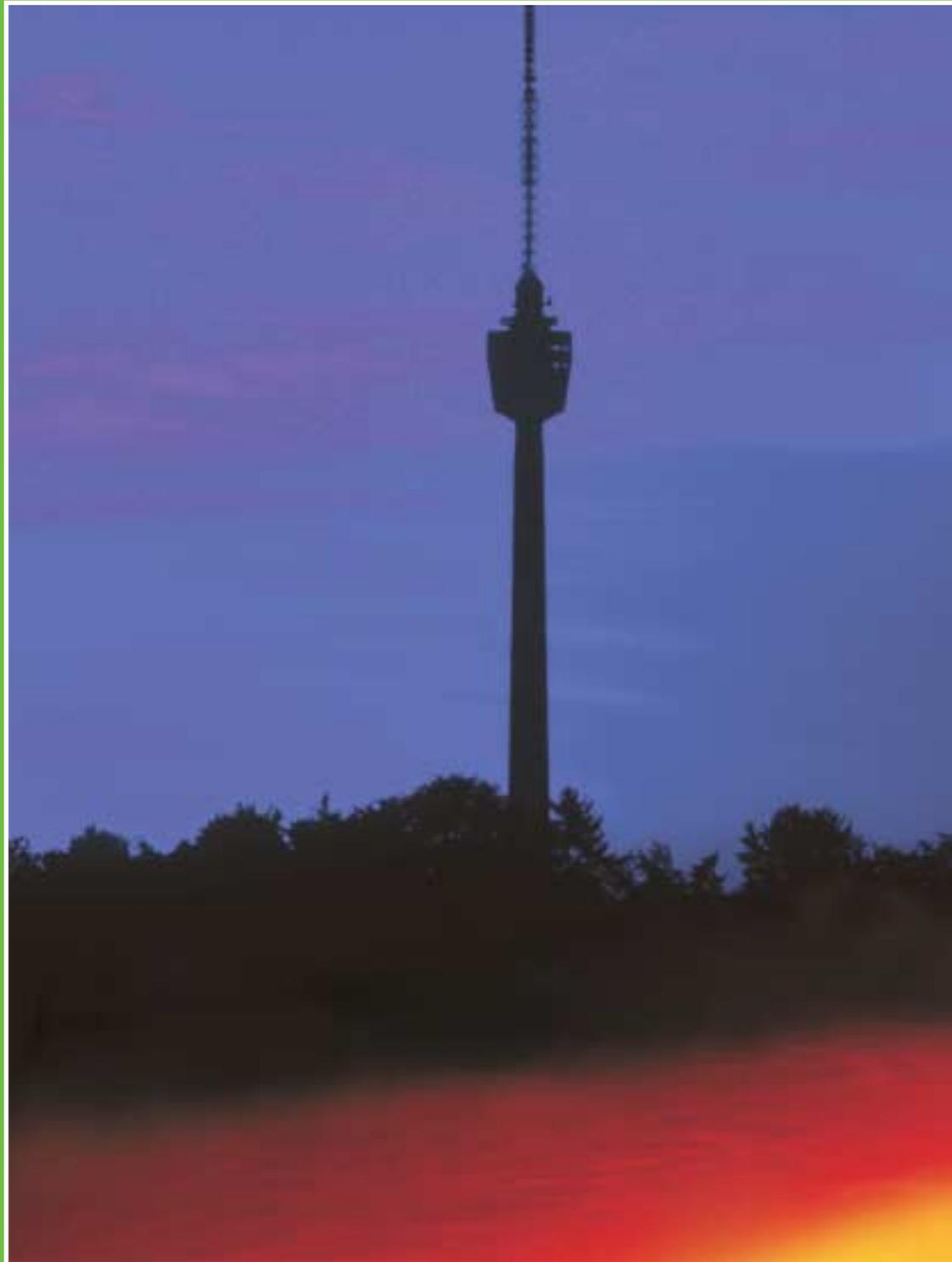


Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz - Heft 1/2005

Landeshauptstadt Stuttgart
Amt für Umweltschutz

Nutzung der Geothermie in Stuttgart



Impressum

Herausgeberin:

Landeshauptstadt Stuttgart,
Amt für Umweltschutz
Abteilung Immissions-, Bodenschutz-,
Wasserrechts- und Abfallrechtsbehörde

Bearbeitung:

Prof. Dr. Gerd Wolff und Nikolaus Hellenthal,
mit einem Beitrag von Dr. Volker Kienzlen (Kap. 10)

Redaktion:

Nikolaus Hellenthal

Gestaltung und Produktion:

media_projekt e.K, www.projekt-media.de

Schutzgebühr: 8,00 Euro
Stuttgart, März 2006

ISSN 1438-3918

Titelseite:

Fernsehturm Stuttgart mit
unterirdischem Lavastrom
(Bildmontage)

Nutzung der Geothermie in Stuttgart

Vorwort



Jürgen Beck
Bürgermeister



Joachim von Zimmermann
Stadtdirektor

Der Stuttgarter Untergrund ist ein natürlicher Energiespeicher. Aus ihm lässt sich in weiten Teilen des Stadtgebiets Heizenergie gewinnen. Oft herrscht aber auch in Gebäuden ein jahreszeitlicher Wärmeüberschuss, der in die Tiefe abgetragen werden kann. Insofern sind geothermische Nutzungen eine moderne Alternative in der Energiewirtschaft. Hierbei werden fossile Energievorräte geschont und Reststoffe vermieden.

Die thermischen Ressourcen im Untergrund sind in menschlichen Zeiträumen betrachtet unerschöpflich. Ihre Nutzung ist unter Umweltgesichtspunkten somit sehr nachhaltig. Dies gilt um so mehr, da diese Form der Energiegewinnung keinen Schadstoffausstoß verursacht und daher einen wichtigen Beitrag zur Luftreinhaltung und zum Klimaschutz leistet. Dies ist gerade in verkehrsreichen Ballungsräumen wie Stuttgart von hohem Stellenwert.

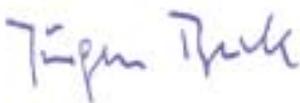
Einfamilienhäuser, Wohnanlagen bis hin zu gewerblichen Großkomplexen – immer mehr Gebäude in Stuttgart regeln ihren Wärmebedarf bzw. ihre Gebäudeklimatisierung über den Untergrund. Damit hat die Energieversorgung aus der Tiefe schon lange keinen Versuchscharakter mehr. Vielmehr zählen solche Objekte heute als Standardvorhaben, welche durch die Nutzung moderner Technik von klassischen Energieträgern und deren Preisentwicklung unabhängig sind.

Besonders wirtschaftlich sind Anlagen, bei denen die Leitungen zum Wärmetausch in unterirdischen Bauteilen oder in konventionellen Gründungskörpern eingebaut sind. Hier gibt es Synergieeffekte, weil ein Großteil des geothermischen Erschließungsaufwands über die ohnehin anfallenden Kosten der Gründung abgedeckt ist. Insofern ist diese Technologie in Stuttgart attraktiv, wo ein Großteil der innerstädtischen Vorhaben großflächig über mehrere Untergeschosse oder über Gründungskörper verfügt, die tief in den Untergrund einbinden.

Die Wirtschaftlichkeit geothermischer Nutzungen hängt aber nicht zuletzt von den geologischen Randbedingungen ab. So sind die Gesteine im Stuttgarter Untergrund und die örtlichen Grundwasserverhältnisse nicht überall gleich vorteilhaft. Sie gelten bereichsweise sogar als wenig günstig. Aus diesem Grund müssen Geologie und Grundwasser frühzeitig Gegenstand der Anlagenplanung und –dimensionierung sein - dies nicht zuletzt auch, um eine Überbewirtschaftung des Untergrunds zu vermeiden. Das ist unserer Meinung nach selbstverständlich, weil nur so Fehleinschätzungen und Enttäuschungen vermeidbar sind. Daher zählen für uns fundierte Vorüberlegungen und Wirtschaftlichkeitsprognosen zur Grundvoraussetzung einer soliden Planung.

Aus diesem Grund haben wir diesen Leitfaden erstellt. Er beschreibt den Stuttgarter Untergrund sowie dessen geothermische Nutzungseignung und zeigt die Grenzen einer verträglichen Bewirtschaftung auf. Gleichzeitig werden geologische Risiken geschildert, die zu Mehrkosten führen können. Wichtig ist auch der Hinweis, dass eine geothermische Energiegewinnung im Rahmen der gesetzlichen Bestimmungen in Stuttgart beinahe flächendeckend zulässig ist. Dies gilt unter Einhaltung bestimmter Auflagen sogar im Heilquellenschutzgebiet, auf die hier besonders eingegangen wird.

Der Leitfaden soll das Interesse an der unterirdischen Energiegewinnung wecken. Er ist für Vorhabensträger, Planer und Sachverständige gleichermaßen hilfreich, weil er Anhaltspunkte liefert, in welchen Bereichen geothermische Nutzungen unter welchen Voraussetzungen Erfolg versprechend sind. Gleichzeitig findet man Hinweise zur Antragstellung, welche die Projektabwicklung maßgeblich erleichtern und beschleunigen. Nicht zuletzt bekennt sich die Stadt mit diesem Leitfaden zu einem modernen Energiemanagement, das die Umwelt schont und das über eine wirtschaftliche Zukunft verfügt.



Jürgen Beck
Bürgermeister



Joachim von Zimmermann
Stadtdirektor

Inhaltsverzeichnis

Seite

| | |
|--|----|
| Impressum | |
| Vorwort | |
| Inhaltsverzeichnis | |
| Abbildungsverzeichnis | |
| Tabellenverzeichnis | |
| Abbildungsverzeichnis (Anlagen) | |
| Tabellenverzeichnis (Anlagen) | |
| | |
| 1. Einführung | 11 |
| | |
| 2. Geologie und Hydrogeologie | 12 |
| 2.1 Schichtenfolge und Tektonik | 13 |
| 2.2 Hydrogeologische Gliederung | 13 |
| 2.3 Geologisch- hydrogeologisch sensible Bereiche | 16 |
| 2.3.1 Ungünstige Gebirgsverhältnisse | 16 |
| 2.3.2 Grundwassersensibilitäten | 22 |
| 2.3.2.1 Schutzgebiet der Heilquellen von Stuttgart-Bad Cannstatt und -Berg | 22 |
| 2.3.2.2 Trinkwasserschutzgebiete | 25 |
| 2.3.2.3 Trink- und Brauchwasserfassungen ohne Wasserschutzgebiet | 26 |
| | |
| 3. Geothermie | 27 |
| 3.1 Oberflächennahe Geothermie | 27 |
| 3.2 Tiefe Geothermie | 27 |
| 3.2.1 Nutzung hydrogeothermischer Systeme (Hydrogerothermie) | 28 |
| 3.2.2 Nutzung petrophysikalischer oder hydrothermaler Systeme – geothermische Spezialverfahren | 28 |
| | |
| 4. Wasserwirtschaftliche Risiken bei der Erschließung der oberflächennahen Geothermie | 29 |
| | |
| 5. Geothermische Situation in Stuttgart | 31 |
| 5.1 Eignung des Stuttgarter Untergrundes für die Erschließung der oberflächennahen Geothermie | 31 |
| 5.2 Geothermische Nutzungsbereiche in Stuttgart | 36 |
| | |
| 6. Erschließung der oberflächennahen Geothermie | 38 |
| 6.1 Technische Erschließungsformen und wasserwirtschaftliche Anforderungen an deren Herstellung | 38 |
| 6.1.1 Erdwärmekollektoren | 38 |
| 6.1.2 Erdwärmesonden | 39 |
| 6.1.3 Energiepfähle | 44 |
| 6.1.4 Energiegewinnung durch erdberührte Betonbauteile | 46 |
| 6.1.5 Wärmepumpen mit Grundwasserbrunnen | 47 |
| 6.1.6 Geothermische Nutzung von Tunnelbauwerken | 48 |
| 6.1.7 Allgemeine Anforderungen und Druckprüfung | 48 |
| 6.2 Anlagenbetrieb | 49 |
| 6.2.1 Art der geothermischen Nutzung | 49 |
| 6.2.2 Betriebsformen | 50 |
| 6.2.3 Anforderungen an den Betrieb | 51 |
| 6.2.3.1 Wärmeträgermedien und Lecküberwachung | 51 |
| 6.2.3.2 Thermische Bewirtschaftung des Untergrundes | 52 |
| 6.2.3.3 Prognosen und Monitoring von Temperatureinflüssen im Untergrund | 54 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| 7. | Überwachung, Schichtenaufnahme und Dokumentation | 57 |
| 8. | Rechtsgrundlagen | 58 |
| 8.1 | Bergrecht | 58 |
| 8.2 | Wasserrecht | 59 |
| 9. | Anzeige- /Antragsunterlagen | 62 |
| 10. | Energiewirtschaftliche Hinweise | 63 |
| 11. | Hinweise zur Planung | 65 |
| 12. | Zusammenfassung | 67 |
| 13. | Literatur | 69 |
| 14. | Anlagen | 71 |
| Anlage 1 | Wasserwirtschaftliche Anforderungen | 71 |
| Anlage 1.1 | Wasserwirtschaftliche Anforderungen an technische Ausführung und Betrieb | 71 |
| Anlage 1.2 | Zulässige Bohrtiefen bei geothermischen Erschließungen im Oberen Muschelkalk | 73 |
| Anlage 2 | Checkliste für Antragsunterlagen (z.B. Erdwärmesonden und Energiepfähle) | 74 |
| Anlage 3 | Praxisbeispiele | 75 |
| Anlage 3.1 | Altenwohnanlage Rohrer Höhe | 76 |
| Anlage 3.2 | Rosenpark Residenz in Stuttgart-Vaihingen | 78 |
| Anlage 3.3 | Bürogebäude Südleasing Stuttgart, Teilgebiet A1.14, Städtebauprojekt Stuttgart 21 | 80 |
| Anlage 3.4 | Kronen-Carre | 82 |
| Anlage 4 | Prognosebeispiel (Modellfall) | 84 |
| Anlage 4.1 | Prognose der Wärmeausbreitung im Untergrund für einen Energiepfahl | 84 |
| Anlage 4.2 | Prognose der Wärmeausbreitung im Untergrund für ein Energiepfahlfeld | 85 |
| 15. | Glossar | 86 |
| 16. | Abkürzungen | 88 |

Abbildungsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| Abb. 1 <i>Geologischer Schichtenaufbau in Stuttgart (nach UFRECHT 2003)</i> | 12 |
| Abb. 2 <i>Stratigraphie und hydrogeologische Stockwerksgliederung in Stuttgart (nach UFRECHT 2003 & WOLFF 2004)</i> | 14 |
| Abb. 3 <i>Hydraulische Kurzschlüsse und deren Auswirkungen (nach WOLFF 2004)</i> | 15 |
| Abb. 4 <i>Karstgrundwasserstockwerke im Oberen Muschelkalk (nach UFRECHT 2002); ku = Unterkeuper, mo = Oberer Muschelkalk, mo2D = Trigonodus-Dolomit, mo1H = Hassmersheimer Schichten, mm = Mittlerer Muschelkalk, mmDo = Obere Dolomite im Mittleren Muschelkalk, mmS = Salinar des Mittleren Muschelkalks</i> | 17 |
| Abb. 5 <i>Hydrogeologische Einheiten in Stuttgart (nach UFRECHT 2003)</i> | 18/19 |
| Abb. 6 <i>Mineralwasseranomalien im Cannstatter Becken (WOLFF & UFRECHT 1998)</i> | 23 |
| Abb. 7 <i>Hydrogeologischer Schnitt durch das Cannstatter Becken (nach WOLFF & UFRECHT 1998); Schnittführung s. Abb. 6</i> | 24 |
| Abb. 8 <i>Das Stuttgarter Heilquellenschutzgebiet (WOLFF 2004)</i> | 25 |
| Abb. 9 <i>Gliederung des Heilquellenschutzgebiets im Nesenbachtal (WOLFF 1999)</i> | 26 |
| Abb. 10 <i>Erdwärme und deren Nutzung</i> | 28 |
| Abb. 11 <i>Eiskeilbildung als Folge des Frostbetriebs</i> | 30 |
| Abb. 12 <i>Geothermische Tiefenstufe im Raum Stuttgart</i> | 32 |
| Abb. 13 <i>Grundwasserdruckverhältnisse im Oberen Muschelkalk (Zeichnung W. UFRECHT); GWmo = Grundwasser im Oberen Muschelkalk, ku = Unterkeuper, mo = Oberer Muschelkalk</i> | 34 |
| Abb. 14 <i>Sulfatgesteinsauslaugung im Gipskeuper (Zeichnung W. UFRECHT)</i> | 35 |
| Abb. 15 <i>Geothermische Nutzungsbereiche in Stuttgart</i> | 36 |
| Abb. 16 <i>Erdwärmekollektoranlage im Bauzustand (Aufnahme: W. Schenk)</i> | 38 |
| Abb. 17 <i>Erdwärmesonde (Detailaufnahmen: Fa. Zent-Frenger/Terrasond, H. Weyersberg)</i> | 40 |
| Abb. 18 <i>γ-log für einen (zusätzlich gekernten) Profilabschnitt vom Unterjura bis zu den Estherienschiefern des Gipskeupers (stratigraphische Abkürzungen s. Abb. 2)</i> | 41 |
| Abb. 19 <i>Hydrochemischer Charakter des Grundwassers im Oberen Muschelkalk</i> | 43 |
| Abb. 20 <i>Armierungskorb mit eingebundenen Wärmeträgerrohren</i> | 44 |
| Abb. 21 <i>Pfahlkopf mit Rohrbündel</i> | 44 |
| Abb. 22 <i>Bauplan Bewehrung (Zeichnung: Fa. Zent-Frenger)</i> | 45 |
| Abb. 23 <i>Anschluss Pfahl an Bodenplatte (Zeichnung: Fa. Zent-Frenger)</i> | 45 |
| Abb. 24 <i>Bewehrungskorb Energieschlitzwand (Aufnahme: Fa. Zent-Frenger)</i> | 46 |
| Abb. 25 <i>Absorbersysteme in offenem (links) und bergmännischem (rechts) Tunnel (nach W. WITTKÉ)</i> | 48 |
| Abb. 26 <i>Saisonale Temperatursignale geothermischer Nutzungen (schematisch) im abströmenden Grundwasser</i> | 50 |

| | | |
|----------------|--|----|
| Abb. 27 | <i>Betriebsspezifische saisonale Temperaturschwankungen im Untergrund (schematisch)</i> | 53 |
| Abb. 28 | <i>Grenzen thermischer Grundwassernutzungen und Einstufung nutzungsbedingter Temperatureinflüsse im Grundwasser (Beispiele typischer Temperaturkurven: A = tolerabel und unbedeutend; B = noch tolerabel, aber bedeutend; C = Überbewirtschaftung = untolerabel)</i> | 56 |
| Abb. 29 | <i>Vorgehen bei der Planung geothermischer Nutzungsanlagen</i> | 66 |

Tabellenverzeichnis

| | Seite | |
|---------------|--|-------|
| Tab. 1 | <i>Charakterisierung der hydrogeologischen Einheiten in Stuttgart (nach UFRECHT 2003)</i> | 20/21 |
| Tab. 2 | <i>Geothermische Daten im Raum Stuttgart (z.T. nach PRESTEL & SCHLOZ 2002); km1GG = Grundgipsschichten, kuGD = Grenzdolomit, ku = Unterkeuper, mo = Oberer Muschelkalk, s = Buntsandstein, g = Gneise oder Granite des Grundgebirges</i> | 31 |
| Tab. 3 | <i>Bandbreiten der gesteinspezifischen Wärmeleitfähigkeit in Stuttgart (in Anlehnung an VDI 4640); exakte Werte müssen bei der Erkundung vor Ort gemessen werden</i> | 33 |
| Tab. 4 | <i>Tiefenbegrenzung für flächenhafte Eingriffe in der Innenzone; GWmo = Grundwasser im Oberen Muschelkalk; * gilt für punktuelle Aufschlüsse unabhängig von der Höhenlage des GWmo</i> | 47 |
| Tab. 5 | <i>Beispiele für geeignete Wärmeträgermittel außerhalb von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten</i> | 52 |
| Tab. 6 | <i>Genehmigungspraxis bei oberflächennaher Erschließung von Erdwärme</i> | 58 |
| Tab. 7 | <i>Wasserrechtliche Tatbestände</i> | 60/61 |

Abbildungsverzeichnis (Anlagen)

| | Seite | |
|-----------------|--|----|
| Anl. 3.1 | <i>Altenwohnanlage Rohrer Höhe</i> | 76 |
| Anl. 3.2 | <i>Perspektivdarstellung Wohnanlage Rosenpark Residenz (Zeichnung: Fa. Häussler AG) Sondenkopf, mit Schachtring gesichert Einbringen der Sonde</i> | 78 |
| Anl. 3.3 | <i>Bürogebäude Südleasing Stuttgart Pfahlkopfreihen</i> | 80 |
| Anl. 3.4 | <i>Bürogebäude Kronen-Carre (Aufnahme: Sparkassenversicherung Stuttgart) Herstellung Energiebodenplatte (Aufnahme: Fa. Zent-Frenger)</i> | 82 |
| Anl. 4.1 | <i>Prognose der Wärmeausbreitung im Untergrund für einen Energiepfahl</i> | 84 |
| Anl. 4.2 | <i>Prognose der Wärmeausbreitung im Untergrund für ein Energiepfahlfeld</i> | 85 |

Tabellenverzeichnis (Anlagen)

| | Seite |
|---|-------|
| Anl. 1.1 <i>Wasserwirtschaftliche Anforderungen an technische Ausführung und Betrieb</i> | 71/72 |
| Anl. 1.2 <i>Zulässige Bohrtiefen bei geothermischen Erschließungen im Oberen Muschelkalk</i> | 73 |
| Anl. 2 <i>Checkliste Antragsunterlagen für Erdwärmesonden und Energiepfähle</i> | 74 |

1. Einführung

Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie gewinnt in Mitteleuropa zunehmend an Bedeutung. In der Schweiz wird mittlerweile jeder vierte Neubau mit einer erdgekoppelten Wärmepumpenanlage ausgestattet. Nach neueren Schätzungen (LANDTAG BADEN-WÜRTTEMBERG 2005) wurden in Baden-Württemberg seit 1998 ca. 2.300 geothermische Nutzungsanlagen errichtet, wobei allein im Jahr 2004 über 600 neue Anlagen hinzukamen.

Auch in Stuttgart ist bei der Nutzung der oberflächennahen Geothermie als regenerative Energiequelle in den letzten Jahren ein deutlicher Zuwachs zu verzeichnen. Spitzenreiter unter den oberflächennahen geothermischen Erschließungsformen sind hier die **Erdwärmesonden** (EWS). In Stuttgart wurden seit 1998 rund zwei Dutzend Anlagen erstellt, die zusammen weit über 100 EWS zählen und deren Gesamtlänge rund 10 km beträgt.

Hinzu kommt, dass die Zahl der beim Amt für Umweltschutz eingehenden Anfragen sich häufen, so dass hier mittelfristig mit einem deutlichen Zuwachs zu rechnen ist. Die Spanne der bislang realisierten Vorhaben reicht von der Warmwasserversorgung eines Einfamilienhauses bis hin zur Heizung bzw. Kühlung von Bürogebäuden oder Wohnkomplexen.



Daneben gibt es auch Bauvorhaben, bei denen technische Alternativen zur Erdwärmesonde wie z.B. **Energiepfähle** oder **erdberührte Betonbauteile** zum Einsatz kommen. Für andere Erschließungsformen, wie z.B. die geothermische Nutzung von Tunnelbauwerken, könnten sich bei einem weiteren Anstieg der Rohstoffpreise interessante Perspektiven ergeben.

In der vorliegenden Broschüre wird aufbauend auf einer ausführlichen Beschreibung der in Stuttgart vorherrschenden geologisch-/hydrogeologischen Verhältnisse auf die Eignung der Stuttgarter Untergrundverhältnisse für geothermische Nutzungen eingegangen. Ferner werden die oben genannten Erschließungsformen beschrieben und deren mögliche Auswirkungen auf das Grundwasser bzw. die Heilquellen sowie die hieraus erwachsenden Anforderungen dargestellt. Weitere Schwerpunkte bilden die bei der geothermischen Nutzung relevanten rechtlichen Grundlagen sowie das Vorgehen bei Planung und Genehmigung entsprechender Anlagen.

Ziel der Broschüre ist es, Vorhabensträger, Planer und Sachverständige zu informieren und ihnen Anhaltspunkte zu liefern, mit denen die Anlagen den Anforderungen entsprechend geplant und sorgfältig kalkuliert werden können.

2. Geologie und Hydrogeologie

Das Relief der Erdoberfläche wird im Wesentlichen vom geologischen Aufbau (**Abb.1**) bestimmt. Besonders der Wechsel zwischen widerstandsfähigen und weicheren Gesteinen sowie die Schichtlagerung prägen das typische Bild unserer Schichtstufen-

landschaft. Hierbei haben der Verlauf der Oberflächengewässer (Vorfluter) und die Abfolge unterschiedlich durchlässiger Schichtabschnitte maßgeblichen Einfluss auf die Stuttgarter Grundwasserverhältnisse.

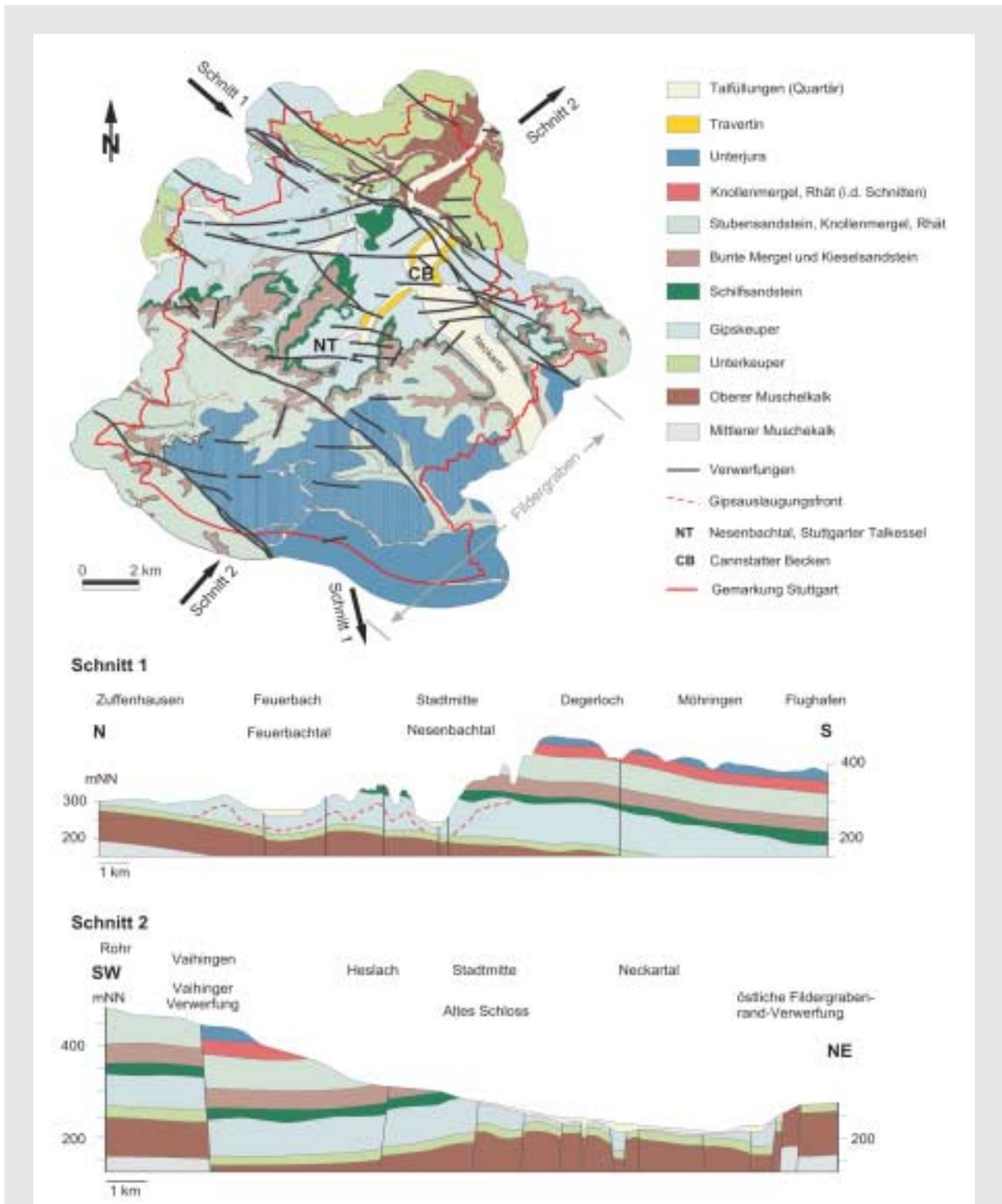


Abb. 1: Geologischer Schichtenaufbau in Stuttgart (nach UFRECHT 2003)

2.1 Schichtenfolge und Tektonik

Nahe der Erdoberfläche sind **quartäre Lockergesteine** ganz unterschiedlicher Entstehung und Zusammensetzung verbreitet: Löss und Lösslehm auf der Filderhochfläche, Keuperschutt und –fließerden an den Talhängen sowie Terrassen- und Talkiese im Neckartal. Gleichzeitig findet man dort, wie auch im Grund der übrigen Täler, Auenlehme und sandige Bachablagerungen.

Die in Stuttgart über Tage erschlossene Abfolge an **Festgesteinen (Abb. 2)** ist etwa 350 bis 400 m mächtig. Sie repräsentiert einen erdgeschichtlichen Zeitausschnitt von etwa 40 Mio. Jahren und setzt zu oberst mit dem **Unterjura** ein. Er bildet die Filderhochfläche und besteht aus einer Wechsellagerung von dunklen Ton-, Mergel- und Kalksteinen. Hinzu kommen die im mittleren Teil typischen Kalksandsteine. Darunter schließt die bunte **Keuperabfolge** an. Sie bildet die Hänge um Botnang und Feuerbach bis hin zum Stuttgarter Talkessel sowie die Hänge beiderseits des Neckars zwischen Münster und Hedelfingen. Im Oberkeuper und im Mittleren Keuper wechseln sich Tonsteinserien und Sandsteinkomplexe ab. Untergeordnet treten auch Dolomitsteine und einzelne Karbonatbänke auf. Kennzeichnend für den Bereich des Gipskeupers sind Sulfatgesteine (Gips, Anhydrit), die im Einflussbereich von Grund- und Niederschlagswässer infolge ihrer hohen Löslichkeit jedoch meist ausgelaugt sind. Der Unterkeuper besteht aus einer Abfolge von Ton- und Dolomitsteinen. Die anderenorts typischen Unterkeuper-sandsteine sind in Stuttgart durch sandige Tonsteine ersetzt. Daran schließt der klüftig-kavernöse Trigonodus-Dolomit, der bereits zum **Oberen Muschelkalk** zählt, an. Zur Tiefe folgen verkarstete Kalkstei-

ne der Nodosus-Schichten. Sie sind die ältesten Gesteine, die auf Stuttgarter Gemarkung ausstreichen. Man findet sie vorrangig in tektonischer Hochlage nördlich des Fildergrabens. Dort bildet die Muschelkalk/Unterkeuper-Verebnung die Hochflächen beiderseits des Neckartals.

Die Schichtenfolge im tieferen Untergrund von Stuttgart ist aus Bohrungen bekannt. Diese reichen beim Mineralbad Cannstatt und am Vogelsang bis in den **Mittleren** bzw. **Unteren Muschelkalk**. Den tiefsten Einblick gewährt die Bohrung der Hofrat-Seyffer-Quelle, welche noch den **Buntsandstein** und **Rotliegendes** durchfahren hat und im **kristallinen Grundgebirge** endet.

Die Erdkruste ist bis heute tektonischen Spannungen ausgesetzt. Diese werden im festen Gebirge durch **Schichtverbiegungen** oder durch **Brüche** mit horizontalem und/oder vertikalem Versatz ausgeglichen (**Abb. 1**). Die Störungssysteme des 10-14 km breiten **Fildergrabens**, der von SE nach NW gerichtet ist, bestimmen die großtektonische Situation auf Stuttgarter Gemarkung. Die teils mehr als 100 m abgesenkte Grabenscholle ist zusätzlich durch Begleit- und Querstörungen zergliedert. Besonders beansprucht sind die Gesteine in den Bereichen, wo sich tektonische Elemente kreuzen. Dort sind sie infolge starker Zerschering auch besonders wasserdurchlässig. An solchen markanten Strukturen steigen im Cannstatter Becken lokal Mineralwässer aus der Tiefe bis in die Talaue bzw. bis in den Neckar auf.

2.2 Hydrogeologische Gliederung

Geologischer Aufbau, tektonische Prägung, Morphologie und Lage der Vorfluter haben maßgeblichen Einfluss auf die örtlichen Grundwasserverhältnisse. Bestimmte Locker- und Festgesteine bilden in Stuttgart Grundwasserleiter (Aquifere), die sich nach Durchlässigkeit und Speichervermögen wie folgt unterscheiden:

Die quartären **Lockergesteine** zählen zu den **Porengrundwasserleitern**. Dabei sind die bindigeren Bach- und Wanderschuttablagerungen geringdurchlässig, die Kiese im Neckartal eher durchlässig.

Die **Festgesteinsfolge** vom Unterjura bis zum Unterkeuper gehört zu den **schichtig gegliederten Kluftgrundwasserleitern**. Ausnahme hiervon ist der Gipskeuper.

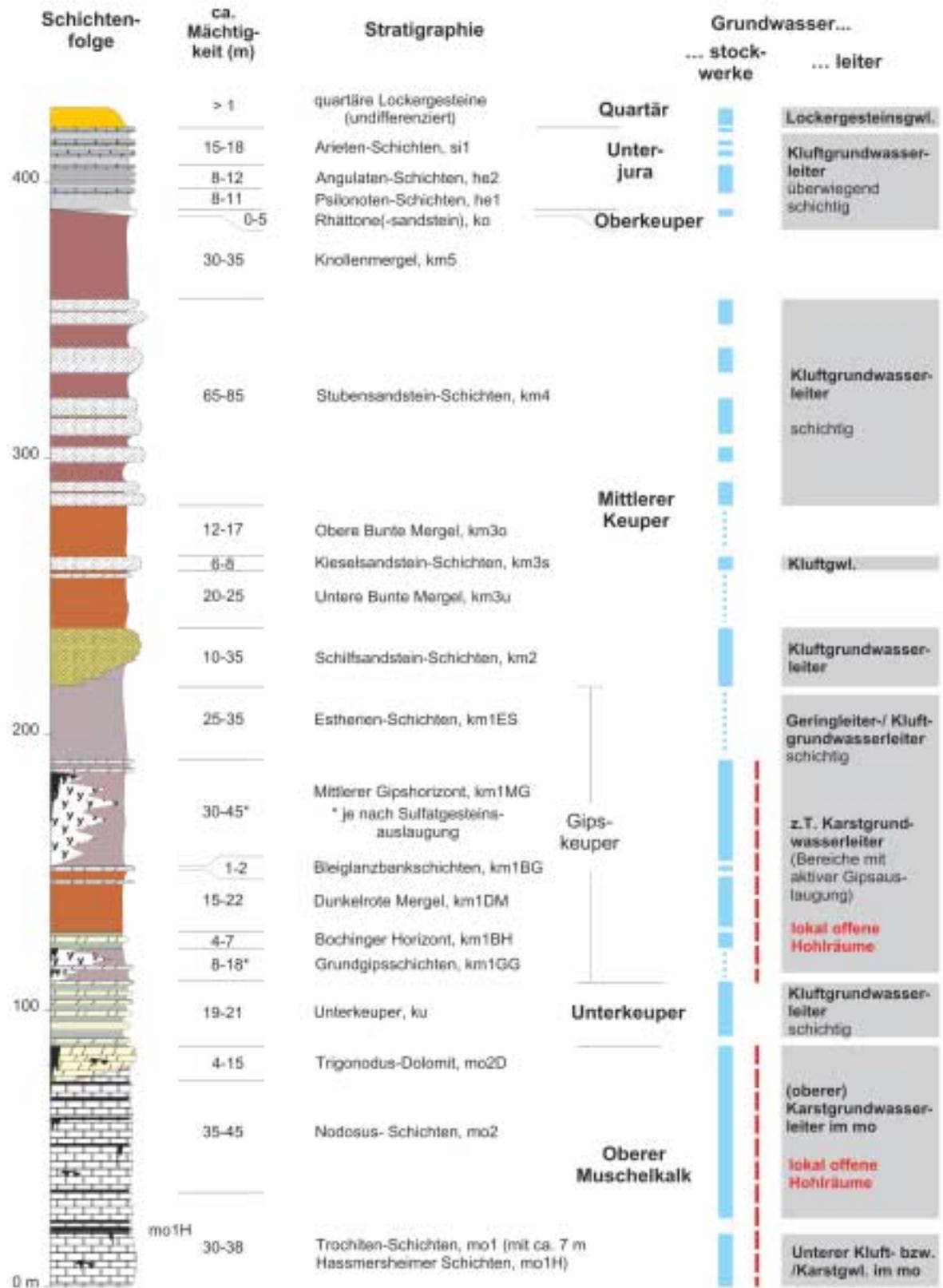


Abb. 2: Stratigraphie und hydrogeologische Stockwerksgliederung in Stuttgart (nach UFRECHT 2003 & WOLFF 2004)

Er hat je nach Auslaugungs- und Verwitterungsgrad unterschiedlichen Charakter. Im Bereich der Gipsauslaugungsfront fließt das Wasser über offene Subrosionshöhlräume. Demzufolge herrschen hier Karstverhältnisse. Bereits ausgelagte, sulfatgesteinsfreie Bereiche des Gipskeupers wirken in weniger verwittertem Zustand dagegen noch als Kluftgesteine. Mit fortschreitender Verwitterung und Entfestigung geht hier, wie auch in den übrigen Tonsteinsolgen des Keupers, das Trennflächengefüge zunehmend verloren. Dann weisen diese veränderlich festen Gesteine eigenständige Aquifereigenschaften auf, mit denen sie sich von den typischen Festgesteinen abheben. Der Obere Muschelkalk ist ein klassischer **Karstgrundwasserleiter**. Hier ist das Trennflächengefüge infolge der Karbonatlösung vielerorts korrosiv erweitert.

Die Schichtenfolge in Stuttgart gliedert sich durch den vertikalen Wechsel grundwasserleitender und –geringleitender Gesteine in verschiedene **Grundwasserstockwerke (Abb. 2)**.

Man erkennt die Abfolge von Grundwasserstockwerken an unterschiedlichen Piezometerhöhen und/oder Unterschieden in der Hydrochemie. Die reguläre Stockwerkstrennung kann an natürlichen oder künstlichen Wegsamkeiten (z.B. tektonische

Störungszonen, Dolinen, unsachgemäß ausgebaute Brunnen, nicht verschlossene Bohrlöcher) örtlich aufgehoben sein. Dann korrespondieren die Grundwasserstockwerke hydraulisch untereinander (**Abb. 3**). Bei fallenden Druckgradienten verliert das höherliegende Stockwerk Wasser in die Tiefe. Im Fall zur Tiefe hin steigender Gradienten ist die interaktive Grundwasserbewegung entgegen der Schwerkraft gerichtet, sodass tiefere Stockwerke in höherliegende Aquifere einspeisen.

Obwohl aufeinanderfolgende Grundwasserstockwerke vergleichsweise gut differenzierbar sind, ist die Zuordnung der hydraulischen Trennschichten oft schwierig. Meist lassen sie sich stratigraphisch nur ungefähr erfassen. Dennoch sind sie ein wichtiger Schutz für die tieferen Grundwasservorkommen, denn sie wirken als vertikale Barriere gegen Stoffeinträge und Grundwasserabflüsse. Damit es zu keinen dauerhaften Beeinträchtigungen im örtlichen Grundwasserhaushalt kommt, muss die natürliche Stockwerksgliederung aufrecht erhalten bleiben. Aus diesem Grund müssen bei technischen Eingriffen in den Untergrund oft Vorkehrungen zum Schutz des Grundwassers (z.B. Abdichtungen) getroffen werden.

