahme- und Reinjektionsmenge pro Zeiteinheit)
- Reinjektionstemperatur
- Betriebsweise (jahreskonstante oder saisonale Entnahme)
- Abstand zwischen dem Entnahme- und dem Reinjektionsbrunnen
- Lage der Störung in Bezug auf die Entnahme- und die Reinjektionsbrunnen
- Reinjektion oberstromig der Entnahmebrunnen

Generell wurden die Berechnungen instationär für eine Betriebsdauer von 50 Jahren ausgeführt (derzeit angenommene technische Lebensdauer einer geothermischen Dublette). In einem Prognosefall wurde ein Betriebszeitraum von 2.000 Jahren simuliert, in zwei Prognosefällen Betriebszeiträume von 300 Jahren. Zusätzlich wurden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die systemrelevanten Parameter

- hydraulische Leitfähigkeit
- Porosität
- Wärmeleitfähigkeit
- Durchlässigkeitskontrast zwischen Gesteinsmatrix und Störungszonen im Höheren Malm variiert.

Die Variationsbreite der untersuchten Parameter orientierte sich an vorliegenden Messergebnissen sowie an Literaturangaben. Insgesamt wurden 39 Prognosefälle berechnet. Genauere Angaben zu den Prognosefällen finden sich in Beilage 3.

Temperaturausbreitung in den Entnahmebrunnen. Ergebnisse sind in Abb. 6.2 bis 6.5 exemplarisch dargestellt. Abb. 6.2 zeigt die Auswirkung unterschiedlicher Fördermengen auf die Temperaturverhältnisse im Malm nach 50 Jahren. Die für die beiden Lastfälle PF2 und PF6 dargestellten Isolinien zeigen für den Nahbereich der Dublette die berechnete Temperatur an der Malmoberfläche (Top Malm).

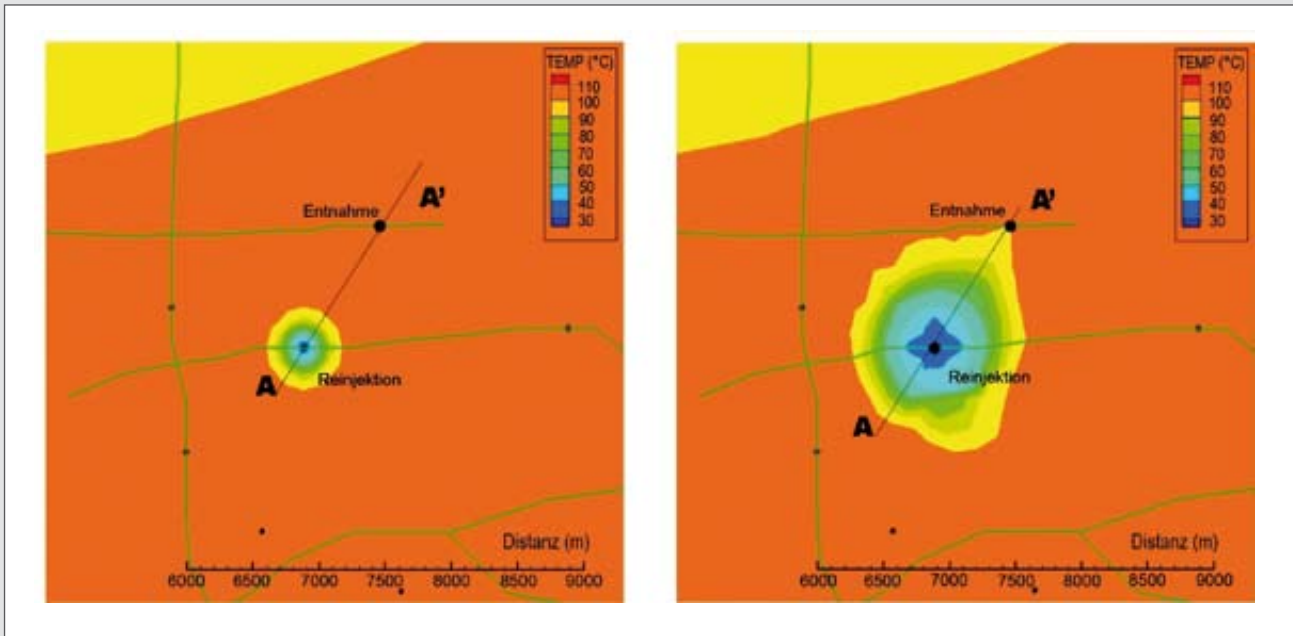


Abb. 6.2: *Temperaturausbreitung in den Lastfällen PF2 (Q=10 l/s) und PF6 (80 l/s) bei Reinjektionstemperatur von 30 °C und Entfernung der Brunnen von 1 km*

Zur Veranschaulichung ist in Abb. 6.3 zusätzlich der Temperaturverlauf in Höhe Top Malm zwischen Entnah-

me- und Reinjektionsbrunnen entlang der in Abb. 6.2 eingetragenen Profillinie A-A' dargestellt.

