



ANTWORTEN ZU FRAGEN ZUR TIEFENGEOTHERMIE

Dr. Birgit Müller, Landesforschungszentrum Geothermie (LFZG)
Prof. Frank Schilling, LFZG
Prof. Thomas Kohl, LFZG

Landesforschungszentrum Geothermie
Forschungszentrum Umwelt
Adenauerring 20b
76136 Karlsruhe

Datum: Mai 2012

Vorbemerkung:

Die hier beantworteten Fragen wurden von Bürgern im Zusammenhang mit einem hydrothermalen Geothermievorhaben in Brühl gestellt und von Vertretern des Landesforschungszentrums Geothermie (LFZG) beantwortet.

Wir haben versucht, die Fragen in allgemein verständlicher Form – aber dennoch mit den entsprechenden detaillierten Hintergrundinformationen zu beantworten.

Wir sind gerne bereit, die Themen näher zu erörtern und auch weitere Fragen zu beantworten – entweder am LFZG oder direkt vor Ort.

Die Beantwortung der Fragen basiert auf den Erfahrungen mit Mineralwasser-, Thermalwasser-, Geothermie- und Tiefenbohrungen der Erdöl-Erdgasindustrie. Bei der Beantwortung dieser Fragen der Tiefen Geothermie beziehen wir uns im Wesentlichen auf die Lokation Brühl. Jeder Standort muss detailliert betrachtet werden, da die lokalen Gegebenheiten am jeweiligen Standort berücksichtigt werden müssen.

In Deutschland kann auf eine lange Tradition von Mineralwasserbohrungen und Thermalwasserbohrungen zurückgegriffen werden, bei denen große Mengen Wasser dem Untergrund entzogen werden. Bei den Mineralquellen von Stuttgart, werden z.B. pro Tag 44 Mio. Liter Wasser aus dem Untergrund gefördert¹, die Hälfte davon aus Brunnenbohrungen. Auch für Thermalquellen wird Wasser aus dem Untergrund gefördert, ohne dieses wieder zu injizieren.

Anders als bei Mineralquellen und Thermalwasserbrunnen wird bei der Geothermie in Europa das thermisch genutzte Wasser wieder in den Untergrund – möglichst in dasselbe Reservoir – zurückgeführt. Dadurch entsteht ein hydraulischer Kreislauf: Reservoir – Förderbohrung – Geothermiekraftwerk/Anschluss Fernwärmenetz – (Re)Injektionsbohrung – Reservoir. Das Wasser wird im Reservoir über den Porenraum bzw. Klüfte transportiert.

Das System Förderbohrung – Geothermiekraftwerk/Anschluss Fernwärmenetz – (Re)Injektionsbohrung ist dabei geschlossen. Der geförderte Massestrom wird nahezu vollständig² wieder in das Reservoir zurückgeführt (Wasser und gelöste Salzfracht³). In der

¹ Amt für Umweltschutz – Stuttgart 2012 (<http://www.stuttgart.de/item/show/192662>)

² Geringe Mengen der Salzfracht können in Form von Ausfällungen in den Rohren der Wärmetauscher oder Bohrungen ausfallen – Scalings. Technisch wird versucht die Ausfällung von Mineralen (Scalings) zu vermeiden – durch geschlossene Systeme, Druckhaltung und unter Nutzung von Inhibitoren.

³ Wenn die Wässer nicht injiziert würden, wären die Geothermieprojekte unwirtschaftlich aufgrund der Kosten für den Abtransport und die Entsorgung der Schlämme

Regel ist das Reservoir über Aquitarde (nahezu Wasserundurchlässige Schichten) von den Trinkwasserhorizonten getrennt. So kann das Reservoir als Untertagewärmetauscher verstanden werden, der über die Förder- und (Re)injektionsbohrung angeschlossen wird. Damit ergibt sich ein „geschlossener“ Kreislauf, bestehend aus ober- und untertägigem Anteil