Die für Stuttgart typischen Grundwasserverhältnisse

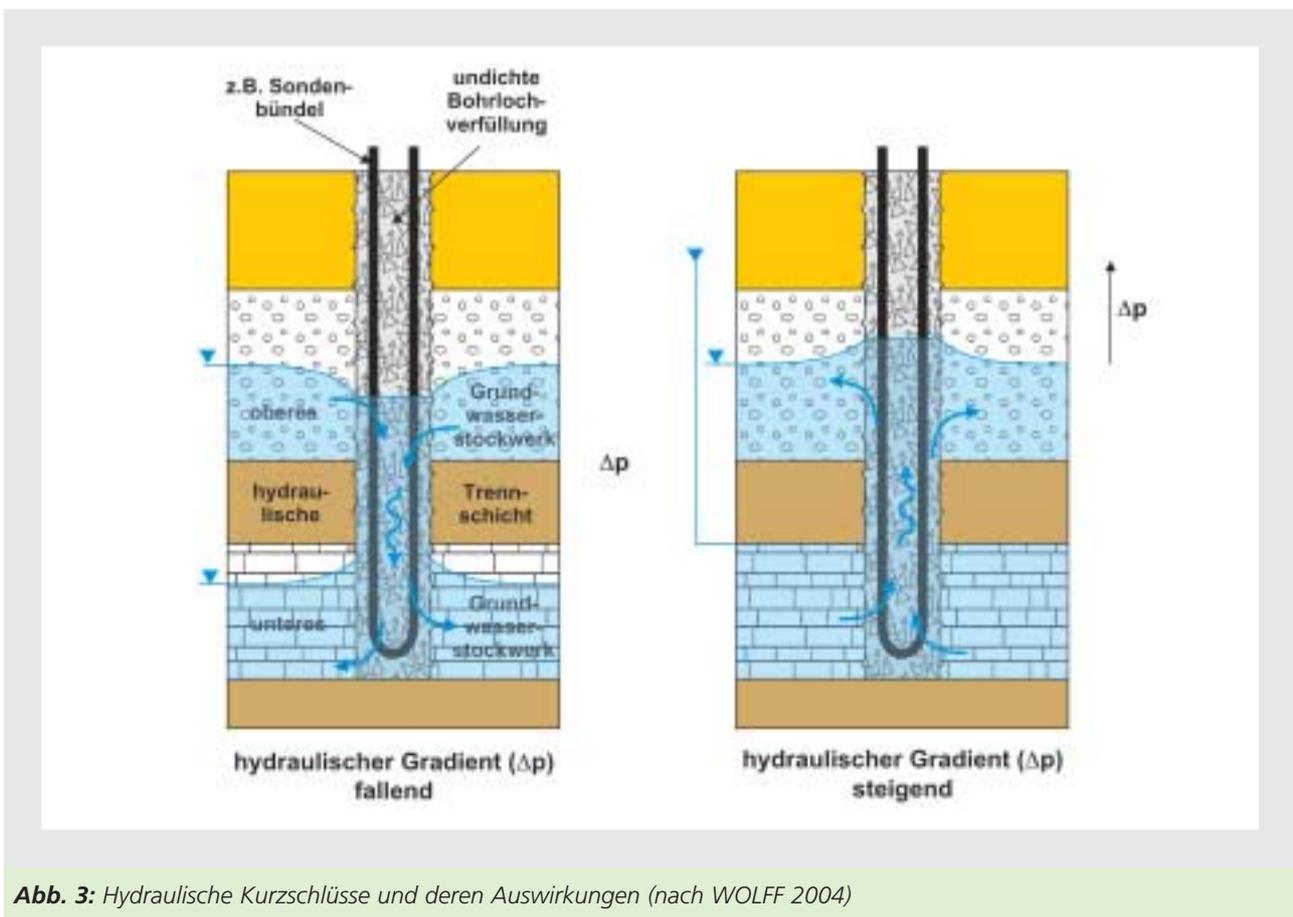


Abb. 3: Hydraulische Kurzschlüsse und deren Auswirkungen (nach WOLFF 2004)

lassen sich nach geologisch-morphologischen Gesichtspunkten vereinfacht in 6 **hydrogeologische Einheiten** einteilen (**Abb. 5, Tab. 1**). Sie verdeutlichen die landschaftsspezifischen Wechselwirkungen zwischen Vorflut, Geologie und Grundwas-

ser, die für die wasserwirtschaftliche Beurteilung von Eingriffen, die ins Grundwasser reichen (z.B. Bauwerke, Brunnen, geothermische Erschließungsanlagen usw.), bedeutsam sind.

2.3 Geologisch-hydrogeologisch sensible Bereiche

Die örtlichen Untergrund- bzw. Grundwasserverhältnisse sind im Hinblick auf tiefe Eingriffe unterschiedlich empfindlich. Dies gilt auch für die technische Erschließung der Erdwärme. Bestimmte Bereiche sind besonders anfällig gegenüber stofflichen Einträgen (genutzte Grundwasservorkommen, Gebiete mit geringmächtigen Deckschichten und/oder hohen Gebirgsdurchlässigkeiten, Verunreinigungen im oberflächennahen Grundwasser usw.). Dabei zählt

das Einzugsgebiet der Stuttgarter Heilquellen zunächst als grundsätzlich sensibel. Ob und in welchem Umfang es hier zu Konflikten kommen kann, hängt im Wesentlichen von der Tiefenreichweite der geothermischen Erschließungsanlage ab.

2.3.1 Ungünstige Gebirgs- und Grundwasserverhältnisse

Die Energieausbeute ist im grundwasserführenden Untergrund günstiger als im Trockenem. Bei tiefen Eingriffen (z.B. EWS, Energiepfähle) lässt es sich meist kaum vermeiden, dass die unterirdischen Wärmetauscher über mehrere Grundwasserstockwerke in die Tiefe reichen. In solchen Fällen gilt es, hydraulische Kurzschlüsse über Längsläufigkeiten entlang des Bohrlochs und/oder der Wärmeträgerrohre zu verhindern. Deshalb muss der Ringraum um die Wärmeträgerrohre sorgfältig abgedichtet werden (**Kap. 6.1.2**).

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht herrschen überall dort ungünstige Verhältnisse, wo das Gebirge **sehr wasserdurchlässig** ist und/oder gar **Hohlräume** enthält. Dort kann im Ringraum keine durchgehende Zementdichtung aufgebaut werden, weil der flüssig eingebrachte Zement gewöhnlich nicht zum Stehen kommt und seitlich ins Gebirge abfließt. Für eine Erschließung ungeeignet sind die **Abfolgen ergiebigerer Grundwasserstockwerke** (z.B. oberes und unteres Karstwasserstockwerk im Oberen Muschelkalk, **Abb. 4**), zwischen denen ein Grundwasseraustausch auftreten kann. Bei einem hydraulischen Kurzschluss droht hier beim **Abfließen des Grundwassers** vom einen zum anderen Stockwerk eine Ausspülung der Zementsuspension, sodass der Aufbau einer Abdichtung unmöglich ist. Sofern dann aus technischen Gründen (z.B. zu enge Ringraumweiten, Brückenbildung) auch der Versuch einer Kieshinterfüllung scheitert, gibt es Bohrlochabschnitte, in denen die Wärmeträgerrohre mehr oder

weniger frei im Bohrloch hängen und schutzlos mechanischen Beanspruchungen (z.B. Nachbrüche, Sackungen) ausgesetzt sind. Aber selbst bei einer erfolgreichen Hinterkiesung fehlt in diesen Abschnitten die notwendige Abdichtung, so dass im Fall von Leckagen die Wärmeträgerflüssigkeit ungehindert ins Gebirge bzw. ins Grundwasser austreten kann. In jedem Fall wird aber über derartige Stockwerkverbindungen dauerhaft und unerwünscht Grundwasser entsprechend dem Druckgefälle in ein anderes Stockwerk abfließen.

Für die Bohr- und Ausbauarbeiten gilt **nicht standfestes Gebirge** als problematisch. Hier können die gebräuchlichen Schichtabschnitte oft nur noch durch den Einbau einer Schutzverrohrung technisch beherrscht werden. Alternativ kann auch versucht werden, das Gebirge durch eine Zementation zu stabilisieren. Das gelingt aber aus vorgenannten Gründen nicht immer. In jedem Fall kostet dieser zusätzliche technische Aufwand Zeit und Geld. Sofern das Bohrloch nicht aufgegeben werden soll, kann auf diese Maßnahmen jedoch kaum verzichtet werden, weil ansonsten Beschädigungen der Wärmeträgerrohre schon beim Einbau wahrscheinlich sind und damit das Risiko von Flüssigkeitsverlusten in das Grundwasser groß ist.

Derartig ungünstige Gebirgsverhältnisse sind überall dort zu erwarten, wo der Gesteinsverband infolge von **Bruchtektonik** zerschert und zerrüttet ist (z.B. Verwerfungssystem des Fildergrabens). Weitere

Auflockerungszonen findet man im Bereich eingestürzter Dolinen im Gipskeuper. Hier gibt es vereinzelt sogar noch Hohlräume im Untergrund, die v.a. bei **aktuell** stattfindender **Gipsauslaugung** aktiv Wasser führen und/oder wenig standsicher sind. **Offene Hohlräume und Dolinen** sind auch aus dem **Oberen Muschelkalk** bekannt. Hier lösen Verkarstungsprozesse Einbrüche aus, die sich – speziell im Einflussbereich hochkonzentrierter Wässer im

Oberen Muschelkalk - auch auf die Deckschichten des Muschelkalks erstrecken können, so dass Unterkeuper oder sogar Gipskeuper mit verstützt sind.

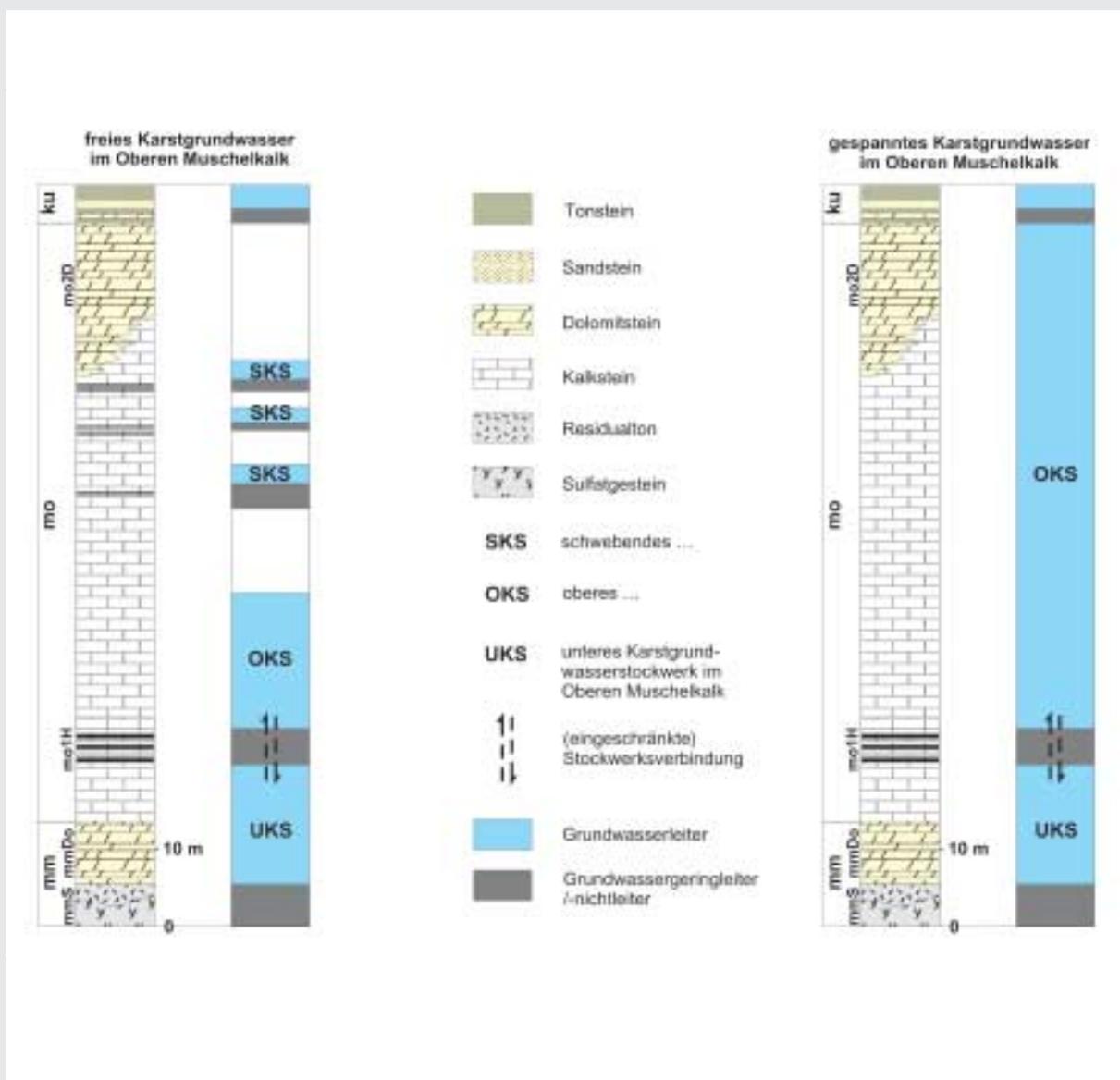


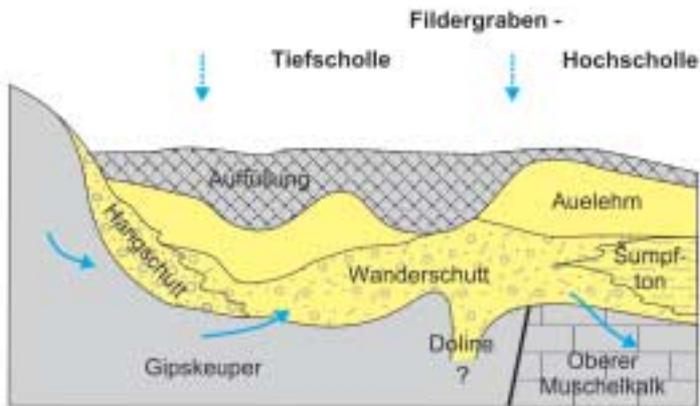
Abb. 4: Karstgrundwasserstockwerke im Oberen Muschelkalk (nach UFRECHT 2002);

ku = Unterkeuper, mo = Oberer Muschelkalk, mo2D = Trigonodus-Dolomit,

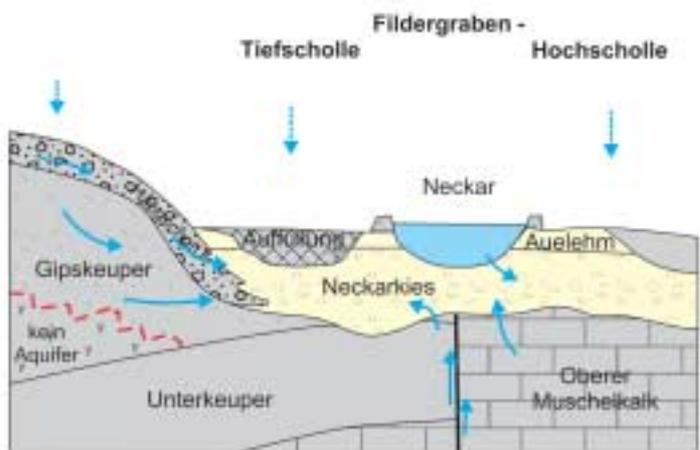
mo1H = Hassmersheimer Schichten, mm = Mittlerer Muschelkalk,

mmDo = Obere Dolomite im Mittleren Muschelkalk, mmS = Salinar des Mittleren Muschelkalks

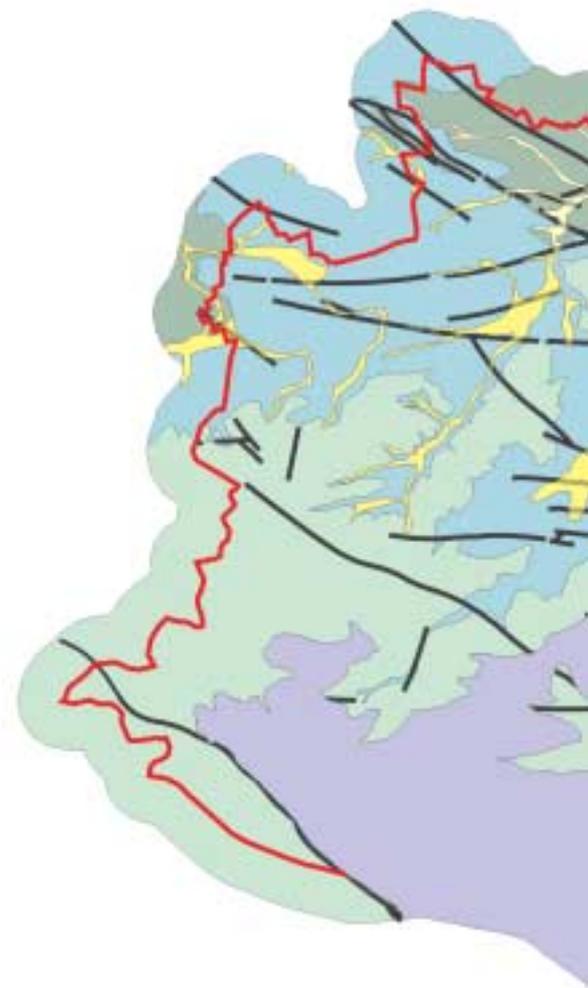
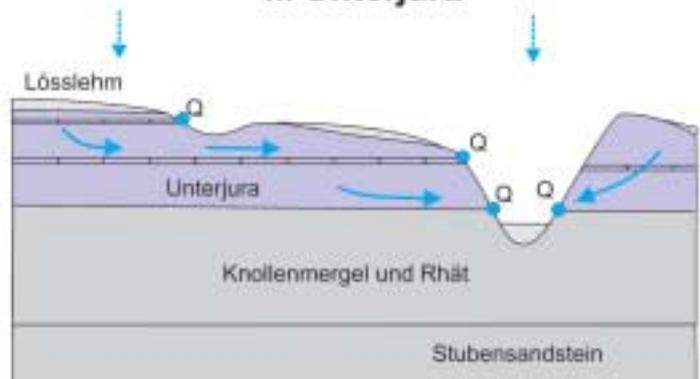
I Quartäre Talfüllungen Neckarzubringer



II Quartär Neckartal



III Unterjura

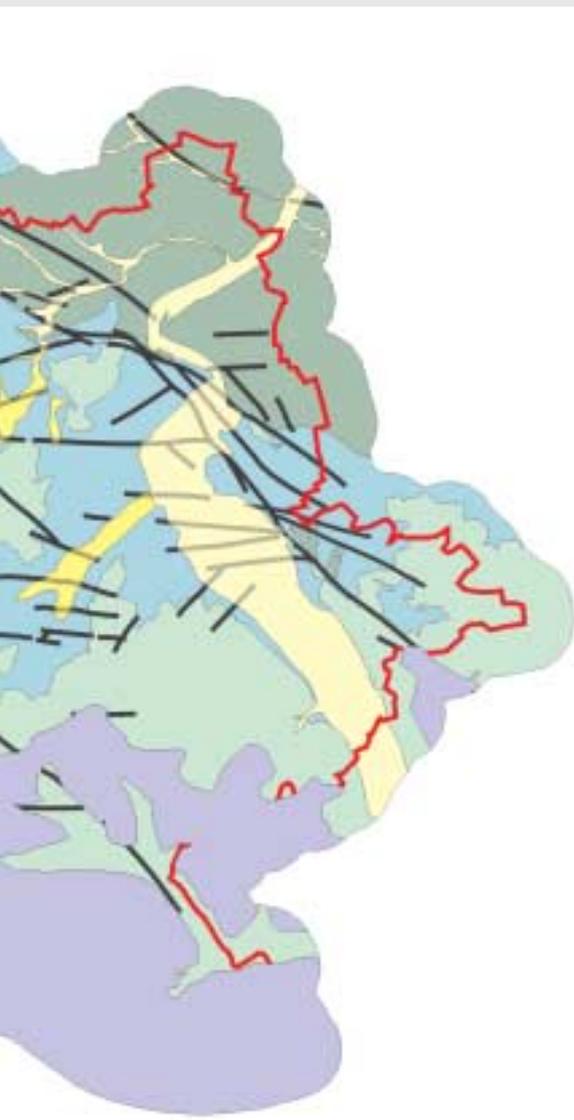


Hydrogeologische Einheiten

- Quartäre Talfüllungen Neckarzubringer
- Quartär Neckartal
- Unterjura
- Knollenmergel, Stubensandstein, Bunte Mergel, Schilfsandstein
- Gipskeuper

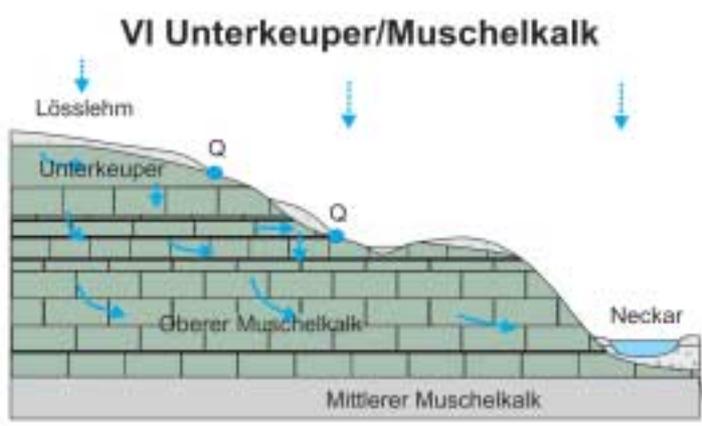
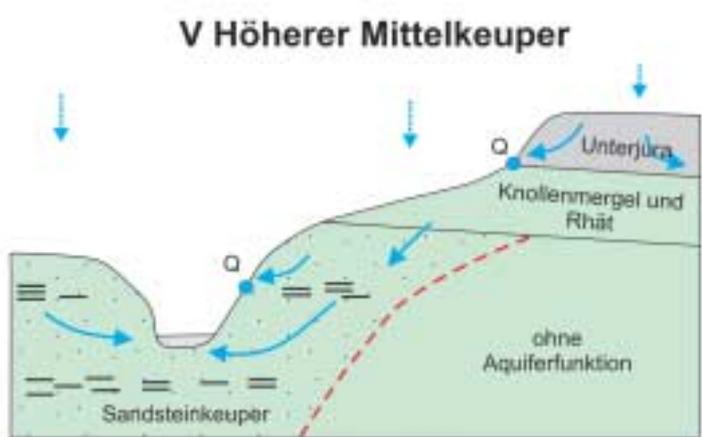
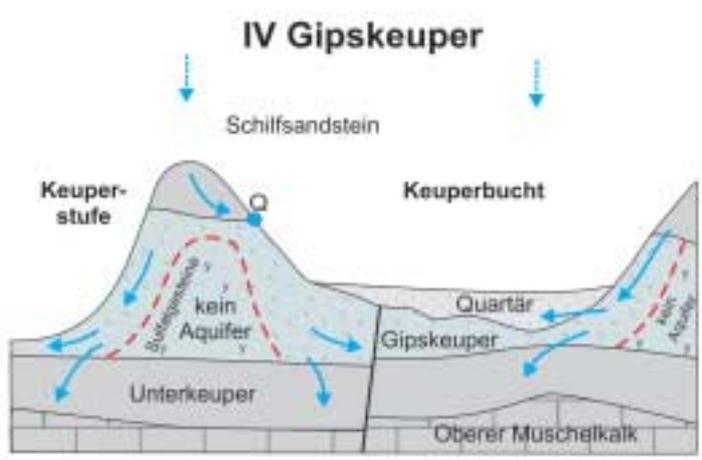


Abb. 5: Hydrogeologische Einheiten in Stuttgart (nach UFRECHT 2003)



Geologischen Einheiten im Stadtgebiet Stuttgart

- Verwerfungen
- Gemarkung Stuttgart
- Grundwasserabfluss
- Niederschlag
- Quellen
- Gipsauslaugungsfront
- Unterkeuper, Oberer Muschelkalk



| | Hydrogeologische Einheit | Gesteinsaufbau | Grundwasserleiter | |
|-----|--|---|---|--|
| | | | Typ | |
| I | <p>I Quartäre Talfüllungen Neckarzubringer</p> | <p>unterschiedlich sandige Schluffe mit Sandstein- und Kalksteinschutt (Bach-, Wanderschutt); in Talniederungen: Schlick und Torf (Sumpftone), Wanderschutt; randlich Verzahnung mit Keuperfließberden und Hangschutt</p> | <p>Lockergesteinsgrundwasserleiter; enge Koppelung mit dem darunter liegenden Festgesteinsgrundwasserleiter</p> | |
| II | <p>II Quartär Neckartal</p> | <p>hellgrauer, mittel- bis grobkörniger Kies mit Schluff und Sand in wechselnden Anteilen, lokal Schlicklinsen; örtlich ausgeräumt und durch Auffüllung ersetzt; seitliche Verzahnung mit Hangschutt und Ablagerungen der Seitenbäche</p> | <p>Lockergesteinsgrundwasserleiter</p> | |
| III | <p>III Unterjura</p> | <p>überwiegend schwarzgraue Tonsteine, z.T. im Wechsel mit bankigen Kalk- und Sandsteinen</p> | <p>schichtiger Kluftgrundwasserleiter; Grundwasserführung in Kalk- und Sandsteinbänken, untergeordnet in aufgewitterten Tonsteinen</p> | |
| IV | <p>IV Gipskeuper</p> | <p>grüne u. rote Schluff-Tonsteine mit dolomitischen Steinmergelbänken; Sulfatgesteine in unterschiedlicher Mächtigkeit (an der Basis Felsengips).</p> | <p>Basis: Tonsteine des Unterkeupers (Grüne Mergel) bzw. Gipsauslaugungsfront; Geometrie stark abhängig von Verwitterung und Auslaugung; bei hoher Überdeckung → keine Verwitterung/Auslaugung → Gering- o. Nichtleiter</p> | |
| V | <p>V Höherer Mittelkeuper</p> | <p>weißgrauer, fein- bis grobkörniger, z.T. konglomeratischer Sandstein; grüne und rotbraune Tonsteinlagen; vereinzelt Steinmergelbänke</p> | <p>Kluftgrundwasserleiter mit interner Stockwerksgliederung; Klüftung und Durchlässigkeit stark tiefen- und reliefabhängig; bei tiefgründiger Verwitterung → Übergang zu Lokergesteinsaquifer</p> | |
| VI | <p>VI Unterkeuper/Muschelkalk</p> | <p>graue Kalksteine mit Ton- und Mergelsteinlagen; oben dolomitisch (Trigonodus-Dolomit)</p> | <p>Karstgrundwasserleiter; über Tonhorizonten lokal schwebende Schichtgrundwasserstockwerke</p> | |

Tab. 1: Charakterisierung der hydrogeologischen Einheiten in Stuttgart (nach UFRECHT 2003)

| Geometrie | Grundwasserhaushalt | Charakteristika |
|--|---|--|
| Basis: Gipskeuper (Feuerbacher Tal); Oberer Muschelkalk (nördliche Fildergraben-Hochscholle) | geringes Grundwasserdargebot; Grundwasserneubildung infolge dichter Besiedelung nur 1 bis 2 l/s·km ² ; Grundwasseraustausch mit dem Gipskeuper bzw. dem Oberen Muschelkalk | starke Einflüsse durch unterlagernde Festgesteine |
| Basis: Unter-, Gipskeuper, Schilfsandstein (Fildergraben); Oberer Muschelkalk (nördliche Fildergraben-Hochscholle); Top: Auelehm/künstliche Auffüllung; laterale Grenze: Festgesteine am Talrand | mittleres bis hohes Grundwasserdargebot; Grundwasserneubildung infolge sehr dichter Besiedelung nur 1 l/s·km ² → vernachlässigbar gegenüber Randzustrom aus angrenzenden hydrogeologischen Einheiten; tlw. Stützung aus dem Liegenden, tlw. Uferfiltrat | hydrogeologische Verhältnisse durch Flussregulierung und Stauhaltung beeinflusst |
| Basis: Tonsteine des Knollenmergels; Top: Turner-Tone (nur im Bereich der Vaihinger Verwerfung) | geringes Grundwasserdargebot; Grundwasserneubildung je nach Lösslehmbedeckung 1 bis 3 l/s·km ² | zahlreiche Oberflächengewässer mit örtlicher Vorflutfunktion → kleine Einzugsgebiete; häufig Sicker- bzw. Stauwasser an der Grenze Lösslehm/Verwitterungstone; kleine (geringergiebig) Quellaustritte v.a. an der Basis Unterjura |
| Basis: Tonsteine des Unterkeupers (Grüne Mergel) bzw. Gipsauslaugungsfront; Geometrie stark abhängig von Verwitterung und Auslaugung; bei hoher Überdeckung → keine Verwitterung/Auslaugung → Gering- o. Nichtleiter | geringes Grundwasserdargebot (Ausnahme im aktiven Gipskarst (z.B. Grundgipsschichten); Grundwasserneubildung < 2 bis 3 l/s·km ² ; in den Keuperbuchten Grundwasserverluste ins Liegende | sehr heterogenes System mit stark wechselnden Eigenschaften |
| Basis: Untere Bunte Mergel; Top: Knollenmergel; Geometrie stark abhängig von der Verwitterungsintensität; unter der Unterjurahochfläche → sehr geringe bis keine Grundwasserführung | geringes bis mittleres Grundwasserdargebot; Grundwasserneubildung ca. 4 l/s·km ² ; unter der Unterjurahochfläche keine Grundwasserneubildung | am Rand der Keuperbuchten, hohe Gewässerdichte → kleine Einzugsgebiete → gering schüttende Quellen über den Bunten Mergeln (Stuttgarter Talkessel, Neckartal); im Westen (Glemswald) zusammenhängende Stubensandsteinflächen → Mahdentalquelle ca. 10 l/s |
| Basis: Salinargesteine bzw. Residualtone des Mittleren Muschelkalks; Top: Tonsteine des Unterkeupers; Tonsteine der Hassmersheimer Schichten trennen den Aquifer örtlich in oberes und unteres Karstgrundwasserstockwerk | hohes Grundwasserdargebot; Grundwasserneubildung je nach Mächtigkeit der Überdeckung 3 bis 8 l/s·km ² , örtlich Stützung aus Liegend- oder Hangendaquiferen (mit Aufkonzentrierung); bei flächiger Sulfatgesteinsführung (Barriere) im Gipskeuper → keine Grundwasserneubildung aus Niederschlag | Grad der Verkarstung und der Durchlässigkeit abhängig von tektonischer Beanspruchung und Überdeckung; regionale Grundwasserströmung auf den Neckar gerichtet; auf der Fildergraben-Hochscholle → mächtige ungesättigte Zone mit schwebendem Schichtgrundwasser |

2.3.2 Grundwassersensibilitäten

Die teils intensiv genutzten Stuttgarter Grundwasservorkommen sind in Abhängigkeit der hydrogeologischen Verhältnisse und der natürlichen Schutzmechanismen unterschiedlich exponiert und reagieren auf menschliche Einflüsse oft sehr empfindlich. Die örtlichen Grundwassersensibilitäten spiegeln sich in den wasserwirtschaftlichen Schutzgebieten wider.

Sie bestimmen maßgeblich die Risiken für bestehende Nutzungen und sind Grundlage fachlicher Planungen und deren Beurteilung.

2.3.2.1 Schutzgebiet der Heilquellen von Stuttgart-Bad Cannstatt und -Berg

Der ergiebigste Grundwasserleiter im Untergrund von Stuttgart ist der Obere Muschelkalk. Er führt in den nördlichen Bereichen des Neckartals niederkonzentrierte Mineralwässer (Calcium-(Magnesium)-Hydrogencarbonat-Sulfat-Typ; Kohlensäuregehalt < 250 mg/l; Feststoffinhalte ca. 1000 bis 1600 mg/l). Im unteren Nesenbachtal und dem Cannstatter Becken findet man im Oberen Muschelkalk dagegen hochkonzentrierte und kohlenstoffhaltige Wässer unterschiedlicher Zusammensetzung (Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogencarbonat-Säuerlinge bzw. Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogencarbonat-Säuerlinge, Kohlensäuregehalt bis 2000 mg/l, Feststoffinhalt 3000 bis 6000 mg/l).

Im Neckartal und im Mündungsgebiet des Nesenbachs ist das Grundwasser des Oberen Muschelkalks artesisch gespannt. Die Mineralwässer aus dem Oberen Muschelkalk sind heute über 19 Brunnen und im natürlichen Quelltopf des Mombachs erschlossen. Außerdem gibt es „wilde Mineralwasserausstritte“ in den Neckar (ARMBRUSTER et al. 1998, WOLFF & UFRICHT 1998, **Abb. 6**) sowie natürliche „Aufbrüche“ hochkonzentrierter Wässer (Mineralwasseranomalien) in das Grundwasser der Neckartalaue (UFRICHT 2001). Die Mineralwässer bewegen sich hier vorzugsweise entlang natürlicher Aufstiegsbahnen (z.B. tektonischen Zerrüttungszonen, Dolinen usw.), wo die Deckschichten über dem Oberen Muschelkalk besonders durchlässig sind. Daneben kennt man aber auch künstliche Mineralwasseraufstiege über hydraulische Wegsamkeiten, die durch menschliche Eingriffe in den Untergrund (z.B. stockwerksübergreifende Brunnen, wilde Bohrlöcher) verursacht wurden.

Der Schwerpunkt des Aufstiegsgebiets der Heil- und Mineralwässer liegt im Cannstatter Becken im Bereich einer Horststruktur (**Abb. 7**). Dort ist der Gipskeuper lokal vollständig abgetragen (UFRICHT 1994). Erst in den flankierenden Schollentreppen tritt er in zunehmender Restmächtigkeit in Erschei-

nung. Neckar aufwärts klingen die hydraulischen Verbindungen vom Oberen Muschelkalk bis ins Quartär aus. Im Norden und Osten endet das Vorkommen hochkonzentrierter und -gespannter Mineralwässer an den Fildergraben-Randverwerfungen. Zum mittleren Nesenbachtal nimmt die hohe Mineralisation gleichfalls ab. Außerdem taucht die Druckfläche des Grundwassers im Oberen Muschelkalk talaufwärts zunehmend unter Flur ab.

Im hochgespannten Mineralwassersystem im Oberen Muschelkalk herrscht ein labiles Gleichgewicht zwischen Druck und Hydrochemie. Dieses bestimmt auch die natürliche Schüttung an Mineralwasser, die insgesamt etwa 500 l/s beträgt (UFRICHT & RENNERT 1996, ARMBRUSTER et al. 1998). Hiervon sind in den Brunnen ca. 225 l/s gefasst (etwa 165 l/s hochkonzentrierte, ca. 60 l/s niederkonzentrierte Mineralwässer). Der überwiegend niederkonzentrierte Rest (> 200 l/s) fließt in die quartären Talfüllungen oder in den Neckar aus (UFRICHT & HARRLACHER 1998, UFRICHT 2003a, 2005). Dieses Gleichgewicht ist gegenüber menschlichen Einflüssen sehr störanfällig.

Quantitative Einwirkungen können das Mineralwasserdargebot schnell und nachhaltig beeinträchtigen. Hierzu zählen hauptsächlich künstlich verursachte Grundwasserverluste aus dem Heil- und Mineralwasseraquifer. Diese führen zu einer Druckminderung im Mineralwassersystem, wodurch die Schüttung der artesischen Heilquellen abnimmt. Parallel dazu verschiebt sich das physikalisch-chemische Gleichgewicht und die natürliche Beschaffenheit des Mineralwassers, speziell der Kohlensäuregehalt ändert sich rasch.

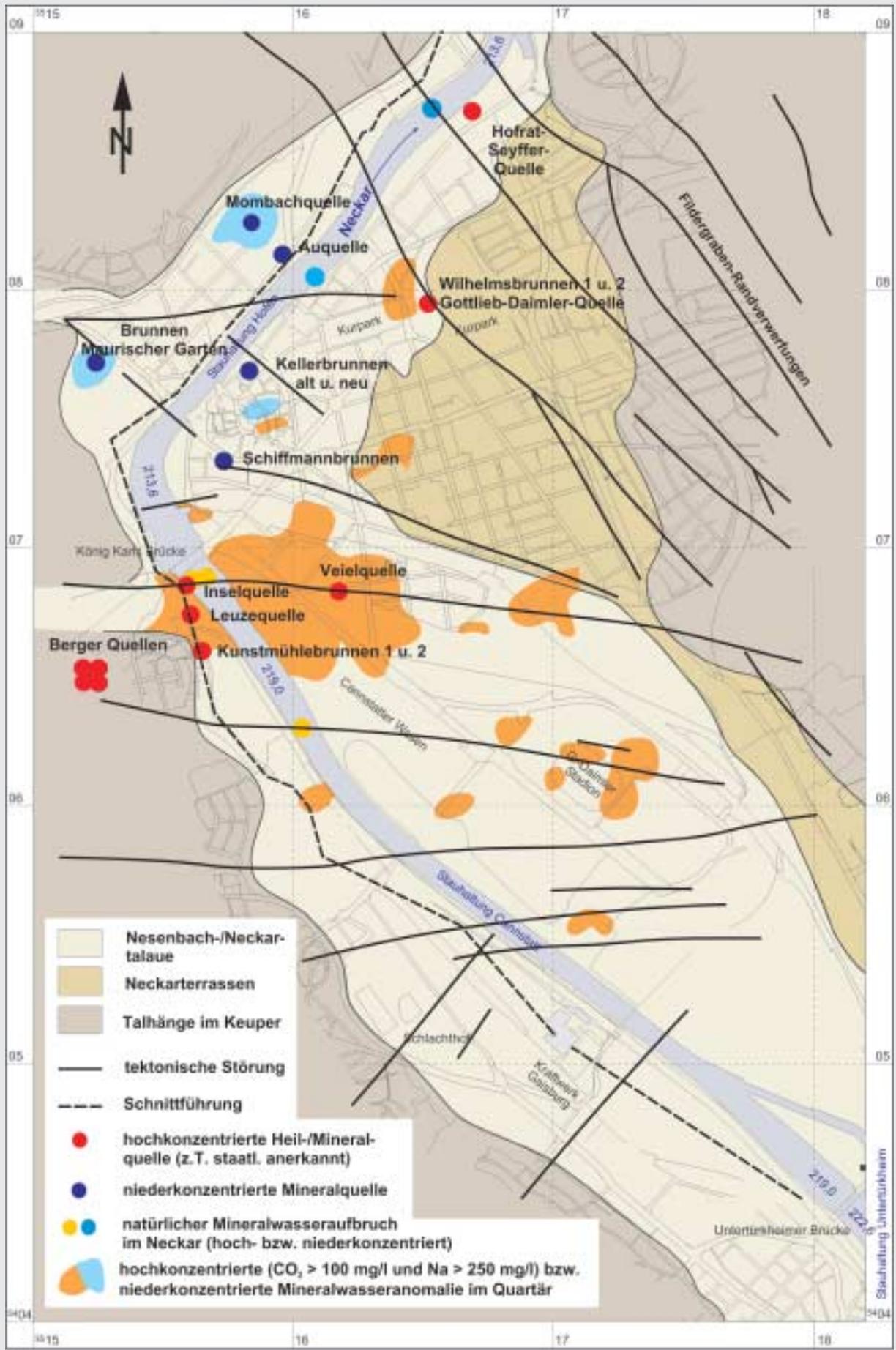


Abb. 6: Mineralwasseranomalien im Cannstatter Becken (WOLFF & UFRECHT 1998)

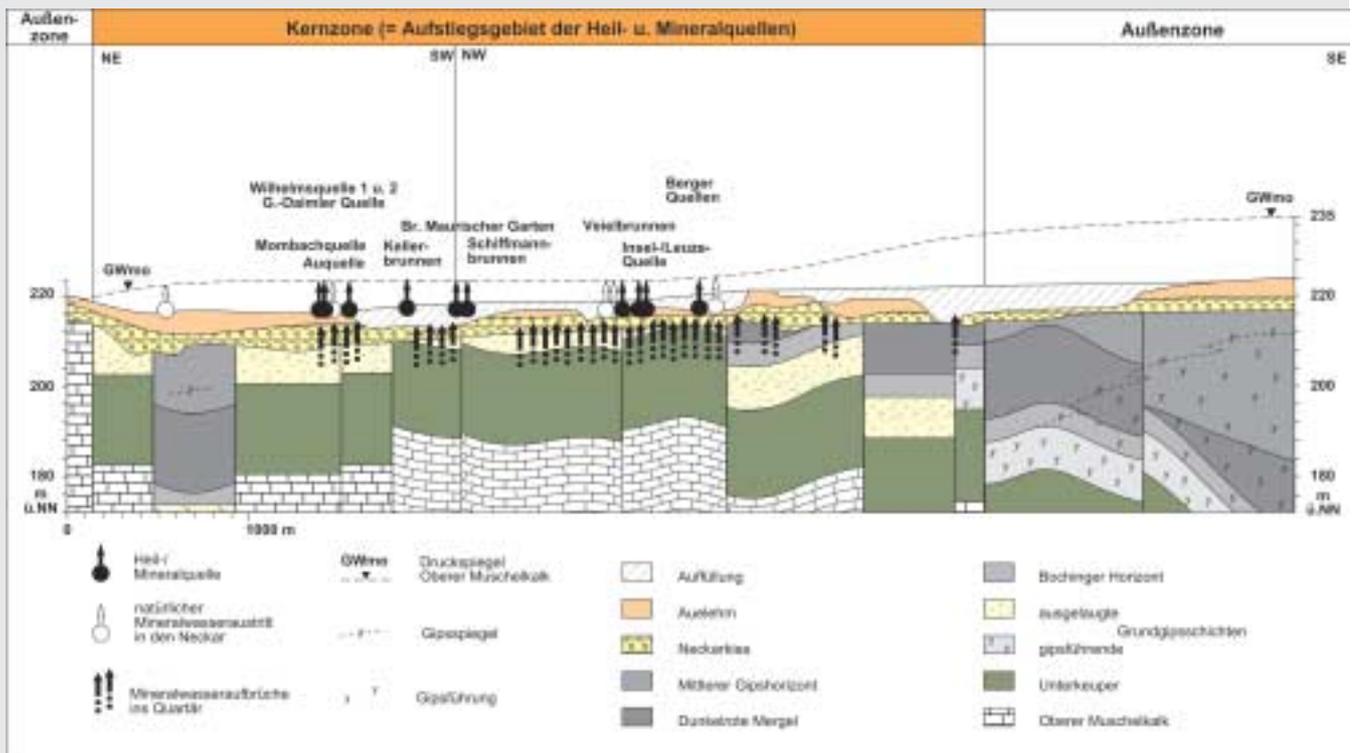


Abb. 7: Hydrogeologischer Schnitt durch das Cannstatter Becken (nach WOLFF & UFRECHT 1998); Schnittführung s. Abb. 6

Qualitative Einwirkungen bedrohen die geogene Mineralwasserzusammensetzung unmittelbar. Die Natürlichkeit der Mineralwässer (Lösungsinhalte, besondere Reinheit) ist jedoch Voraussetzung für deren staatliche Anerkennung. Daher sind die Heilquellen und deren Akkreditierung sowohl direkt durch Einträge anthropogener Stoffe als auch indirekt durch die hydrochemischen Auswirkungen quantitativer Einflüsse (Mengen-/Druckminderungen) gefährdet.