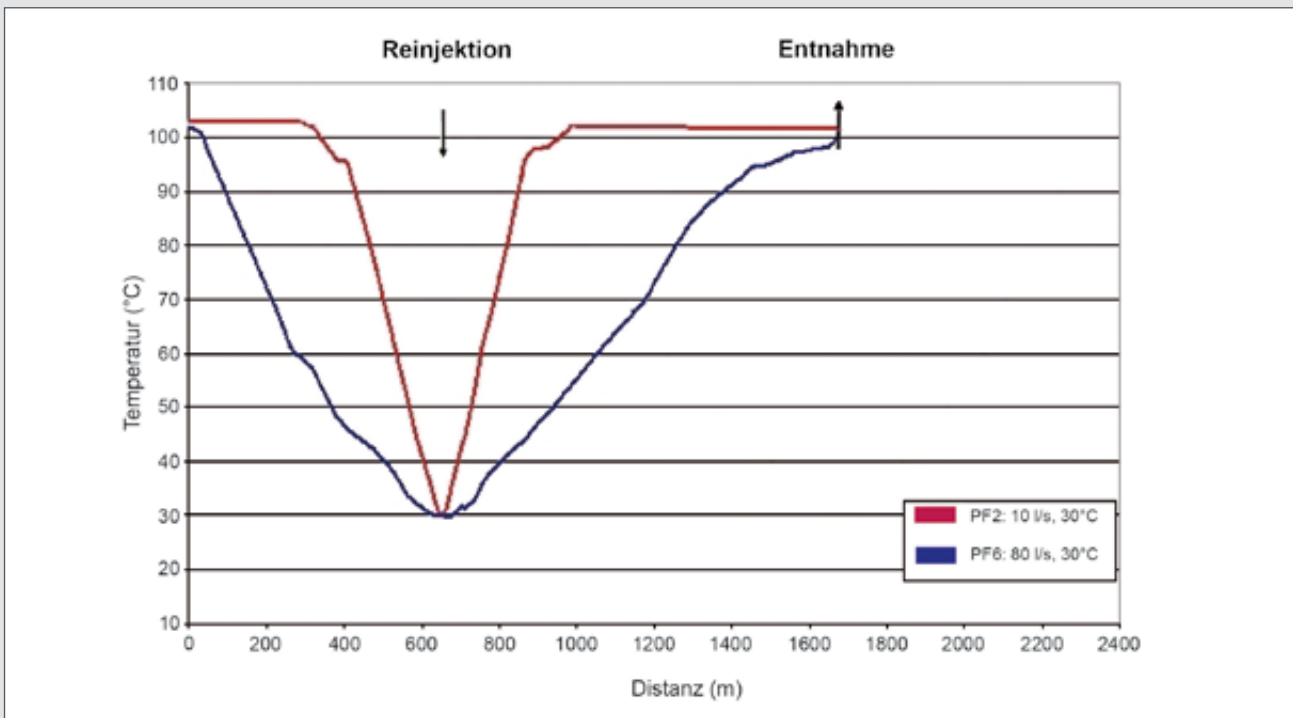


Abb. 6.3: *Berechnete Temperaturen an Top Malm entlang Profillinie A-A'*

Die hydraulischen Auswirkungen in den Lastfällen PF2 und PF6 sind in Abb. 6.4 für den Nahbereich der Dublet-

ten als Potenzialhöhen für Top Malm entlang der Profillinie A-A' dargestellt.

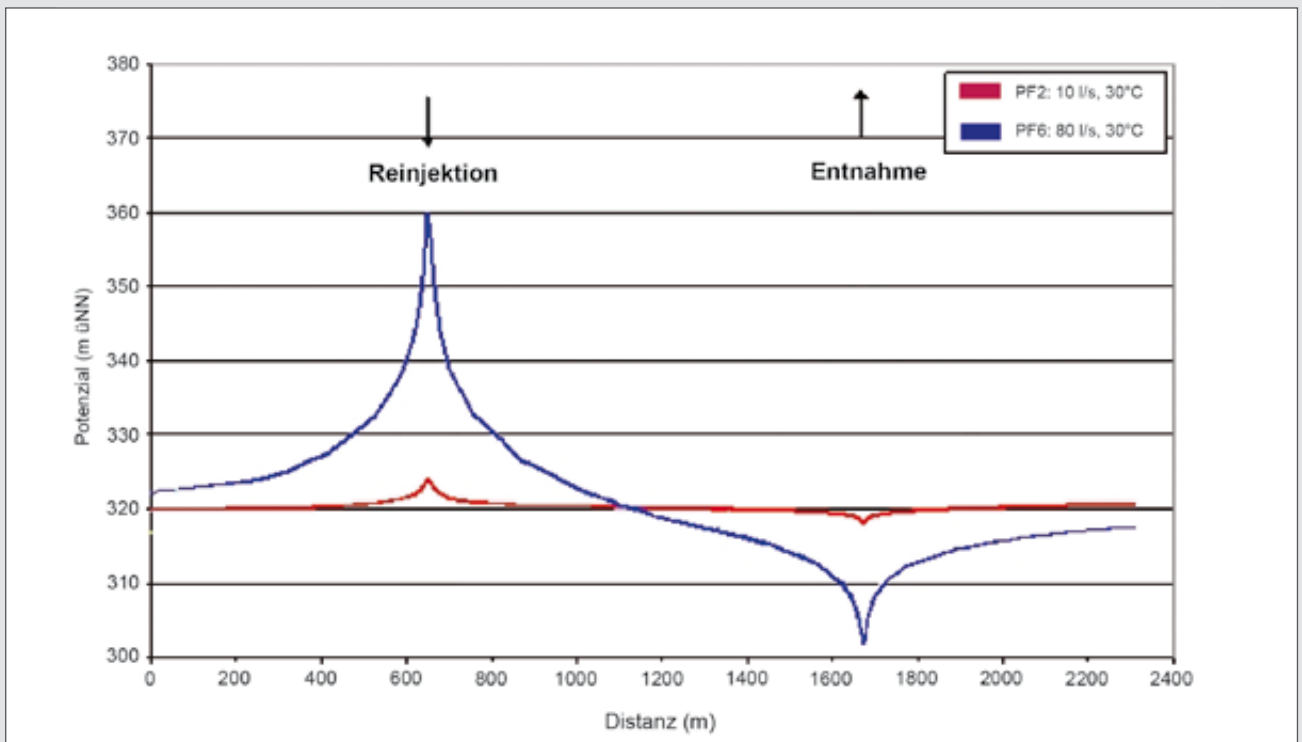


Abb. 6.4: Berechnete Potenzialhöhen an Top Malm entlang Profillinie A-A'

Zur Bewertung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturausbreitung wurden für alle Lastfälle Diagramme mit den berechneten Temperaturänderungen in den Entnahme-

brunnen erstellt. Abb. 6.5 zeigt dies beispielhaft für zwei Lastfälle mit unterschiedlichem Abstand zwischen Entnahme- und Reinjektionsbrunnen (PF22 und PF24).