Grundvoraussetzung für diesen geschlossenen Kreislauf ist eine ausreichende natürliche Durchlässigkeit der Reservoirgesteine. Diese hydraulische Verbindung des Systems im Untergrund sollte vor Inbetriebnahme einer Anlage durch Zirkulationstest in den Bohrungen geprüft werden. Ist die hydraulische Anbindung an den Untergrund nicht ausreichend, können durch Stimulationsmaßnahmen, die im Zeitraum von Stunden/Tagen erfolgen, können

- a) Verstopfungen der hydraulischen Wegsamkeiten in unmittelbarer Bohrungsumgebung durch chemische Reaktionen (chem. Stimulation) entfernt werden oder
- b) durch gezielte Druckbelastung die Wegsamkeiten für Fluide im Untergrund verbessert werden – hydraulische (physikalische) Stimulation. Dabei werden kontrolliert Mikrobeben, durch den Versatz von Gesteinen im Untergrund ausgelöst (induzierte Seismizität).

Alle menschlichen Eingriffe in den Untergrund (Bauvorhaben, Tunnel, Bohrungen) können zu unerwünschten Veränderungen im Untergrund führen. Diese müssen durch sorgfältiges Vorgehen vermieden werden. Die im Zusammenhang mit Geothermie aufgetretenen Erschütterungen fanden in 2-5 km Tiefe statt und erreichten in Basel eine Magnitude von maximal 3.4. Dies entspricht in Bezug auf die freigesetzte Energie einer mittleren Sprengung in einem Steinbruch.



A) Das rückgeführte Wasser wird in der Regel ca. 1 - 2 km von der Förderbohrung entfernt in höherliegende Gesteinsschichten eingepresst. Das Wasser breitet sich naturgemäß in solche Richtungen aus, die den geringsten Strömungswiderstand aufweisen. Es wird in Gesteinsschichten gepresst, wo solche Wassermassen natürlicherweise nicht vorhanden sind.

Wie wird sichergestellt, dass sich diese Gesteins- und Erdschichten dadurch nicht verändern?

B) Wie ist des Weiteren sichergestellt, dass das abgekühlte Wasser nach der Reinjektion vollständig und zeitnah in den leergepumpten Bereich zurückfließt und genau dort wieder ankommt, wo es entnommen wurde?

Kurzantwort:

Das zuvor geförderte Wasser wird in Schichten injiziert, welche bereits vorher Wasser führten⁴. Der Bereich um die Förderbohrung wird auch nicht leergepumpt, sondern aufgrund des Drucks der Wassersäule fließt das Wasser aus dem umgebenden Gestein unmittelbar nach.

Das geförderte Wasser wird in einen Aquifer z.B. den Entnahmehorizont des Reservoirs rückgeführt, der mit der Förderbohrung hydraulisch verbunden sein soll (Nachweis möglich über Zirkulationstest). Durch das Abpumpen von Wasser und (Re)injektion entwickelt sich ein Druckgefälle zwischen Injektions- und Förderbohrung. Dadurch fließt Wasser von der Injektionsbohrung zur Förderbohrung und wird durch das umliegende Gestein wieder erwärmt und kann sich mit dem vorhandenen Wasser vermischen. Dieses injizierte Wasser erreicht über das Reservoir wieder die Förderbohrung.

Weitere Details:

Das Wasser im Untergrund bewegt sich entlang eines Druckgradienten von Regionen mit höherem Druck zu Regionen mit geringerem Druck und dabei – wie in der Frage angegeben – nimmt es den Weg des geringsten Widerstands. Durch die Entnahmebohrung wird eine sogenannte

⁴ Deshalb werden Geothermiebohrungen an wasserleitende Schichten angeschlossen.

Drucksinke erzeugt. So wird das Wasser „gezwungen“ von der Injektionsbohrung, in die das Wasser mit geringem Druck eingespeist wird, zur Entnahmebohrung zu fließen.

Für die Vorhaben der Tiefen Geothermie ist es wesentlich, dass der Fluidkreislauf erhalten bleibt. Das Wasser wird bei hydrothermalen Systemen daher wieder in den genutzten Aquifer eingeleitet, wo es sich allmählich durch den Poren- und Kluftraum ausbreitet und durch das umgebende Gestein aufgewärmt wird. Normalerweise wird ein Kraftwerk so ausgelegt, dass eine Nutzung des Reservoirs von mindestens 20-30 Jahren ohne signifikante Temperaturenniedrigung in der Förderbohrung gewährleistet ist. Seit 1969 arbeiten solche Anlagen in der Region von Paris, ohne wesentliche Temperaturenniedrigung bei der Förderbohrung (Laplaige & Jaudin, 1999).