Den Risiken derartiger Beeinträchtigungen wurde durch die Ausweisung des **Stuttgarter Heilquellenschutzgebietes** begegnet (REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART 2002). Hierbei orientiert sich die Zonengliederung (Abb. 8) an der örtlichen hydrogeologischen Charakteristik und Empfindlichkeit gegenüber anthropogenen Einflüssen (WOLFF 2004).

Der **Fassungsbereich** ist das enge Umfeld um die jeweilige Brunnenanlage (Radius von 5 m). Hier herrschen die strengsten Schutzanforderungen.

Daran schließt die **Kernzone** an. Sie umfasst den eigentlichen Aufstiegsbereich der Stuttgarter Heil- und Mineralwässer im Neckartal und an der Nesenbachtalmündung. Hinzu kommen die Abschnitte

des unteren Nesenbachtals, in denen die Grundgipschichten teilweise oder vollständig abgetragen sind und der Druckspiegel des Mineralwassers im Quartär liegt. In der Kernzone ist das Grundwasser im Oberen Muschelkalk bis hin zu artesischen Verhältnissen gespannt.

Die **Innenzone** erstreckt sich im zentralen Nesenbachtal und an den östlichen Neckartalhängen beiderseits der Nesenbachtalmündung. Ihre Außen- grenze ist identisch mit dem Ausstrich der Grenze Bleiglanzbankschichten (km1BG)/Mittlerer Gipshorizont (km1MG). Charakteristisch für die Innenzone ist, dass die ausgelagten und plastifizierten Grundgipschichten hier in voller Residualmächtigkeit von etwa 9 m flächig verbreitet sind. Sie verfügen dort über sehr geringe vertikale Durchlässigkeiten. Sie bilden in den zentralen Bereichen der Innenzone eine Art „Dichtschicht“, der wasserwirtschaftlich eine bedeutsame Trennfunktion zukommt (Abb. 9). In der Innenzone herrschen natürlicherweise fallende Drücke innerhalb der Grundwasserstockwerke im Gipskeuper (Dunkelrote Mergel, Bochinger Horizont) bzw. zum Unterkeuper und zum Oberen Muschelkalk.

An der Peripherie des Heilquellenschutzgebiets liegt die **Außenzone**. Ihre Grenze ist identisch mit dem Einzugsgebiet, aus dem mehr als 95 % der Schützungsmenge den Heilquellen zuströmt (PLÜMACHER 1999). In der Außenzone auf Stuttgarter Gemarkung ist der Obere Muschelkalk infolge sehr mächtiger Überdeckung gegenüber stofflichen Einträgen besonders gut geschützt. Dies gilt auch, weil er infolge des hohen Flurabstandes (mehrere 100 m) außer Reichweite von gewöhnlichen Bauvorhaben liegt. Umgekehrt heißt das aber auch, dass ver-

gleichsweise tiefe Eingriffe (z.B. Erdwärmesonden) in diesen Bereichen zunächst diese Schutzwirkung reduzieren und eine grundsätzliche Bedrohung für die Heilquellen darstellen. Sie müssen deshalb unter diesem Gesichtspunkt gesondert beurteilt werden.

Aus diesen zonenspezifischen Empfindlichkeiten leiten sich unterschiedliche Anforderungen an den Bau und den Betrieb von geothermischen Erschließungsanlagen ab (**Kap.6.1, Anlage 1**).

2.3.2.2 Trinkwasserschutzgebiete

Im Stadtgebiet Stuttgart liegen 4 Trinkwasserschutzgebiete (Blauäcker, Bruderhaus- und Schattenquelle, Mahdentalquelle, Parksee/Steinbachsee/Katzenbachsee). Im Wasserschutzgebiet „Blauäcker“ wird der Obere Muschelkalk, in den Wasserschutzgebieten „Bruderhaus-/Schattenquelle“ und „Mahdentalquelle“ das Grundwasservorkommen des Stubensandsteins zur Trinkwassergewinnung genutzt. In den zuvor genannten Fällen ist damit zu rechnen, dass Anlagen zur Erdwärmegewinnung u.U. bereits in den weiteren Schutzzonen bis in die genutzten

Grundwasservorkommen reichen und somit ein erhöhtes Risiko für die Trinkwasserqualität darstellen. Hier kollidiert die Absicht, Erdwärme zu nutzen, zunächst formal an den Bestimmungen der jeweiligen Schutzgebietsverordnung.

Gleiches gilt für die Trinkwasserschutzgebiete „Parksee/Steinbachsee/Katzenbachsee“, obwohl hier Trinkwasser aus den gleichnamigen Oberflächengewässern bezogen wird.

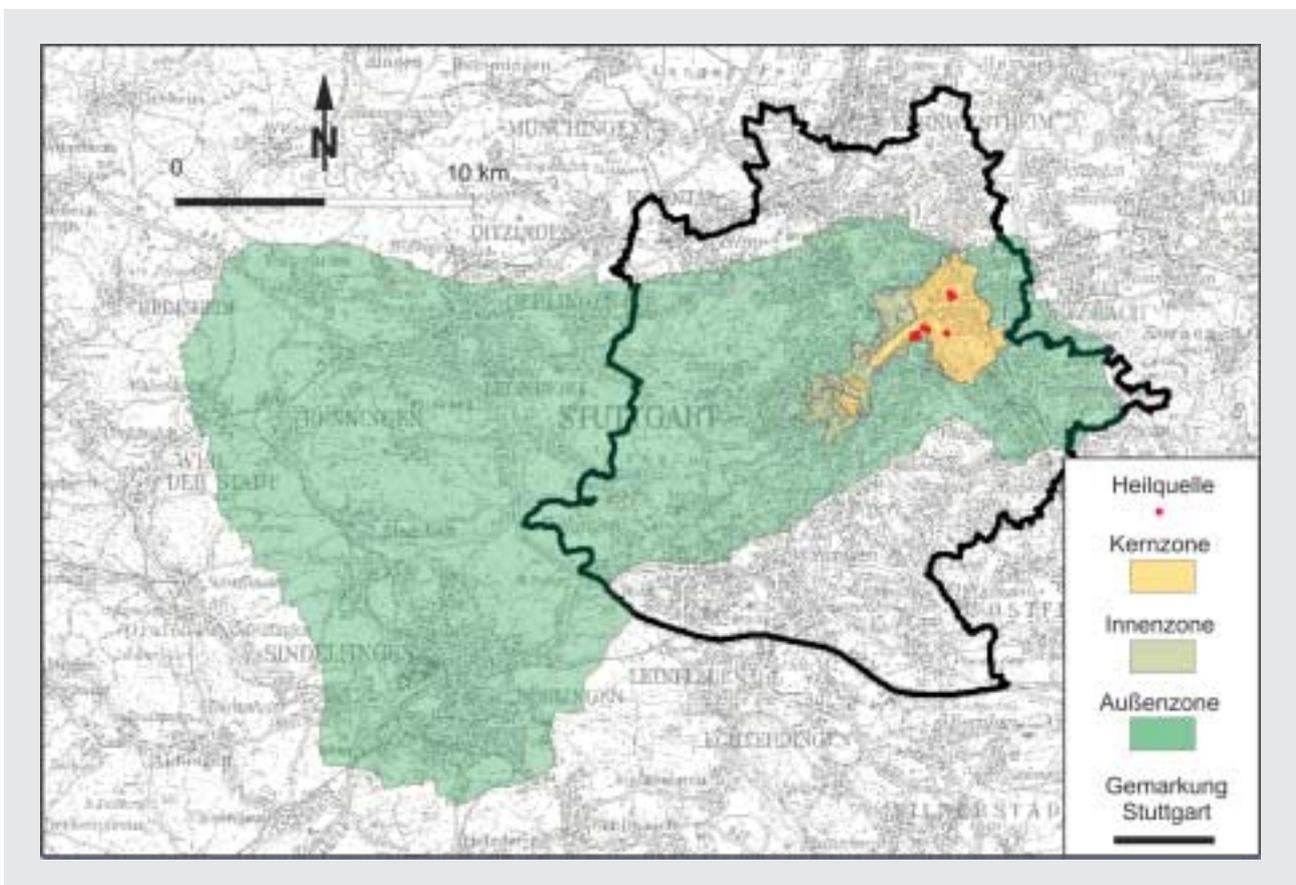


Abb. 8: Das Stuttgarter Heilquellenschutzgebiet (WOLFF 2004)

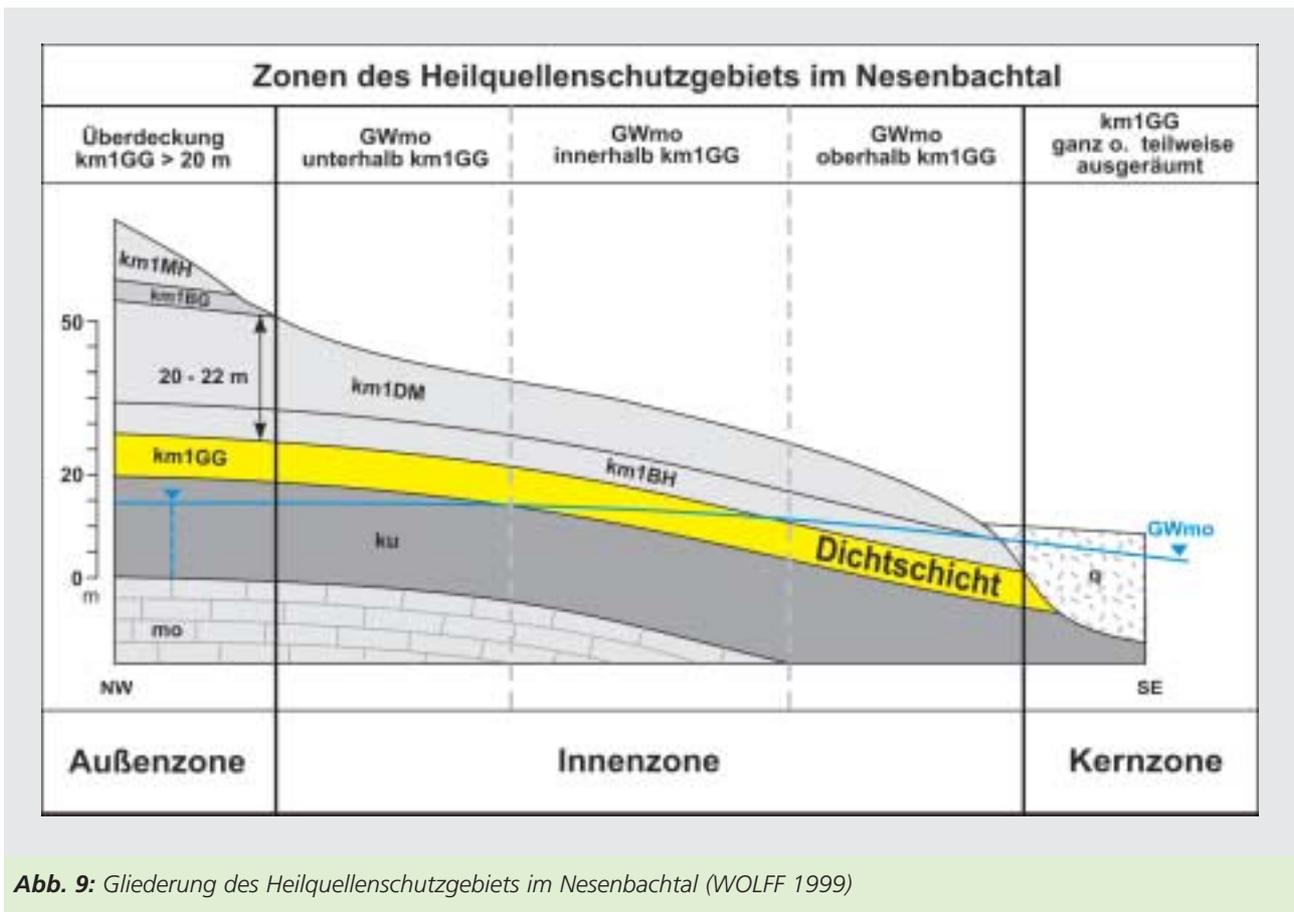


Abb. 9: Gliederung des Heilquellenschutzgebiets im Nesenbachtal (WOLFF 1999)

2.3.2.3 Trink- und Brauchwasserfassungen ohne Wasserschutzgebiet

Unabhängig von den durch Rechtsverordnung festgesetzten Wasserschutzgebieten gibt es im Stadtgebiet Stuttgart privat oder betrieblich genutzte Wasserfassungen. Je nach Lage im örtlichen Einzugsgebiet und Entfernung zur jeweiligen Fassung sowie je nach Art der Nutzung (Trink-, Brauchwasser) muss anhand der lokalen Grundwasserverhältnisse

geprüft werden, ob sich durch die beabsichtigte Erdwärmenutzung Risiken für die Grundwassergewinnung ergeben.

3. Geothermie

Geothermische Energie (deutsch: Erdwärme) ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der Erdkruste (VDI 2000).

Dabei nimmt die Temperatur zur Tiefe hin kontinuierlich zu. Der tägliche Verlauf der Lufttemperatur wirkt sich bis wenige Dezimeter unter die Erdoberfläche aus. Darunter machen sich nur noch jahreszeitliche Schwankungen der Lufttemperatur bemerkbar. Ihr Einfluss endet in etwa 10 m bis 20 m Tiefe. Hier herrschen in unseren Breiten bereits beinahe konstante Temperaturen, die in etwa der mittleren Jahrestemperatur der Luft entsprechen (Stadtmitte von Stuttgart: 10 °C; Filderhochfläche: 8,6 °C). Mit zunehmender Tiefe steigen die Temperaturen im Untergrund mehr oder weniger kontinuierlich an. Hierbei handelt es sich zunächst noch um gespeicherte Sonnenenergie, dann aber um die eigentliche (= nicht klimabeeinflusste) Erdwärme, die bei der Erdentstehung freigesetzt wurde und die

noch zum Teil im Erdinneren gespeichert ist. Gleichzeitig wird im Untergrund kontinuierlich Wärme frei, wenn radioaktive Elemente in der Erdkruste oder im tieferen Erdinnern zerfallen.

Aufgrund dieser natürlichen physikalischen Eigenschaften kann der Untergrund als Wärmequelle oder zu Kühlzwecken genutzt werden. In besonderen Fällen eignet er sich sogar als thermischer Energiespeicher.

Bei der Nutzung von Energie aus dem Untergrund wird je nach Tiefenreichweite der Gewinnungsanlagen zwischen oberflächennaher und tiefer Erdwärme (Geothermie) unterschieden (**siehe Abb. 10**).

3.1 Oberflächennahe Geothermie

Hier stammt die Erdwärme aus dem obersten Bereich der Erdkruste. Dabei werden i.d.R. Tiefen im Meter- bis mehrere Zehnermeterbereich erschlossen. Anlagen mit Einbindelängen von über 100 m sind eher selten. Das nutzbare Temperaturspektrum reicht, abhängig von den örtlichen geothermischen Verhältnissen, von ca. 8 °C in Oberflächennähe bis zu etwa 25 °C.

In den oberen 10 m bis 20 m stammt die zur Verfü-

gung stehende Energie noch mehrheitlich aus der Sonneneinstrahlung bzw. aus dem Sickerwasser und dem oberflächennahen Grundwasser. Erst darunter spielt der geothermische Anteil aus der Tiefe eine zunehmende Rolle.

Auf die Erschließungsformen der oberflächennahen Geothermie wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

3.2 Tiefe Geothermie

Hierbei handelt es sich um reine Erdwärme, die aus größeren Tiefen (mehreren hundert bis einigen tausend Metern) stammt. Der zugehörige Temperaturbereich reicht von 20 °C bis 200 °C. Der Wärmetransport erfolgt entweder über natürlich vorhandene Thermalwässer oder über Wasser, das zum Zweck der Aufheizung ins Gebirge eingebracht wird.

In Stuttgart sind infolge der schützenswerten Heil- und Mineralwasservorkommen die hydrogeologischen Voraussetzungen zur rentablen technischen

Erschließung der tiefen Geothermie nicht gegeben, sodass entsprechende Verfahren nur kurz abgehandelt werden.

3.2.1 Nutzung hydrogeothermischer Systeme (Hydrogeothermie)

Diese Verfahren konzentrieren sich auf die Nutzung natürlicher Thermalwässer. Diese warmen (40 °C bis 100 °C) oder heißen (> 100 °C) Wässer steigen aus großer Tiefe auf oder werden dort direkt erschlossen. Sofern das Wasser über eine zweite Bohrung

(Doublette) wieder eingeleitet wird, kann ein hydrothermischer Kreislauf aufgebaut werden.

3.2.2 Nutzung petrophysikalischer oder hydrothermaler Systeme – geothermische Spezialverfahren

Hierzu zählt z.B. das Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR), bei dem heißes Gestein in großer Tiefe (z.B. > 5.000 m) über mehrere Bohrungen erschlossen wird. Dann wird das Gebirge durch Wasserdruck aufgesprengt. Ziel ist die Schaffung neuer, künstlicher Fließwege, die als unterirdischer Wärmetauscher wirken. In diesem offenen System wird eingepresstes Wasser erhitzt und in einem geschlossenen Kreislauf wieder zu Tage geführt. Dabei steht das hochtemperierte Förderwasser unter Druck, sodass ein Sieden zunächst verhindert wird. Dampf entsteht erst an der Turbine, mit welcher die Energie gewonnen wird. Diese Technologie wird derzeit im Rahmen

eines europäischen Forschungsprojekts im französischen Soultz-sous-Forêts näher untersucht.

Nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die im jeweiligen geothermischen System gängigen technischen Verfahren zur Erdwärmennutzung.

| | Oberflächennahe Erdwärme | | | | Tiefe Erdwärme | | | |
|---|--------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------|--|--|-----------------------|--------------------------------|
| Tiefenbereiche | ca. 2 m | ca. 25 m | | bis ca. 400 m | mehrere 100 m bis mehrere 1000 m | | | > 5000 m |
| Anlagen/Verfahren zur Erdwärmegewinnung | Kollektoren | Erdberührte Bauteile, Energiepfähle | Grundwasserpumpen | Erdwärmesonden | Erschließung natürlicher Thermalwässer (> 20 °C) | Hydrothermischer Kreislauf (Doublette) | | Geothermische Spezialverfahren |
| Temperaturbereiche | ca. 8 - 25 °C | | | | Niedrigtemperaturwässer 25 - 40 °C | Warme Wässer 40 - 100 °C | Heiße Wässer > 100 °C | z.T. Wasserdampf bis 200 °C |
| Nutzung der Erdwärme | Wärmepumpen | | | | Wärmetauscher, direkte Warmwassernutzung | | | |
| | Kühlung | | | | direkte Heißwassernutzung | | | |
| | Wärmegewinnung | | | | Wärmegewinnung, Stromerzeugung | | | |
| | | | | | | | | |

Abb. 10: Erdwärme und deren Nutzung

4. Wasserwirtschaftliche Risiken bei der Erschließung der oberflächennahen Geothermie

Im Stuttgarter Raum sind aus verschiedenen Gründen (z.B. Rentabilität, Heilquellenschutz) eher oberflächennahe Nutzungen im Zehner- bis wenige Hundertermeterbereich wahrscheinlich. Hier herrschen abhängig von Bau- und Nutzungszustand je nach Art und Tiefenreichweite der geothermischen Nutzungsanlage unterschiedliche Risiken für Boden und Grundwasser:

- Beeinträchtigungen des natürlichen Grundwasserabflusses,
- hydraulische Kurzschlüsse zwischen Grundwasserstockwerken mit
 - Änderungen der Druckverhältnisse und der Grundwasserbeschaffenheit und
 - dauerhaften Grundwasserverlusten,
- physikalische Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit (Temperaturanstieg, Abkühlung),
- chemische Veränderungen (Boden- und Grundwasserkontaminationen durch Verluste von Trägerflüssigkeit, Schadstoffverschleppungen von höheren in tiefere Grundwasserstockwerke, Verschiebung von Lösungsgleichgewichten, Ausgasungen),
- biologische Veränderungen (beschleunigte Verkeimung bei Temperaturzuwachs, Minderung mikrobiologischer Abbauprozesse).

Bei der **Herstellung** von geothermischen Erschließungsanlagen, die ins Grundwasser einbinden, kann es z.B. im Fall einer engen Rasteranordnung (z.B. bei Energiepfählen) zu Behinderungen des natürlichen Grundwasserabflusses kommen. Ferner können Längsläufigkeiten entlang des Bohrloches ein Problem darstellen. Dies gilt besonders dort, wo die Anlagen über mehrere Grundwasserstockwerke in die Tiefe reichen. Hier müssen aus qualitativen und quantitativen Gründen (z.B. Schadstoffverschleppungen, dauerhafte Grundwasserverluste) Grundwasserabflüsse im Ringraum der Wärmeträgerrohre (bei Energiepfählen entlang des Pfahlkörpers) unterbunden werden. Deshalb wird bei der Herstellung der Anlagen eine sorgfältige und dauerhaft wirkende Abdichtung der Bohrlöcher verlangt.

Da die Wärmeträgerrohre mit einer Wärmeträgerflüssigkeit befüllt werden, muss im **Betrieb** eine dauerhafte Dichtheit der unterirdischen Anlagenteile sichergestellt werden. Dies ist nur möglich, wenn die Wärmeträgerrohre senkrecht eingebaut werden, sodass sie keinen direkten Gebirgskontakt haben und über eine ausreichend dicke Zementummantelung (Dicke > 5 cm) verfügen. Hinzu kommt eine automatische Lecküberwachung, die auf den unterirdischen Verlust an Wärmeträgermedium reagiert. Das Risiko von Grundwasserschäden ist immer dann besonders groß, wenn grundwasserfremde Wärmeträgermedien eingesetzt werden sollen, die zudem noch als wassergefährdend oder unverträglich eingestuft werden müssen (z.B. Heilquellenschutzgebiet → anthropogene Stoffe). Zu den nachteiligen Veränderungen des Grundwassers zählt ferner ein unproportional hoher Wärmeentzug bzw. eine dementsprechende Erwärmung. Hierbei kommt es rasch zu Veränderungen der chemischen, physikalischen und biologischen Beschaffenheit des Grundwassers, welche die Qualität des Grundwassers –speziell das natürliche Selbstreinigungsvermögen– negativ beeinflussen können (HEILAND 1997). Insofern werden Abweichungen von mehr als 2 K von der Normaltemperatur in einem Abstand von mehr als 50 m zur Quelle der Temperaturänderung als besorgniserregend und damit als untolerabel erachtet. Dies gilt für Bereiche, aus denen Grundwasser in mehr als nur unerheblichem Umfang abströmt besonders, weil hier die Temperaturbeeinflussungen oft weit über die Grundstücke der Erschließungsanlage hinausreichen (**Kap. 6.2.3.2**).

Besonders nachteilhaft sind geothermische Nutzungsformen, bei denen Frostkörper im Untergrund entstehen. Diese stellen Fließhindernisse dar, sodass während des Frostbetriebs das Grundwasser umgeleitet wird. Zudem bilden sich beim Gefrieren des Grundwassers entlang der Wärmeträgerrohre bzw. in Rissen und Poren der Zementdichtung sowie im umgebenden Gebirge Frostspalten. Im Zuge mehrerer Frost-/Tauwechsel kommt es dort zur Eiskeilbildung. Dadurch werden die Spalten sukzessive aufgeweitet und die vertikale Dichtwirkung geht verloren. Untersuchungen in diesem Zusammenhang haben gezeigt, dass nicht frost-/taubeständige Verpressbaustoffe durch Frostsprengung regelrecht zerfallen (MÜLLER 2004). In Folge hiervon fließt im Auftauzustand immer mehr Grundwasser entlang der Sondenbohrung unkontrolliert ab (**Abb. 11**).

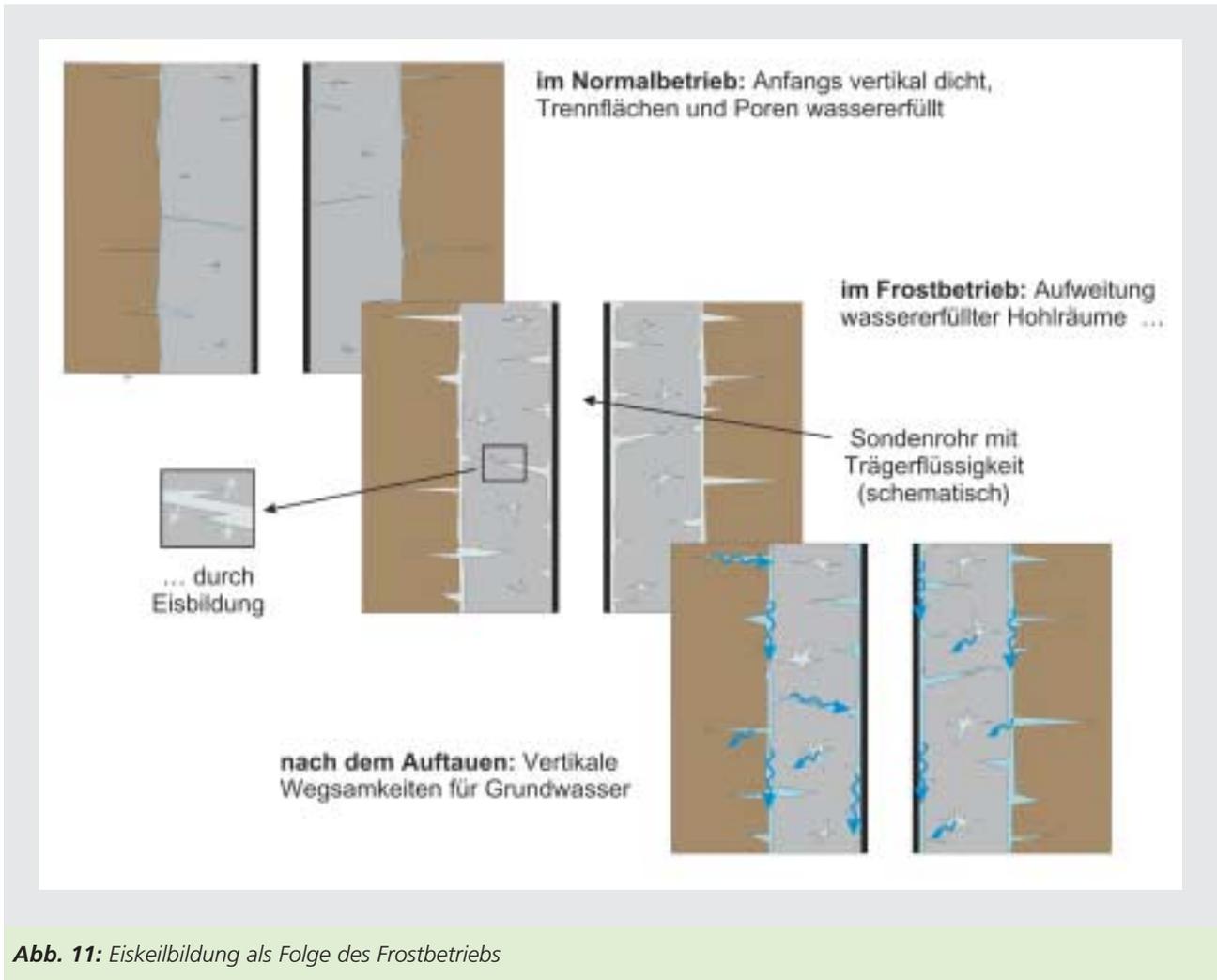


Abb. 11: Eiskeilbildung als Folge des Frostbetriebs

Solche unerwünschten Grundwasserbewegungen können noch größere Ausmaße annehmen, wenn es im Zuge periodischer Frost-/Tauwechsel zu Auflockerungen im umgebenden Gebirge kommt.

Nicht nur im Betrieb, sondern auch nach **Stilllegung** dürfen von der Anlage keine Gefahren für das Grundwasser ausgehen. Aus diesem Grund muss das Trägermedium vollständig aus den unterirdischen Bauteilen entfernt werden. Danach sind die Leitungen bis auf das Niveau der Erdoberfläche dicht zu verschließen oder ordnungsgemäß zurückzubauen.

Den geschilderten Gefahren für Boden und Grundwasser kann im Normalfall durch technische Maßnahmen begegnet werden. Sie minimieren die Risiken und sind entweder Bestandteil der Planung oder werden als Auflagen im Zuge der einschlägigen Anzeige*- bzw. Erlaubnisverfahren erteilt. Dabei gelten im Heilquellenschutzgebiet aus Gründen der Vorsorge z.B. hinsichtlich der Bohrtiefen bzw. der zulässigen Stoffe im Wärmeträgermedium gesonderte Bestimmungen (**Kap. 6, Anlage 1**).

* Aufgrund der am 28.11.2005 erfolgten Aufhebung der Verordnung des Innenministeriums über die Überwachung von Erdaufschlüssen vom 18. Dezember 1961 entfällt momentan die Pflicht zur Anzeige von Erdaufschlüssen (sog. Bohranzeige) nach §37 WG. Insofern ergeht bis zu einer Neuregelung auch keine kostenpflichtige Stellungnahme durch die untere Wasserbehörde.

Ungeachtet dessen wird eine vorherige schriftliche Abstimmung der Bauausführung von unterirdischen Anlagenteilen, die ins Grundwasser reichen, mit der unteren Wasserbehörde dringend empfohlen, da für den späteren Betrieb solcher Anlagen eine wasserrechtliche Erlaubnis benötigt wird. Diese kann nur dann erteilt werden, wenn die Anlage dem hier dokumentierten Stand der Technik entspricht und deren Betrieb nach den hier genannten Bewirtschaftungsgrundsätzen erfolgt. (s. auch Kap. 8).

5. Geothermische Situation in Stuttgart

Für Mitteleuropa beträgt die durchschnittliche Temperaturzunahme (= mittlerer geothermischer Gradient) in der oberen Erdkruste etwa 3,3 K/100 m. Dies entspricht einer geothermischen Tiefenstufe von ca. 33 m/K. Lokalspezifische Mittelwerte lassen sich vereinfacht anhand folgender Formel aus örtlichen Kenndaten ermitteln:

$$GT = \frac{s_E - s_0}{T_E - T_0} \quad [\text{m/K}]$$

GT = mittlere geothermische Tiefenstufe

s_0 = Tiefenreichweite der klimabedingten Temperaturschwankungen im Untergrund in m (hier: ca. 15 m)

s_E = Tiefe der Temperaturmessung in m (meist Endteufe einer Bohrung)

T_0 = Jahresmitteltemperatur in °C (hier: ca. 10 °C)

T_E = gemessene Temperatur in °C (meist an der Sohle einer Bohrung)

5.1 Eignung des Stuttgarter Untergrundes für die Erschließung der oberflächennahen Geothermie

In Stuttgart und dessen direktem Umland liegt der tiefenspezifische Temperaturzuwachs über dem mitteleuropäischen Durchschnitt. Dabei zeichnet sich im Aufstiegsgebiet der Stuttgarter Heil- und Mineralwässer eine lokale Wärmeanomalie ab. Gleichzeitig

variiert der geothermische Gradient bzw. die geothermische Tiefenstufe in dessen Umfeld sehr stark (**Tab. 2, Abb. 12**).

| Bohrung | Geologie im Sohlbereich | Tiefe (m) | Temperatur Bohrlochsohle (°C) | mittlerer geothermischer Gradient (K/100 m) | geothermische Tiefenstufe (m/K) |
|----------------------|-------------------------|-----------|-------------------------------|---|---------------------------------|
| Scharnhausen | mo | 310 | 32,99 | 7,68 | 13,0 |
| Spieth-Hof | mo | 359 | 32,83 | 6,78 | 14,7 |
| Bonlanden 1 | s | 352 | 32,17 | 6,72 | 14,9 |
| Musberg | mo | 234 | 23,31 | 6,33 | 15,8 |
| BK 17.4/3 | mo | 127 | 23,96 | 11,83 | 8,5 |
| BK 17.1/4 | mo | 118 | 26,77 | 15,12 | 6,6 |
| Leuzequelle | mo | 37,4 | 20,97 | 32,01 | 3,1 |
| Inselquelle | mo | 43 | 19,76 | 25,02 | 4,0 |
| Hofrat-Seyffer-Q | g | 470 | 28,25 | 4,1 | 24,4 |
| Böblingen B2 | g | 675 | 36,92 | 4,28 | 23,4 |
| Br. 5 Dinkelacker | mo | 90 | 19,2 | 12,3 | 8,15 |
| Auf der Steig | mo | 130 | 16,1 | 5,3 | 18,9 |
| Gottlieb-Daimler-Q. | mo | 135 | 19,6 | 8,0 | 12,5 |
| Sarwey-Brunnen, tief | mo | 75 | 14,8 | 8,0 | 12,5 |
| B 213 | kuGD | 38,9 | 16,7 | 27,8 | 3,6 |
| B 224 | ku | 54 | 19,7 | 25,0 | 4,0 |
| B 225 | km1GG | 43,9 | 18,7 | 30,3 | 3,3 |

Tab. 2: Geothermische Daten im Raum Stuttgart (z.T. nach Prestel & Schloz 2002); km1GG = Grundgipsschichten, kuGD = Grenz dolomit, ku = Unterkeuper, mo = Oberer Muschelkalk, s = Buntsandstein, g = Gneise oder Granite des Grundgebirges

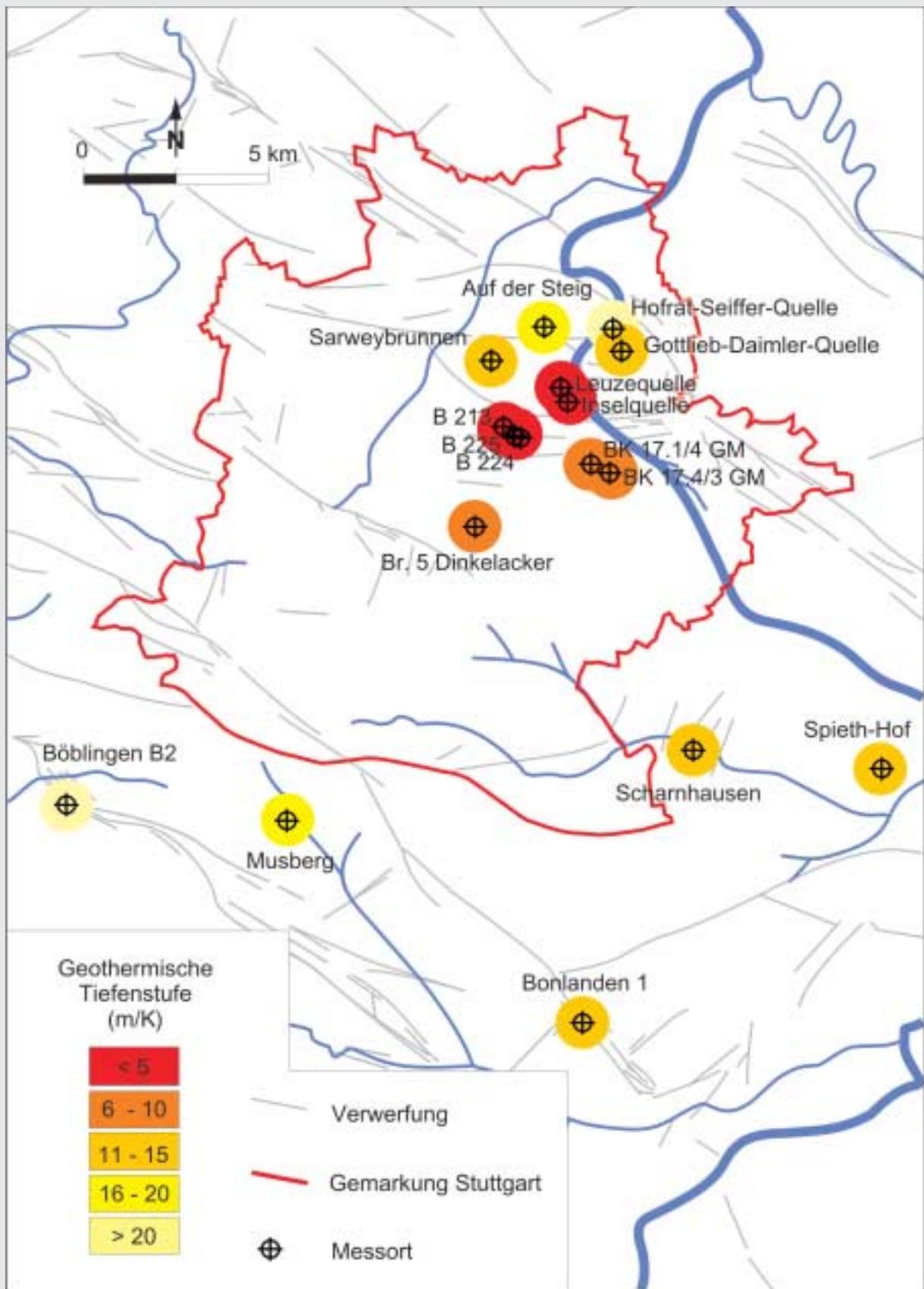


Abb. 12: Geothermische Tiefenstufe im Raum Stuttgart

In Stuttgart schwankt die Eignung des Untergrundes zur Erschließung von geothermischer Energie in Abhängigkeit von Geologie und Hydrogeologie stark.