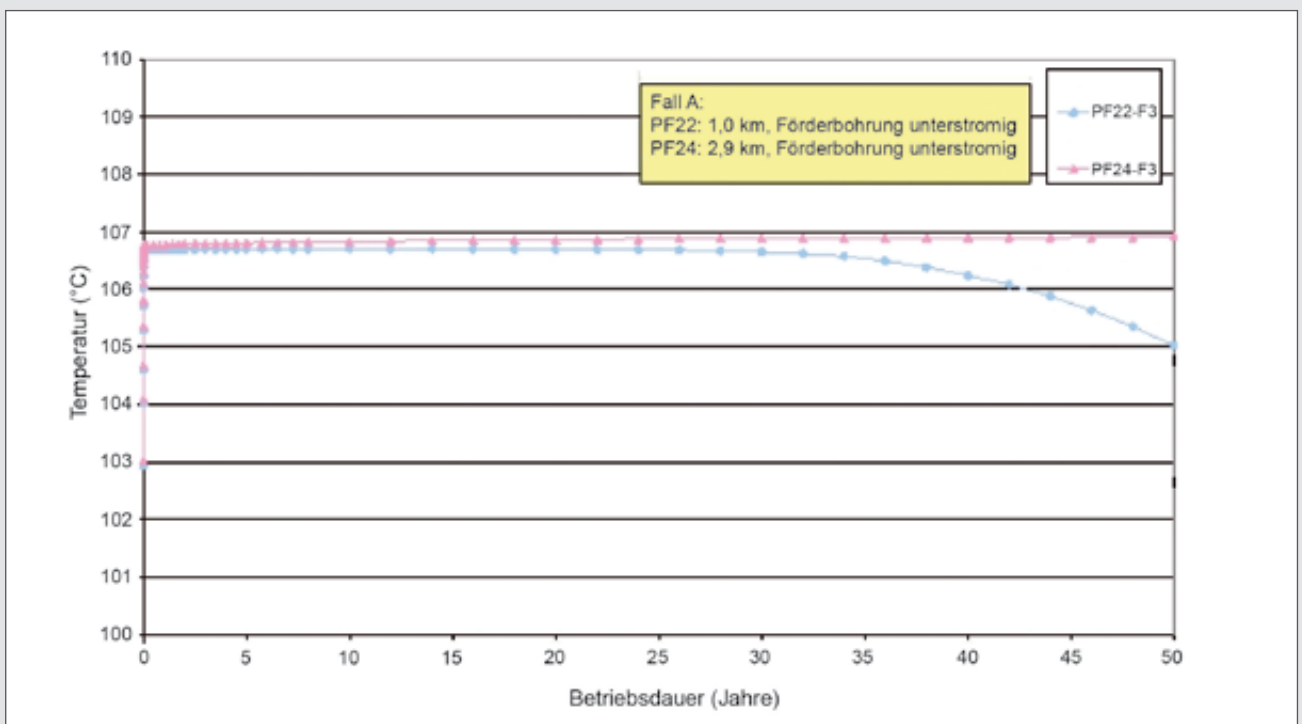


Abb. 6.5: Temperaturverlauf im Entnahmebrunnen; berechnet über 50 Jahre ($Q=80$ l/s, Reinjektionstemperatur 30 °C, unterschiedlicher Abstand zwischen Entnahme- und Reinjektionsbrunnen)

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen wurden hinsichtlich der genannten System- und Prozessfaktoren ausgewertet. Die Größe des Einflusses wurde wie folgt quantitativ bewertet:

GERING

Die Änderung eines bestimmten Faktors zeigt keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss auf das Temperatur- und/oder Druckverhalten.

MITTEL

Die Änderung eines bestimmten Faktors zeigt einen be-

reits merklichen Einfluss auf das Temperatur- und/oder Druckverhalten.

HOCH

Die Änderung eines bestimmten Faktors bestimmt maßgeblich das Temperatur- und/oder Druckverhalten.

Der Einfluss der einzelnen System- und Prozessfaktoren auf das Druck- und Temperaturverhalten in den Entnahme- und Reinjektionsbrunnen sowie auf die Ausdehnung des Absenkrichters im untersuchten Teilgebiet sind in Abb. 6.6 bis 6.9 dargestellt.

Hydraulische Auswirkungen

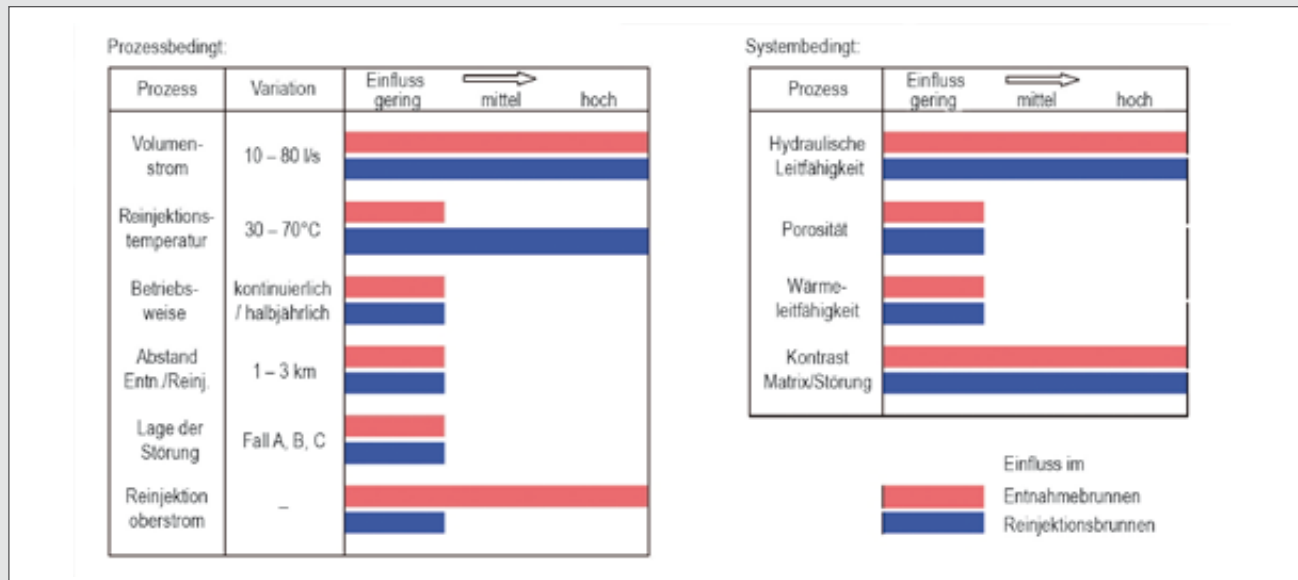


Abb. 6.6: Auswirkungen von System- und Prozessfaktoren auf die Potenziale in Entnahme- und Reinjektionsbrunnen