Es ist nicht generell so, dass die Tiefe der Injektionsbohrung geringer ist als die der Förderbohrung, sondern oft auch umgekehrt (s. Tab. 1). Dies hängt von der Geologie im Untergrund, genauer gesagt, von der Tiefe, Dicke, Ausdehnung und Neigung des Aquifers ab (s. Abb. 1). Für die Einschätzung welche Bohrung als Förderbohrung und welche als Injektionsbohrung verwendet wird, sind meist die Ergebnisse der hydraulischen Tests vor Inbetriebnahme maßgeblich.

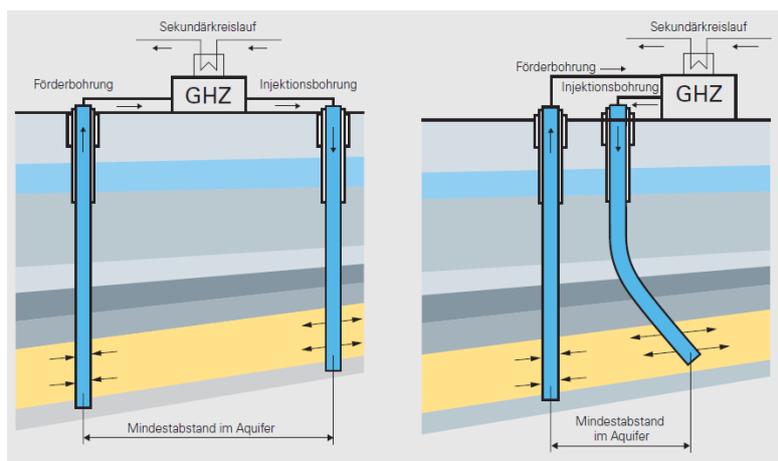


Abbildung 1: Bohrungsdulette mit zwei senkrechten bzw. einer senkrechten und einer abgelenkten Bohrung (Quelle: GTN). Gelb dargestellt ist der in diesem Fall geneigte Speicherhorizont.

Tabelle 1: Übersicht über Tiefen von Injektions- und Förderbohrungen

Projekt	Teufe Förderbohrung	Teufe Injektionsbohrung
Landau	3000	3100
Neustadt-Glewe	2250	2335
Soultz	5000	5000
Unterhaching	3350	3590
Bad Blumau	2843	3145

Riehen	1547	1247
Unterschleißheim	1961	2002
Simbach Braunau	1942	1848

C) Nach den bisherigen Aussagen befinden sich Thermalwasser aus der Förderbohrung sowie das abgekühlte Reinjektionswasser in einem geschlossenen Kreislauf: Wie kann ein Kreislauf geschlossen sein, wenn mindestens eine Stelle so weit offen sein muss, dass täglich mehr als 6 Millionen Liter einfließen können?

Bei der oberflächennahen Geothermie handelt es sich um geschlossene Kreisläufe, da dabei immer die gleiche Flüssigkeit (Kältemittel) in einem geschlossenen Rohrsystem zirkuliert. Bei der Tiefen Geothermie handelt es sich um ein im Untergrund „offenes“ System. Wird das Reservoir aber in erster Näherung als abgeschlossene Einheit betrachtet, handelt es sich auch hier um ein „geschlossenes“ System.

Anders als bei Mineralquellen und Thermalwasserbrunnen wird bei der Geothermie das thermisch genutzte Wasser wieder in den Untergrund – möglichst in dasselbe Reservoir – zurückgeführt. Dadurch entsteht ein hydraulischer Kreislauf: Reservoir – Förderbohrung – Geothermiekraftwerk/Anschluss Fernwärmenetz – (Re)Injektionsbohrung – Reservoir. Das Wasser kann im Reservoir über den Porenraum bzw. Klüfte transportiert werden. Der Reservoirbereich ist dabei in der Regel über Aquitarde (nahezu Wasserundurchlässige Schichten) von den Grundwasserhorizonten getrennt.