Günstig sind hierbei solche Bereiche, in denen der Untergrund eine hohe **Wärmeleitfähigkeit** λ aufweist. Diese variiert je nach Gesteinsart in etwa wie folgt:

| Stratigraphie/Petrographie | | Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K] (Schätzwerte) | |
|----------------------------|---|--|-----------|
| Lockergesteine | Lehm (Löss-, Filder-, Auelehm, Keuperfließerde) | trocken | 0,4 - 1,0 |
| | | wassergesättigt | 0,9 - 2,3 |
| | Neckarkies | trocken | 0,4 - 0,5 |
| | | wassergesättigt | ca. 1,8 |
| Festgesteine | Unterjura (ungegliedert) | Tonstein | 1,7 - 2,2 |
| | | Kalk-/Sandstein | 1,4 - 4,1 |
| | Knollenmergel | Schluffstein | 1,5 - 2,2 |
| | Stubensandstein-Schichten | Sandstein | 1,8 - 2,6 |
| | | Schlufftonstein | 1,6 - 2,1 |
| | Obere Bunte Mergel | Schluffstein | 1,5 - 2,2 |
| | Kieselsandstein-Schichten | Sandstein | 1,7 - 2,6 |
| | | Tonstein | 1,7 - 2,2 |
| | Untere Bunte Mergel | Schluffstein | 1,5 - 2,2 |
| | Schilfsandstein-Schichten | Sandstein | 1,8 - 2,6 |
| | | Tonstein | 1,7 - 2,2 |
| | Gipskeuper | ausgelaugte Tonsteine | 1,7 - 2,3 |
| | | teilausgelaugte Tonsteine | 1,5 - 2,2 |
| | | Gips | 1,3 - 1,6 |
| Anhydrit | | 1,5 - 4,1 | |

Tab. 3: Bandbreiten der gesteinspezifischen Wärmeleitfähigkeit in Stuttgart (in Anlehnung an VDI 4640); exakte Werte müssen vor Ort gemessen werden.

Neben dem Verwitterungsgrad spielt auch in den Festgesteinen die Wassersättigung eine große Rolle. Hier muss damit gerechnet werden, dass z.B. im Bereich der Keupertonsteine in größeren Tiefen trockenes (= nicht wasserführendes) Gebirge ange-
 troffen wird, das für die Energiegewinnung grund-
 sätzlich weniger vorteilhaft ist. Ähnliches gilt für
 unausgelaugte Sulfatgesteinslager im Gipskeuper,
 die auf Grund ihrer leichten Wasserlöslichkeit ein
 Indiz für die Abwesenheit von Grundwasser sind.
 Trockene Gebirgsabschnitte findet man ferner in
 den Gebieten, in denen der Obere Muschelkalk

nicht nur stark verkarstet ist, sondern bei tiefliegen-
 dem freiem Karstgrundwasserspiegel auch über eine
 oft mehrere Zehnermeter mächtige ungesättigte
 Zone verfügt (**Abb. 13**).

Außerdem können fazielle Unterschiede das Wär-
 meleitvermögen stark beeinflussen. Aus diesem
 Grund darf in der „Flutfazies“ des Schilfsandsteins
 (= massige Sandsteine mit tonig-karbonatischem
 Bindemittel) ein besserer Wärmetransport als in der
 geringer mächtigen „Normalfazies“ (= sandige Ton-
 steine) erwartet werden.

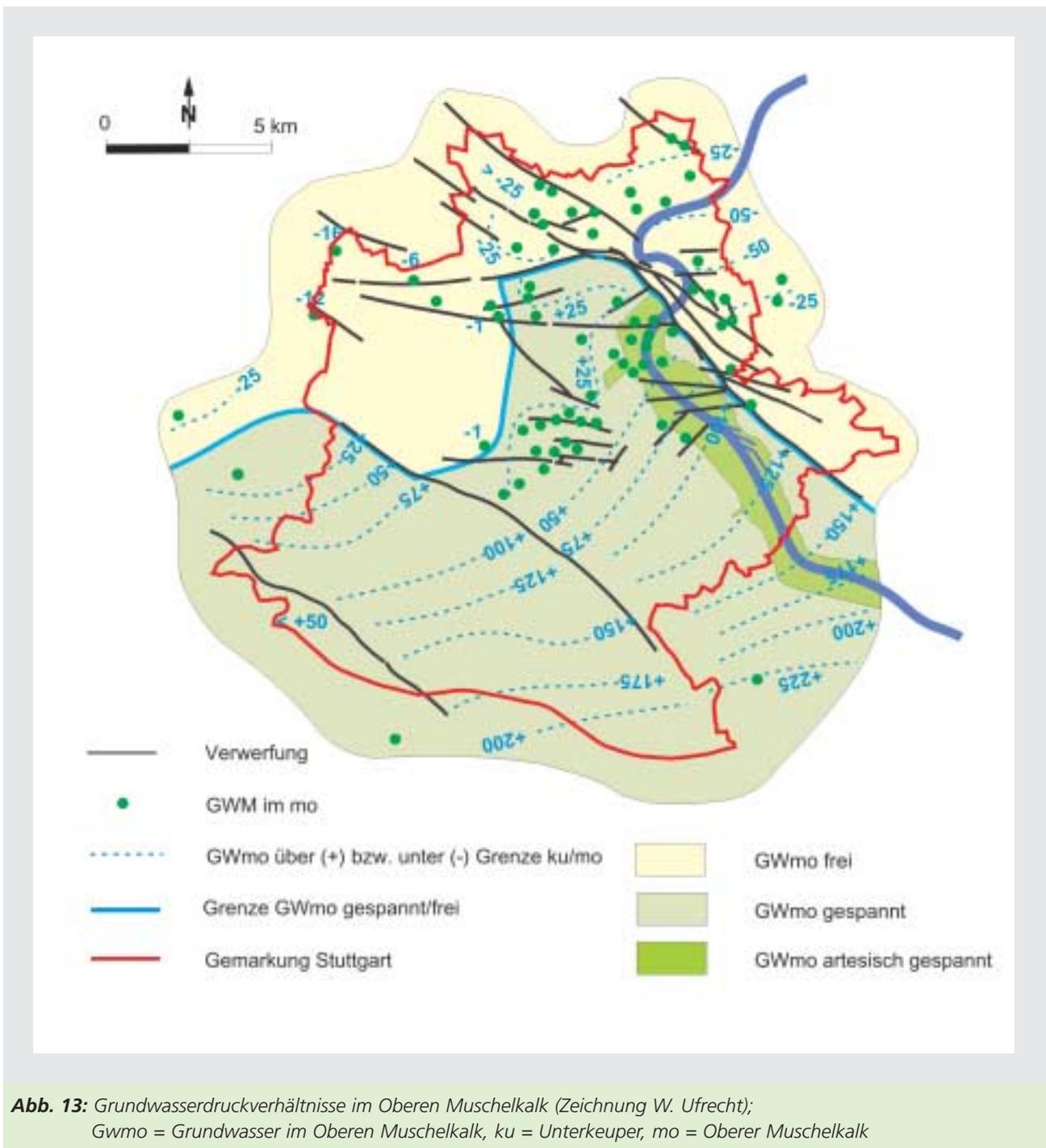


Abb. 13: Grundwasserdruckverhältnisse im Oberen Muschelkalk (Zeichnung W. Ufrecht);
 Gwmo = Grundwasser im Oberen Muschelkalk, ku = Unterkeuper, mo = Oberer Muschelkalk

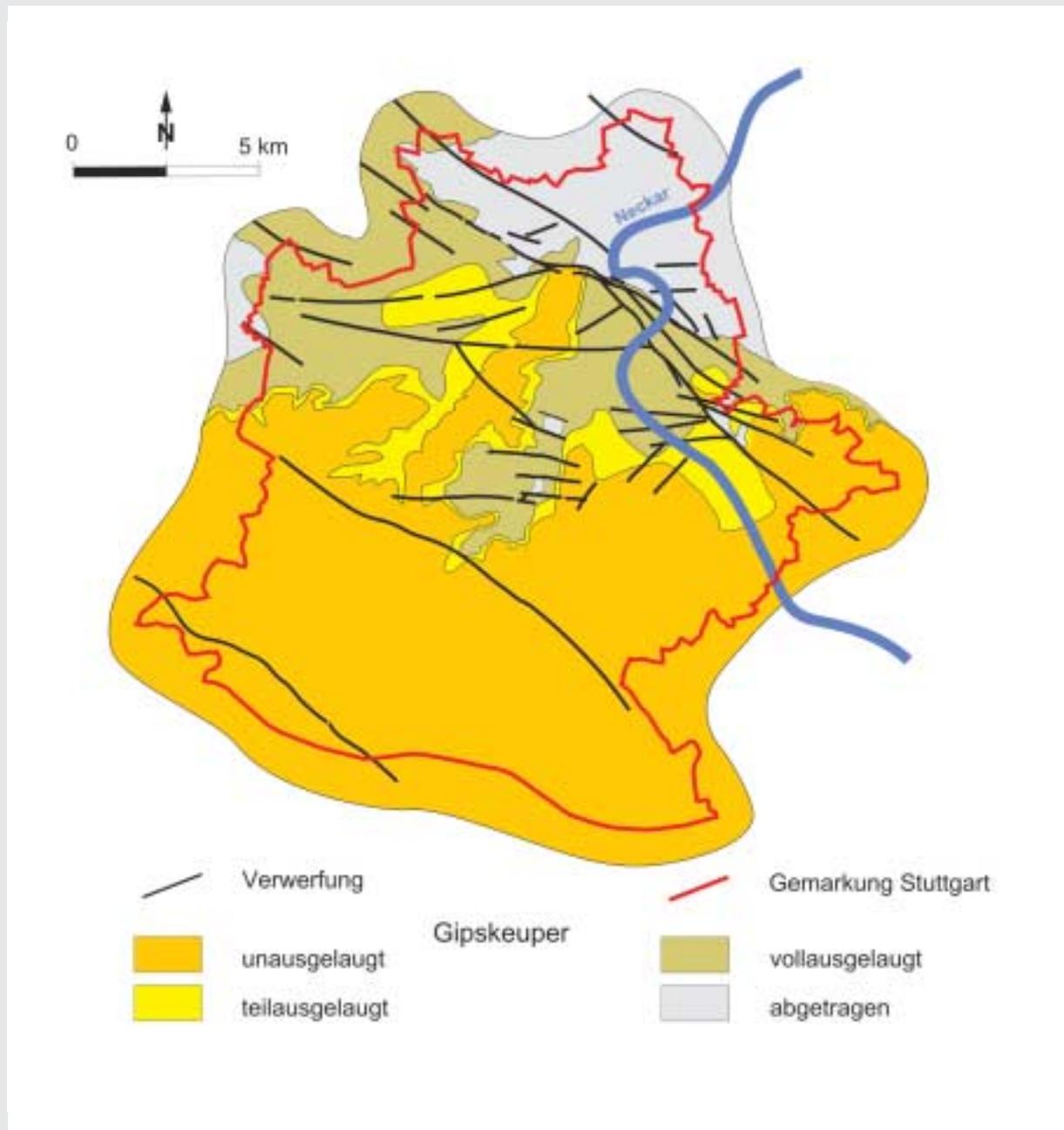


Abb. 14: Sulfatgesteinauslaugung im Gipskeuper (Zeichnung W. Ufrecht)

In den gröberen (= vindelizischen) Keupersandsteinen (Kiesel-, Stubensandstein) wird die Wärmeleitfähigkeit in gewissem Umfang auch von der Art der Kornbindung (tonig, karbonatisch oder kieselig) bestimmt. Die größte Bandbreite zeigt sich jedoch wieder im Gipskeuper. Hier trifft man je nach örtlichem Verwitterungs- und Auslaugungsgrad (**Abb. 14**) - von wassergesättigten Tonen und Tonsteinen bis hin zu trockenem Gips (einzelne Knollen und Bänder, örtlich auch metermächtige Lager) und wasserfreiem Anhydrit - thermodynamisch ganz unterschiedlich wirksame Untergrundverhältnisse an.

Auf Grund dieser sehr wechselhaften Gesteins- und Grundwassereinflüsse sind größere Erschließungstiefen nicht immer rentabel. Vielmehr ist es empfehlenswert, sorgfältig zu planen und die tatsächliche Eignung für eine geothermische Nutzung vor Ort zu erkunden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind die einzigen verlässlichen Anhaltspunkte, nach denen die unterirdischen Anlagen wirtschaftlich dimensioniert werden können.

5.2 Geothermische Nutzungsbereiche in Stuttgart

Im Stadtgebiet Stuttgart lassen sich entsprechend den geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen sowie der Zonengliederung des Heilquellenschutzgebiets vereinfacht sechs Bereiche zusammenfassen (**Abb. 15**). In den **nördlichen Nutzungsbereichen** ist die Gewinnung von Wärme aus

fläche. Die lokal vorhandenen Deckschichten über dem Oberen Muschelkalk bestehen aus Unterkeuper, der bereichsweise noch Reste von ausgelaugtem Gipskeuper trägt. Die Mächtigkeit dieser Keuperschichten, die insgesamt nur wenige Zehnermeter beträgt, ist oft unzu-

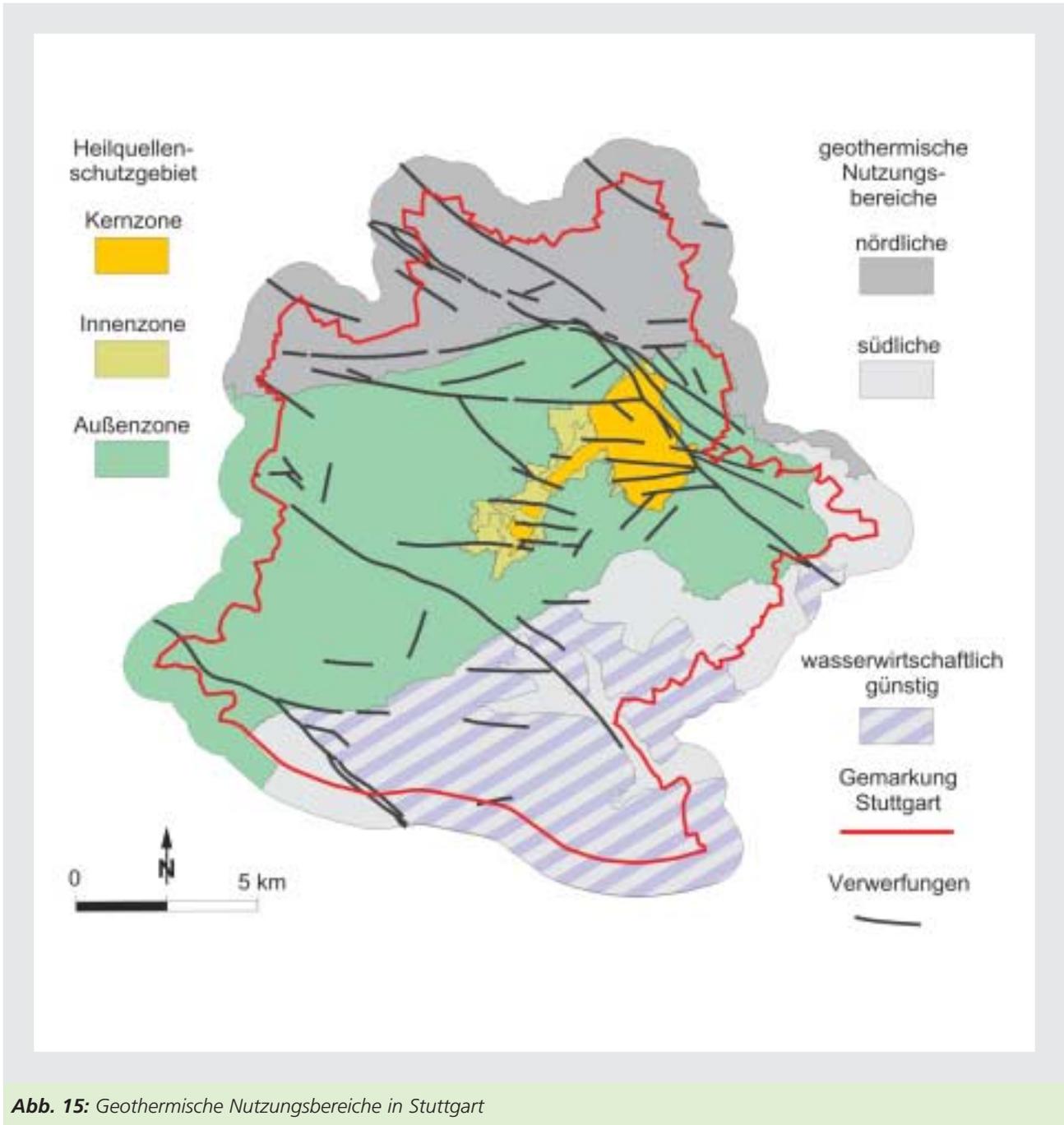


Abb. 15: Geothermische Nutzungsbereiche in Stuttgart

dem Untergrund grundsätzlich möglich, erschließungstechnisch aber oft schwierig. Hier ist der Obere Muschelkalk intensiv verkarstet. Er verfügt örtlich über eine mehrere Zehnermeter mächtige ungesättigte Zone und eine freie Karstwasserober-

reichend, um den benötigten Energiebedarf zu decken. Dann gibt es nur die Möglichkeit, einen wirtschaftlicheren Wärmegewinn über größere Einbindetiefen zu gewährleisten. Dazu müssen die unterirdischen Wärmetauscher bis in den Oberen Muschel-

kalk hinabgeführt werden. Aber auch hier ist die Wärmeausbeute in der ungesättigten Zone vergleichsweise schlecht. Hinzu kommen die technischen Risiken, die im Zusammenhang mit der starken Verkarstung auftreten. Meist bereiten Hohlräume und Nachfall, besonders im Trigonodus-Dolomit, bereits bei der Bohrung oder später beim Ausbau Schwierigkeiten. In Reichweite größerer Hohlräume kann das Bohrloch oft nicht abgedichtet bzw. die Sonde nicht sehr wärmeleitschlüssig an das Gebirge angebunden werden. Insofern steht die hier unzureichende Wärmeausbeute oft auch in keinem Verhältnis zur Bohrtiefe. Außerdem drohen in freien, nicht hinterfüllten Bohrlochabschnitten leicht Leckagen, weil hier die Sonden gegenüber Nachbrüchen und Sackungen besonders exponiert sind.

Damit sind die geologischen Randbedingungen in den nördlichen Nutzungsbereichen deutlich ungünstiger als im Süden. Sofern hier dennoch eine Erdwärmegewinnung beabsichtigt ist, muss den dortigen Verhältnissen durch eine dementsprechend sorgfältige Planung Rechnung getragen werden.

Innerhalb des **Heilquellenschutzgebiets** ist die Erdwärmennutzung - anders als in vielen Trinkwasserschutzgebieten - grundsätzlich zulässig. Allerdings gelten hier zonenspezifische Tiefenbegrenzungen sowie Auflagen zur Beschaffenheit des Trägermediums.

In der **Kernzone** können die quartären Schichten zur Wärmegewinnung genutzt werden. Allerdings dürfen die unterlagernden Schichten des Keupers dort nicht erschlossen werden (**Kap. 6.1.2**).

In der **Innenzone** entspricht die nutzbare Einbindelänge von geothermischen Erschließungsanlagen, sofern es sich hierbei um punktuelle Eingriffe handelt (z.B. EWS, Energiepfähle), der Entfernung zwischen Erdoberfläche und der Grenzfläche Grundgipsschichten/Unterkeuper (**Kap. 6.1.2**).

Gleiches gilt in der **Außenzone**, wenn die Anlagen nicht mit grundwasserneutralen Stoffen betrieben werden sollen. Die Grenze zum Unterkeuper ist auch überall dort limitierend, wo in höheren Schichtabschnitten ungünstige Gebirgsverhältnisse herrschen, sodass keine durchgehende Ringraumabdichtung eingebaut werden kann (z.B. Sondenabschnitte mit Aufkiesung im Ringraum).

Die **südlichen Nutzungsbereiche** umfassen die Stubensandstein-Verebnungen und die Filderflächen. Hier streichen an der Erdoberfläche Schichten vom höheren Mittelkeuper (Stubensandstein) bis zum Unterjura aus.

Von oben nach unten betrachtet, gelten die Unterjuraesteine sowohl bohrtechnisch als auch hydrogeologisch als wenig problematisch. Gleiches trifft für den darunter liegenden Knollenmergel zu, der in Oberflächennähe zwar als rutschgefährdet, generell aber als wasserarm gilt. Demgegenüber sind die Sandsteinkomplexe der Stubensandstein-Schichten im Bereich der Verebnungen oder am Ausstrich an den Talhängen öfters stockwerkspezifisch wasserführend. Wird die Überdeckung mächtiger, geht die Aquiferfunktion der Stubensandsteine jedoch weitgehend verloren.

Abgesehen von tektonisch beanspruchten Gebieten (z.B. Fildergraben-Randverwerfung) ist der Bereich der geschlossenen Unterjuraflächen auf den Fildern **wasserwirtschaftlich günstig**. Hier konzentriert sich das meist geringe Grundwasserdargebot auf die Kalk- und Sandsteine im Unterjura. In der darunter folgenden Keuperserie findet man wenig bis so gut wie kein Grundwasser mehr. Aus diesem Grund führt der Gipskeuper dort auch noch flächig unausgelaugten Gips. Die trockenen Keuperabschnitte gelten als vergleichsweise standfest, sodass hier die bohrtechnischen Risiken für Stuttgarter Verhältnisse gering sind.

Das weitgehend wasserfreie Gebirge ist für die Wirtschaftlichkeit der Wärmeausbeute allerdings weniger vorteilhaft. Als besonders unattraktiv gelten die Gipsvorkommen im Gipskeuper, weil deren Wärmeleitfähigkeit gering ist. Das bedeutet, dass eine Ausdehnung der Erschließungstiefe bis in diese Schichten nicht automatisch rentabel sein muss.

Erschließungstechnisch kritisch sind auch die Bereiche des unausgelaugten Gipskeupers, in denen noch Anhydrit anzutreffen ist. Grund hierfür sind Quellungen, die unweigerlich auftreten, wenn Anhydrit mit Wasser in Kontakt kommt. Selbst bei der Wahl geeigneter Bohrverfahren (z.B. Imlochhammer mit Druckluftspülung) kann weder ausgeschlossen noch verhindert werden, dass in Oberflächennähe Grundwasser angetroffen wird, das dann über das Bohrloch bis in den Anhydrit abfließt. Dann bergen die dort einsetzenden Quellprozesse unkalkulierbare Risiken. Diese können von Behinderungen beim Einführen der unterirdischen Anlagenanteile (z.B. Steckenbleiben der Leitungsbündel) bis hin zum Abquetschen der Wärmeträgerrohre nach dem Einbau reichen. Insofern ist fraglich, ob in anhydritführenden Gebirgsabschnitten ein reibungsloser Einbau und ein störungsfreier Anlagenbetrieb garantiert werden kann. Aus diesem Grund sind die Erschließung von Anhydrit zur Gewinnung von Erdwärme riskant und die Folgen kaum absehbar.

6. Erschließung der oberflächennahen Geothermie

6.1 Technische Erschließungsformen und wasserwirtschaftliche Anforderungen an deren Herstellung

6.1.1 Erdwärmekollektoren

Erdwärmekollektoren bestehen i.d.R. aus **horizontal** verlegten Wärmetauschersystemen (Rohrregister bzw. Kapillarrohrmatten aus Kunststoff). Diese werden in einer Tiefe von rund 0,2 m unter der örtlichen Frostgrenze (i.d.R. 1,0 – 1,2 m) verlegt. Im Kollektor zirkuliert als Wärmeträgermedium ein Wasser-Frostschutzmittelgemisch (z.B. Sole, Glykol), das die Wärme aus dem Erdreich aufnimmt und an die Wärmepumpe weiterleitet.

Erdwärmekollektoren nutzen gespeicherte Sonnenenergie, die durch direkte Einstrahlung, Wärmeüber-

tragung aus der Luft und durch Niederschlag in das Erdreich übergeht. Somit unterliegt der Erdwärmekollektor den jahreszeitlichen Temperatureinflüssen, weshalb die Wärmepumpe in den Zeiten des größten Wärmebedarfs mit den ungünstigsten Wärmequellentemperaturen auskommen muss.

es aber auch Sonderformen (z.B. Grabenkollektor), die mit weniger Fläche auskommen. Da Erdwärmekollektoren üblicherweise in geringer Tiefe verlegt werden, zählen i.d.R. weder die Herstellung noch der Betrieb als wasserrechtlicher Benutzungstatbestand.

In hydrogeologisch sensiblen Gebieten (z.B. geringer Grundwasserflurabstand) besteht jedoch bei unsachgemäßem Einbau bzw. im Leckagefall die Gefahr, dass das Trägermedium mangels ausreichender Rückhaltung in der ungesättigten Zone in das oberflächennahe Grundwasser sickert und dort zu qualitativen Beeinträchtigungen führt.

Ferner bewirkt eine unsachgemäße Verfüllung der Kollektorgrube eine dauerhafte Schwächung der Deckschicht und erhöht so das Risiko eines verstärkten Eintrags anthropogener Stoffe aus dem Oberflächenwasser. Sofern es hierbei zu direkten hydraulischen Kurzschlüssen zwischen Oberflächen- und Grundwasser kommt, ist die Gefährdung besonders groß.

Zum Schutz der Grundwasserbeschaffenheit müssen gerade bei geringem Flurabstand die Deckschichten mit ihrer Filter- und Ausgleichsfunktion möglichst erhalten bleiben. Um dies zu gewähr-

leisten, sollte vor Beginn der eigentlichen Planung die hydrogeologische Situation im Bereich des vorgesehenen Standorts möglichst genau erfasst werden. Im Zweifelsfall empfiehlt sich die Abstimmung mit der unteren Wasserbehörde.

Im Übrigen wird durch geeignete Sicherheitsvorkehrungen beim Bau und Betrieb möglichen Boden- und Grundwasserunreinigungen vorgebeugt. Zur Vermeidung von Druck- oder Leckagestellen werden die Wärmeträgerrohre üblicherweise in einem Sand-



Abb. 16: Erdwärmekollektoranlage im Bauzustand (Aufnahme: W. Schenk)

Der Erdwärmekollektor benötigt eine nicht überbaute Freifläche, die i.d.R. der 1,5- bis 2-fachen Größe der zu beheizenden Fläche entspricht. Daneben gibt

bett (ca. 30 cm, VDI 2001) verlegt. Die ursprüngliche Schutzfunktion der Deckschicht lässt sich wiederherstellen, in dem nach Verlegen der Rohrregister gering durchlässiges Bodenmaterial in ausrei-

6.1.2 Erdwärmesonden

Erdwärmesonden sind Bohrungen, in die ein oder mehrere Wärmeträgerrohre eingebaut sind. Hierbei kommen Doppel-U-Rohre oder (seltener) Koaxialrohre aus Kunststoff (HDPE/PP/PB) mit üblichen Einzeldurchmessern von 25 bzw. 32 mm in Frage. Der Raum zwischen Bohrlochwand und Wärmetauscherrohren wird i.d.R. durchgehend mit Zement-Bentonit-Suspension oder gleichwertig dauerhaft abdichtenden Materialien (z.B. Thermo-Zement) verpresst. Den Energietransport zur Wärmepumpe übernehmen - wie beim Erdwärmekollektor - die in den Wärmeträgerrohren zirkulierenden Trägermedien.

In unserer Region reichen die Erdwärmesonden normalerweise in Tiefen zwischen 50 m und 150 m. Neben dem reinen Entzug von Energie aus dem Untergrund dienen Erdwärmesonden zur Ableitung überschüssiger Wärme bzw. zur Speicherung saisonaler Wärme (Solarwärme, Prozesswärme, Abwärme aus der Raumkühlung) im Untergrund, die bei späterem Bedarf dann zum Heizen zurückgewonnen werden kann (vgl. Kap. 6.2.2).

Der Einsatz von Erdwärmesonden reicht von ein bis zwei Sonden zur Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern bis hin zu Multisondensystemen zur Wärme- und Kälteversorgung von Großbauten (Industrie, Gewerbe) oder ganzen Siedlungen. In Abb. 17 sind Aufbau und Funktionsweise der Erdwärmesonde dargestellt.

Bei der Herstellung (Bohrung, Ausbau) von EWS müssen meist verschiedene Grundwasserstockwerke durchbohrt werden. Dabei wird die Mächtigkeit der über dem Oberen Muschelkalk verbleibenden Deckschichten reduziert. Dadurch geht ein Teil der natürlichen Schutzwirkung verloren. Gleichzeitig besteht die Gefahr, dass bei unsachgemäßem Ausbau bzw. unsachgemäßer Verschließung mehrere Grundwasserstockwerke dauerhaft miteinander verbunden werden (hydraulischer Kurzschluss). Dann werden sich die ursprünglichen Grundwasserhältnisse sowohl qualitativ als auch quantitativ verändern. Deshalb muss durch technische Sicherheitsvorkehrungen dafür gesorgt werden, dass weder über die Betriebszeit noch danach künstliche horizontale und vertikale Wegsamkeiten existieren, über die flüssige

chender Mächtigkeit in die Kollektorgrube eingebaut und optimal verdichtet wird.

Stoffe in das Grundwasser bzw. in tiefere Grundwasserstockwerke gelangen können. Schwerpunkt ist daher die sorgfältige Abdichtung des Bohrlochs nach Einbau der Sonden. Eine funktionstüchtige Dichtwirkung ist speziell dort bedeutsam, wo in den unterirdischen Anlagenteilen grundwasserfremde Trägermedien verwendet werden sollen. Schwachstellen in der Ringraumzementation treten meist dort auf, wo die Sondenbündel exzentrisch eingebaut wurden oder gar an der Bohrlochwand anliegen. Dann besitzen die Sondenstränge keine gleichmäßige bzw. überhaupt keine Zementummantelung, die gegen das Gebirge und das Grundwasser abdichtet.

Zur Unterbindung von künstlichen Wegsamkeiten für das Grundwasser muss der Ringraum der Bohrlöcher nach Einbau der Sondenstränge selbst beim Einsatz unbedenklicher Trägermedien wirkungsvoll abgedichtet werden. Um dies zu erreichen, dürfen die unterirdischen Wärmetauscher nicht an der Bohrlochwand anliegen. Gleichzeitig müssen die Leitungen in den **hydrogeologisch weniger günstigen Bereichen** (z.B. Karst, Grundwasserstockwerke, Heilquellenschutzgebiet) über eine ausreichend dicke Ummantelung mit Dichtungsmaterial (z.B. Zement-Bentonit) verfügen. Dies ist der Fall, wenn die Bohrdurchmesser so gewählt sind, dass der Ringraum um die Leitungsbündel (Abstand Leitung – Bohrlochwand) überall $\geq 5 \text{ cm}$ beträgt und in Abständen $< 5 \text{ m}$ eine Zentrierung der Leitungen mittels Abstandshalter erfolgt. Da die Stuttgarter Grundwässer oft sulfathaltig und damit aggressiv sind, werden üblicherweise sulfatbeständige Abdichtungsmaterialien (z.B. sulfatbeständige Zement-Bentonit-Suspension) verlangt. Das Abdichtungsmaterial wird hierbei im Kontraktorverfahren, erforderlichenfalls in mehreren Schritten, eingebracht. Weil die Drücke der Zementpumpe z.T. nicht ausreichen, um die noch flüssige Suspensionssäule im Ringraum hoch zu drücken, muss die Suspensionsleitung sukzessive nach oben gezogen werden. Alternativ können die flüssigen Dichtungsstoffe auch über mehrere verlorene Leitungen, die in unterschiedlichen Tiefen enden, eingepresst werden.

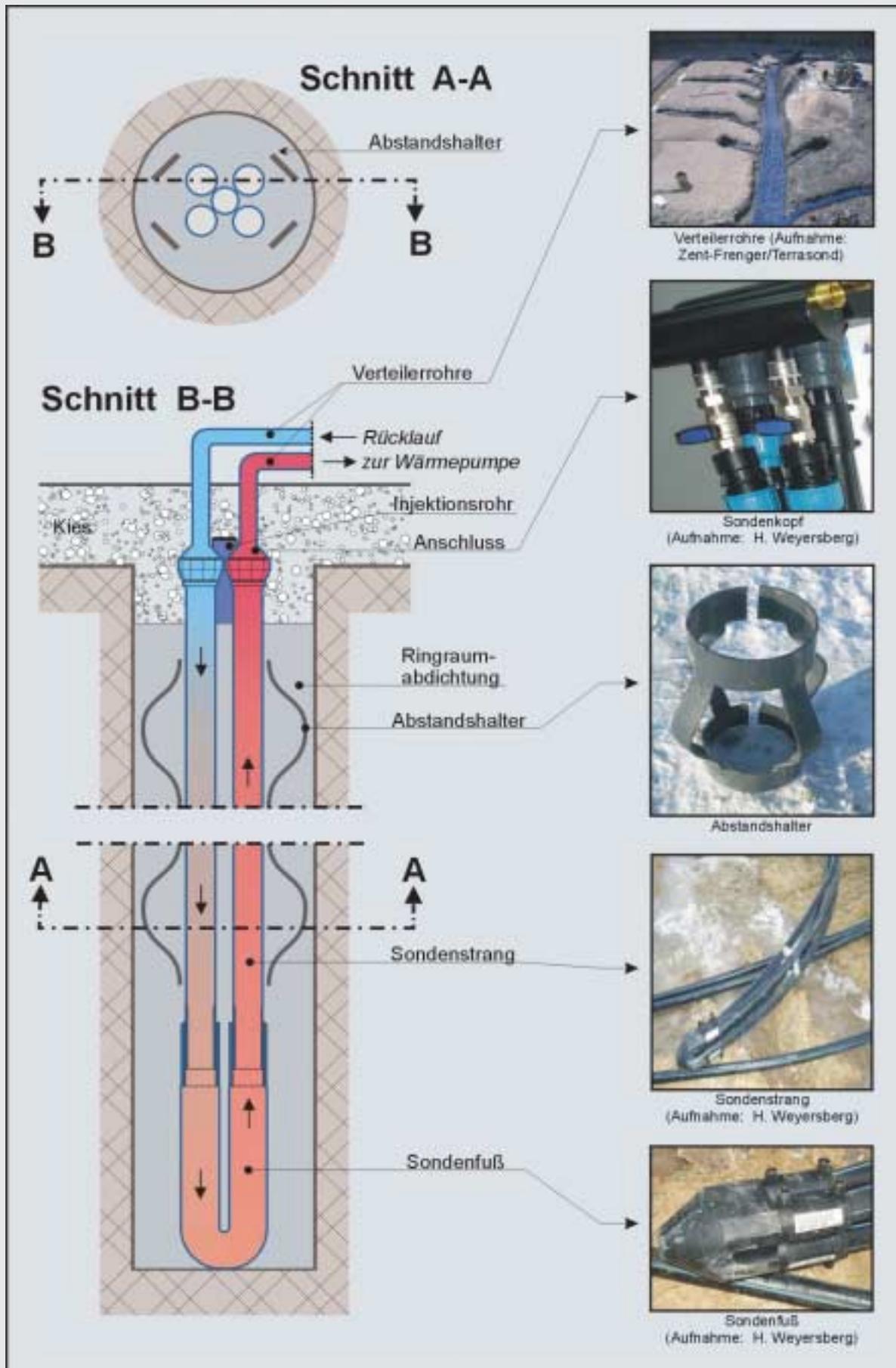


Abb. 17: Erdwärmesonde (Detailaufnahmen: Zent-Frenger/Terrasond, H. Weyersberg)

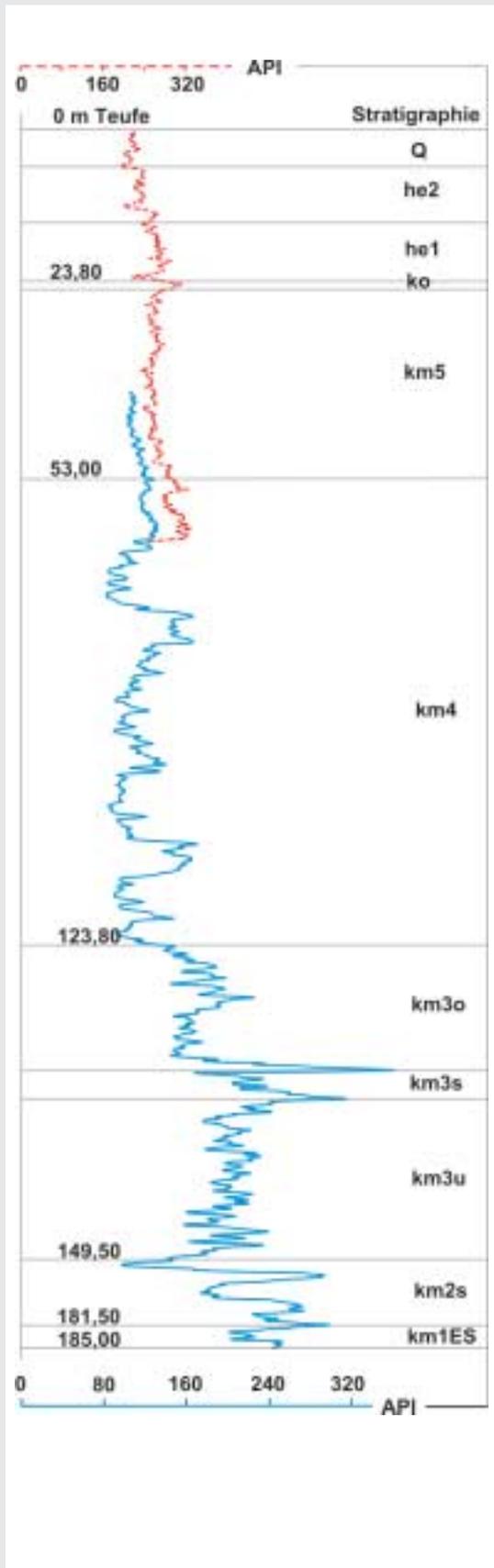


Abb. 18: γ -log für einen (zusätzlich gekernten) Profilabschnitt vom Unterjura bis zu den Estherien-schichten des Gipskeupers (stratigraphische Abkürzungen s. Abb.2)

In **wasserwirtschaftlich günstigeren Bereichen** (Filderflächen mit geschlossener Unterjurabedeckung außerhalb des Heilquellenschutzgebiets) sind auch engere Ringraumweiten und demzufolge auch kleinere Bohrdurchmesser vertretbar, sofern die Querschnittsfläche der Ringraumverfüllung mindestens 65% der Bohrquerschnittsfläche beträgt (MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG 2005).

Unabhängig vom Heilquellenschutzgebiet muss geklärt werden, welche Grundwasserstockwerke von den Erdwärmesonden durchteuft werden und welche hydrogeologischen Verhältnisse (z.B. Gipsauslaugung, offene Hohlräume, Klüftung) in der erschlossenen Bohrstrecke herrschen. Insofern müssen die durchfahrenen Schichten detailliert aufgenommen und dokumentiert werden (**Kap. 7**).