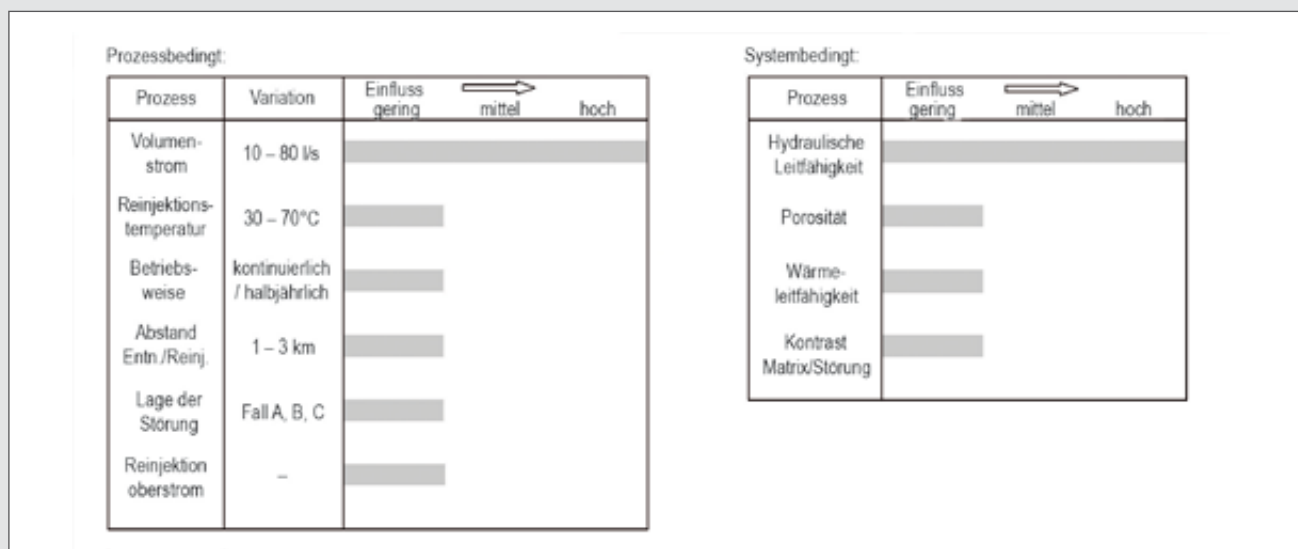


Abb. 6.7: Hydraulische Auswirkungen von System- und Prozessfaktoren auf die Größe (Reichweite) des durch die Entnahme beeinflussten Bereichs

Thermische Auswirkungen

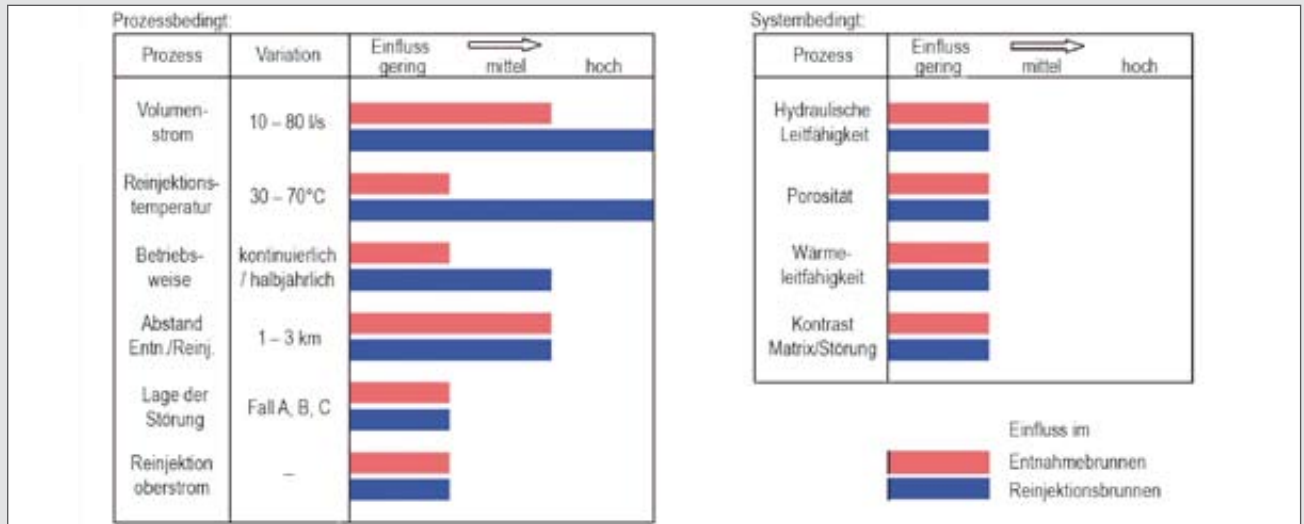


Abb. 6.8: Auswirkungen von System- und Prozessfaktoren auf die Temperatur in Entnahme- und Reinjektionsbrunnen

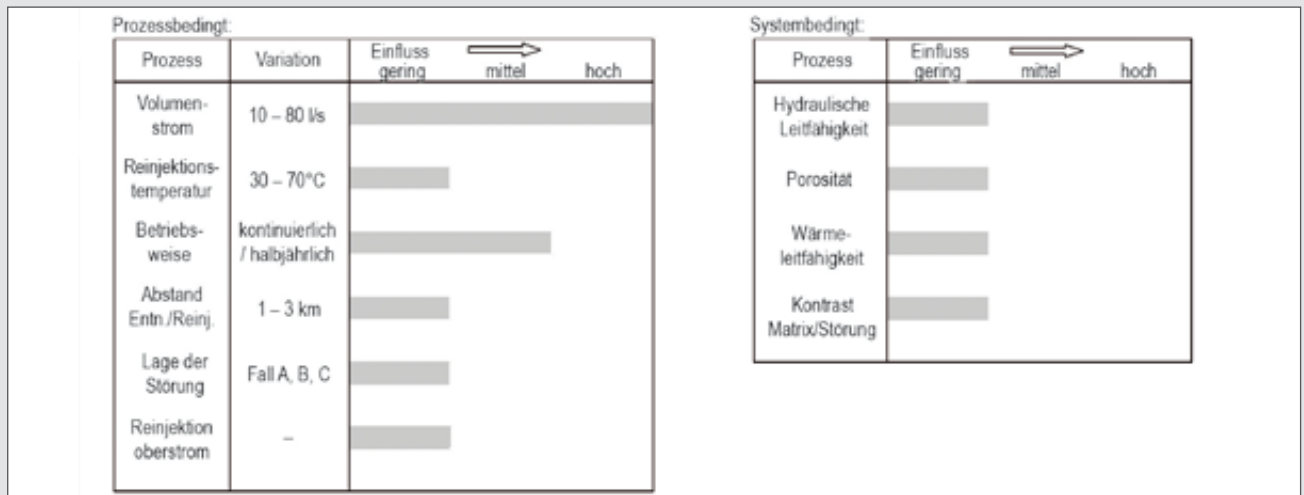


Abb. 6.9: Thermische Auswirkungen von System- und Prozessfaktoren auf die Größe (Reichweite) des durch die Reinjektion beeinflussten Bereichs

Unter den den Prognosefällen zugrunde liegenden Annahmen lassen sich aus den Abbildungen für das Teilgebiet folgende Schlüsse ableiten:

- Der Volumenstrom hat hohen Einfluss auf das Druckverhalten in den Entnahme- und Reinjektionsbrunnen. So dehnt sich die Abkühlungsfront um den Reinjektionsbrunnen bei Steigerung des Volumenstromes in annähernd linearem Verhältnis aus.
- Im Vergleich zu einer kontinuierlichen Betriebsweise einer Dublette hat eine saisonale Betriebsweise den gleichen Einfluss auf das Druckverhalten im Malmquifer. Die Temperaturentwicklung am Reinjektionsbrunnen verringert sich hingegen entsprechend der reduzierten jährlichen Betriebsdauer.
- Die Reinjektionstemperatur hat hohen Einfluss auf das Druck- und Temperaturverhalten im Reinjektionsbrunnen, dagegen nur eine geringe Auswirkung auf die räumliche Ausbreitung der Kaltwasserfront.

- Der Unterschied der Durchlässigkeit zwischen Gesteinsmatrix und Störung sowie die hydraulische Leitfähigkeit haben hohen Einfluss auf das Druckpotenzial in den Entnahme- und Reinjektionsbrunnen.
- Der Volumenstrom und die hydraulische Leitfähigkeit haben hohen Einfluss auf die Ausdehnung des durch die Entnahme beeinflussten Bereiches.
- Alle anderen System- und Prozessfaktoren haben im Wesentlichen einen geringen Einfluss auf das Druck- und Temperaturpotenzial in den Entnahme- und Reinjektionsbrunnen.

Die getroffenen Aussagen gelten nur für die mit dem 3D-Lokalmodell untersuchten Prognosefälle. Verallgemeinerungen und Rückschlüsse auf andere Bereiche des DETAILMODELL 1998 und auf andere als die untersuchten Betriebsweisen und Lagekonfigurationen der Entnahme- und Reinjektionsbrunnen sind nicht zulässig.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bereits im Jahre 1998 wurden in deutsch-österreichischer Zusammenarbeit für das Thermalwasservorkommen im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken ein Hydrogeologisches Modell und ein zweidimensionales Thermalwasser-Strömungsmodell (DETAILMODELL 1998) erstellt.

Mit diesem Modell ist es beiden Seiten möglich, die mit der Entnahme von Thermalwasser zusammenhängenden wasserwirtschaftlichen Fragen, wie die nach entnahmebedingten Veränderungen des Potenzials und der Wasserbilanz, auf einer fachlich gut abgesicherten Basis zu beurteilen. Die Ergebnisse sind geeignet, bestehende Nutzungen abzusichern und in einem wasserwirtschaftlich vertretbaren Maße zukünftige Nutzungen zu ermöglichen.

Die innerhalb des letzten Jahrzehnts insbesondere im grenznahen Bereich zunehmende Anzahl von Anträgen zur geothermischen Nutzung des Thermalwassers machte deutlich, dass nicht alle im Zusammenhang mit der Nutzung des Thermalwassers stehenden Fragen allein mit dem DETAILMODELL 1998 geklärt werden können.

2002 wurde in München ein internationaler Workshop abgehalten, um festzustellen, welche Fragen im Zusammenhang mit den Auswirkungen der thermischen Nutzung des Thermalwassers vordringlich geklärt werden sollten. Um auch zukünftig eine weitgehend nachhaltige Nutzung des Thermalwassers sicherstellen zu können, wurde empfohlen, eine Studie mit dem Ziel zu beauftragen, ein besseres Verständnis der grundlegenden thermisch-hydraulischen Zusammenhänge im niederbayerisch-oberösterreichischen Malmkarst zu erlangen.

Im Rahmen dieser Studie sollte genauer untersucht werden, in welchem Ausmaß ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und den die Grundwasserströmungsverhältnisse maßgeblich bestimmenden hydrogeologischen Parametern besteht und in welchem Maße eine Verminderung der Temperatur die herrschenden Druckverhältnisse beeinflusst. Auch sollte

der Frage nachgegangen werden, inwieweit die Menge und die Temperatur des reinjizierten Wassers sowie die Lage und die Entfernung zwischen den einzelnen Bohrungen die thermischen Verhältnisse im Untergrund beeinflussen können. Um diese Fragen zu klären, wurde jene Expertengruppe, die schon seinerzeit mit der Erstellung des DETAILMODELL 1998 befasst war, von der Ständigen Kommission nach dem Regensburger Vertrag beauftragt, ein thermisch-hydraulisch gekoppeltes Grundwassermodell in Auftrag zu geben und dessen Erarbeitung erneut fachlich zu begleiten.

Die vorliegende, von der Europäischen Union im Rahmen des INTERREG III A-Programms kofinanzierte Grundsatzuntersuchung "Thermische Auswirkungen von Thermalwassernutzungen im oberösterreichisch-niederbayerischen Innviertel" wurde von einer deutsch-österreichisch-schweizerischen Arbeitsgemeinschaft, der ARGE TAT, erstellt.

Das von der ARGE TAT entwickelte und angewandte thermisch-hydraulisch gekoppelte 3D-Lokalmodell baut auf den Ergebnissen des DETAILMODELL 1998 auf. Alle in der Zwischenzeit gewonnenen neuen Erkenntnisse wurden ausgewertet und in das Hydrogeologische Modell eingearbeitet.

Mit dem thermisch-hydraulisch gekoppelten 3D-Lokalmodell wurden 39 Prognosefälle untersucht. Die Ergebnisse geben Aufschluss, in welchem Umfang die Lage der Brunnen im Störungsfeld, die Entfernung der Brunnen voneinander und die Art, wie die Anlage betrieben wird (entnommene und reinjizierte Wassermenge, Temperaturdifferenz zwischen dem entnommenen und dem reinjizierten Thermalwasser) das Druck- und Temperaturverhalten im Malmaquifer bestimmen. In einigen Fällen wurde die Lage der Brunnen vorgegeben und die Betriebsweise variiert, in anderen Fällen wurde die Betriebsweise vorgegeben und die Lage der Brunnen variiert.

Die Berechnungen wurden über einen Zeitraum von 50 Jahren, der im Allgemeinen der technischen Lebensdauer einer Dublettenanlage entspricht, durchgeführt. Der Berechnung eines Prognosefalles lag ein Zeitraum von 2.000 Jahren, zwei anderen ein Zeitraum von 300 Jahren zugrunde.