Falls keine Kernproben vorliegen, kann auch das Bohrklein einer Vollbohrung beschrieben und in Kombination mit einer geophysikalischen Untersuchung (z.B. γ -log) stratigraphisch eingestuft werden (siehe **Abb. 18**). Zur Dokumentation der Gebirgs- und Grundwasserverhältnisse eines Sondenfelds reicht gewöhnlich die geologische Aufnahme einer repräsentativen Bohrung aus.

Generell besteht bei den Bohrarbeiten zur Herstellung der Erdwärmesonden die Gefahr, dass das Grundwasser sowohl qualitativ als auch quantitativ beeinträchtigt wird. Insofern müssen geeignete Sicherheitsvorkehrungen ergriffen werden. Dabei sind die Anforderungen an den Stand der Technik der Bohrungen für Erdwärmesonden und Grundwassermessstellen gleich.

So besteht z.B. bei Bohrverfahren mit Flüssigspülung die Gefahr, dass mit der Bohrspülung grundwasserfremde Stoffe ins Grundwasser gelangen und dieses verunreinigen. In stark klüftigem oder gar verkarstem Untergrund ist dieses Risiko besonders groß, weil dort oft beachtliche Mengen an Spülflüssigkeit ins Gebirge verloren gehen.

Deshalb gilt es, das Kontaminationsrisiko möglichst klein zu halten. Dies wird erreicht, indem auf Spülungszusätze verzichtet und ausschließlich Trinkwasser als Bohrspülung verwendet wird. In Bereichen mit stark verkarstem bzw. stark klüftigem Untergrund ist zu prüfen, ob nicht alternative Bohrverfahren (z.B. mit Druckluftspülung) vorteilhafter sind.

Damit die natürliche Reinheit und die Schüttung der Stuttgarter Heilquellen unbeeinträchtigt bleibt, sind die Ansprüche zur Risikominimierung im **Heilquellenschutzgebiet** sehr hoch. In der **Kernzone** ist sicherzustellen, dass die Mineralwässer nur über natürliche Wegsamkeiten ins Quartär bzw. direkt in

den Neckar aufsteigen können. Insofern dürfen dort keine neuen, künstlichen Verbindungen in den abdichtenden Untergrund (Gipskeuper/Unterkeuper) geschaffen werden. Deshalb müssen die Erdwärmesonden hier - wie die übrigen Bohrungen - an der Grenze Quartär/Gipskeuper enden. In Bereichen, in denen das Mineralwasser bis weit über die Erdoberfläche gespannt ist, drohen artesische Mineralwasseraufbrüche. Damit diese technisch beherrscht werden können, müssen auf der Baustelle Totstauverrohrungen vorgehalten werden. Außerdem werden in der gesamten Kernzone zur Früherkennung von Mineralwasser- bzw. Gaszutritten arbeitsbegleitende Messungen mineralwasserrelevanter Parameter (z.B. elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, CO₂ in der Bohrlochluft und im Grundwasser) verlangt.

In der **Innenzone** besitzt der Unterkeuper wichtige Schutzfunktionen gegenüber dem unterlagernden Oberen Muschelkalk. Er führt hier örtlich bereits selbst Mineralwasser und muss vor anthropogenen Einflüssen, speziell stofflicher Art, besonders geschützt werden. Insofern müssen in der Innenzone auch punktuelle Eingriffe (hier: Bohrungen/Erdwärmesonden) grundsätzlich an der Basis der Grundgipsschichten enden. Sofern die Erdwärmesonden-Bohrung unter das Druckniveau im Oberen Muschelkalk reicht, ist auch hier arbeitsbegleitend eine mineralwasserspezifische Bohrlochüberwachung (elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, CO₂ in der Bohrlochluft und im Grundwasser) obligatorisch.

In der **Außenzone** ist die Qualität des Mineralwassers nur dann bedroht, wenn Erdwärme bis in größere Tiefen erschlossen werden soll. Sofern die Bohrungen noch über dem Unterkeuper enden und sich die Gebirgsverhältnisse als günstig (= wenig wasserwegsam) erweisen, sind die normalen Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers ausreichend. Je nach Einzelfall (z.B. Altlast) muss über die Zulässigkeit bzw. über spezielle qualitative Schutzvorkehrungen (z.B. Sperrrohreinsetzung, wirkungsvollere Ringraumabdichtung) entschieden werden. Wenn aber wenig günstige Gebirgsverhältnisse (z.B. Zerrüttungs- und Versturz zonen, offene Hohlräume im Untergrund) auftreten, werden zusätzliche Schutzvorkehrungen (z.B. Reduzierung der Sondenlänge, Verwendung unbedenklicher Trägermedien) verlangt. Grundwasserneutrale Trägerflüssigkeiten sind immer dann vorgeschrieben, wenn die Sonden bis in den Unterkeuper oder tiefer reichen sollen.

In den rechtskräftigen **Wasserschutzgebieten** „Blauäcker“, „Mahdental“ und „Bruderhaus-/Schattenquelle“ werden Karst- bzw. Kluftgrundwasservorkommen zur Trinkwasserversorgung genutzt.

Hier zählen im engeren Zustrombereich Erdaufschlüsse (und damit auch Bohrungen für Erdwärmegewinnung), bei deren Herstellung die schützenden Deckschichten verletzt werden, generell als ein Risiko für die qualitative Beschaffenheit des Trinkwassers. Daher ist im Fassungsbereich (Zone I) sowie in der engeren Schutzzone (Zone II) die Herstellung von Erdaufschlüssen verboten. Entsprechendes gilt auch für Zone III A im Wasserschutzgebiet „Blauäcker“.

In den weiteren Schutz zonen (Zone III, III A außer „Blauäcker“, III B) sind Eingriffe je nach Aquifertyp (Kluft- oder Karstgrundwasserleiter) zulässig, wenn die Erdaufschlüsse in größerer Entfernung zu den Fassungen liegen und zwischen Endteufe und Aquiferoberfläche noch ausreichende Restmächtigkeiten schützender Deckschichten verbleiben. Ob diese Voraussetzungen erfüllt und welche Auflagen zu beachten sind, wird behördlicherseits nach Art und Ausmaß des Vorhabens, ggf. auch auf Grundlage gutachterlicher Beurteilungen, entschieden.

Die Parkseen, Katzenbach- und Steinbachsee liefern Trinkwasser aus Oberflächengewässern. Hier sind im Fassungsbereich und in der engeren Schutzzone Erdaufschlüsse über 2 m Tiefe verboten. Für die weiteren Schutz zonen gibt es keine diesbezüglichen Einschränkungen.

Sofern **Bohrungen in den Oberen Muschelkalk** bzw. bis in den direkten Wirkungsraum (= unter die Druckfläche) der Stuttgarter Mineralwässer geplant sind, wird in Abhängigkeit der örtlichen Druckverhältnisse des Grundwassers im Oberen Muschelkalk und dessen hydrochemischer Zusammensetzung – **inner- und außerhalb des Heilquellenschutzgebiets** - über die jeweils zulässige Bohrtiefe von Fall zu Fall wie folgt entschieden (**Anlage 1.2**):

In Gebieten, in denen das Grundwasser im Oberen Muschelkalk artesisch gespannt und mineralisiert ist (**Abb. 13**), ist das Risiko hinsichtlich kaum beherrschbarer Mineralwasseraufbrüche ins Quartär bzw. bis an die Erdoberfläche groß. Insofern müssen die Bohrungen hier an der Basis des Quartärs enden.

In Bereichen, in denen im Oberen Muschelkalk gespanntes, hoch mineralisiertes und kohlenstoffhaltiges Grundwasser (**Abb. 19**) verbreitet ist, darf der Unterkeuper als Deckschicht über dem Oberen Muschelkalk (Schutz des Mineralwassers vor Verunreinigungen, Ausgasungen usw.) nicht erschlossen werden – nicht zuletzt deshalb, weil hier im Unterkeuper örtlich bereits selbst mineralisiertes Wasser auftritt.

In allen übrigen Gebieten, in denen der Obere Muschelkalk nieder mineralisiertes Wasser bzw. normales Karstgrundwasser führt, können die Bohrungen - unabhängig davon, ob hier freie oder gespannte Druckverhältnisse herrschen - unter Inkaufnahme aller verkarstungsbedingten Bohr- und Erschließungsrisiken - bis auf die Hassmersheimer Schichten (mo1H) abgeteufelt werden. Deren Trennfunktion zum unteren Karststockwerk im Oberen

Muschelkalk, das die Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks hydraulisch und oft auch hydrochemisch umfasst (**Abb. 4**), muss erhalten bleiben. Bohrungen vom oberen in das untere Karststockwerk gelten als nicht abdichtungsfähig, weil hier das Risiko groß ist, dass über das Bohrloch Karstwasser von einem Stockwerk ins andere abfließt und demzufolge die eingebrachte Zementsuspension vor dem Abbinden ausgespült wird.

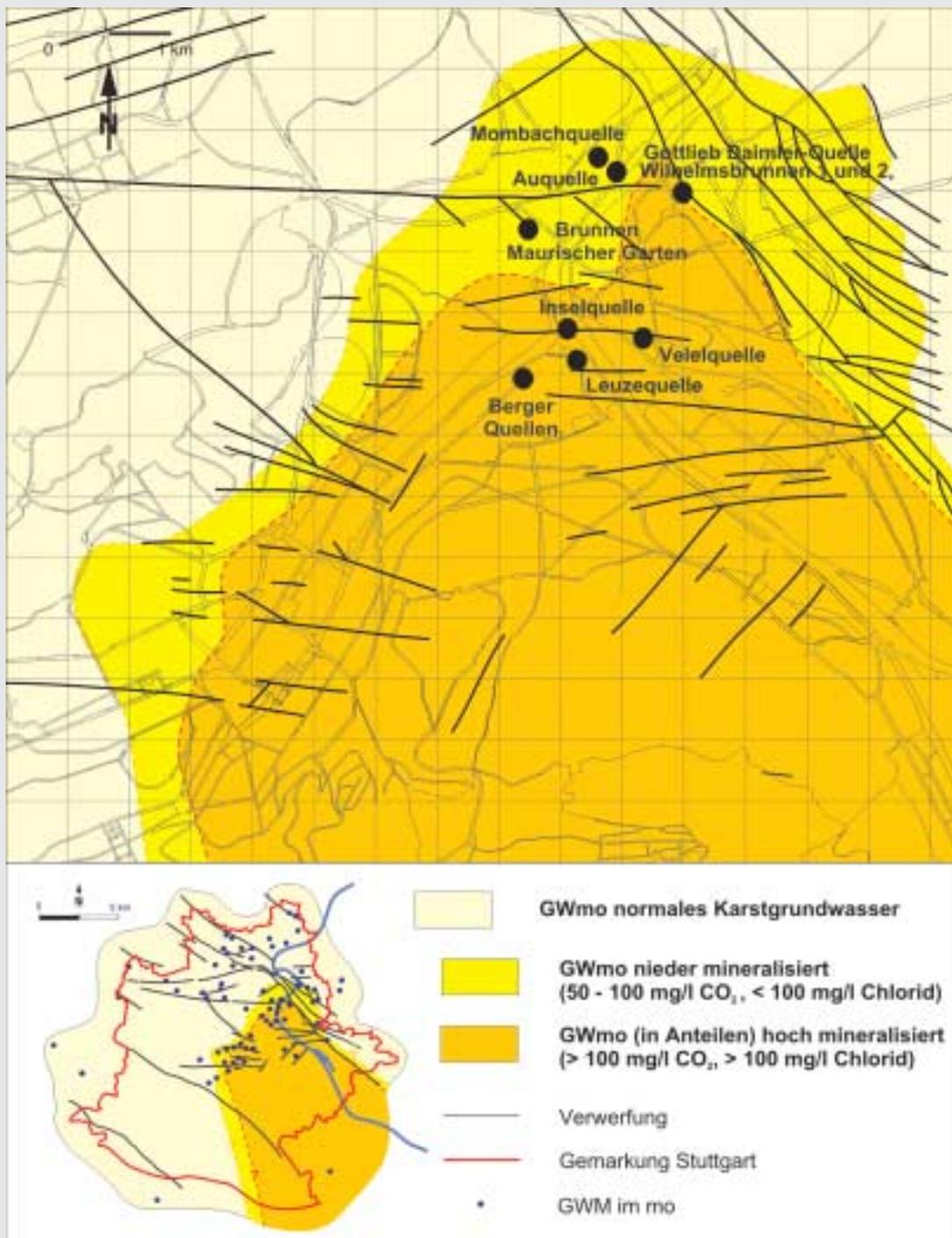


Abb. 19: Hydrochemischer Charakter des Grundwassers im Oberen Muschelkalk

6.1.3 Energiepfähle

Großbauwerke werden oft tief in den Untergrund gegründet. Da Beton eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzt, eignen sich punktuelle Gründungskörper wie Bohr-, Ortbetonramm-, Betonfertigpfähle etc. hervorragend zur Gewinnung und Speicherung von thermischer Energie in Form von Wärme und Kälte.

Die Herstellung von Energiepfählen unterscheidet sich von der Herstellung klassischer Pfähle kaum. Einziger Unterschied ist, dass an den Bewehrungselementen Wärmeträgerrohrsysteme befestigt werden (Abb. 20). Der Aufwand für diese Zusatzausrüstung ist vergleichsweise gering. Insofern ist die geothermische Erschließung des Untergrunds mit Energiepfählen besonders günstig, weil ein Großteil der Herstellungskosten durch die rein gründungstechnischen „Sowieso“-Kosten abgedeckt sind.



Abb. 20: Armierungskorb mit eingebundenen Wärmeträgerrohren



Abb. 21: Pfahlkorb mit Rohrbündel

Pfähle, die ins Grundwasser reichen, bergen immer gewisse Risiken für das Grundwasser. Hierzu zählen hydraulische Kurzschlüsse über Längsläufigkeiten, die zu einem vertikalen Wasseraustausch zwischen einzelnen Grundwasserstockwerken bzw. zu Schadstoffverschleppungen führen können. Insofern ist es wichtig, dass die Pfähle dauerhaft dicht an das Gebirge angebunden sind.

Zum Schutz des Grundwassers werden Energiepfähle daher wasserundurchlässig hergestellt. Hierzu müssen beständige Zementrezepturen gewählt werden, die Schutz vor aggressiven Grundwässern, die im Stuttgarter Raum weit verbreitet sind, bieten. Ansonsten geht im Laufe der Zeit sowohl die Dichtfunktion als auch die Tragfähigkeit der Pfähle verloren.

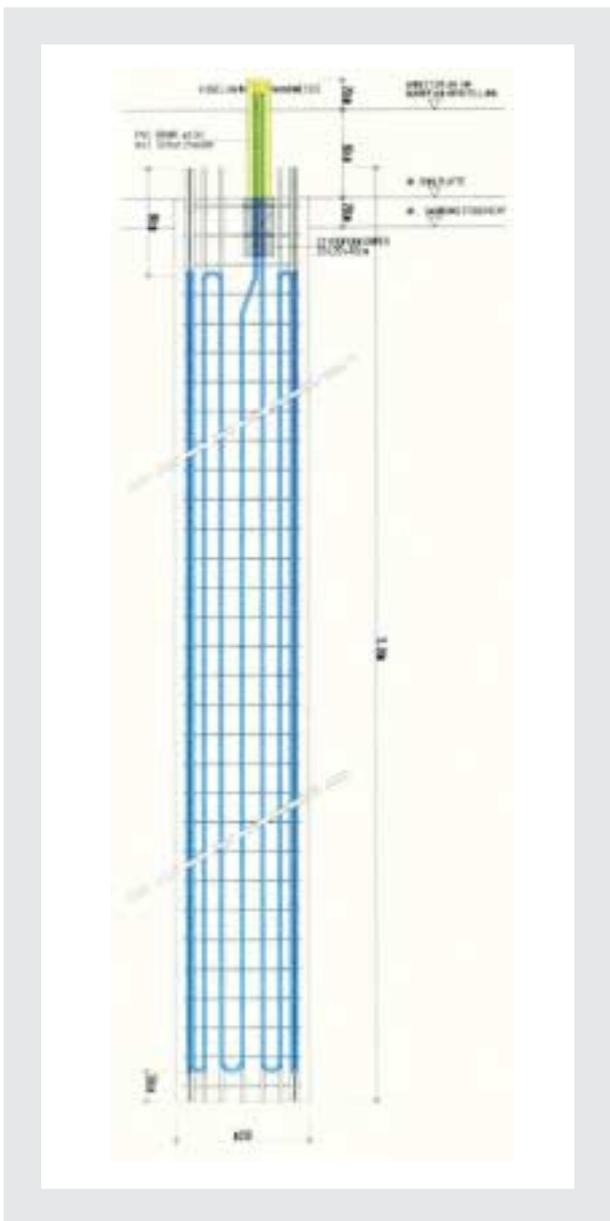


Abb. 22: Bauplan Bewehrung (Zeichnung: Zent-Frenger)

Sofern überschrittene Bohrpfahlwände energetisch genutzt werden sollen, dürfen nur die Sekundärpfähle mit Wärmetauschersystemen ausgerüstet sein. Dagegen müssen Primärpfähle energetisch „blind“ (= ohne Tauscherrohre) sein. Grund ist, dass für die Sicherheit von Leitungen in Primärpfählen, die bei der Herstellung der zweiten Pfahlserie überschritten werden, nicht garantiert werden kann. Hier ist das Risiko von Beschädigungen zu groß.

Innerhalb des **Heilquellenschutzgebiets** gelten zusätzliche Anforderungen. Hier ist das bohrbedingte Risikopotential von Energiepfählen und Erdwärmesonden weitgehend identisch.

In der **Kernzone** wird jedoch – anders als bei den Erdwärmesonden - wegen der eingeschränkten

Möglichkeiten, den Tiefenfortschritt bei Großbohrungen stratigraphisch sicher steuern zu können, ein Sicherheitsabstand zur Quartärbasis (= Oberfläche des unterlagernden Gips- oder Unterkeupers) von 0,5 m verlangt. Insofern muss die Raumlage dieser Grenzflächen vorab hinreichend (z.B. mit Kernbohrungen) erkundet und dargestellt sein. Zudem dürfen die Bohr- bzw. Rammarbeiten keine neuen Wegsamkeiten für das gespannte Mineralwasser schaffen. Deshalb müssen Erschütterungen so reduziert werden, dass in mineralwasserführenden Schichten nur noch Schwinggeschwindigkeiten < 3 mm/s auftreten. In artesisch gespannten Bereichen wird dem Risiko eines unkontrollierbaren Mineralwasserausbruchs durch die Vorhaltung entsprechender Totstauverrohrungen begegnet. Gleichzeitig dienen arbeitsbegleitend Messungen mineralwasserspezifischer Vor-Ort-Parameter (elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert, CO₂ in der Bohrlochluft und im Grundwasser) zur Früherkennung möglicher Mineralwasserprobleme.

In der **Innenzone** dürfen die Energiepfähle bis maximal an die Basis der Grundgipsschichten hinabreichen. Sofern die Pfahlbohrungen die Druckfläche des Mineralwasseraquifers unterschneiden, müssen ausgewählte Pfahlbohrungen stichprobenartig auf Mineralwasserzutritte (arbeitsbegleitende Messungen der Vor-Ort-Parameter) kontrolliert werden.

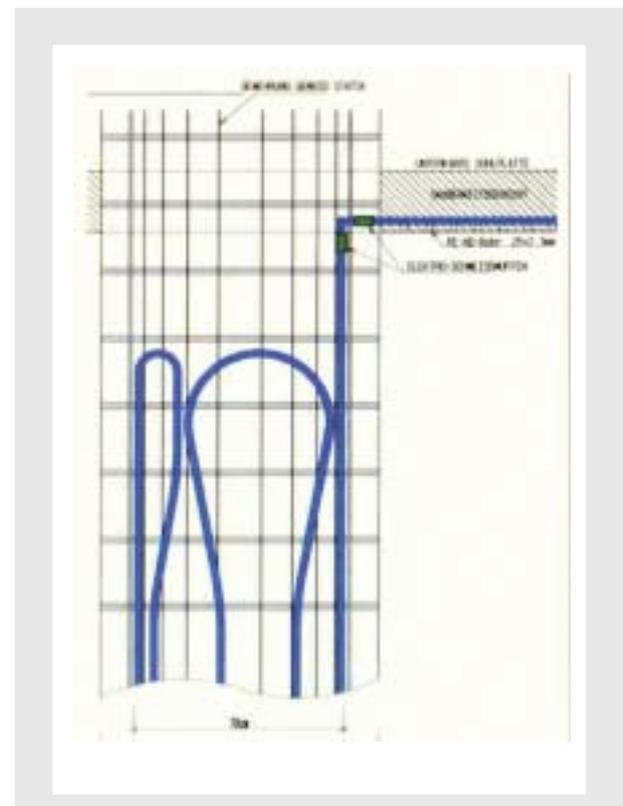


Abb. 23: Anschluss Pfahl an Bodenplatte (Zeichnung Zent-Frenger)

6.1.4 Energiegewinnung durch erdberührte Betonbauteile



Abb. 24: Bewehrungskorb Energieschlitzwand (Aufnahme: Zent-Frenger)

Analog zu Energiepfahlanlagen kann grundsätzlich jede unterirdische (= erdberührte) Betonfläche zur Erschließung geothermischer Energie genutzt werden. Dabei werden die Wärmeträgerrohrsysteme in unterirdische Bauwerkselemente (z.B. Fundamente, Bodenplatten, aufgehende Untergeschoss- bzw. Kellerwände, im Untergrund verbleibende Baugrubenumschließungen, Kanalsegmente etc.) integriert.

Insofern können Schlitzwände, die z.B. als Ortbetonwände für Baugrubensicherungen, Schachtbauwerke oder als unterirdische Umfassungsmauern von Gebäuden dienen, als **Energieschlitzwände** ausgebildet werden. Analog zum Energiepfahl werden hier die Wärmeträgerrohre an vorgefertigten Bewehrungskörben (**Abb. 24**) befestigt und in den zuvor ausgehobenen Schlitz eingelassen. Dieser wird anschließend im Kontraktorverfahren ausbetoniert.

Ferner lassen sich Bodenplatten von Gebäuden thermisch aktivieren (**Energiebodenplatte**), indem Wärmeträgerrohrsysteme vor Erstellung der Sauberkeitsschicht z.B. auf dem Kies-Sand-Planum horizontal verlegt und anschließend einbetoniert werden. Wenn beim Bau der erdberührten Bauteile das Grundwasser freigelegt oder zur Trockenlegung der Baugrube abgesenkt werden muss, gilt es, die Eingriffe in den örtlichen Grundwasserhaushalt auf ein Minimum zu reduzieren und erhebliche Beeinträchtigungen in Quantität (Menge) und Qualität zu vermeiden. Insofern gelten speziell im Heilquellenschutzgebiet baubetriebliche Standards (WOLFF

2004), die hier kurz wie folgt zusammengefasst sind:

In der **Kernzone**, in dem das Mineralwasser hoch bis gar artesisch gespannt ist, können leicht künstliche Mineralwasseraufbrüche entstehen, wenn die (hydraulische) Auflast über den hier bereits lokal mineralwasserführenden Keuperschichten vermindert oder direkt in diese eingegriffen wird. Deshalb sind hier Grundwasserabsenkungen zur Trockenhaltung von Baugruben oder sonstige Grundwasserentnahmen (außer zu Sanierungszwecken) verboten. Außerdem ist die Tiefenreichweite flächiger Eingriffe auf die Basis des Quartärs begrenzt. Damit eventuelle Mineralwasseraufbrüche technisch beherrschbar bleiben, darf dabei das oberflächennah

anstehende Grundwasser im Quartär nur schrittweise bis zu einer Fläche von je 500 m² freigelegt werden.

In der **Innenzone** wirken die Grundgipsschichten bei hochliegendem Druckspiegel des Grundwassers im Oberen Muschelkalk (oberhalb der Grenze Grundgipsschichten/Unterkeuper) örtlich als „Dichtschicht“ gegen Mineralwasseraufstiege aus der Tiefe. Je nach dem, ob die Druckfläche des Grundwassers im Oberen Muschelkalk ober-, inner- oder unterhalb der Grundgipsschichten liegt, variieren heilquellenspezifische Auflagen zur Tiefenreichweite **flächenhafter** Eingriffe – hierzu zählen auch eng-räumige Ansammlungen punktueller Aufschlüsse (z.B. Sonden- oder Energiepfahlfelder) - und zu deren Überwachung (Messung mineralwasserspezifischer Vor-Ort-Parameter) wie folgt:

| Lage der Druckfläche des GWmo | maximale Tiefenreichweite flächenhafter Eingriffe | Messung mineralwasser-spezifischer Vor-Ort-Parameter |
|----------------------------------|---|--|
| oberhalb ... | Basis Bochinger Horizont | ja |
| innerhalb ... | Druckfläche GWmo | nein |
| unterhalb der Grundgipsschichten | Basis Grundgipsschichten* | nein |

Tab. 4: Tiefenbegrenzung für flächenhafte Eingriffe in der Innenzone;
 GWmo = Grundwasser im Oberen Muschelkalk;
 * gilt für punktuelle Aufschlüsse unabhängig von der Höhenlage des GWmo

Parallel dazu sind nach der Heilquellenschutzgebietsverordnung (Regierungspräsidium Stuttgart 2002) Grundwasserentnahmen (Bauwasserhaltungen) in der Innenzone

- auf eine Dauer von max. 6 Monaten,
- eine Entnahmerate von max. 2 l/s oder
- eine Gesamtfördermenge von höchstens 32.000 m³ limitiert.

In der **Außenzone** erstrecken sich Beschränkungen nur auf direkte Eingriffe in den Grundwasserhaushalt des Oberen Muschelkalks. Sie lauten wie folgt:

- max. Förderdauer 12 Monate
- max. Entnahmerate 10 l/s
- max. Gesamtfördermenge 100.000 m³.

6.1.5 Wärmepumpen mit Grundwasserbrunnen

Hierzu wird das Grundwasser über einen Förderbrunnen erschlossen, mittels Unterwasserpumpe direkt zur Grundwasser-Wärmepumpe gefördert und über einen Schluckbrunnen in den Grundwasserkörper zurückgeführt.

In Stuttgart gibt es vielerorts alllastbedingte Grundwasserschäden, deren gezielte Sanierung durch neue Grundwasserentnahmen im Umfeld gestört wird. Daher ist hier ein Zutagefördern und Wieder-einleiten von kontaminiertem Grundwasser - außer im Zusammenhang mit Grundwassersanierungen - unerwünscht. Es wäre zudem mit Reinigungsaufgaben verbunden, sodass eine direkte Entnahme von Grundwasser zur Wärmegegewinnung unter derartigen Voraussetzungen schnell unrentabel wird.

Ungeachtet dessen kollidieren längerfristige Entnahmen in Stuttgart generell mit den Anstrengungen zur Wiederherstellung bzw. zum Erhalt möglichst natürlicher Grundwasserverhältnisse. Hier wird zur Sicherung der Vorräte in den höheren Grundwasserstockwerken (Keuper, Unterjura, Quartär) und zum Schutz der Heilquellen darauf hingewirkt, dass

dauerhafte (= längerfristige) Grundwasserentnahmen schrittweise zurückgefahren werden und neue Nutzungen unterbleiben. Insofern haben in Stuttgart Anträge auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis zur Erschließung und Förderung von Grundwasser zum Zweck der Gewinnung von Erdwärme kaum Aussicht auf Erfolg. Daher wird die Wärmegegewinnung über Grundwasserbrunnen hier nicht vertieft erörtert.

6.1.6 Geothermische Nutzung von Tunnelbauwerken

Bei einigen großen Eisenbahn- bzw. Straßentunneln in der Schweiz (z.B. Furka, St. Gotthard etc.) wird das am Portalbereich gefasste warme Wasser aus der Trockenhaltung des Tunnels energetisch genutzt. Analog der Funktionsweise der „erdberührten Bauteile“ kann die Energie aus dem Tunnel auch durch geschlossene Absorbersysteme (Wärmeträgerleitungen) gewonnen werden. Hierzu müssen beim Bau des Tunnels im Bereich der Tunnelwand Rohrregister eingebaut werden, die später von Wärmeträgerflüssigkeit durchströmt werden.

Bei **Tunneln in offener Bauweise** kann Erdwärme je nach Tiefenlage sowohl über die Bodenplatten als

me (z.B. speziell vorgefertigte Dichtungsfolien = „Energiefolien“; „Energievliese“) in bestimmte Bauelemente des Tunnels integriert, wobei Wärmeträgerrohrsysteme auch im Bereich der Tunnelinnenschale (**Abb. 25**) oder in Ankerelementen verlegt werden können.

Die Gewinnung von Erdwärme aus Tunnelbauwerken wird derzeit in Österreich praktisch erprobt. Sie stellt angesichts des wachsenden Bedarfs an Infrastrukturmaßnahmen sowie der vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten im Großstadtbereich (z.B. Heizen von Stationen, Treppenhäusern, Vorplätzen, Gleisflächen, Geschäften usw.) eine interessante und wirtschaftliche Perspektive dar. Dies gilt besonders,

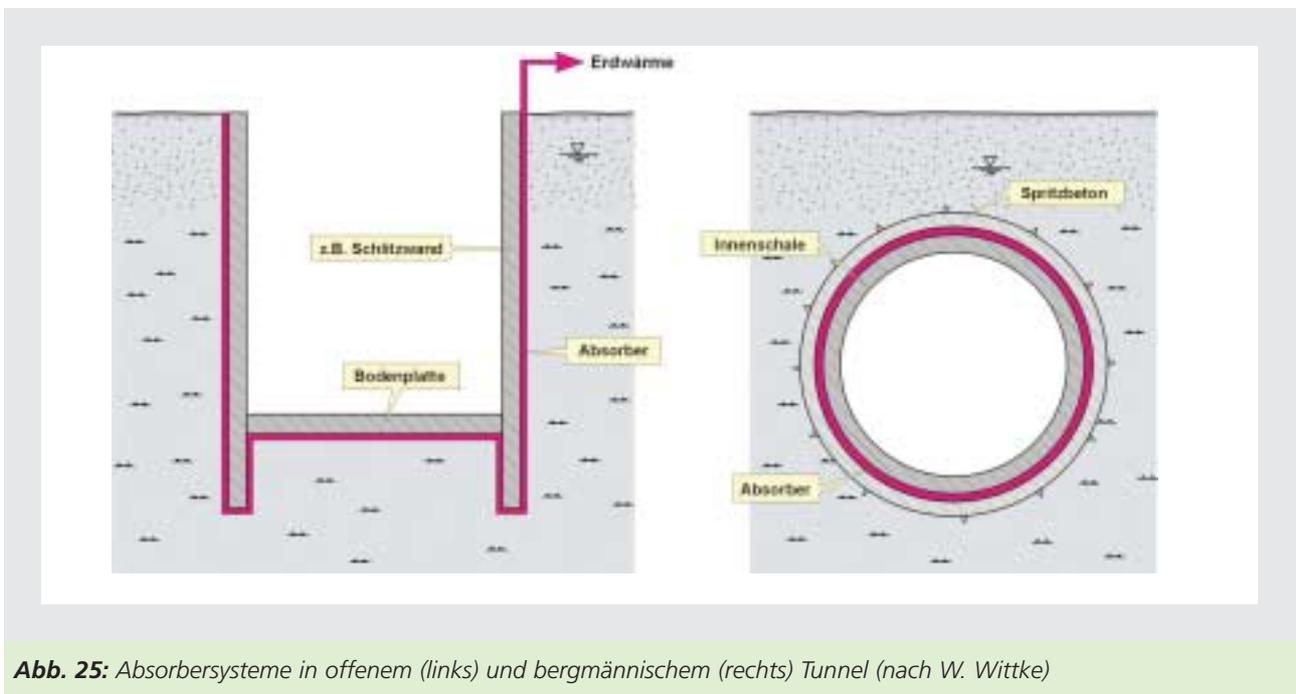


Abb. 25: Absorbersysteme in offenem (links) und bergmännischem (rechts) Tunnel (nach W. Wittke)

auch über die Tunnelwände gewonnen werden (**Abb. 25**). Dies ist auch der Fall, wenn die Wände aus Bohr- oder Rammpfählen bestehen und diese unter den dafür bekannten Bedingungen zur Erdwärmegewinnung ausgerüstet sind.

Durch neuere Entwicklungen kann Erdwärme auch in **bergmännisch aufgefahrenen Tunneln** erschlossen werden. Hier werden die Absorbersysteme

weil die Kosten zur Erschließung des Untergrunds von den herkömmlichen Baukosten, die ohnehin anfallen, abgedeckt werden und im Vergleich dazu der Zusatzaufwand für die Ausrüstung mit Wärmetauscheranlagen kaum ins Gewicht fällt.

6.1.7 Allgemeine Anforderungen und Druckprüfung

Unabhängig davon, ob es sich bei den geothermischen Erschließungsanlagen um Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, Energiepfähle, erdberührte Betonbauteile oder geothermisch genutzte Tunnelbauwerke handelt, gibt es zum Schutz des Grund-

wassers und der Heilquellen grundlegende Anforderungen, die für alle Nutzungsarten gelten.

Im Bereich von **Altlasten bzw. Grundwasserschadensfällen** drohen bei jeglicher Art von Eingriffen

in Boden und Grundwasser Schadstoffverschleppungen in die Tiefe. Diesem Risiko muss durch vorsorgende Planung und mit technischen Maßnahmen in der Umsetzung begegnet werden. Hier werden neben einer fachgutachterlichen Bauüberwachung erforderlichenfalls konkrete Sicherheitsmaßnahmen (z.B. Einsatz von Sperrrohren) verlangt. Dies gilt auch hinsichtlich einer ordnungsgemäßen Entsorgung von kontaminiertem Aushub bzw. der zulässigen Verwertung anfallender Überschussmassen.

Die **Materialien der geothermischen Erschließungsanlage** (unterirdische Wärmetauscher/Wärmeträgerrohre, Verteilerleitungen) sind i.d.R. hohen physikalischen und chemischen Beanspruchungen ausgesetzt. Sofern sie diesen nicht Stand halten, werden sie undicht und die Wärmeträgerflüssigkeit geht in den Untergrund verloren. Zur Vermeidung solcher materialbedingter Risiken müssen die Leitungen dauerhaft dicht und beständig (= z. B. korrosionssicher gegenüber aggressivem Grundwasser oder angreifendem Trägermedium) sowie für den geplanten Temperaturbereich geeignet (geringe Verformungen) sein. Gleichzeitig darf durch Mauerdurchlässe, durch welche die Leitungen ins Gebäude führen, kein Grundwasser einsickern.

Die Wärmeträgerrohre können beim Transport und beim Einbau beschädigt und undicht werden. Bleiben derartige Lecks unbemerkt, kommt es bei der Erstbefüllung mit Trägerflüssigkeit schnell zu Grundwasserschäden. Um solche Schwachstellen noch vor oder spätestens beim Einbau der Wärmeträgerrohre entdecken zu können, sind **Dichtigkeitskontrollen** erforderlich. I.d.R. ist die Prüfung 3-stufig, wobei der erste Drucktest vor Einbau der Wärmeträgerrohre vorgenommen wird. Die zweite Druckprüfung folgt unmittelbar nach dem dichten Gebirgsanschluss (Zementation bzw. Betonieren). Ob der Einbau bzw. die Ringraumabdichtung (Erdwärmesonde) bzw. der Betoniervorgang (Energiepfahl) zu Beschä-

digungen (Einbeulung, Abquetschung) geführt hat, zeigt eine abschließende Druck- und Durchflussprüfung nach Fertigstellung des unterirdischen Wärmetauschers. Bei komplexen geothermischen Erschließungsanlagen werden die Wärmeträgerrohre bereits im Werk mit einem Manometer ausgerüstet und mit einem Prüfdruck beaufschlagt, so dass etwaige Undichtheiten jederzeit erkennbar sind.

Unabhängig davon gelten hinsichtlich der Materialbeschaffenheit und der **Dichtheit oberirdischer Systemteile** gleichartige Anforderungen wie bei den unterirdischen Leitungen, sodass die von dort ausgehenden Gefahren für Boden und Grundwasser gering sind.

Gegen eine Fehlinterpretation der Anlage sowie gegen thermische Überbewirtschaftungen des Untergrunds (Frostkörper, starke Aufheizung) schützen gutachterliche **Standortprognosen zur Geologie/Hydrogeologie**. Sie liefern wichtige Anhaltspunkte, mit denen die Anlage bedarfsgerecht dimensioniert und kalkuliert werden kann. Bei nur einem Aufschlusspunkt ist i.d.R. die Auswertung vorhandener Daten (Baugrunderkennung, Bohrarchiv) ausreichend. Größere Anlagen lassen sich wirtschaftlicher und sicherer planen, wenn die geothermischen Untergrundparameter (z.B. Wärmeleitfähigkeit, thermischer Bohrlochwiderstand) in einer Pilotbohrung ermittelt werden, die nach Durchführung einschlägiger **Vor-Ort-Versuche** (z.B. Thermal Response-Test = TRT) gleichfalls zur Erdwärmeerschließung genutzt werden kann.

6.2 Anlagenbetrieb

6.2.1 Art der geothermischen Nutzung

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, die thermische Energie des Untergrundes zu nutzen. Beim reinen **Heizbetrieb** (z.B. Heizung Einfamilienhaus mit EWS) wird dem Untergrund Wärme entzogen. Umgekehrt wird beim **Kühlen** (z.B. zur Klimatisie-

rung von Büroräumen im Sommer) überschüssige Wärme in den Untergrund abgegeben.

6.2.2 Betriebsformen

Je nach dem, ob eine geothermische Nutzungsanlage nur im Heiz- bzw. nur im Kühlbetrieb oder aber im Wechsel von Heiz- und Kühlbetrieb gefahren wird, unterscheidet man verschiedene Betriebsformen:

Im **Monobetrieb** erfolgt der Wärmetransport ausschließlich in eine Richtung. Beim **Wechselbetrieb** hingegen wird ein Wärmeentzug in der Heizperiode von einem Wärmeeintrag in den Sommermonaten alternierend abgelöst.

Eine Sonderform des Wechselbetriebs ist die **Speicherung** thermischer Energie, bei der gezielt Wärme in den Untergrund eingespeist wird, die diesem im Bedarfsfall wieder entzogen werden kann. Ein Beispiel hierfür ist der Erdwärmesondenspeicher, der üblicherweise in Tiefen von 30 m und 100 m reicht. Im Hinblick auf die thermische Energiespeicherung im Untergrund zählen Tonsteine mit einer relativ hohen Wärmekapazität und geringer hydraulischer Durchlässigkeit (geringe konvektive Wärmeverluste) als günstig. Ungünstig sind dagegen solche Bereiche, in denen die eingeleitete Wärme bzw. Kälte mit dem Grundwasser rasch abtransportiert

wird (**Abb. 26**). Ein maßgebliches Beurteilungskriterium ist, inwiefern die gespeicherte Energie an Ort und Stelle verbleibt und zurückgewonnen werden kann bzw. mit welcher Verfrachtung zu rechnen ist. Ob und ggf. inwiefern sich der Stuttgarter Untergrund angesichts der Fließgeschwindigkeiten der hier vorkommenden Grundwässer (mehrere Zehner bis Hundertermeter im Jahr) für eine thermische Energiespeicherung eignet, ist fraglich und wurde bislang noch nicht genauer untersucht.

Ungeachtet dessen würden im Antragsfall für die Herstellung thermischer Energiespeicher dieselben Anforderungen wie bei Erdwärmesonden bzw. Energiepfählen gelten. Entscheidend für die Genehmigungsfähigkeit solcher Anlagen wäre besonders die Bandbreite der saisonalen Temperaturveränderungen im Grundwasser sowie die damit verbundenen räumlichen Auswirkungen. Hier würden zuverlässige Berechnungen auf Grundlage lokaler Messergebnisse verlangt, aus denen die Grundwasserverträglichkeit und die technische Beherrschbarkeit der Wärmefahne hervorgeht.