Anhand der Modellergebnisse konnten Aussagen über den Einfluss einzelner System- und Prozessfaktoren auf das Temperatur- und Druckverhalten in den Entnahme- und Reinjektionsbrunnen und die Ausdehnung der Absenkrichter getroffen werden.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, wie sich Änderungen der Größe einzelner Systemfaktoren (Wärmeleitfähigkeit, Gesteinsporosität, hydraulische Leitfähigkeit der Gesteinsmatrix und der Störungen) auf das Druck- und Temperaturverhalten auswirken. Die Variationsbreite der Größe der untersuchten Parameter orientierte sich an gemessenen Werten und Angaben aus der Literatur. Überlagerungseffekte einzelner Faktoren auf das Druck- und Temperaturverhalten im Malmaquifer blieben im Rahmen der Studie unberücksichtigt.

Aus der nunmehr vorliegenden Grundsatzuntersuchung ergibt sich für die Expertengruppe „Thermalwasser“, dass

- ein besseres Verständnis der thermisch-hydraulischen Zusammenhänge im untersuchten Bereich erzielt werden konnte
- der Einfluss des Volumenstroms und der Reinjektionstemperatur einer Anlage auf das Druck- und Temperaturverhalten im Malmaquifer besser abgeschätzt werden kann
- sich die Reinjektionstemperatur weit weniger auf die Ausbreitung der Temperaturfront auswirkt als bisher angenommen
- während der Nutzungsdauer einer Dublette dem System mehr Energie entzogen als natürlich nachgeliefert wird; in welchem Ausmaß und Zeitraum die Regeneration der entzogenen Wärmemenge erfolgt, wurde im Rahmen des Projektes nicht abgeschätzt
- das Ausmaß der geothermischen Nutzung des Thermalwassers weniger von der vorhandenen Wärmemenge als vielmehr von der gewinnbaren Wassermenge begrenzt wird
- die vorhandene Wärmemenge unter den den Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen über einen

Literaturverzeichnis

Detailmodell zur Bilanzierung des Thermalwasservorkommens im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken – Endbericht, Geotechnisches Institut Prof. Dr. Schuler / Dr. Gödecke, Augsburg 1998

sehr langen Zeitraum geothermisch genutzt werden könnte

- Dubletten über Jahrzehnte betrieben werden können, ohne dass sich die regionalen Druck- und Temperaturverhältnisse im Malmaquifer signifikant ändern, wobei sich der Betrieb einer Dublette auf die Druckverhältnisse im Malmaquifer weiträumiger auswirkt als auf die Temperaturverhältnisse
- nach wie vor die Größenordnung einzelner Faktoren, die das hydraulische und thermische Verhalten im Malmaquifer bestimmen, nur abgeschätzt werden kann. Es wird daher bei der Planung und Ausführung von geothermischen Anlagen notwendig sein, diese Faktoren bestmöglich zu erfassen, die einem Projekt zugrunde liegenden Annahmen zu überprüfen und erforderlichenfalls anzupassen.

Anhand der vorliegenden Grundsatzuntersuchung können keine Aussagen darüber getroffen werden,

- wie sich der Betrieb einer Dublette auf den Betrieb benachbarter Thermalwassernutzungen auswirkt
- inwieweit die Ergebnisse der Studie auf das gesamte Thermalwasservorkommen im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken oder auf andere Grundwasserkörper übertragen werden können.

Die Tatsache, dass die vorliegende Studie initiiert und durchgeführt werden konnte, ist als deutliches Zeichen für die hohe Qualität der deutsch-österreichischen Zusammenarbeit im Rahmen der Bewirtschaftung des grenzüberschreitenden Thermalgrundwasserkörpers zu werten. Der durch diese Studie gewonnene Zuwachs an Erkenntnissen zeigt, dass sich die gemeinsamen Anstrengungen, auf deutscher und österreichischer Seite verbesserte Kenntnisse der thermisch-hydraulischen Zusammenhänge im Malmaquifer des niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebeckens zu erlangen, gelohnt haben. Die vorliegenden Ergebnisse werden in die Grundsatzpapiere, die die Grundlage für die Thermalwassernutzung im niederbayerisch-oberösterreichischen Molassebecken bilden, einzuarbeiten sein. Damit kann das gemeinsame Thermalwasservorkommen noch effizienter bewirtschaftet und besser geschützt werden.

ARGE TAT (J. Goldbrunner, B. Huber, T. Kohl und C. Baujard): Thermische Auswirkungen von Thermalwassernutzungen im oberösterreichisch-niederbayerischen Innviertel, Endbericht, Graz, Augsburg, Zürich 2007

Beilage 1

Bilanzabschnitt	Bereich	Fläche (km ²)	Hydraulische Leitfähigkeit (m/s)	Mächtigkeit (m)	Potenzial- differenz (m)	Breite (m)	Potenzial- gefälle (-)	Zu-/ Abstrom (l/s)
Vertikaler Austausch mit dem Hangenden (über Leakage)	Zustrom	425						0
	Abstrom Q ₂	100	2,1 • 10 ⁻⁷	300	-30			-20
	gesamt	525						-20
Mittlere Thermalwasserumsätze (2004)	Entnahme							-134
	Reinjektion							+ 99
	gesamt							-35
Horizontaler Randabstrom ins Ried-Schwanenstadt-Becken	Abstrom Q ₃		1,75 • 10 ⁻³	200		3.400	1,04 • 10 ⁻⁴	-123
Aufstieg aus dem Kristallin (über Leakage)	Zustrom Q _{1a}	175	2,1 • 10 ⁻⁷	3.000	10			123
	Zustrom Q _{1b}	160			5			56
	Zustrom Q _{1c}	190			0			0
	gesamt	525						

Tab. 1: Hydraulische Thermalwasserbilanz im Malm

Hydraulische Bilanzkomponente	Q (l/s)	Fläche (km ²)	Geschwindigkeit v _D = Q/F (m/s)	Mittlere Tiefe (m u. GOK)	Temperatur (°C)
Vertikaler Austausch mit dem Hangenden	Q ₃ 20	100	2,0 • 10 ⁻¹⁰		
Horizontaler Randabstrom	Q ₂ 123	0,68	1,81 • 10 ⁻⁷		
Aufstieg aus dem Kristallin	Q _{1a} 123	175	7,03 • 10 ⁻¹⁰	1200	70
	Q _{1b} 56	160	3,50 • 10 ⁻¹⁰	1500	85
	Q _{1c} 0	190	0	1800	100