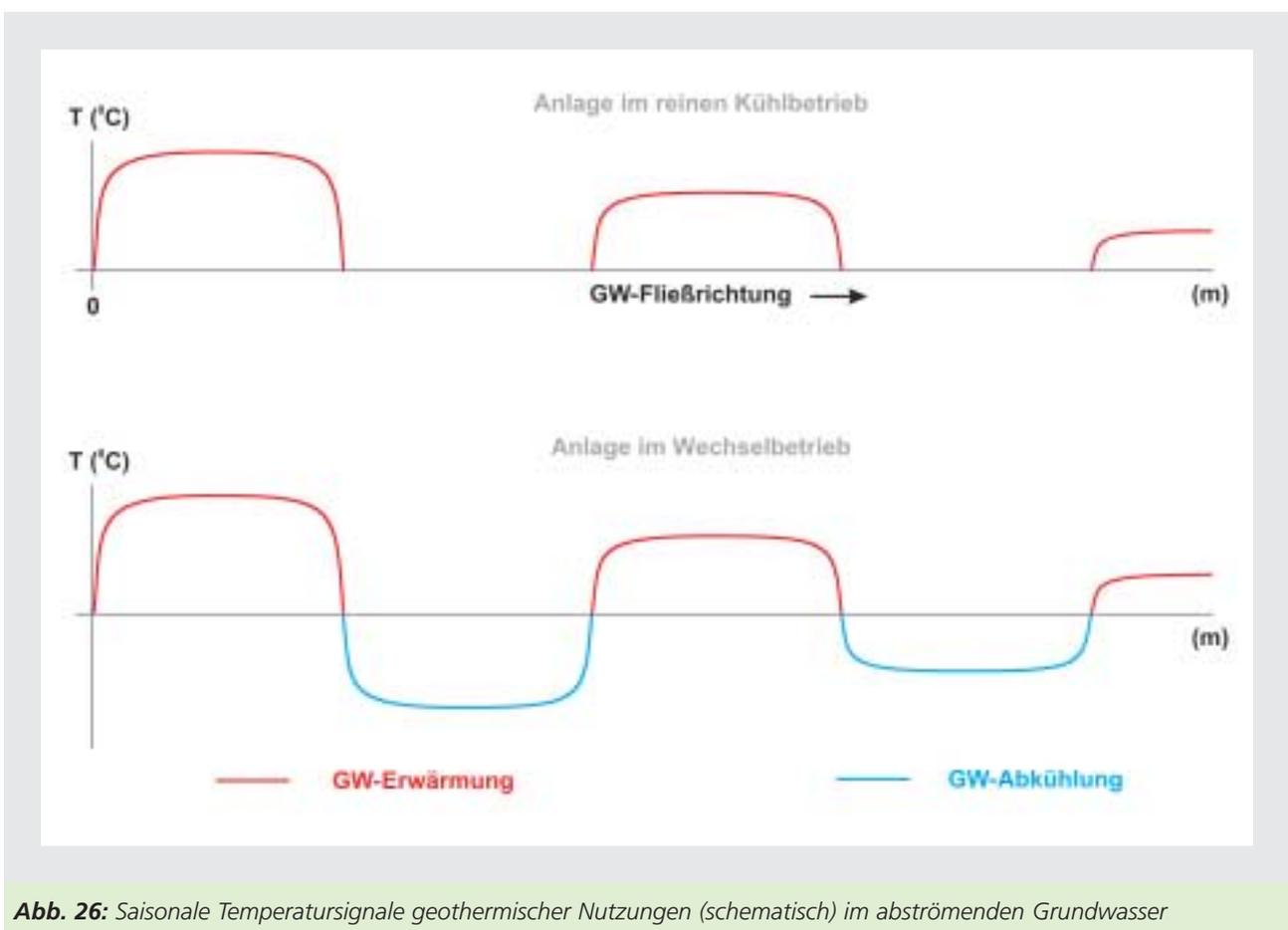


Abb. 26: Saisonale Temperatursignale geothermischer Nutzungen (schematisch) im abströmenden Grundwasser

6.2.3 Anforderungen an den Betrieb

6.2.3.1 Wärmeträgermedien und Lecküberwachung

Geothermische Wärmeträgermedien sind i.d.R. Flüssigkeiten, die hauptsächlich innerhalb unterirdischer Anlagenteile zirkulieren und die für den Wärmetransport aus dem Untergrund zur Erdoberfläche (Heizbetrieb) oder in umgekehrter Richtung (Kühlbetrieb) sorgen.

Hauptbestandteil der Wärmeträgerflüssigkeit ist Wasser. Um bei Wärmeentzug zu vermeiden, dass dieses infolge niedriger Temperaturen am oberirdischen Wärmetauscher bzw. im Rücklauf zu den unterirdischen Leitungsteilen gefriert, werden üblicherweise

- Frostschutzmittel,
- bei Bedarf auch Korrosionsinhibitoren,

zugewetzt. Hierbei wird zwischen

- organischen (z.B. Alkohole) Zusätzen und
- anorganischen Zusätzen (z.B. Salz/Sole)

unterschieden. Je nach chemisch- biologischen Eigenschaften (Toxizität, Abbaubarkeit etc.) handelt es sich hierbei um grundwasserfremde Stoffe mit unterschiedlichem Gefährdungspotenzial.

Insofern kommt es im Zuge von Leckagen zu einem Verlust von Wärmeträgerflüssigkeiten bzw. rasch zu Grundwasserkontaminationen. Deren Ausmaß hängt u.a. von der Art und Menge der ausgetretenen Flüssigkeit und der örtlichen Hydrogeologie ab. Insofern kann das stoffliche Risiko derartiger Havarien durch die Wahl wenig oder nicht bedenklicher Wärmeträgermedien, ggf. in Kombination mit zusätzlichen Sicherheitsvorkehrungen (z.B. automatische Leckanzeigen), gemindert werden.

Im **Heilquellenschutzgebiet** gelten besondere Anforderungen an die Trägermedien. Hier wird im Zusammenhang mit der staatlichen Anerkennung eine natürliche Reinheit der Heilquellen verlangt. Aus diesem Grund sind hier die herkömmlichen Wassergefährdungsklassen allein kein sicheres Beurteilungskriterium. Hier gelten vielmehr bereits geringste Konzentrationen anthropogener Stoffe, unabhängig von ihrer Toxizität, als schädlich.

Daher ist in der **Kernzone und in der Innenzone** des Heilquellenschutzgebiets der Einsatz wassergefährdender oder organischer Trägermedien in den

unterirdischen Anlagenteilen verboten. In der **Außenzone** ist ein Betrieb der geothermischen Erschließungsanlage mit wassergefährdenden oder organischen Trägerstoffen nur dann verboten, wenn diese in den Unterkeuper oder tiefer reichen.

In höheren Schichten der Außenzone (oberhalb des Unterkeupers) **sowie außerhalb des Heilquellenschutzgebiets** wird der Einsatz von Wärmeträgerflüssigkeiten der Wassergefährdungsklasse 1 (z.B. Glykol in einer wässrigen Lösung bis zu einem Anteil von 25 %) als vertretbar eingestuft, wenn eine dauerhaft schädliche Veränderung des Grundwassers durch zusätzliche Schutzvorkehrungen zur Begrenzung der Leckagemengen vermieden wird (Umweltministerium Baden-Württemberg 2005). Dies ist z.B. erfüllt, wenn ein automatisches Lecküberwachungssystem so eingesetzt wird, dass nur geringe Mengen an Wärmeträgerflüssigkeit in den Untergrund gelangen können. Beispiele geeigneter Wärmeträgermittel, die ohne Bedenken außerhalb von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten eingesetzt werden können, sind in der nachfolgenden Tabelle (**Tab. 5**) zusammengestellt.

Darüber hinaus werden bei speziellen Erschließungsverfahren (z.B. Direktverdampfung) auch gasförmige Wärmeträgermedien (z.B. CO₂, Propan, Ammoniak) eingesetzt. Obwohl diese gegenüber flüssigen Wärmeträgermedien oft den Vorteil haben, dass sie von Fall zu Fall im Hinblick auf die Grundwasserqualität unbedenklich sind, ist hier das Risiko einer Frostkörperbildung im Untergrund je nach Bewirtschaftungsintensität besonders groß. Insofern wird über die Genehmigungsfähigkeit im Einzelfall entschieden.

Innerhalb von **Wasserschutzgebieten** sind geothermische Nutzungsanlagen unter bestimmten Bedingungen in den weiteren Schutzzonen (**vgl. Kap. 6.1.2**) möglich. Um Beeinträchtigungen der Trinkwasserqualität auszuschließen, werden hier jedoch nur nicht-wassergefährdende Trägerflüssigkeiten (z.B. Wasser-/Glykolgemisch mit Glykolanteil < 3 Vol. %) zugelassen. Bei Nachweis hydrogeologisch günstiger Verhältnisse (z.B. kein Eingriff in den genutzten Grundwasserleiter und ausreichende Restmächtigkeit der verbleibenden Deckschichten) sind Ausnahmen möglich.

| Name/ Bezeichnung | Quelle |
|----------------------------------|---|
| Ethylenglykol (Ethandiol) | VDI 2000; HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2004 |
| Propylenglykol (1,2 (Propandiol) | |
| Calciumchlorid | |
| Äthylalkohol (Ethanol) | VDI 2000 |
| Magnesiumchlorid | BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) SCHWEIZ 1998: |
| Kaliumchlorid | |
| Kaliumcarbonat | |
| Kaliumacetat | |
| Kaliumformiat | |
| Natriumchlorid | |
| Natriumcarbonat | |

Tab. 5: Beispiele für geeignete Wärmeträgermittel außerhalb von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten

6.2.3.2 Thermische Bewirtschaftung des Untergrundes

Damit das regenerative Potenzial des Untergrundes (Boden/Gebirge, Grundwasser) nachhaltig und ohne Beeinträchtigungen natürlicher Kreisläufe genutzt werden kann, gilt es, jede Form einer Überbewirtschaftung zu vermeiden. Ansonsten drohen besonders bei Grundwasserkontakt untolerierbare Beeinträchtigungen oder schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Grundwassers bis hin zu Schädigungen Dritter (z.B. Baugrundhebungen und -setzungen infolge Frost-/Tauwechsels, Wasseraufstau). Insofern sind bei mittleren und größeren Vorhaben plausible Prognosen zur verträglichen Bewirtschaftung wesentliche Voraussetzung für die Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis.

Nicht genehmigungsfähig sind Energieentnahmen, bei denen im Untergrund Frosttemperaturen auftreten. Hier sind Beeinträchtigungen beinahe unvermeidlich, weil die Frostkörper das Grundwasser aufstauen und/oder umleiten. Im Zuge betriebsbedingter Frost-/Tauwechsel kommt es dann zu saisonalen Änderungen der Grundwasserfließrichtung. Gleichzeitig verliert die Ringraumzementation durch die periodische Eiskeilbildung ihre Dichtwirkung. Dadurch entstehen entlang der Sonde vertikale Wegsamkeiten, sodass Grundwasserstockwerke untereinander kurzgeschlossen werden. Da diese Undichtigkeiten mit verhältnismäßigem technischen Aufwand kaum reparabel sind, ist die Gefahr von künstlichen Grundwasserabflüssen und Schadstoffverschleppungen groß. Deshalb sind Betriebsarten,

bei denen sich der Aggregatzustand des Grundwassers frostbedingt ändert, besonders riskant. Sie zählen zudem zur typischen Form der Überbewirtschaftung.

Dagegen ist eine nachhaltige Nutzung dann gewährleistet, wenn die eingriffsbedingten Temperaturschwankungen innerhalb tolerabler Grenzen liegen und auch unter stationären Verhältnissen des längerfristigen Betriebs räumlich auf das engere Anlagenfeld beschränkt bleiben. Das bedeutet, dass bestimmte Grenztemperaturen, die für das direkte Umfeld des Wärmetauschers und für eine bestimmte Toleranzentfernung definiert werden, nicht über bzw. unterschritten werden dürfen.

Grund ist, dass bereits bei einer geringfügigen Abkühlung unter die Jahresdurchschnittstemperatur mit einem Rückgang der mikrobiologischen Aktivitäten und parallel dazu mit Einschränkungen beim Abbau von Schadstoffen im Grundwasser zu rechnen ist. Beinahe kritischer ist eine Grundwassererwärmung zu beurteilen. Anlass hierfür ist, dass bei der Wärmeeinleitung ins Grundwasser schnell größere Differenzen zur Normaltemperatur als beim Wärmeentzug bis zur Frostgrenze auftreten können. Dementsprechend stärker und v.a. weiträumiger wird das derzeitige Gleichgewicht im Grundwasser gestört. Dabei ist zu erwarten, dass die mikrobiologischen Aktivitäten zunächst steigen werden. Ob dieses zu einer Abnahme von Schadstoffen im Grundwasser führen wird, bleibt offen, da im Zuge der Erwärmung eventuell auch mehr organische

Schadstoffe gelöst und bislang stationäre Phasen mobiler werden. Auch ist bekannt, dass Mikroorganismen unter bestimmten Voraussetzungen anorganische Schadstoffe (z.B. Schwermetall-, Arsenverbindungen) mobilisieren können. Unabhängig davon ist fraglich, inwiefern sich die temperaturbedingte mikrobielle Entwicklung auch in erhöhten Keimzahlen im Grundwasser widerspiegelt. Insofern lassen sich die komplexen Wechselwirkungen, die bei Temperaturveränderungen im Grundwasser auftreten, derzeit kaum zuverlässig kalkulieren. Ein großer Unsicherheitsfaktor sind die Temperatur-

schätzt und somit auch kaum toleriert werden kann. Grund ist, dass hier das Grundwasser großflächig anthropogene Bestandteile aufweist, die mit keinem verhältnismäßigem Aufwand technisch entfernt werden können. Insofern spielen die Abbau- und Reinigungsprozesse unter natürlichen Temperaturverhältnissen im Hinblick auf eine Stabilität der örtlichen Grundwasserqualität eine bedeutende Rolle. Daher wird dem Erhalt der heutigen Grundwasserhältnisse auch unter thermischen Gesichtspunkten zunächst Vorrang vor Grundwasserbenutzungen mit oft weitreichenden, derzeit aber noch wenig

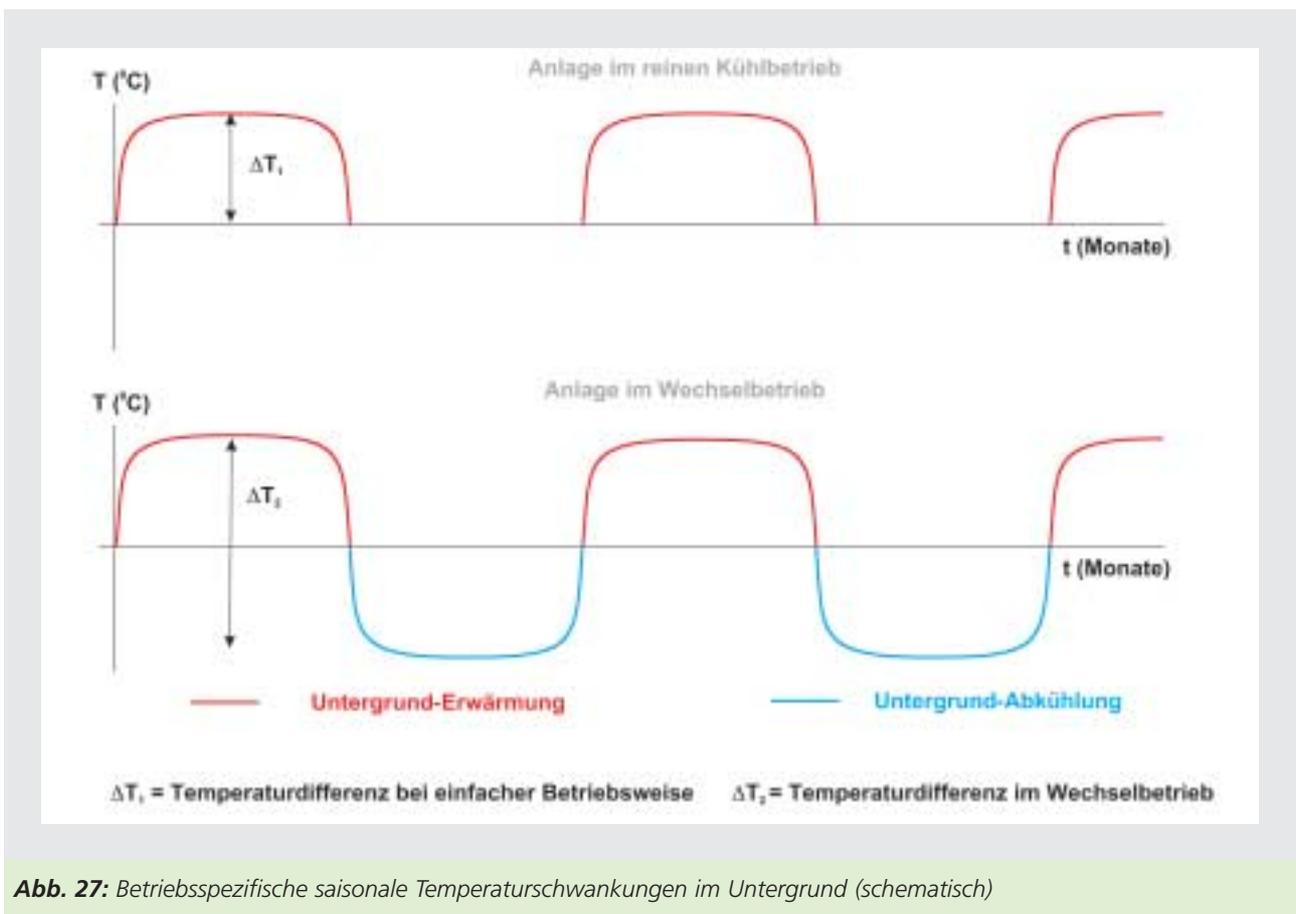


Abb. 27: Betriebsspezifische saisonale Temperaturschwankungen im Untergrund (schematisch)

schwankungen im Untergrund, die aus saisonalen Betriebsformen (Abb. 27) resultieren und die der Entwicklung stabiler chemischer, physikalischer und biologischer Gleichgewichte entgegenwirken. Dies gilt besonders für Anlagen, die im Wechselbetrieb gefahren werden. Hier treten durch die Abfolge von Wärmeeinleitung und Wärmeentzug viel größere Temperaturschwankungen auf als im einfachen Betrieb (z.B. nur Wärmeeinleitung in den Sommermonaten).

Grundsätzlich muss diesen potentiell negativen Entwicklungen mit einer angemessenen Besorgnis begegnet werden. Sie sind ein Risiko, das gerade in urbanen Bereichen momentan noch kaum einge-

absehbaren Folgen eingeräumt.

Orientierungsgröße für den „Sollzustand“ im oberflächennahen Bereich ist die „natürliche“ Grundwassertemperatur ab ungefähr 10 m Tiefe, wo normalerweise (= ohne anthropogene Einflüsse) etwa konstant die mittlere klimatische Jahresdurchschnittstemperatur (Stadtmitte von Stuttgart: 10 °C; Filderhochfläche: 8,6 °C) herrscht. Ziel einer geordneten Bewirtschaftung ist, dass diese in der Fläche ohne Schwankungen erhalten bleiben soll.

Das bedeutet, dass in Bereichen mit anthropogen erhöhten Temperaturen, die in Stuttgart schon heute bereichsweise (v.a. Innenstadt) bis zu 4 K über

dem Normalmaß (= mittlere Jahresdurchschnittstemperatur) liegen können, von vornherein geringere Spielräume vorhanden sind, weil im Zusammenhang mit Wärmeeinleitungen kein Anspruch auf absolute Temperaturzuschläge (= gemessener Wert + x K) besteht. Maßgeblich ist in solchen Fällen immer die mittlere („natürliche“ = normale) Jahresdurchschnittstemperatur.

Unter Stuttgarter Verhältnissen endet eine verträgliche Bewirtschaftung i.d.R. dann, wenn

■ bei Wärmeentzug

- am unterirdischen Wärmetauscher 0 °C erreicht werden (drohende Eisbildung) und/oder
- in der Toleranzentfernung von 50 m der Untergrund bzw. das Grundwasser um 2 K kälter als die mittlere normale Jahresdurchschnittstemperatur ist.

■ bei Wärmeeinleitung

- am unterirdischen Wärmetauscher Temperaturen von mehr als 25 °C auftreten und/oder
- in der Toleranzentfernung von 50 m der Untergrund bzw. das Grundwasser noch um 2 K wärmer als die mittlere normale Jahresdurchschnittstemperatur ist.

■ im Wechselbetrieb

- für die Richtung des jeweiligen Wärmeflusses vorgenannte Kriterien über bzw. unterschritten sind. Dabei sind für die Beurteilung der Verträglichkeit des Wechselbetriebs nicht die rechnerischen Durchschnittstemperaturen, sondern die Extremtemperaturen ausschlaggebend, die zeitweise tatsächlich im Untergrund auftreten und dort bzw. im Umfeld messbar sind.

Sofern geothermische Nutzungen in Gebieten vorgesehen sind, in denen die Untergrundtemperaturen bereits anthropogen verändert sind, müssen die verfügbaren Spielräume frühzeitig ausgelotet werden. Besonders kritisch sind hierbei Wärmeeinleitungen in Bereichen, in denen das Grundwasser durch diffuse Temperatureinträge schon heute künstlich aufgeheizt ist.

Dann ist über eine energiewirtschaftliche Prognose abzu prüfen, ob die geringeren nutzbaren Temperaturspannen in ein projektspezifisches Energiekonzept passen und ob dieses Aussicht auf wasserrechtliche Zustimmung hat. Dies ist dann der Fall, wenn betrieblich so gesteuert werden kann, dass die vorhabensbezogenen Temperatursignale in der Kontrollentfernung von 50 m vollkommen abgeklungen sind und dort wieder ubiquitäre Temperaturen herrschen. Sofern dies nicht belegt werden kann (z.B. durch eine Ausbreitungsberechnung), ist ein Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis kaum aussichtsreich. Grund ist, dass in Bereichen, in denen das Stuttgarter Grundwasser bereits heute schon anthropogen erwärmt ist, keine gezielte zusätzliche Aufheizung, die einen weiteren Qualitätsverlust darstellt, tolerierbar ist.

6.2.3.3 Prognosen und Monitoring von Temperatureinflüssen im Untergrund

Sowohl durch Wärmeentzug als auch durch Wärmeeinleitung kommt es zu Temperaturveränderungen im Untergrund. Modellhafte Untersuchungen für Stuttgart haben gezeigt, dass Anlagen mit nur einem punktuellen Wärmetauscher i.d.R. keine bedeutenden Auswirkungen auf die Umgebung haben.

Gleichzeitig hat sich herausgestellt, dass die Temperatureinflüsse im grundwassererfüllten Untergrund bei steigender Anzahl der Wärmetauscher (z.B. Sonden-/Energiepfahlfeld) in Abhängigkeit der verursachten Temperaturunterschiede und der örtlichen Gebirgs- und Grundwasserverhältnisse schnell mehrere Zehner- bis mehrere Hundertmeter über die

eigentlichen Entnahme- bzw. Einleitungsstellen hinausreichen können (**Anlage 4**).

Die lokalen Unterschiede werden in den Modellen einer kontinuierlichen Wärmeeinleitung („worst-case“-Betrachtung) über ein Energiepfahlfeld (25 Stück im 5 m-Raster) besonders deutlich. Im **Neckarkies** (vgl. **Abb. 5**, hydrogeologische Einheit II) gehen die Temperaturen im Zehnmeterbereich rasch zurück. Allerdings kann die Restwärme von wenigen K über Entfernungen von mehreren Hunderten Metern verfolgt werden. Demgegenüber klingen die Temperatureinflüsse im **Gipskeuper**, der im Innenstadtgebiet weit verbreitet ist (vgl. hydrogeologische Einheit IV), mit der Entfernung nur langsam ab. Selbst bei geringen Temperatureinleitungen von 20 °C wird das Ausgangsniveau (10 °C) erst nach mehr als 200 m wieder erreicht. Im **Unterjura** (vgl. hydrogeologische Einheit III) ist die Wärmeausbreitung am geringsten. Hier bauen sich die Temperaturspitzen von 20 °C bis 25 °C in Entfernungen von unter 100 m vollkommen ab (**Anlage 4**).

Insofern wird davon ausgegangen, dass die temperaturbedingten Einflüsse im Untergrund in den südlichen Nutzungsbereichen bei entsprechender Planung und Anlagendimensionierung am ehesten räumlich begrenzt werden können. Anders verhält es sich im Stuttgarter Talkessel. Hier sind Wärmeeinleitungen viel kritischer zu sehen, weil hier die Grundwassertemperaturen bereits anthropogen erhöht sind und der Temperatureausgleich nur relativ langsam und erst auf größere Entfernungen erfolgt. Deshalb muss im Vorfeld konkreter Absichten genau geprüft werden, ob und unter welchen lokalen Voraussetzungen eine entsprechende Planung im Innenstadtgebiet überhaupt sinnvoll ist. Ähnliches gilt im Neckartal, wo Temperatureinleitungen in den Kiesgrundwasserleiter zwar geringe, aber sehr weitreichende Auswirkungen haben.

Daher ist bereits in der Planungsphase geothermischer Nutzungsanlagen klärungsbedürftig, mit welchen betriebsbedingten Temperaturdifferenzen im Gebirge und im Grundwasser zu rechnen ist und wie diese in der beabsichtigten Bewirtschaftungsform (nur Wärmeentzug bzw. –einleitung oder Wechselbetrieb) räumlich ausgeglichen werden. Anhand dieser Ergebnisse muss dann beurteilt werden, ob die beabsichtigte Maßnahme verträglich ist oder ob eine Überbewirtschaftung vorliegt.

Aus Gründen der Zweckmäßigkeit und der Verhältnismäßigkeit wird dabei stufenweise wie folgt vorgegangen:

- Bei **kleineren Vorhaben** zur Versorgung von Einfamilien- oder Doppelhäusern (i.d.R. bis zu 5 Aufschlüssen) sind Bilanzen zur räumlichen Ausbreitung entbehrlich.
- Bei **mittleren Vorhaben (6 bis 10 Aufschlüsse)** werden einfache Prognosen verlangt.
- **Größere Vorhaben (mehr als 10 Aufschlüsse)** besitzen bereits anlagenbedingt eine Ausdehnung in der Fläche. Hier sind entsprechende Vorhersagen obligatorisch. Hinzu kommen ggf. Auflagen zu einem Monitoring, mit dem der Betrieb bzw. der Eintritt der prognostizierten Einflüsse im Untergrund überwacht werden kann. Dies lässt sich i.d.R. ohne nennenswerten Mehraufwand sicherstellen, wenn Messstellen zur geotechnischen bzw. hydrogeologischen Baufelderkundung, die in diesen Fällen meist ohnehin hergestellt werden, so platziert werden, dass sie zusätzlich für das geothermische Monitoring genutzt werden können.

Mit zunehmendem Abstand zum jeweiligen Wärmetauscher kann aus der Art des Temperatureausgleichs (Bezugsgröße = mittlere Jahresdurchschnittstemperatur) der räumliche Charakter der Temperatureinflüsse beurteilt werden. Dabei ist ein rasches Abklingen der nutzungsbedingten Temperaturunterschiede ein Indiz dafür, dass die Reichweite der Temperatureinflüsse und damit auch das Risiko einer unverträglichen thermischen Bewirtschaftung des Untergrunds gering ist.

Diese Zusammenhänge sind für die anlagenbezogene Temperaturüberwachung im Grundwasser maßgeblich. Danach gelten unter Stuttgarter Verhältnissen die Auswirkungen als unbedeutend, wenn die anthropogenen Signale in einer Entfernung zum Wärmetauscher von 10 m weniger als 5 K betragen (**Abb. 28**). Sofern unter solchen Umständen ein Überwachungsbedarf herrscht, können die Monitoring-Messstellen gewöhnlich auf dem Betriebsgrundstück bzw. an dessen Grenzen eingerichtet werden.

Sofern im 10 m Abstand allerdings Temperaturdifferenzen von mehr als 5 K auftreten, geht der lokale Charakter der Temperatureinflüsse verloren. Sie werden mit zunehmender Entfernung immer flächenhafter und damit bedeutender. In diesen Fällen reicht zur Beobachtung einer verträglichen Bewirtschaftung eine Nahüberwachung nicht aus. Hier muss die Temperaturentwicklung zusätzlich in größerer Distanz kontrolliert werden. Die hierfür

benötigten Messstellen müssen dabei nicht selten außerhalb des eigentlichen Betriebsareals im Unterstrom der Wärmetauschanlage auf Nachbargrundstücken eingerichtet werden. Die beurteilungsrelevante Entfernung beträgt hier um die 50 m. Messwerte aus geringerer Distanz geben keine hinreichenden Anhaltspunkte zu den tatsächlichen Verhältnissen in der Kontrollentfernung von 50 m. Noch weniger erfolgversprechend ist die Interpretation und Rückrechnung von Werten, die in Entfernungen von deutlich mehr als 50 m gemessen

wurden. Hier können sich Temperaturfahnen unterschiedlicher Quellen schnell überlagern, sodass die gemessenen Signale ohne nähergelegene Messpunkte nur mit unzureichender Sicherheit den jeweiligen Quellen zugeordnet werden können.

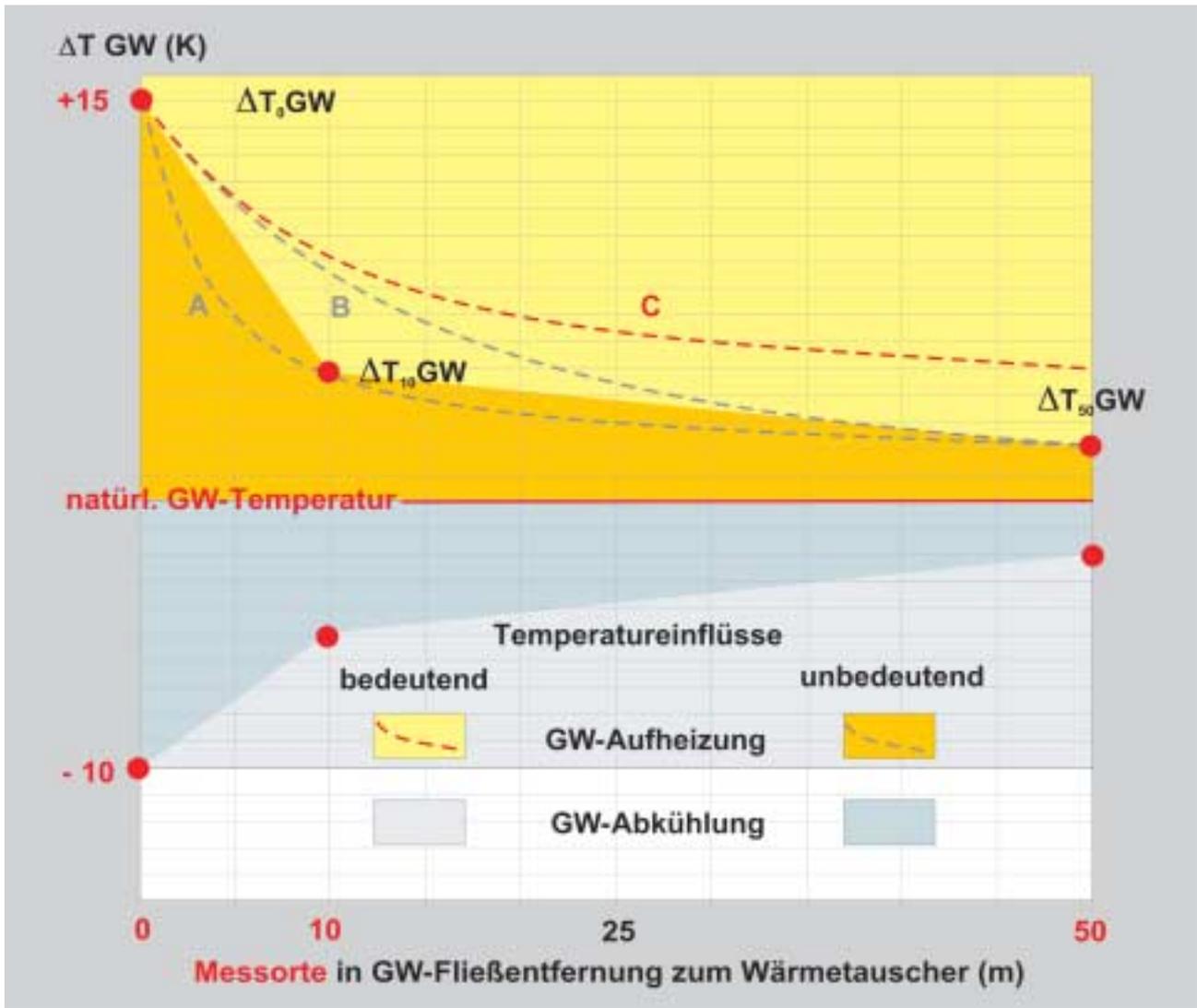


Abb. 28: Grenzen thermischer Grundwassernutzungen und Einstufung nutzungsbedingter Temperatureinflüsse im Grundwasser (Beispiele typischer Temperaturkurven: A = tolerabel und unbedeutend; B = noch tolerabel, aber bedeutend; C = Überbewirtschaftung = untolerabel; Ausgangswert: natürliche Grundwassertemperatur = 10 °C)

7. Überwachung, Schichtenaufnahme und Dokumentation

Bei der geothermischen Erschließung des Untergrundes sind alle Arten von Bohrungen (Erdwärmesonden, Energiepfähle) besonders überwachungsbedürftig. Damit die Energieprognosen erfüllt werden können, muss hierbei v.a. im Interesse des Vorhabensträgers auf eine sorgfältige technische Bauausführung geachtet werden.

Zur Beurteilung der Funktionstauglichkeit einer Anlage ist ferner von Bedeutung, inwiefern die Vorhersagen zur Beschaffenheit des Untergrundes mit den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort übereinstimmen. Aus diesem Grund und zur Dokumentation, welche Schichtenfolge bzw. welche Grundwasserstockwerke geothermisch erschlossen wurden, ist eine zuverlässige Ansprache und Aufnahme der Bohrproben (Bohrkerne, Bohrklein) erforderlich. Hierzu gehört neben einer petrographischen Beschreibung zwingend eine stratigraphische Einordnung durch einen Sachverständigen (Geologen), aus der hervorgeht, welche Grundwasserleiter bzw. -stockwerke von der Maßnahme betroffen sind. Alternativ kann die Stratigraphie der erschlossenen Schichtenfolge auch über ein γ -log zugeordnet werden (**vergl. Abb. 18**). Voraussetzung ist, dass dieses gleichfalls von einem Sachverständigen ausgewertet wurde. Obligatorisch wird die geophysikalische Aufnahme des Bohrlochs mit einem γ -log immer dann, wenn die zunächst vorgesehene Vor-Ort-Ansprache der Bohrproben keine eindeutigen Anhaltspunkte zur Stratigraphie geliefert hat und somit einer Absicherung bedarf.

Bei Sonden- oder Energiepfählfeldern braucht im Normalfall (ungestörte geologische Lagerungsverhältnisse, störungsfreier Bohrablauf) nur eine repräsentative Bohrung (i.d.R. die Pilotbohrung zur Vorerkundung) detailliert aufgenommen werden.

Eine Auswertung der Bohrergebnisse gem. DIN 4022 sowie eine Darstellung gem. DIN 4023 reichen unter Stuttgarter Verhältnissen allein nicht aus. Die komplexen Untergrundverhältnisse -speziell die hydraulische Stockwerksgliederung- machen es notwendig, dass hier die Schichtenansprache und -aufnahme durch einen Sachverständigen erfolgt, der nicht nur Erfahrungen mit der Technik der Bohr- und Ausbauarbeiten hat, sondern auch mit der örtlichen Geologie und Hydrogeologie vertraut ist.

Sofern eine Anlage stillgelegt werden soll, erstreckt

sich die Überwachung auch auf den Rückbau bzw. auf die sorgfältige Verschließung der unterirdischen Leitungen. Hier muss auch im Interesse des Anlagenbetreibers sichergestellt werden, dass nach der Stilllegung im Untergrund keine hydraulischen Wegsamkeiten mehr vorhanden sind.

Generell sind sämtliche Bohr-, Ausbau- und Verschließungsarbeiten durch den Sachverständigen zu dokumentieren und gemäß den Auflagen in der wasserrechtlichen Erlaubnis oder anderer behördlicher Forderungen zur Verfügung zu stellen. Dazu gehören:

- Lageplan mit Einmessdaten
- Auswertung der Bohrergebnisse gem. DIN 4022 und Darstellung z. B. gem. DIN 4023 (insbesondere Grundwasserzutritte und Grundwasserstände)
- Petrographische Ansprache des Bohrgutes
- Bohrprofile mit geologischen Schichtenverzeichnissen (Petrographie und Stratigraphie) und stratigraphische Einstufung der erbohrten Schichtenfolge (z. B. im Gipskeuper in Grundgipsschichten, Bochinger Horizont, Dunkelrote Mergel usw.; im Unterjura in Arietenschichten, Angulatenschichten usw.)
- Ausbaupläne mit mind. folgenden Daten:
 - Stratigraphie
 - Bohrdurchmesser
 - Durchmesser, Länge und Material der Wärmetauscher
 - Bohr- und Ausbautiefen (m u. Gel.)
 - Art der Ringraumabdichtung bzw. sonstige Ringraumverfüllungen (z.B. Kies)
 - Zur Ringraumabdichtung verwendetes Material (bei Zementation: Zusammensetzung der Zementationsmischung)
 - Tiefenlage (m u. Gel.) der Materialstrecken (z.B. Zementation, Kies) im Ringraum
 - Soll-/Ist-Mengenangaben zur Ringraumabdichtung/-verfüllung
 - Lage der Wasserstände (angetroffener und Ruhewasserstand)
 - Ansatzhöhe (m ü. NN)
 - Ergebnisse der Druckprüfung
 - ggf. γ -log mit stratigraphischer Zuordnung
 - ggf. Ergebnisse des Thermal-Response-Tests
 - ggf. sonstige Ergebnisse aus Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit im Untergrund

8. Rechtsgrundlagen

Wasser- und Bergrecht bilden den gesetzlichen Rahmen bei der Herstellung und dem Betrieb von geothermischen Nutzungsanlagen. Welche behördlichen Zulassungen und Genehmigungen im Einzelfall

erforderlich sind, hängt von der Art und Umfang der Erschließung des Untergrunds und den betriebsbedingten Auswirkungen auf Boden und Grundwasser ab (**Tab. 6**).

| Projekteigenschaften | Antragstellung bei | | Bescheid/Genehmigung/Erlaubnis durch | |
|---|---|--|---|---|
| | zuständiger Bergbehörde (LGRB*) | unterer Wasserbehörde (AfU**) | zuständige Bergbehörde (LGRB*) | untere Wasserbehörde (AfU**) |
| Geothermische Nutzungsanlage ist grundstücksbezogen, Bohrtiefe < 100 m | Anzeige nach § 4 Lagerstättengesetz | Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis | Kein Bescheid (es gelten dann nur die Nebenbestimmungen der wasserrechtlichen Erlaubnis) | Wasserrechtliche Erlaubnis (i.d.R. förmliches Verfahren ohne Bekanntmachung nach § 108 Abs. 3 WG; in bestimmten Fällen auch förmliches Verfahren mit Bekanntmachung nach § 108 Abs. 1 WG möglich) |
| Geothermische Nutzungsanlage ist grundstücksbezogen, Bohrtiefe > 100 m | Anzeige nach § 4 Lagerstättengesetz und § 127 BBergG | Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis sofern keine Betriebsplanpflicht besteht | Regelfall: Bergrechtlicher Freigabebescheid, ggf. mit Nebenbestimmungen | Sonderfall: Kein Bescheid (i.d.R. beteiligt die Bergbehörde die untere Wasserbehörde, diese gibt eine Stellungnahme an das LGRB ab) |
| | | | Sonderfall: Bergrechtliche Betriebsplanpflicht, in diesem Fall ist Bergbehörde auch für wasserrechtliche Entscheidung zuständig | |
| Geothermische Nutzungsanlage ist grundstücksübergreifend (Bohrtiefe nicht relevant) | Antrag auf bergrechtliche Genehmigung nach §§ 6 ff. und 51 ff. BBergG | Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis | Bergrechtliche Genehmigung, ggf. mit Nebenbestimmungen | Wasserrechtliche Erlaubnis (i.d.R. förmliches Verfahren ohne Bekanntmachung nach § 108 Abs. 3 WG; in bestimmten Fällen auch förmliches Verfahren mit Bekanntmachung nach § 108 Abs. 1 WG möglich) |

* Landesamt für Geologie und Rohstoffe Baden-Württemberg (Regierungspräsidium Freiburg)
 ** Amt für Umweltschutz

Tab. 6: Genehmigungspraxis bei oberflächennaher Erschließung von Erdwärme

8.1 Bergrecht

Zunächst ist jede Erdwärmesondenbohrung nach § 4 Lagerstättengesetz der zuständigen Bergbehörde (Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung 9, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)) anzuzeigen.