Tab. 2: Thermische Bilanzierung – Eingangsgrößen

	Wärmeleitfähigkeit λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Schichtdicke Δz (m)	Mittlere Tiefe z (m u. GOK)	Fläche F (km ²)	Temperatur T (°C)
Oberfläche					10
Quartär	1	3,33	30	585	
Tertiär	2	2,70	1200	585	
Oberkreide	3	2,65	400	525	
Campan	3	2,97	200	1	75
Cenoman	4	2,97	30	525	80
Malm	5 + 6	2,93	400	525	90
Kristallin	7	3,21			
Ø im Hangenden des Malm		2,73			

Tab. 3: Thermische und geometrische Parameter der einzelnen geologischen Schichten

Hydrostratigrafische Einheit (Modellschicht)	Hydraulische Leitfähigkeit k_f ($m \cdot s^{-1}$)	Spezifischer Speicherkoeffizient S_s (m^{-1})	Wärmeleitfähigkeit λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Gesteinsporosität P (%)	Mittlere Wärmekapazität c_p ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)
Quartär (1)	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-10}$	3,3	20	$2,20 \cdot 10^6$
Tertiär (2)	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$	2,7	5	$2,15 \cdot 10^6$
Oberkreide (3) Campan (3)	$1 \cdot 10^{-9}$ $5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-7}$	3,0	20	$2,25 \cdot 10^6$
Cenoman (4)	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	3,0	15	$2,25 \cdot 10^6$
Höherer Malm (5)	$1 \cdot 10^{-5} - 8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	3,7	2	$2,30 \cdot 10^6$
Tieferer Malm (6)	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	2,9	2	$2,15 \cdot 10^6$
Kristallin (7)	$3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	3,2	1	$2,12 \cdot 10^6$

Tab. 4: Hydraulische und thermische Parameter des kalibrierten 3D-Regionalmodells

Beilage 2

Phase 1: Regionalmodell

1 Aufbau des 3D-Regionalmodells

Abgrenzung anhand der hydraulischen Grenzen des vorhandenen 2D-Modells

- Geometrie (horizontal, vertikal, Störungszonen)
- Diskretisierung
- Parameterzuordnung
- Randbedingungen

2. Kalibrierung des Regionalmodells

- Stationäre hydraulische Kalibrierung:

Verfügbare Datenbasis:

- Ruhepotenziale im Malm (vor Beginn der Förderung)
- Mittelwerte der Potenziale (Periode 1986-1996)
- Mittelwerte der Potenziale (Periode 2003)

Prüfung auf Stationarität: nur Szenario mit Ruhepotenzialen stationär

Kalibrierungsziel: Reproduktion der stationären Potenzialverteilung

- Instationäre hydraulische Kalibrierung:

Verfügbare Datenbasis: Potenziale an Thermen (Periode 1947- 2004)

Kalibrierungsziel: Reproduktion der zeitlichen Entwicklung der Potenziale

- Stationäre thermische Kalibrierung:

Verfügbare Datenbasis: Oberflächentemperatur (10 °C)

Temperaturmessungen an den Thermen

Ergebnis: Kalibriertes thermisch-hydraulisches 3D-Regionalmodell

Phase 2: Lokalmmodell

Aufbau des 3D-Lokalmmodells (Ausschnitt aus 3D-Regionalmodell)

- Geometrie (horizontal, vertikal, Störungszonen)
- Diskretisierung
- Parameterzuordnung
- Randbedingungen

Phase 3: Szenarienberechnung

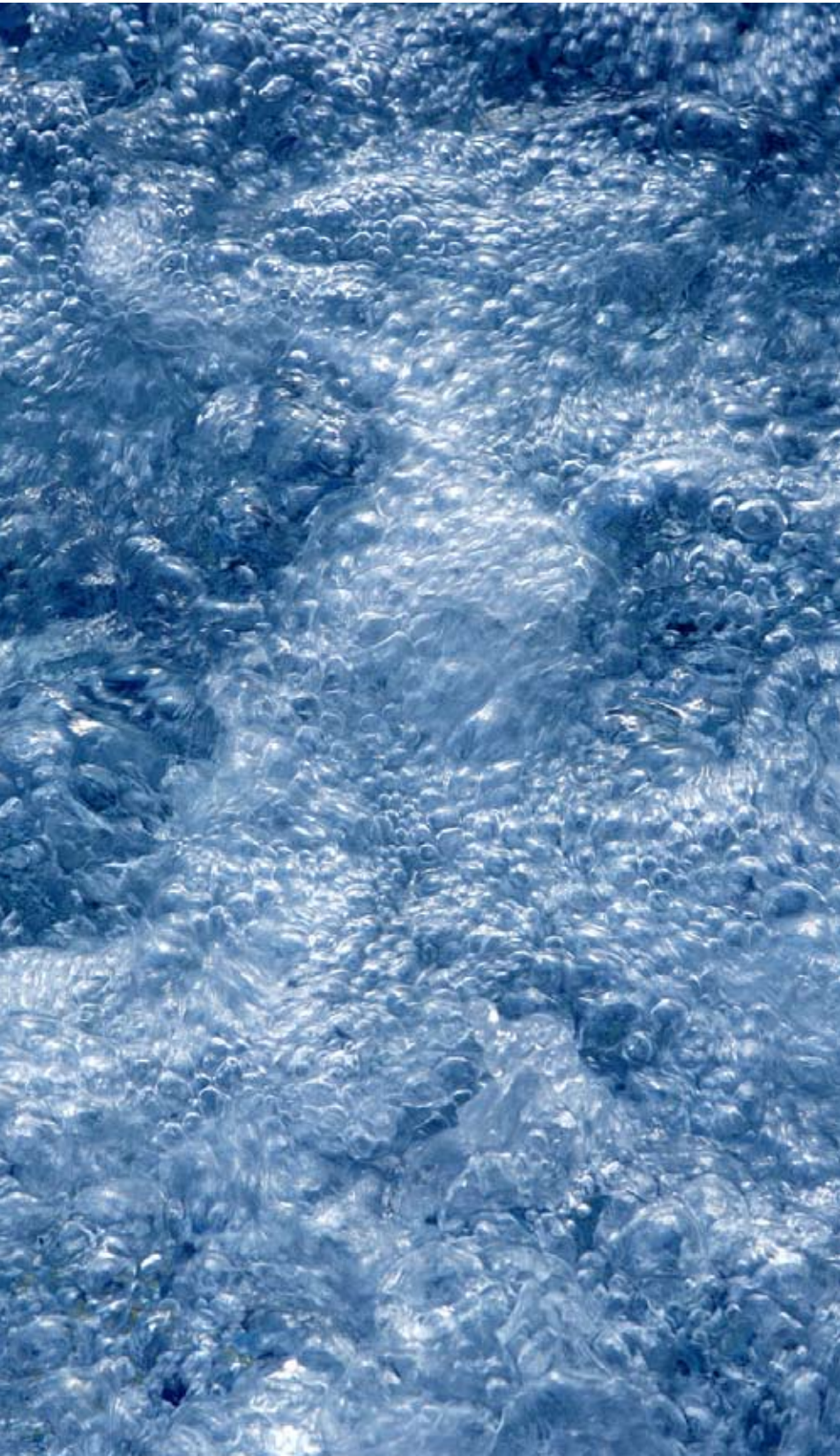
Auswahl von Szenarien (Lastfälle)