Außerdem fällt die Erschließung von Erdwärme unter das Bundesberggesetz (BBergG) vom 13.08.1980. Demnach bedarf einer bergrechtlichen Genehmigung, wer Erdwärme aufsuchen und/oder gewinnen (erschließen) will. Hierbei unterscheidet

das BBergG weder nach Art (Technik) noch nach der Tiefe der Erdwärmeerschließung. So ist auch die oberflächennahe Erdwärmennutzung, beispielsweise mittels Erdwärmesonden, grundsätzlich nach Bundesberggesetz genehmigungspflichtig.

Ausgenommen hiervon sind nach § 4 Abs. 2 BBergG Erdwärmeprojekte, bei denen die Erschließung von Erdwärme in einem Grundstück aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung erfolgt. Für die Anwendung dieser Ausnahmeregelung ist es wesentlich, dass Erdwärmeerschließung und -nutzung auf ein und demselben Grundstück erfolgen (Beispiel: Bürogebäude mit Energiepfählen auf eigenem Grundstück).

8.2 Wasserrecht

Je nach technischem Verfahren zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie ist das Grundwasser unterschiedlich betroffen. Hierbei können ein oder mehrere Benutzungstatbestände nach dem Wasserhaushaltsgesetz (§ 3 Abs. 1 und 2 WHG) erfüllt sein.

Erdwärmekollektoren sowie **erdberührte Betonbauteile** wirken sich - sofern sie oberhalb des Grundwasserspiegels eingebaut und ordnungsgemäß betrieben werden – meist nicht bzw. nicht nachteilig auf das Grundwasser aus. Sie unterliegen daher i.d.R. keiner Anzeige- bzw. Erlaubnispflicht.

Erdwärmesonden sowie **Energiepfähle** reichen in Stuttgart fast immer ins Grundwasser. Insofern ist dieses sowohl durch den Bau als auch durch den späteren Anlagenbetrieb betroffen. Hierbei findet nicht nur ein Aufschließen von Grundwasser statt, sondern im Zuge der Bohr- und Ausbauarbeiten ist zudem eine Einleitung von Stoffen ins Grundwasser (z.B. Bohrspülung, Zementsuspension) unumgänglich. Insofern gilt es, damit verbundene Risiken für das Grundwasser (z.B. Trübung, pH-Wert-Verschiebung bzw. stoffliche Veränderungen, hydraulische Verbindung von Grundwasserstockwerken) zu vermeiden oder zu minimieren. Daher müssen die Bohrarbeiten nach § 37 Wassergesetz Baden-

Bei **Bohrungen über 100 m Tiefe** entscheidet die Bergbehörde, ob eine sogenannte Betriebsplanpflicht besteht (§ 127 BBergG). Ist dies der Fall, dann erteilt diese eine bergrechtliche Genehmigung, welche die wasserrechtliche Erlaubnis mit einschließt (s. § 37 Abs. 5 WG Ba-Wü). Sofern trotz Bohrtiefen von mehr als 100 m kein Betriebsplan erforderlich ist, ergeht ein bergrechtlicher Freigabebescheid, der ggf. Nebenbestimmungen enthält. Dann fällt das Vorhaben in die Zuständigkeit der Wasserbehörde und ist von dieser weiter zu bearbeiten.

Je nach Lage und Aufschlusstiefe ergeben sich die in **Tab. 6** zusammengestellten Antragsformen beziehungsweise behördlichen Zuständigkeiten.

Württemberg (WG) bei der unteren Wasserbehörde angezeigt werden (sog. Bohranzeige)*.

Beim Betrieb der Anlage zählen u.a. Veränderungen der Grundwassertemperatur (Abkühlung, Erwärmung) als eine Grundwasserbenutzung im Sinne von § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG, sofern diese Einwirkungen „geeignet sind, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Grundwassers herbeizuführen“. Derartige Einwirkungen werden in Stuttgart grundsätzlich dann unterstellt, wenn

- keine grundwasserneutralen Wärmeträgerflüssigkeiten eingesetzt werden und/oder
- die natürliche Grundwassertemperatur mehr als nur unerheblich (> 2 K in 50 m Entfernung) verändert wird und/oder
- Grundwasser maßgeblich umgeleitet oder aufgestaut wird und/oder
- das Vorhaben innerhalb eines rechtskräftigen wasserwirtschaftlichen Schutzgebiets (Heilquellenschutzgebiet, Trinkwasserschutzgebiet, Überschwemmungsgebiet) liegt.

* Aufgrund der am 28.11.2005 erfolgten Aufhebung der Verordnung des Innenministeriums über die Überwachung von Erdaufschlüssen vom 18. Dezember 1961 entfällt momentan die Pflicht zur Anzeige von Erdaufschlüssen (sog. Bohranzeige) nach §37 WG. Insofern ergeht bis zu einer Neuregelung auch keine kostenpflichtige Stellungnahme durch die untere Wasserbehörde.

Ungeachtet dessen wird eine vorherige schriftliche Abstimmung der Bauausführung von unterirdischen Anlagenteilen, die ins Grundwasser reichen, mit der unteren Wasserbehörde dringend empfohlen, da für den späteren Betrieb solcher Anlagen eine wasserrechtliche Erlaubnis benötigt wird. Diese kann nur dann erteilt werden, wenn die Anlage dem hier dokumentierten Stand der Technik entspricht und deren Betrieb nach den hier genannten Bewirtschaftungsgrundsätzen erfolgt.

In solchen Fällen ist parallel zur Bohranzeige* eine wasserrechtliche Erlaubnis nach § 7 WHG zu beantragen. Zur Vereinfachung und Verfahrensbeschleunigung empfiehlt es sich, die Bohranzeige und das Wasserrechtsgesuch in einem gemeinsamen Antrag zusammenzufassen.

Sofern davon auszugehen ist, dass sich das Vorhaben im Grundwasser nur kleinräumig und nicht negativ auf Dritte auswirkt, wird dann gewöhnlich nach § 108 Abs. 3 WG ein förmliches Erlaubnisverfahren ohne Bekanntmachung des Antrags oder Unterrichtung der Beteiligten durchgeführt. Andernfalls ist verfahrensrechtlich nach § 108 Abs. 1 WG-BaWü ein förmliches Verfahren mit Bekanntma-

chung obligatorisch. Ein vereinfachtes Verfahren nach § 108 Abs. 4 Nr. 2 ist in Stuttgart aufgrund der komplexen hydrogeologischen Situation i.d.R. nicht anwendbar.

Im Rahmen einer Voranfrage bei der unteren Wasserbehörde lässt sich schnell klären, ob und ggf. welche wasserrechtlichen Verfahrensschritte einzuleiten sind.

| Technische Verfahren zur Nutzung der Geothermie | Potenzieller wasserrechtlicher Tatbestand (WHG) | | |
|--|---|--|---|
| | § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG (Veränderung der chemischen, physikalischen oder biologischen Eigenschaften des Grundwassers) | § 3 Abs. 1 Nr. 6 WHG (Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten, Ableiten von Grundwasser) | § 3 Abs. 2 Nr. 1 WHG (Umleiten, Aufstauen von Grundwasser) |
| Erdwärmekollektoren (oberhalb GW) | – | – | – |
| Erdwärmesonden, Energiepfähle mit Grundwasserkontakt | X | – | X |
| Erdberührte Betonbauteile mit Grundwasserkontakt | X | X* | X |
| Tunnelbauwerke mit Grundwasserkontakt | X | X* | X |

Tab. 7: Wasserrechtliche Tatbestände

Nach der Rechtslage darf mit der Herstellung der Erdwärmesonden bzw. der Energiepfähle vier Wochen nach Eingang der Anzeige* oder unmittelbar nach Erhalt der wasserrechtlichen Stellungnahme zur Anzeige* begonnen werden. Für die Befüllung der Wärmetauscher bzw. für die Inbetriebnahme ist in o.g. Fällen ausschlaggebend, dass eine wasserrechtliche Erlaubnis vorliegt. Letzteres gilt sinngemäß, wenn die Anzeige der Bohrarbeiten Bestandteil des wasserrechtlichen Antrags ist.

Sofern **erdberührte Betonbauteile** oder **Tunnelbauwerke** ins Grundwasser einbinden, gelten hinsichtlich der geothermischen Nutzung dieselben wasserrechtlichen Bestimmungen wie bei den Erd-

wärmesonden. Wenn aber bei der Herstellung flächiger Betonbauteile oder dem Auffahren eines Tunnels mit einer unvermeidlichen Grundwasserhaltung zusätzliche Benutzungstatbestände nach § 3 Abs. 1 Nr. 6 WHG erfüllt sind, muss der wasserrechtliche Antrag dementsprechend erweitert werden.

Tab. 7 gibt einen Überblick zu den erschließungsspezifischen Grundwasserbenutzungen sowie den zugehörigen Verfahren nach dem Wasserrecht.

* vergl. Hinweis zur Bohranzeige S. 59

| Verfahren | | Erläuterung |
|---|--------------------------------------|---|
| Anzeigepflicht nach § 37 WG BaWü*** | Wasserrechtl. Erlaubnis nach § 7 WHG | |
| – | – | – |
| X | X | - Bohranzeige*** nach § 37 WG Ba-Wü obligatorisch - Veränderungen der GW-Beschaffenheit nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 sowohl durch Bohrarbeiten (z.B. Durchteufung mehrerer GW-Stockwerke) als auch Anlagenbetrieb möglich (Temperaturveränderung im GW) |
| X | X | - Anzeige*** Erdaufschluss nach § 37 WG Ba-Wü - i.d.R. GW-Haltung (§ 3 Abs. 1 Nr. 6) - Veränderungen der GW-Beschaffenheit nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 durch Anlagenbetrieb möglich (Temperaturveränderung im GW) |
| X** | X** | - i.d.R. Erdaufschluss*** nach § 37 WG Ba-Wü - i.d.R. GW-Haltung beim Tunnelvortrieb (§ 3 Abs. 1 Nr. 6) - Veränderungen der GW-Beschaffenheit durch Vortriebsarbeiten und/oder Anlagenbetrieb (z.B. Temperaturveränderung im GW) |
| <p>* Bei erforderlicher Grundwasserhaltung zur Trockenlegung der Baugrube bzw. des Vortriebsbereichs ** i.d.R. in der wasserrechtlichen Erlaubnis des Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahrens enthalten *** s. Hinweis zur Bohranzeige S. 59</p> | | |

9. Anzeige-/Antragsunterlagen

Für die technische Erschließung der Geothermie mit **Erdwärmesonden** bzw. **Energiepfählen** müssen die Anzeigen* und Anträge nach Berg- und Wasserrecht alle für die Beurteilung wesentlichen Angaben/Unterlagen enthalten (Anlage 2).

Hauptsächlich sind dies Angaben

- zur Projektverantwortung bzw. –zuständigkeit,
- zur Lage des Vorhabens,
- zu den geologischen/hydrogeologischen Verhältnissen sowie
- zur technischen Ausführung wie
 - vorgesehene Bohrtiefe,
 - Art des Herstellungsverfahrens (z.B. Erdwärmesonden: Voll-/Kernbohrung mit Flüssig-/Luftspülung),
 - Bohrlochdurchmesser,
 - ggf. Schutzvorkehrungen gegen Schadstoffverschleppungen (z.B. Sperrrohre),
 - Art und Durchmesser der Wärmetauscher,
 - Baustoff zum Gebirgsanschluss/der Ringraumabdichtung,
 - Wärmeträgermedium (Menge, Inhaltsstoffe, Wassergefährdungsklasse).

Bei mittleren und größeren Vorhaben (i.d.R. ab 6 Erdwärmesonden) kommen

- Prognosen zur räumlichen Ausdehnung der Temperaturveränderung im Grundwasser
- und ggf. Angaben für ein Monitoring

dazu.

Bei erdberührten Betonbauteilen, die in das Grundwasser hineinreichen, werden dieselben Antragsunterlagen benötigt. Hinzu kommen aber ggf. noch Angaben zur Bauwasserhaltung wie

- Entnahmedauer,
- Tiefe der Absenkung und
- Förderrate.

* s. Hinweis zur Bohranzeige Kap. 8.2

10. Energiewirtschaftliche Hinweise

Nicht nur die geologisch/hydrogeologischen Randbedingungen und die unterirdischen Erschließungseinrichtungen, sondern das aufeinander abgestimmte Zusammenspiel aller Anlagenteile -hierzu gehört auch die oberirdische Technik (Wärmepumpe, Heizung)- bestimmen die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage maßgeblich.

Die Nutzung von Erdwärme ist eine noch neue Technologie. Sofern entsprechende Absichten bestehen, empfiehlt es sich, frühzeitig ein Ingenieurbüro einzuschalten, das über einschlägige Erfahrungen verfügt. Dies gilt insbesondere bei Planungen für große und komplexe Bauvorhaben. Aber auch bei einer Versorgung eines Einfamilienhauses mit Geothermie stellen eine sorgfältige Anlagendimensionierung und eine solide Bauausführung den Nutzen sicher. Hier ist eine sachverständige Beratung gefragt, welche auf die Interessen des Bauherrn eingeht und diesen vor nicht auskömmlichen Angeboten schützt. In jedem Fall sollte der langfristig wirtschaftliche Betrieb Vorrang vor billiger Planung und Ausführung haben.

Die Möglichkeiten der Geothermie sind besonders interessant, weil damit nicht nur im Winter geheizt, sondern im Sommer auch gekühlt werden kann. Zum einen verbessert sich durch verlängerte Auslastung die Wirtschaftlichkeit, zum anderen regeneriert sich der Untergrund, wenn günstige Voraussetzungen herrschen und die Anlage im Wechselbetrieb gefahren wird. Entsprechend attraktiv ist das bei Gebäuden mit hohem Heiz- bzw. Kühlbedarf.

Die Wirtschaftlichkeit einer Erdwärmenutzung nimmt zu, wenn Heizenergie auf einem möglichst niedrigen Temperaturniveau und Kühlenergie auf einem möglichst hohen Temperaturniveau genutzt werden kann. Ursache hierfür ist die Funktionsweise der Wärmepumpe: Bei steigender Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke sinkt die Leistungszahl der Wärmepumpe, also das Verhältnis zwischen eingesetzter Antriebsleistung und nutzbarer Wärmeleistung. Für die Wirtschaftlichkeit ist der Jahresdurchschnitt dieses Wertes wichtig, also die Jahresarbeitszahl. Bei einer Elektrowärmepumpe sollte die Jahresarbeitszahl auf jeden Fall größer als 3 sein, anzustreben sind Werte zwischen 4 und 5. Aus ökologischer Sicht hat eine Erdwärmenutzung nur dann Vorteile, wenn weniger Primärenergie verbraucht wird als bei einer Heizungsanlage, die mit fossilen Brennstoffen wie Erdgas oder Heizöl betrieben wird. Da für die Erzeugung

einer Kilowattstunde (kWh) Strom ca. 3 kWh Primärenergie eingesetzt werden müssen, ist bei einer Jahresarbeitszahl von 3 eine Erdwärmenutzung gleichwertig mit einer herkömmlichen Heizung.

Niedertemperaturheizsysteme bieten gute Rahmenbedingungen für Wärmepumpensysteme. Mit den niedrigsten Temperaturen können **Bauteilaktivierungen** betrieben werden. Am meisten verbreitet sind dabei Betonkernaktivierungen. Hier wird in die Betondecke ein Rohrregister - üblicherweise zwischen die beiden Bewehrungslagen - eingebaut. Dieses wird vom Heizwasser, das von der Wärmepumpe erhitzt wurde, durchströmt. Decke und Boden geben dann Wärme an das Gebäude ab. Voraussetzung ist, dass keine abgehängten Decken und Hohlraumböden vorhanden sind, die keine thermische Koppelung an die Räume ermöglichen. Die Betriebstemperaturen liegen in der Regel unter 30 °C. Derartige Heizsysteme sind sehr träge und können nur mit großer Verzögerung auf Wetteränderungen reagieren. Es empfiehlt sich, diese Systeme mit einem flinkeren Heizsystem in Fassadennähe (z.B. Radiatoren) zu kombinieren.

Betonkernaktivierungen können im Sommer einfach zur Kühlung genutzt werden. Dazu wird das Rohrregister in der Decke direkt von dem Wasser durchströmt, das durch die unterirdischen Wärmetauscher gepumpt wird. Die Betriebstemperatur liegt meist über 18 °C, um eine Kondensation der Raumluft an den gekühlten Oberflächen zu vermeiden. Damit kann, je nach Raumtemperatur, eine Kühlleistung von 30 bis 50 W/m² erreicht werden. Dies reicht für übliche Büronutzungen bei gutem Wärme- und Sonnenschutz aus.

Auch **Fußbodenheizungen** können sinnvoll in Kombination mit einer Erdwärmeanlage betrieben werden. Hier liegen die üblichen Betriebstemperaturen in der Regel unter 40 °C. Die sommerliche Nutzung zur Kühlung ist hier jedoch nur sehr eingeschränkt möglich.

Übliche **Konvektoren- oder Radiatorenheizsysteme** können zwar ebenfalls in Kombination mit Wärmepumpen betrieben werden, sind jedoch aufgrund der üblichen Vorlauftemperaturen von 60 °C bis 80 °C eher weniger geeignet. Damit scheidet die Nutzung von Erdwärme in Altbauten aus wirtschaftlichen Gründen weitgehend aus, falls nicht das Gebäude durch eine gute Wärmedämmung wesentlich verbessert wurde. Wenn der Wärmebedarf durch eine Wärmedämmung deutlich gesenkt

wurde, können auch Heizflächen im Altbau mit wesentlich reduzierten Vorlauftemperaturen betrieben werden. Hier ist jedoch eine Prüfung im Einzelfall erforderlich.

Energetisch kann auch der bivalente Betrieb einer Erdwärmeanlage sinnvoll sein. Hier wird die Erdwärmeanlage auf etwa 50 % der zu erwartenden Spitzenleistung ausgelegt und mit einem Gas- oder Ölkessel, in Ausnahmefällen auch mit einer elektrischen Nachheizung, kombiniert. Damit lässt sich bei deutlich reduzierten Investitionskosten für die Erdwärmeanlage ein Anteil von 70 bis 85 % der Jahresarbeit über die Geothermie decken.

Im Wohnungsbau ist zudem noch die Frage der Warmwasserbereitung zu klären. Die für Warmwassererwärmung erforderlichen Temperaturen können von Erdwärmesystemen nur bedingt zur Verfügung

gestellt werden. Denkbar ist beispielsweise, die geothermische Erschließungsanlage zur Vorwärmung zu nutzen. Im Sommer bietet sich eine Solaranlage als Ergänzung an.

Pauschale Aussagen zu Investitionskosten und Wirtschaftlichkeit sind kaum möglich, da sie von vielen Faktoren abhängen. Grundsätzlich gilt, dass ein Neubau mit niedrigen Vorlauftemperaturen und zusätzlichem Kühlbedarf günstigere Rahmenbedingungen bietet als ein bestehendes Gebäude mit großem Warmwasserbedarf und hohen Vorlauftemperaturen.

11. Hinweise zur Planung

Bei der Planung einer geothermischen Nutzungsanlage wird ein stufenweises Vorgehen empfohlen.

Eine erste Prüfung der technischen und organisatorischen Durchführbarkeit unter Berücksichtigung der örtlichen Grundwasserverhältnisse, formaler Schutzbestimmungen (z.B. Heilquellenschutz) und der Eignung des Untergrundes zeigt frühzeitig Möglichkeiten und Grenzen des Vorhabens auf.

Sofern die grundsätzliche Machbarkeit geklärt ist, folgt darauf aufbauend die Vorplanung. Neben der überschlägigen Dimensionierung der unterirdischen Anlagenteile muss hier der Energiebedarf festgelegt und eine Entscheidung zu Art und Umfang der oberirdischen Anlagenkomponenten (Wärmepumpe,

Heizsystem, monovalenter/ bivalenter Betrieb etc.) getroffen werden.

Dann werden die Anträge bei der zuständigen Berg- bzw. Wasserbehörde gestellt.

Liegen die jeweiligen Genehmigungen vor, werden in Abhängigkeit der Größe des Vorhabens zur Abgrenzung bohrtechnischer Risiken sowie zur genaueren Dimensionierung Voruntersuchungen (Pilotbohrungen, TRT) durchgeführt. Anschließend folgt die Ausschreibung.

Danach liegen die Voraussetzungen für eine reibungslose Realisierung der geothermischen Anlage vor (**Abb. 29**).

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

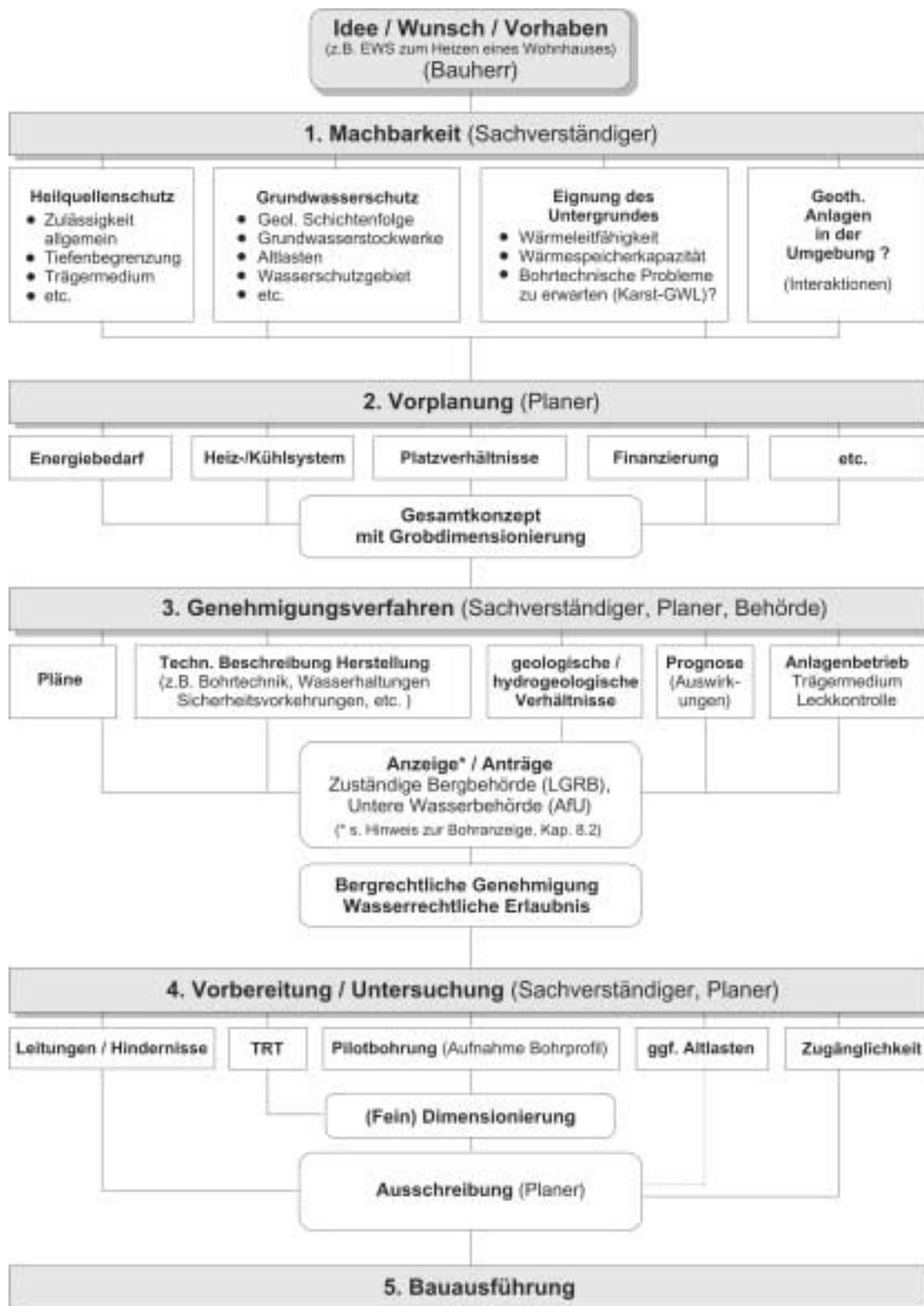


Abb. 29: Vorgehen bei der Planung geothermischer Nutzungsanlagen

12. Zusammenfassung

Vorliegende Broschüre behandelt die in Stuttgart bereits praktizierten und Erfolg versprechenden Nutzungsformen der oberflächennahen Geothermie. Schwerpunkt ist hierbei die Klärung folgender Fragen:

- Gibt es hinsichtlich der geothermischen Nutzung des Untergrundes in Stuttgart Einschränkungen und - wenn ja - was ist hierbei zu beachten?
- Wo ist die geothermische Nutzung wirtschaftlich Erfolg versprechend und welche Erschließungsformen empfehlen sich?
- Wie geht man vor, wenn man die Geothermie ökonomisch nutzen will?

Rund 60 % der Stuttgarter Gemarkungsfläche liegt innerhalb des Heilquellenschutzgebiets von Stuttgart-Bad Cannstatt und -Berg (REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART, 11.06.2002). Entgegen z.T. anders lautender Regelungen für Trinkwasser- und Quellenschutzgebiete gibt es im Heilquellenschutzgebiet in Stuttgart **kein** generelles Ausschlusskriterium für die Erschließung von Erdwärme. Hier sind geothermische Nutzungen grundsätzlich zulässig, wenn die technischen Anforderungen und Auflagen zum Schutz des Heil- und Mineralwassers beachtet werden. Die Ansprüche steigen aber mit zunehmender Nähe zu den Fassungen der staatlich anerkannten Heilquellen. So ist in der **Innen-** und **Kernzone** die Erschließungstiefe begrenzt. Ferner dürfen hier in den unterirdischen Anlagenteilen weder wassergefährdende noch organische Stoffe im Wärmeträgermedium eingesetzt werden.

Generell, d.h. auch außerhalb des Heilquellenschutzgebiets, sind in Stuttgart die Anforderungen an den Bau geothermischer Erschließungsanlagen anspruchsvoll. Hier ist wegen der ausgeprägten hydrogeologischen Stockwerksgliederung des Untergrundes eine besonders sorgfältige Abdichtung der unterirdischen Wärmeträgerrohre gegenüber dem anstehenden Erdreich notwendig. Dazu muss mit entsprechenden Bohrdurchmessern ein ausreichend großer Ringraum (≥ 50 mm) gewährleistet sein, sodass die Wärmetauscherrohre mit geeigneten Abdichtungsmaterial allseitig ummantelt und wasserundurchlässig an den Untergrund angebunden werden können.

Beim **Betrieb** geothermischer Nutzungsanlagen

spielt eine grundwasserverträgliche Bewirtschaftung eine maßgebliche Rolle. Dies gilt sowohl für den Heizfall, bei dem ein übermäßiger Wärmeentzug zur Frostbildung im Untergrund (Ringraumabdichtung, umgebendes Gebirge) führt, als auch für Wärmeeinleitungen (Kühlfall), bei denen das Grundwasser aufgewärmt und in seiner Qualität beeinträchtigt wird.

Aus diesem Grund müssen die nutzungsbedingten Temperaturveränderungen und deren räumliche Auswirkungen innerhalb tolerabler Grenzen liegen. Dies ist bei mittleren und größeren Vorhaben bereits in der Antragstellung durch entsprechende Prognosen zu belegen.

Für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie ist der Untergrund in Stuttgart unterschiedlich geeignet. Vergleichsweise günstige Voraussetzungen findet man in den **südlich** des Heilquellenschutzgebiets gelegenen Teilen Stuttgarts. **Innerhalb** des Heilquellenschutzgebiets sind Erdwärmennutzungen in den technischen und geologischen Grenzen realisierbar, die eine unbeeinflusste Quellschüttung nach Menge und Güte sicherstellen. Die **nördlich** des Heilquellenschutzgebiets gelegenen Bereiche sind grundsätzlich auch geothermisch erschließbar, wengleich der dortige Untergrund für Stuttgarter Verhältnisse erhöhte Bohr- und gewinnungstechnische Risiken birgt. Diese sind jedoch kein Ausschlusskriterium, da sie mit einer sorgfältigen Vorplanung hinreichend sicher kalkuliert und beherrscht werden können.

Neben den Erdwärmesonden gewinnen in Stuttgart Energiepfähle sowie Wärmetauschersysteme in erdberührten Betonbauteilen zunehmend an Bedeutung. Diese Erschließungsformen sind besonders günstig, weil ein Großteil der Herstellungskosten von den ohnehin anfallenden Kosten für die Gründung abgedeckt sind. Sie gelten aus energiewirtschaftlicher und ökologischer Sicht vor allem dann als sinnvoll, wenn sie mit Niedertemperaturheiz- (bzw. Kühl-)systemen in Kombination mit einem guten baulichen Wärmeschutz gekoppelt sind.

Die direkte thermische Nutzung des Grundwassers über Förder- und Schluckbrunnen sowie die Erschließung der tiefen Geothermie ist angesichts der sensiblen Stuttgarter Grundwasserverhältnisse problematisch und daher kaum genehmigungsfähig.

Demgegenüber bietet die Erdwärmegewinnung über Tunnelbauwerke gerade für Stuttgart interes-

sante Perspektiven. Auch hier sind die Kosten für die Zusatzausrüstung gering, die Flächen für den Wärmetausch jedoch groß. Da in Stuttgart mittel- und voraussichtlich auch langfristig mit umfangreichen Tunnelbauvorhaben zu rechnen ist, sollte diese Erschließungsmöglichkeit gezielt weiterverfolgt werden.

Unabhängig von Ort und Art der beabsichtigten Erdwärmennutzung ist eine gründliche Vorbereitung mit einem stufenweisen Vorgehen notwendiger Bestandteil der Planung. Diese wiederum dient als Grundlage für die berg- bzw. wasserrechtlichen Verfahren und beschleunigt deren Abwicklungen. Entsprechende Freigaben und Erlaubnisse sowie die zugehörige Planung bilden eine solide Plattform für die Ausschreibung und sorgen für ein hohes Maß an Kalkulationssicherheit.

Sofern Bauherren und Planer die hier zusammengefassten Hinweise zum Untergrund und zur technischen Ausführung befolgen und diese entsprechend den Empfehlungen schrittweise in die Planung und Antragstellung umsetzen, ist die Sicherheit vor Überraschungen (z.B. Havarien beim Bohren, Zeitverzögerungen, zu geringe Energieausbeute) und unvorhersehbaren Mehrkosten groß, sodass einer reibungslosen Realisierung des Vorhabens kaum mehr etwas im Wege steht.

13. Literatur

- ARMBRUSTER, H., DORNSTÄDTER, J., KAPPELMEYER, O. & UFRICHT, W. (1998): Thermische Untersuchungen im Neckar zwischen Stuttgart-Bad Cannstatt und Münster zum Nachweis von Mineralwasseraustritten. - Deutsche Gewässerkundl. Mitt., **42(1)**: 9-14, 7 Abb.; Koblenz.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) SCHWEIZ (1998): Liste der Kältemittel und Wärmeträgerflüssigkeiten. – Verordnung über den Schutz der Gewässer vor wassergefährdenden Flüssigkeiten (VWF) vom 1. Juli 1998, AS 1998: 2019 – 2030; Bern.
- HEILAND, J. (1997): Genehmigungsverfahren im Zusammenhang mit Erdwärmennutzung. – Tagungsband zum Symposium Geothermie-Erdwärme Chancen und Grenzen einer regenerativen Energie 25. November 1997 in Stuttgart, 80 – 89, 54 Abb., 14 Tab.; Stuttgart.
- HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2004): Erdwärmennutzung in Hessen. - Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW, 32 S., 12 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- LANDTAG VON BADEN- WÜRTTEMBERG (2005): Stellungnahme des Umweltministeriums zur Bedeutung der oberflächennahen Geothermie für die Energieversorgung im Gebäudebereich. - Drucksache 13/4216, 2 S.; Stuttgart.
- MÜLLER (2004): Geotechnische Untersuchungen zur Optimierung der geothermischen Energiegewinnung mit Erdwärmesonden. - Mitt. zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen, **89**: 49 – 59, 5 Abb., 2 Tab.; Aachen.
- PLÜMACHER, J. (1999): Kalibrierung eines regionalen Grundwasserströmungsmodells mit Hilfe von Umweltisotopeninformationen. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **1/1999**: 160 S.; Stuttgart.
- PRESTEL, R. & SCHLOZ, W. (2002): Ergebnisse der Bohrung und Grundwassermessstelle Scharnhausen. – Abh. L.-Amt f. Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, **15**: 303-330, 6 Abb., 7 Tab.; Freiburg i. Br.
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART (2002): Verordnung des Regierungspräsidiums Stuttgart zum Schutz der staatlich anerkannten Heilquellen in Stuttgart-Bad Cannstatt und Stuttgart-Berg. - GBl. f. B.W., **Nr. 7**: 255 - 260; Stuttgart.
- SCHOLLENBERGER, U. & SPITZBERG, S. (2005): Thermische Modellrechnungen zur Wärmeausbreitung im Grundwasserraum beim Einsatz von Energiepfählen am Beispiel von drei Modellräumen im Stadtgebiet von Stuttgart. - Unveröff. Gutachten im Auftrag des Amtes für Umweltschutz, 5 S., 2 Tab., 6 Anlagen; Stuttgart.
- UFRICHT, W. (1994): Das Mineral- und Heilwasser von Stuttgart-Bad Cannstatt und Berg eine Einführung in die Geologie, Geohydraulik und Hydrochemie des Systems. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **2/1994**: 13 – 48, 14 Abb., 1 Tab.; Stuttgart
- _____ (2001): Vulnerabilität und Schutzmaßnahmen im Quellgebiet der Stuttgarter Mineral- und Heilwässer. – Z. angew. Geol., **47(1)**: 47-54; Hannover.
- _____ (2002): Ein Hydrogeologisches Modell für den Karst- und Mineralwasseraquifer Muschelkalk im Großraum Stuttgart. – In: FACHSEKTION HYDROGEOLOGIE DER DEUTSCHEN GEOLOGISCHEN GESELLSCHAFT (Hrsg.): Hydrogeologische Modelle – Ein Leitfaden mit Fallbeispielen. – Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges., Hydrogeol. Beitr., **Heft 24**: 101-110 (Gesamtband 120 S.), 7 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- _____ (2003a): Hydrogeologisches Modell Aquifersystem Oberer Muschelkalk. Aktualisierung des Hydrogeologischen Modells zur Fortschreibung des numerischen Grundwasserströmungsmodells „Stuttgarter Mineralquellen“. – Gutachten des Amtes für Umweltschutz, 71 S., 75 Anlagen; Stuttgart.

_____ (2003b): Kommunalen Umweltbericht: Das Grundwasser in Stuttgart. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **1/2003**: 202 S., 77 Abb., 22 Tab.; Stuttgart.

_____ (2005): Fortschreibung des Hydrogeologischen Modells Stuttgarter Talkessel. – Gutachten des Amtes für Umweltschutz. – 56 S., 15 Tab.; 25 Anlagen; Stuttgart.

UFRECHT, W. & HARRLACHER, C. (1998): Hydrogeologisches System-Modell Stuttgart (Feuerbacher Tal, Stuttgarter Talkessel, Neckartal). – Gutachten des Amtes für Umweltschutz Stuttgart, 70 S., 47 Anlagen; Stuttgart.

UFRECHT, W. & RENNER, S. (1996): Hydrogeologisches Modell Stuttgarter Talkessel (Nesenbachtal). – Gutachtend des Amtes für Umweltschutz, 46 S.; 43 Anlagen; Stuttgart.

UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2005): Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. – Leitfaden, 26 S., 6 Abb.; Stuttgart.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2000): Thermische Nutzung des Untergrundes, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. - VDI 4640 Blatt 1, 32 S., 2 Abb., 4 Tab.; Düsseldorf.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. - VDI 4640 Blatt 2, 43 S., 6 Abb., 2 Tab.; Düsseldorf.

WOLFF, G. (1999): Neukonzeption zum Schutz der Heilquellen von Stuttgart-Bad Cannstatt und – Berg. – Bauen in den engeren Schutzzonen. geotechnik, **1999/3**: 185-193, 5 Abb., 3 Tab.; Essen.

_____ (2004): Technischer Heilquellenschutz in Stuttgart. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **4/2004**: 98 S., 46 Abb., 6 Tab., 5 Anlagen; Stuttgart.

WOLFF, G. & UFRECHT, W. (1998): Neukonzeption zur Abgrenzung der engeren quantitativen Schutzzonen für die Heilquellen von Stuttgart-Bad Cannstatt und Berg. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **1/1998**: 161-172, 4 Abb., 3 Tab.; Stuttgart.

14. Anlagen

Anlage 1 Wasserwirtschaftliche Anforderungen

Anlage 1.1 Wasserwirtschaftliche Anforderungen an technische Ausführung und Betrieb

| Erschließungsform | Regelungsgegenstand | Schutzziele/-zwecke | HQSG-Zone | Verbote, Beschränkungen, Auflagen |
|--|---|--|--|---|
| Erdwärmekollektoren (oberhalb Grundwasserspiegel) | Bodenaushub/Herstellung | Vermeidung unkontrollierbarer Mineralwasseraufbrüche | Kernzone | Verbot flächiger Eingriffe tiefer als Basis Quartär |
| Erdwärmesonden | Bohrung | <ul style="list-style-type: none"> ■ Erhalt der natürlichen Stockwerksgliederung ■ Vermeidung eines Mineralwasseraufstiegs ■ Schutz vor artesischen Mineralwasseraufstiegen | Kernzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Maximale Bohrtiefe = Basis Quartär ■ Vorhalten einer Totstauverrohrung ■ Arbeitsbegleitende Messungen → CO₂ (GW, Bohrlochluft), pH, ELF und Temperatur im GW vor Ort |
| | | | Innenzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Maximale Bohrtiefe = Basis Grundgips-schichten ■ Bei Unterschneidung GWmo: arbeitsbegleitende Messungen → CO₂ (GW, Bohrlochluft), pH, ELF und Temperatur im GW vor Ort |
| | | | Außenzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Je nach Restmächtigkeiten über dem mo und vorhandenen natürlichen Schutzwirkungen → Einzelfallentscheidungen (s. Anlage 1.2) |
| | Ausbau | <ul style="list-style-type: none"> ■ Besonders sorgfältige Abdichtung des Ringraums ■ Zentrischer Einbau der Sonden | Unabhängig HQSG (gesamtes Stadtgebiet) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Lichter Ringraum zwischen Sonde und Bohrlochwand ≥ 50 mm (z.B. Doppel-U-Sonde Ø 25 mm → Bohrloch Ø ≥ 185 mm, Doppel-U-Sonde Ø 32 mm → Bohrloch Ø ≥ 200 mm) ■ Sulfatbeständige Zemente bzw. korrosionsbeständige Verschleißmaterialien bei der Ringraumabdichtung ■ Abstandshalter mindestens alle 5 m |
| Energiepfähle | Bohrungen | <ul style="list-style-type: none"> ■ analog EWS ■ Beherrschung von CO₂-Ausgasungen | Kernzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ 0,5 m Sicherheitsabstand zur Quartärbasis ■ Begrenzung dynamischer Einwirkungen infolge Bohr-/Ramarbeiten (Schwinggeschwindigkeit < 3 mm/s) ■ sonst analog EWS-Bohrungen |
| | | | Innenzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ maximale Bohrtiefe = Basis Grundgips-schichten ■ sonst analog EWS-Bohrungen |
| | Ausbau (Sondeneinbau, Verschließung) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Dauerhaft dichte Verschließung zur Vermeidung von Wegsamkeiten/ Stockwerksverbindungen | Kernzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Gründungskörper müssen wasserundurchlässig sein und dicht an das Gebirge anschließen ■ Verwendung aggressions-/sulfatbeständiger Zemente |
| | | | Innenzone | |
| | | | Außenzone | |
| | | | Außerhalb HQSG | |

| Erschließungsform | Regelungsgegenstand | Schutzziele/-zwecke | HQSG-Zone | Verbote, Beschränkungen, Auflagen |
|--|-----------------------------|--|--|--|
| Erdberührte Betonbauteile | Baumaßnahme/ Bodenaushub | <ul style="list-style-type: none"> ■ Vermeidung unkontrollierbarer Mineralwasseraufbrüche ■ Vermeidung eines Mineralwasseraufstiegs ■ Vermeidung untolerierbarer Mengendefizite | Kernzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Verbot flächiger Eingriffe tiefer als Basis Quartär ■ Grundwasserhaltung zur Trockenlegung der Baugrube unzulässig ■ Fläche des freigelegten Grundwassers < 500 m² ■ Arbeitsbegleitende Messungen → CO₂, pH, ELF, Temperatur im GW |
| | | | Innenzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Verbot flächiger Eingriffe <ul style="list-style-type: none"> - in den Unterkeuper und tiefer - in die Grundgipsschichten, wenn dabei Druckspiegel des GWmo unterschritten wird ■ Sofern Grundwasserhaltung > Standard eingriffe → Begrenzung: <ul style="list-style-type: none"> - Dauer < 12 Monate - Entnahmerate < 2 l/s - Gesamtfördermenge < 32.000 m³ |
| | | | Außenzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Sofern Grundwasserhaltung direkt im GWmo → Begrenzung: <ul style="list-style-type: none"> - Dauer < 12 Monate - Entnahmerate < 10 l/s - Gesamtfördermenge < 100.000 m³ |
| Allgemein (gilt für Erdwärmekollektoren, EWS, Energiepfähle und erdbeberührte Betonbauteile) | Anlagenbetrieb | <ul style="list-style-type: none"> ■ Unbedenklichkeit der Trägermedien ■ Nachhaltige thermische Bewirtschaftung des Untergrundes ohne Beeinträchtigung natürlicher Kreisläufe ■ Ausreichende Sicherheit gegen Vereisung des Untergrundes ■ Lecküberwachung | Kernzone | <ul style="list-style-type: none"> ■ Keine wassergefährdenden und organischen Stoffe im Trägermedium |
| | | | Innenzone | |
| | | | Außenzone, Sonde im Unterkeuper und tiefer | |
| | | | Außenzone, Sonde bis Basis Gipskeuper | <ul style="list-style-type: none"> ■ Trägermedien der WGK 1 zulässig, wenn gleichzeitig Ausrüstung Anlage mit automatischem Druck-/Strömungswächter (Abschaltung Umwälzpumpe + Alarmauslösung) zur Begrenzung etwaiger Leckagemengen |
| | | | Außerhalb HQSG | <ul style="list-style-type: none"> ■ Prognose der Temperaturänderungen im Untergrund/GW ab Anlagen mittlerer Größe (≥ 6 Aufschlüsse) ■ Wärmeentzug (Heizfall): GW-Temperatur am Wärmetauscher ≥ 0 °C und Abkühlung gegenüber Jahresdurchschnittstemperatur in 50 m Abstand vom Wärmetauscher ≤ 2 K ■ Wärmeeinleitung (Kühlfall): GW-Temperatur am Wärmetauscher < 25 °C und GW-Erwärmung in 50 m Abstand vom Wärmetauscher ≤ 2 K ■ Bei größeren Anlagen (≥ 11 Aufschlüsse) auf Anforderung Monitoring (z.B. automatische Temperaturüberwachung, Bestimmung der Hydrochemie und Schadstoffe im Abstrom der unterirdischen Wärmetauscher) |
| Allgemein (unabhängig von der Lage bzgl. HQSG) | | | | |

Anlage 1.2 Zulässige Bohrtiefen bei geothermischen Erschließungen im Oberen Muschelkalk

| Charakter des GWmo | | Zonen im Heilquellenschutzgebiet | maximale Bohrtiefe bis ... |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------|--|
| Drucksituation | Hydrochemie | | |
| artesisch | (Anteile) hoch mineralisiert | Kernzone | Basis Quartär |
| | nieder mineralisiert | | |
| gespannt | (Anteile) hoch mineralisiert | Innenzone | Basis Grundgips-schichten |
| | nieder mineralisiert | Außenzone | Top Hassmersheimer Schichten |
| | normales Karstgrundwasser | | (= ca. 70 m unterhalb Basis Unterkeuper) |
| frei | | kein Heilquellenschutzgebiet | |

Anlage 2 Checkliste für Antragsunterlagen (z.B. Erdwärmesonden und Energiepfähle)

| Überbegriff/ Stichwort | Angaben und Unterlagen des Antrags |
|---|--|
| Zuständigkeit/ Projektverantwortung | |
| Bauherr/Vorhabensträger | Adresse/ Anschrift: <ul style="list-style-type: none"> ■ Name ■ Firma ■ Ansprechpartner ■ Anschrift ■ Fon, Fax, mail ■ Zertifikat nach DVGW-Arbeitsblatt W 120 oder vergleichbare Nachweise |
| Überwachendes Geologie-/Gutachter-/Ingenieurbüro | |
| Bohrfirma | |
| Lage des Vorhabens | |
| Lage des Vorhabens und der Bohransatzpunkte | <ul style="list-style-type: none"> ■ Stadtbezirk ■ Gewann/Straße/Haus-Nr. (Anschrift der Baustelle) ■ Flurstücks-Nr. ■ Übersichtslageplan mit Kennzeichnung des Vorhabens (z.B. Auszug Top. Karte 1: 25.000) ■ Lageplan mit Bohransatzpunkten (z.B. Flurkartenauszug M 1: 500) |
| Geologische/hydrogeologische Verhältnisse | |
| Geologie | <ul style="list-style-type: none"> ■ Zu erwartende Schichtenfolge/ voraussichtliches Bohrprofil |
| Grundwasser | <ul style="list-style-type: none"> ■ Voraussichtliche Lage des Grundwasserspiegels ■ Durchteufte Grundwasserstockwerke |
| Schutzgebiete | <ul style="list-style-type: none"> ■ Heilquellenschutzgebiet ■ Wasserschutzgebiet |
| Umliegende Grundwasser-nutzungen | <ul style="list-style-type: none"> ■ z.B. Brauchwasserfassung, Trinkwasserfassung etc. |
| Technische Beschreibung des Vorhabens | |
| Bohrarbeiten | <ul style="list-style-type: none"> ■ Anzahl der Bohrungen ■ Geplante Teufe ■ Bohrverfahren ■ Spülungszusätze ■ Geplanter Bohrlochdurchmesser ■ Vorgesehene Sicherheitsvorkehrungen (z.B. beim Durchteufen mehrerer GW-Stockwerke) ■ Bohrbeginn/geplantes Bohrende |
| Bohrbegleitende Untersu-chungen und Messungen | <ul style="list-style-type: none"> ■ Aufnahme des geologischen Schichtprofils (verantwortliches Büro/Person) ■ Vorgesehene Messungen (z.B. Geophysik) ■ Sonstige Überwachungsmaßnahmen (wer, was) |
| Sonde | <ul style="list-style-type: none"> ■ Typ (z.B. Doppel-U) ■ Abmessungen ■ Sondenmaterial ■ Prinzipskizze Sondendurchmesser mit Abmessungen |
| Bohrlochverschließung | <ul style="list-style-type: none"> ■ Materialien (z.B. sulfatbeständiger Zement, Bentonit) ■ Ringraumabstand ■ Verschließungsstrecke |
| Anlagenbetrieb | |
| Wärmeträgermedium | <ul style="list-style-type: none"> ■ Art/Inhaltsstoffe ■ Wassergefährdungsklasse ■ Menge |
| Anlagenkontrolle/ Monito-ring | <ul style="list-style-type: none"> ■ Vorgesehenes Lecküberwachungssystem (Druck-/ Strömungswächter) ■ Eigenkontrolle (Art, Umfang, Zuständigkeiten) |
| Auswirkungen des Vorhabens | |
| Ggf. Prognose | Dokumentation der Prognoseberechnung (bzw. -modellierung) bei mittelgro-ßen und größeren Anlagen (ab 6 Aufschlüssen) mit Angaben zur <ul style="list-style-type: none"> ■ Veränderung der Grundwassertemperatur ■ räumlichen Auswirkung der Temperaturveränderung (z.B. Isothermen im Grundwasser) |

Anlage 3. Praxisbeispiele

Anlage 3.1 Altenwohnanlage Rohrer Höhe



Altenwohnanlage Rohrer Höhe in Stuttgart

Altenwohnanlage Rohrer Höhe in Stuttgart

| | |
|---|--|
| Bauherr: | Landeshauptstadt Stuttgart |
| Planung u. Beratung (Energiemanagement/Geothermie): | Steinbeis – Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik (EGS), Stuttgart |
| Gebäudenutzung: | Altenwohnheim |
| Fertigstellung: | 1998 |
| Energiekonzept (Heizen/ Raumklima): | Erdgekoppelte Wärmepumpenanlage als Grundlast für Heizung und Warmwasserbereitung. Solaranlage mit ca. 150 m ² Kollektorfläche zur Unterstützung der Warmwasserbereitung. Elektro-Feststoffspeicher-Heizung zur Deckung des Spitzenbedarfs. |
| Art der Heizflächen: | Fußbodenheizung mit 45 °C Vorlauftemperatur |
| Heizenergiebedarf: | |
| berechnet: | 590 MWh/a |
| gemessen: | 666 MWh/a (im Jahr 2002) |
| Angestrebter Deckungsgrad durch geothermische Anlage: | 70 % |
| Jahresarbeitszahl: | |
| berechnet: | 3,7 |
| gemessen: | 3,0 |
| Geologie/ Hydrogeologie | |
| Zone Heilquellenschutzgebiet: | Außerhalb |
| Geol. Schichtenfolge: | Quartär, Stubensandstein, Obere Bunte Mergel, Kieselsandstein, Untere Bunte Mergel |
| GW-Stockwerke: | Stubensandstein, Kieselsandstein |
| Geothermische Nutzungsanlage – Typ: | Erdwärmesondenanlage mit Wärmepumpe |
| Technische Auslegung: | |
| Anzahl EWS: | 28 |
| Tiefe EWS: | Jew. 95 - 99,5 m |
| Bohrlochdurchmesser: | 190 mm |
| Mindestabstand EWS: | 6 m |
| Bohrverfahren: | Imlochhammer |
| Sondentyp: | Doppel-U, HD-PE 32x3,6 mm, $\varnothing_{\text{gesamt}} = 89 \text{ mm}$ |
| Trägermedium: | Wasser-Glykol-Gemisch (20 %) |

Anlage 3.2 Rosenpark Residenz in Stuttgart-Vaihingen



Perspektivdarstellung Wohnanlage Rosenpark Residenz (Zeichnung: Fa. Häussler AG)



Sondenkopf, mit Schachtring gesichert



Einbringen der Sonde

Rosenpark Residenz in Stuttgart-Vaihingen

| | |
|--|---|
| Bauherr: | Häussler Baumanagement GmbH |
| Planung (Heizung/Kühlung/Energiemanagement): | Zent-Frenger |
| Gebäudenutzung: | 80 Wohneinheiten |
| Fertigstellung: | 2005/2006 |
| Energiekonzept (Heizen/Raumklima): | Kombination aus Radiatorenheizung (70 °C Vorlauftemperatur) und Fußbodenheizung (40 °C Vorlauftemperatur); Energiequellen: erdgekoppelte Wärmepumpe und Gas-Brennwert-Kessel |
| Energiebedarf (berechnet) | |
| Heizen: | ca. 896 MWh/a |
| Kühlen: | ca. 154 MWh/a |
| Geschätzte Jahresarbeitszahl: | > 4 |
| Geologie/ Hydrogeologie | |
| Zone Heilquellenschutzgebiet: | Außerhalb |
| Geol. Schichtenfolge: | Unterjura, Rhät, Knollenmergel, Stubensandstein |
| GW-Stockwerke: | Schwarzjura, Stubensandstein |
| (Oberster) Grundwasserstand: | ca. 5 m unter GOK |
| Voruntersuchungen: | Pilotbohrung, Thermal Response-Test |
| Wärmeleitfähigkeit I (Mittelwert): | 2,28 W/m·K |
| Boden-/GW-Temperatur: | ca. 11 bis 12 °C |
| Geothermische Nutzungsanlage – Typ: | Erdwärmesonden (EWS) |
| Technische Auslegung und Durchführung | |
| Anzahl EWS: | 58 |
| Tiefe EWS: | 75 m |
| Bohrlochdurchmesser: | 200 mm |
| Mindestabstand EWS: | 6 m |
| Bohrverfahren: | Imlochhammer |
| Sondentyp: | Doppel-U, 4 x 32 mm |
| Trägermedium: | Wasser-Glykol-Gemisch (25 %) |

**Anlage 3.3 Bürogebäude Südleasing Stuttgart, Teilgebiet A1.14
Städtebauprojekt Stuttgart 21**



Bürogebäude Südleasing Stuttgart



Pfahlkopfreihen

Bürogebäude Südleasing Stuttgart, Teilgebiet A1.14 Städtebauprojekt Stuttgart 21

| | |
|---|--|
| Bauherr: | Pariser Platz AG |
| Planung (Energiemanagement): | DS-Plan GmbH Stuttgart (Systemplanung) Scholze Ingenieurgesellschaft, Leinfelden-Echterdingen (Ausführung) |
| Gebäudenutzung: | Büro- und Dienstleistungsgebäude |
| Fertigstellung: | Sommer 2005 |
| Energiekonzept (Heizen/Raumklima): | Thermische Betonkernaktivierung (TBA), Heizung TBA durch Fernwärme, Gebäudekühlung Deckung fast vollständig durch geothermische Bohrpfahlaktivierung |
| Heizenergiebedarf: | ca. 17 kWh/m ³ a |
| Kühlenergiebedarf: | ca. 7 kWh/m ³ a |
| Geschätzte Jahresarbeitszahl (Kühlen): | 12 - 20 |
| Geologie/ Hydrogeologie | |
| Zone Heilquellenschutzgebiet: | Innenzone |
| Geol. Schichtenfolge: | Auffüllung, Quartär (Talablagerungen, Travertin), Dunkelrote Mergel, Bochinger Horizont |
| Aufgeschlossene GW- Stockwerke: | Quartär/Gipskeuper (hydraulisch gekoppelt) |
| Grundwasserstand: | ca. 10 m unter GOK |
| Geschätzte Wärmeleitfähigkeit λ (Mittelwert): | 2,0 W/m·K |
| Boden-/GW-Temperatur: | 13,5 °C |
| Filtergeschwindigkeit: | 0,01 – 1,17 m/d (\varnothing 0,6 m/d) |
| Geothermische Nutzungsanlage – Typ: | Energiepfähle |
| Technische Auslegung | |
| Anzahl Energiepfähle: | ca. 100 |
| Tiefe Energiepfähle: | 20 – 25 m |
| Bohrpfahldurchmesser: | 1 – 1,2 m |
| Mindestabstand Energiepfähle: | 6 m |
| Sondentyp: | HDPE-Rohre DN 20/2.0 bzw. 25/2.3 |
| Trägermedium: | Trinkwasser |

Anlage 3.4 Bürogebäude Kronen-Carre



Bürogebäude Kronen-Carre (Aufnahme: Sparkassenversicherung Stuttgart)



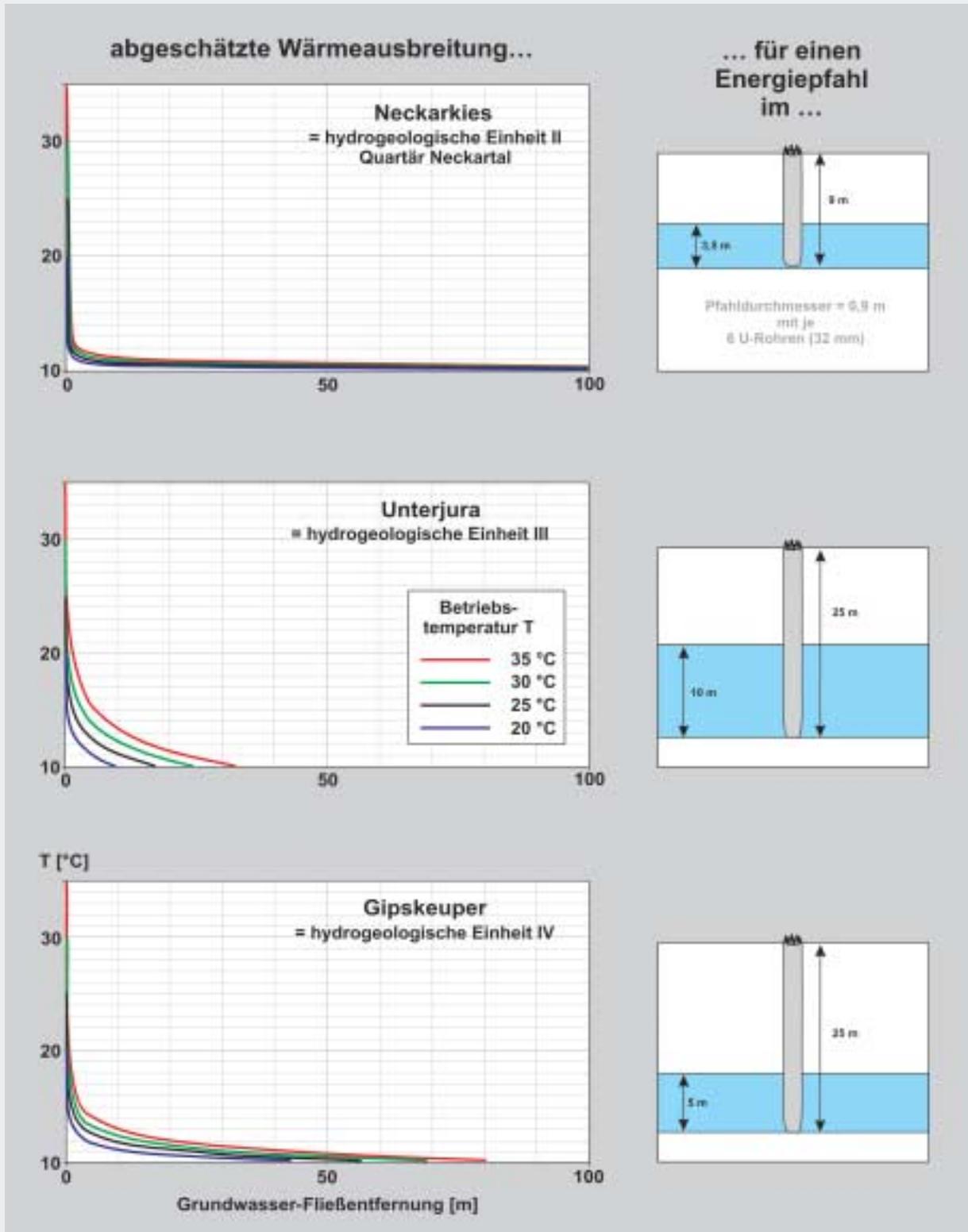
Herstellung
Energiebodenplatte
(Aufnahme:
Fa. Zent-Frenger)

Bürogebäude Kronen-Carre

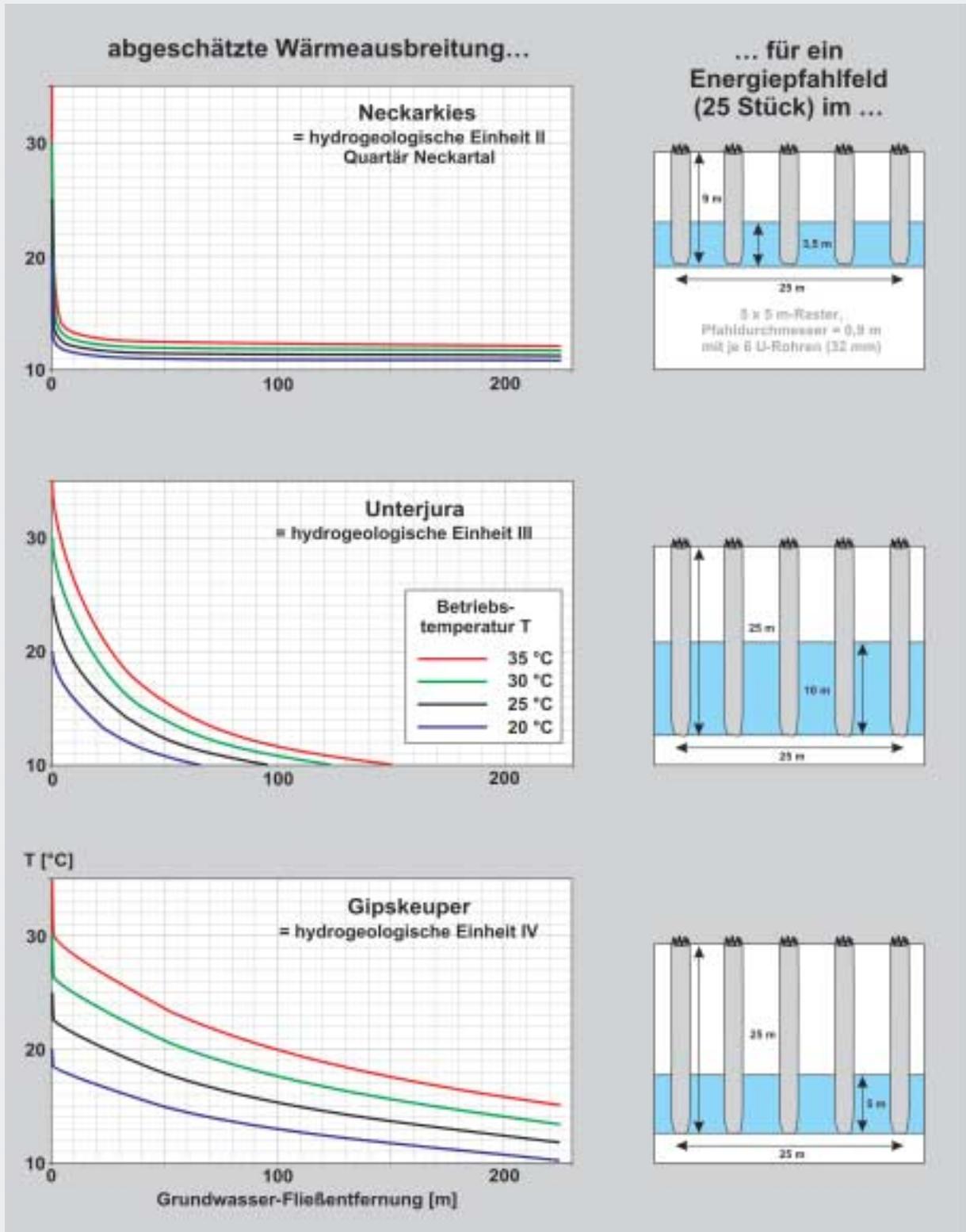
| | |
|--|--|
| Bauherr: | Sparkassen-Versicherung Lebensversicherung AG |
| Planung (Energiemanagement/Geothermie): Gebäudenutzung: | Transsolar Energietechnik GmbH Bürogebäude |
| Fertigstellung: | April 2001 |
| Energiekonzept (Heizen/Raumklima): | Heizen: Fernwärme Gebäudekühlung durch Betonkernaktivierung; Grundlast durch Kältemaschine, Ergänzung/Spitzenlast durch Energiebodenplatte |
| Geologie/ Hydrogeologie | |
| Zone Heilquellenschutzgebiet: | Innenzone |
| Geol. Schichtenfolge: | Quartär, Dunkelrote Mergel, Bochinger Horizont |
| Aufgeschlossene GW-Stockwerke: | Dunkelrote Mergel/Bochinger Horizont |
| Grundwasserstand: | Überwiegend unterhalb Bauwerkssohle |
| Geschätzte Wärmeleitfähigkeit: | 1,1 W/m·K |
| GW-Temperatur: | ca. 14 °C |
| Filtergeschwindigkeit: | ca. 0,1 m/d |
| Geothermische Nutzungsanlage – Typ: | Energiebodenplatte |
| Technische Auslegung | |
| Kontaktfläche Boden/GW: | 1900 m ² |
| Tiefe Betonbauteil: | ca. 9 m unter GOK |
| Sondentyp: | Rohrschlangen aus PEX-Kunststoff, in Sauberkeitsschicht (B15) eingelegt |
| Trägermedium: | Trinkwasser |
| Sonstiges: | Um flächigen Kontakt der Energiebodenplatte mit dem anstehenden Erdreich zu ermöglichen, wurde das Grundwasserumläufigkeitssystem nicht als Flächenfilter, sondern als Kiesrigolensystem ausgebildet |

Anlage 4: Prognosebeispiel
 (Modellfall, nach SCHOLLENBERGER & SPITZBERG 2005)

Anlage 4.1 Prognose der Wärmeausbreitung im Untergrund für einen
 Energiepfahl



Anlage 4.2 Prognose der Wärmeausbreitung im Untergrund für ein Energiepfahlfeld



15. Glossar

Anomalie (hier: geothermische Anomalie): Lokale Abweichung vom durchschnittlich gemessenen geothermischen Gradienten. Normalerweise erhöht sich die Temperatur je 100 m Tiefe um etwa 3°C. Es gibt jedoch Bereiche (z.B. Oberrheingraben oder Bad Urach), in denen die Temperatur im Untergrund schneller ansteigt. In Bad Urach sind es in den oberen 300 bis 400 Metern fast 11°C pro 100 m. Ursache für eine geothermische Anomalie ist ein erhöhter konvektiver Wärmetransport aus der Tiefe (z.B. Thermalwasser) oder ein verstärkter konduktiver Wärmefluss über Gesteine (z.B. Vulkanismus).

Aquifer: Grundwassererfüllter Gesteinskörper

artesisch: Hydraulischer Zustand, bei dem aufgrund eines natürlichen Überdrucks Grundwasser oberirdisch ausfließt.

Bauteilaktivierung: Hierbei sind massive Bauteile wie Decken, Böden und Wände mit Wasser gefüllten Rohren ausgestattet und können je nach Bedarf geheizt oder gekühlt werden. Das System nutzt die thermische Speicherkapazität der Betonkonstruktion. Da es mit Wassertemperaturen nahe der Raumtemperatur betrieben wird, eignet es sich gut für Anlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie.

Betonkernaktivierung: Siehe Bauteilaktivierung

Bergmännische Tunnelbauweise: Bei großer Überdeckung werden Tunnelbauwerke im unterirdischen Vortrieb durch Sprengungen, Bagger, Tunnelbohrmaschinen etc. aufgeföhren.

Bivalenter Betrieb: Gebäudeheizung/-kühlung erfolgt durch unterschiedliche Energiequellen (z.B. Wärmepumpe und Brennstoffkessel).

°C: Gemessene Temperatur in Grad Celsius.

Contraktorverfahren: Verschließen des Bohrlochs mit Zementsuspension über Zementierrohre von unten nach oben.

Doppel-U-Rohre: Zwei Rohrschlaufen in U-Form, die zum Zweck der unterirdischen Wärmegewinnung in das Bohrloch eingebracht sind. Darin zirkuliert eine Wärmeträgerflüssigkeit.

Erdkruste: Äußerste (feste) Schicht der Erde. Die Mächtigkeit der Erdkruste beträgt im Bereich der Kontinente zwischen 30 – 60 km.

Erdwärme: Siehe Geothermie.

Geothermie: Thermische Energie, die im Untergrund gespeichert ist bzw. aus diesem abstrahlt. Geothermie kann als Energiequelle zur Erzeugung von Wärme und Strom genutzt werden.

- oberflächennahe Geothermie: Erdwärme aus dem obersten Bereich der Erdkruste (i.d.R. Tiefen im Meter- mehrere Zehnermeterbereich/ wenige 100-m Bereich).

- tiefe Geothermie: Erdwärme, die aus größeren Tiefen (mehrere hundert bis einige tausend Metern) stammt.

geothermische Erschließungsanlage: Überwiegend unterirdischer Teil der geothermischen Nutzungsanlage. Er besteht i.d.R. aus Wärmetauschern, den Verteilerrohren sowie den bis zur Wärmepumpe führenden Sammler-/Anschlussleitungen.

geothermische Erschließungsformen: Bautechnische Art und Weise, mit der die Geothermie erschlossen wird (z.B. EWS, Erdwärmekollektoren, Energiepfähle, erdberührte Betonbauteile etc.).

geothermische Nutzungsanlage: Anlage zur Nutzung der Geothermie. Besteht i.d.R. aus geothermischer Erschließungsanlage, Wärmepumpe und Heizungs- bzw. Kühlanlage.

geothermischer Gradient: Tiefenspezifische Temperaturzunahme (durchschnittlich 3 °C pro 100 Meter).

geothermische Tiefenstufe: Vertikale Strecke, in der sich die Erdkruste um ein Grad Celsius erwärmt (durchschnittlich ca. 33 m/°C).

geschlossene Absorbersysteme: Geschlossener Kreislauf aus Wärmeträgerrohren.

HDR (= Hot-Dry-Rock)-Verfahren: Im trockenen, heißen Tiefengestein werden mit hydraulischem Druck Risse/Spalten aufgebrochen, in denen sich eingepresstes Kaltwasser erwärmt und dadurch zur Stromproduktion genutzt werden kann.

HDPE: Polyethylen, Kunststoff mit hoher Dichte (= High Density), Bestandteil Wärmeträgerrohre.

Hydrogeothermie: Erdwärme aus hydrothermalen Systemen.

Hydrothermale Systeme: Natürliche Thermalwasservorkommen. Deren warme (40 °C – 100 °C) oder heiße (> 100 °C) Wässer steigen aus großer Tiefe auf oder werden dort direkt erschlossen.

Jahresarbeitszahl: Verhältnis zwischen eingesetzter Antriebsenergie (zum Betrieb der Wärmepumpe bzw. Umwälzung Trägermedium, i.d.R. Strom) und nutzbarer Wärme-(Kühl-)energie als Jahresdurchschnittswert; Maß für die Wirtschaftlichkeit einer geothermischen Nutzungsanlage.

K: Temperaturunterschied in Kelvin, SI-Basiseinheit der Temperatur

Leistungszahl: Die Leistungszahl ist ein Momentanwert. Sie wird unter genormten Randbedingungen im Labor nach der europäischen Norm EN 255 gemessen. Die Leistungszahl dient dazu, Antriebsleistung und Heizleistung von Wärmepumpen verschiedener Hersteller miteinander zu vergleichen. Sie wird daher auch in den Informationen der Wärmepumpen-Hersteller angegeben. Die Leistungszahl ist ein Prüfstandwert ohne Hilfsantriebe. Eine Leistungszahl von 5 bedeutet, dass das 5-fache der eingesetzten elektrischen Leistung als nutzbare Wärmeleistung zur Verfügung steht.

Mono-Betrieb: Die geothermische Erschließungsanlage wird entweder nur zum Heizen oder nur zum Kühlen genutzt. Es findet kein saisonaler Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb statt.

petrophysikalische Systeme: Bereiche der Erdkruste mit heißem Gestein (z.B. aus Vulkanzone).

PB: Polybutylen, Kunststoff, Bestandteil Wärmeträgerrohre.

PP: Polypropylen, Kunststoff, Bestandteil Wärmeträgerrohre.

Regeneration: Bewirtschaftungspause, in welcher der Untergrund thermisch nicht beansprucht wird und nutzungsbedingte Temperaturveränderungen (auf Ausgangsniveau) abklingen.

Residualmächtigkeit: Restmächtigkeit einer geologischen Schicht nach vollständiger Gipsauslaugung.

Ringraum: Raum zwischen Bohrlochwand und Wärmeträgerrohr.

Sole/Soleflüssigkeit: Frostsicheres Gemisch aus Wasser und darin gelösten Salzen für den Einsatz in unterirdischen Wärmetauschern.

Thermalwasser: Natürlich in der Erdkruste vorkommende warme (> 40 °C) oder heiße (> 100 °C) Grundwässer.

Thermal Response Test: Vor-Ort-Versuch in einer zur EWS ausgebauten Pilotbohrung zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit und des thermischen Bohrlochwiderstands (Abkürzung: TRT).

Untergrund: = Gebirge = Gestein mit und ohne Grundwasser.

Unterirdische Wärmetauscher: Teil der geothermischen Erschließungsanlage, der die Energie aus dem Untergrund aufnimmt (z.B. EWS, Energiepfahl).

Vorlauftemperatur: Temperatur, mit der das Heizungs- (bzw. Kühl-)wasser – vom Wärmeerzeuger (z.B. Wärmepumpe) kommend – in das Wärmeverteilungssystem (z. B. Fußbodenheizung, Heizkörper) eintritt.

Wärmekapazität (spezifische): Charakteristische Eigenschaft, Wärme aufnehmen beziehungsweise abgeben zu können. Für Materialien wird die spezifische Wärmekapazität in kWh/m·K angegeben.

Wärmeleitfähigkeit λ : Physikalische Eigenschaft eines Materials (Gestein, Stahl, Kunststoff etc.), thermische Energie (Wärme) zu leiten (Einheit: W/m·K).

Wärmepumpe: Maschine, die Wärme von einem niedrigeren Temperaturniveau unter dem Einsatz von Arbeit auf ein höheres Temperaturniveau transportiert. Diese kann dann z.B. zur Raumheizung und Wassererwärmung verwendet werden. Die Wärmepumpe besteht aus Verdampfer, Verdichter (Kompressor), Kondensator und Entspannungsventil. Arbeitsmedien sind leicht verdampfbare Flüssigkeiten (Kältemittel).

Wärmeträgerflüssigkeiten: Flüssigkeiten (z.B. Sole), die in unterirdischen Wärmetauschern zirkulieren und die geothermische Energie zur Wärmepumpe transportieren.

Wärmeträgermedium: = Wärmeträgerflüssigkeit.

Wärmeträgerrohre: Rohrschlaufen bzw. –systeme (z.B. in U-Form), in denen Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert.

Wechselbetrieb: Die geothermische Erschließungsanlage wird im (saisonalen) Wechsel zwischen Heizen und Kühlen betrieben.

16. Abkürzungen

Ba-Wü: Baden-Württemberg

BBergG: Bundesberggesetz in der Fassung vom 13.08.1980

ELF: elektrische Leitfähigkeit

EWS: Erdwärmesonde

GW: Grundwasser

GWL: Grundwasserleiter

GWM: Grundwassermessstelle

GWmo: Druckspiegel des Grundwassers im Oberen Muschelkalk

HQSG: Heilquellenschutzgebiet

kWh: Kilowattstunde

LGRB: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg

mo: Oberer Muschelkalk

pH: pH-Wert

TRT: Thermal Response Test

WGK: Wassergefährdungsklasse

WG: Wassergesetz Baden-Württemberg in der Fassung vom 01. 01.1999.

WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz) in der Fassung vom 12.11.1996

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

In der Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz sind bisher erschienen:

| | |
|---|------------------------------|
| Jahresbericht 1992, Chemisches Institut | (Heft 1/1993) - vergriffen - |
| Energiesparendes Bauen | (Heft 2/1993) |
| Stadtklimatologische Stadtrundfahrt in Stuttgart | (Heft 3/1993) |
| Luftschadstoffbelastung an ausgewählten Straßen in Stuttgart | (Heft 4/1993) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1992 | (Heft 5/1993) - vergriffen - |
| Jahresbericht 1993, Chemisches Institut | (Heft 1/1994) |
| Das Mineral- und Heilwasser von Stuttgart | (Heft 2/1994) - vergriffen - |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1993 | (Heft 3/1994) |
| Unser Beitrag zur V. Internationalen Gartenbaustellung IGA '93 in Stuttgart | (Heft 4/1994) |
| Jahresbericht 1994, Chemisches Institut | (Heft 1/1995) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1994 | (Heft 2/1995) |
| Die Böden Stuttgarts - Erläuterung zur Bodenkarte | (Heft 3/1995) |
| Energiekonzept Viesenhäuser Hof | (Heft 4/1995) |
| Der Steinkrebs im Elsenbach | (Heft 5/1995) |
| Jahresbericht 1995, Chemisches Institut | (Heft 1/1996) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1995 | (Heft 2/1996) |
| Altlastenverdachtsflächen in Stuttgart | (Heft 3/1996) - vergriffen - |
| Altlastenverdachtsflächen in Stuttgart - Kurzfassung - | (Heft 3/1996) - vergriffen - |
| Stuttgarter Biotopatlas - Methodik, Beispiele und Anwendung | (Heft 4/1996) - vergriffen - |
| Jahresbericht 1996, Chemisches Institut | (Heft 1/1997) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1996 | (Heft 2/1997) |
| Klimaschutzkonzept Stuttgart (KLIK) | (Heft 3/1997) |
| Das Stuttgarter Mineralwasser - Herkunft und Genese | (Heft 1/1998) - vergriffen - |
| Jahresbericht 1997, Chemisches Institut | (Heft 2/1998) |
| Schallimmissionsplan Stuttgart - Vaihingen | (Heft 3/1998) |
| Stuttgarter Flusskrebse - vereinfachter Nachdruck - | (Heft 4/1998) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1997 | (Heft 5/1998) |
| Verkehrslärmkartierung Stuttgart 1998 | (Heft 6/1998) |
| Sprengbomben und andere Kampfmittelaltlasten 1945 - 1998 | (Heft 7/1998) |
| Pflege- und Entwicklungsplan Vördere | (Heft 8/1998) |
| Kalibrierung regionaler Grundwasserströmungsmodelle | (Heft 1/1999) |
| Jahresbericht 1998, Chemisches Institut | (Heft 2/1999) |
| Lärminderungsplan Stuttgart-Vaihingen, Runder Tisch | (Heft 3/1999) |
| Altlastenerkundung Neckartalaue, Abschlussbericht | (Heft 4/1999) |
| Die Wildbienen Stuttgarts | (Heft 5/1999) |

| | |
|--|------------------------------|
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1998 | (Heft 6/1999) - vergriffen - |
| Pilotprojekt Lärminderungsplan Stuttgart-Vaihingen | (Heft 1/2000) - vergriffen - |
| Stuttgarter Biotopatlas - Methodik, Beispiele und Anwendung - überarbeitete Neuauflage - | (Heft 2/2000) - vergriffen - |
| Kombinierte Markierungsversuche im Mineralwasseraquifer Oberer Muschelkalk, Stadtgebiet Stuttgart | (Heft 1/2001) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 1999/2000 | (Heft 2/2001) |
| ISAS - Informationssystem Altlasten Stuttgart | (Heft 3/2001) |
| Die Amphibien und Reptilien in Stuttgart | (Heft 1/2002) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 2001 | (Heft 2/2002) |
| Das Grundwasser in Stuttgart | (Heft 1/2003) - vergriffen - |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 2002 | (Heft 2/2003) |
| Lärminderungsplan Stuttgart-Zuffenhausen | (Heft 1/2004) |
| Gewässerbericht 2003 | (Heft 2/2004) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 2003 | (Heft 3/2004) |
| Technischer Heilquellenschutz in Stuttgart | (Heft 4/2004) |
| Nutzung der Geothermie in Stuttgart | (Heft 1/2005) |
| Energiebericht, Fortschreibung für das Jahr 2004 | (Heft 2/2005) |
| Die Heuschrecken Stuttgarts Verbreitung, Gefährdung und Schutz | (Heft 3/2005) |

Die Ausgaben der Schriftenreihe erscheinen in begrenzter Auflage. Sie sind gegen eine Schutzgebühr, zuzüglich 3,00 € für den Postversand erhältlich bei: Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Gaisburgstraße 4, 70182 Stuttgart.