- Lokal angepasste verfeinerte Diskretisierung des Modellnetzes
- Festlegung der Randbedingungen bzw. Parameterkombinationen (hydraulisch - thermisch - hydrogeologisch)
- Berechnung der Lastfälle und Auswertung

Beilage 3

Prognosefall	Entnahmebrunnen		Reinjektionsbrunnen			Anordnung Entnahme- zu Reinjektionsbrunnen		Bemerkung	Zeitraum Jahre	
	Name	Q	Name	Q	T	Lage	Abstand			
Fall B: Entnahme- und Reinjektionsbrunnen auf parallel verlaufenden Störungen										
PF1	B 8	-10 l/s	B 6	10 l/s	30 °C	oberstromig	1 km	Förderung halbjährlich	50	
PF2					70 °C			Förderung halbjährlich		
PF3					70 °C			Förderung halbjährlich		
PF4					70 °C			Förderung halbjährlich		
PF5	B 8	-80 l/s	B 6	80 l/s	30 °C			Förderung halbjährlich		
PF6					70 °C			Förderung halbjährlich		
PF7					70 °C			Förderung halbjährlich		
PF8					70 °C			Förderung halbjährlich		
PF9	B 6	80 l/s	B 8	80 l/s	30 °C	unterstromig				
PF10	B 9	-10 l/s	B 7	10 l/s	30 °C	oberstromig	3 km			
PF11					70 °C	oberstromig				
PF12	B 9	-80 l/s	B 7	80 l/s	30 °C	oberstromig				
PF13					70 °C	oberstromig				
PF14	B 7	-80 l/s	B 9	80 l/s	30 °C	unterstromig				
Fall C: Entnahme- und Reinjektionsbrunnen auf sich kreuzenden Störungen										
PF15	B 4	-10 l/s	B 6	10 l/s	30 °C	oberstromig	1 km	50		
PF16					70 °C					
PF17	B 4	-80 l/s	B 6	80 l/s	30 °C	oberstromig	1 km			
PF18	B 6		B 4		unterstromig					
PF19	B 4	-80 l/s	B 7	80 l/s	30 °C	unterstromig	3 km			
PF20	B 7		B 4							
Fall A: Entnahme- und Reinjektionsbrunnen auf einer Störung										
PF21	B 4	-80 l/s	B 3	80 l/s	30 °C	oberstromig	1 km		50	
PF22	B 3		B 4			unterstromig				
PF23	B 5		B 3			oberstromig	3 km			
PF24	B 3		B 5			unterstromig				
PF25	B 6	-5 l/s	-	-	-	-	Balneologische Nutzung			
PF26	B 4	-80 l/s	B 3	80 l/s	15 °C	oberstromig	1 km	Reinjekt. Temp. <30 °C		
PF27				75 l/s	30 °C			Kombinierte Nutzung		
Fall B: Entnahme- und Reinjektionsbrunnen auf parallel verlaufenden Störungen										
PF28	B 8	-80 l/s	B 6	80 l/s	15 °C	oberstromig	1 km	Reinjekt. Temp. <30 °C		50
PF29				75 l/s	30 °C			Kombinierte Nutzung		
PF30	B 6	-80 l/s	B 8	80 l/s	30 °C	unterstromig	1 km	Förderung: Tiefer Malm, Reinjekt.: Höherer Malm		
Fall C: Entnahme- und Reinjektionsbrunnen auf sich kreuzenden Störungen										
PF19a	B 4	-80 l/s	B 7	80 l/s	30 °C	oberstromig	3 km		2.000	
PF19b1								Wärmeleitf. 1.7 W/(m K)	50	
PF19b2								Wärmeleitf. 5.0 W/(m K)	50	
PF19c1								Gesteinsporosität 13 %	50	
PF19c2								Gesteinsporosität 0,5 %	50	
PF19d1								Störungscontrast K = 100	300	
PF19d2								Störungscontrast K = 1		
PF19e1								$k_f = 1.0 \text{ E} - 05 \text{ m/s}$	50	
PF19e2								$k_f = 1.0 \text{ E} - 06 \text{ m/s}$		

Berechnete Prognosefälle



IMPRESSUM

Medieninhaber und Herausgeber:

Amt der Oö. Landesregierung
Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung Grund- und Trinkwasserwirtschaft
Kärntnerstraße 12, 4021 Linz
Tel.: (+43 732) 7720-12478
Fax: (+43 732) 7720-212662
E-Mail: gtw.post@ooe.gv.at

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
D-86179 Augsburg

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft
Stubenring 1, 1012 Wien

Projektleiter: Dipl.-Ing. Christian Kneidinger
Grund- und Trinkwasserwirtschaft

Projektbegleitung und Autoren:
Expertengruppe „Thermalwasser“
im Auftrag der Ständigen Kommission
nach dem Regensburger Vertrag:

für Österreich:
Dipl.-Ing. Christian Kneidinger
Mag. Michael Lunz
Dipl.-Ing. Michael Samek
Dipl.-Ing. Dr. Otto Vollhofer

für Deutschland:
Dipl.-Geol. Wolfgang Büttner
Dipl.-Ing. Karl Roth
Dipl.-Ing. Wolfgang Veit

Redaktion: Waltraud Dinges
Grund- und Trinkwasserwirtschaft
Öffentlichkeitsarbeit

Fotos: Franz Linschinger, Land OÖ

Grafik: Grund- und Trinkwasserwirtschaft
text.bild.media GmbH, Linz (732002)
Mag. art. Cornelia Wengler

Druck: OHA-Druck, Traun

Download: www.land-oberoesterreich.gv.at/Themen>Umwelt>Wasser>Grundwasser

www.lebensministerium.at

www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/thermalwassernutzung/index.htm

Erscheinungsdatum: Dezember 2008

Copyright:
Grund- und Trinkwasserwirtschaft