Weitere Details

Bei den meisten Geothermievorhaben werden zwei Kreisläufe betrachtet.

a) Thermalwasserkreislauf.

Es wird eine Bohrung zur Förderung des Thermalwassers verwendet, das Wasser geht im Kraftwerk durch einen Wärmetauscher und wird dann in der Injektionsbohrung wieder versenkt. Im Untergrund breitet sich das Wasser entlang eines Druckgefälles durch das klüftige oder poröse Gestein des Aquifers aus. Dabei vermischt es sich mit dem dort anstehenden (warmen) Wasser und wird zusätzlich durch das umgebende Gestein erwärmt. An der Förderbohrung wird immer die Menge Wasser entnommen, die auf der Injektionsseite wieder versenkt wird. Man kann das mit einem Gartenteich (entspricht dem Reservoir) mit Springbrunnen vergleichen: Das Wasser aus dem Springbrunnen wird mit der Pumpe wieder angesaugt um erneut durch den Brunnen zu plätschern, aber die Pumpe fördert nicht immer die gleichen Wassermoleküle zum Brunnen zurück sondern bedient sich des gesamten Vorrats im Teich.

b) Kreislauf der Stromerzeugung.

In sogenannten Hochenthalpie-Lagerstätten wird sehr heißes Wasser bzw. Wasserdampf gefördert, das direkt auf Turbinen beaufschlagt und damit zur Stromerzeugung verwendet werden kann. Solche Lagerstätten finden wir in Deutschland nicht, sondern z. B. in Island, Indonesien, Neuseeland oder Italien. In Deutschland wird im Geothermiekraftwerk die Wärme des Thermalwassers im Wärmetauscher auf eine zweite Flüssigkeit übertragen. Diese hat einen optimierten Siedepunkt, der niedriger ist als der von Wasser, um in einem Sekundärkreislauf mit den geringstmöglichen Verlusten Strom zu erzeugen. Diese Flüssigkeit befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf (geschlossenes Rohrleitungssystem).



A) Es werden täglich ca. 6.048.000 Liter Thermalwasser aus der Tiefe hochgepumpt. Durch solche großen Wasserentnahmen kann es in entsprechender Tiefe zur Entstehung von Hohlräumen kommen.

B) Das geförderte Thermalwasser enthält neben einem sehr hohen Salzgehalt (etwa 3 x so viel wie im Meerwasser enthalten) auch eine große Menge an Schlämmen. Diese werden zunächst dem Thermalwasser entzogen und 'fehlen' daher nach der Reinjektion im Untergrund. Dadurch ergibt sich, bezogen auf das Volumen und (spezifische) Gewicht eine Mindermenge an rückgeführtem Wasser.

Wie wird diese Mindermenge vollständig wieder ausgeglichen?

In wie weit kommt es darüber hinaus zu Wasserverlusten durch Verdampfen?

Wie wird sichergestellt, dass es nicht zu Landabsenkungen wie beim Kohlbergbau kommt?

C) Durch die Thermalwasserentnahme kann es in großer Tiefe zur Entstehung von Hohlräumen kommen.

Wie ist sichergestellt, dass diese Stellen nicht unter dem Druck des Deckgebirges einstürzen?

D) Heißes Wasser wird entnommen, kaltes Wasser wird zurückgeführt.

Wie wirken sich die Temperaturunterschiede auf die Gesteins- und Erdschichten im Untergrund aus (Wärme dehnt sich bekanntermaßen aus, Kälte zieht sich zusammen)?

Wie ist sichergestellt, dass die Gesteinsschichten nicht porös werden bzw. in ihrer Konsistenz und hinsichtlich Stabilität verändern?

Kurzantwort:

Bei Tiefen Geothermievorhaben handelt es sich um die Erstellung eines Kreislaufs Reservoir – Förderbohrung – Geothermiekraftwerk/Anschluss Fernwärmenetz – (Re)Injektionsbohrung – Reservoir. Ausfällungen in diesem Kreislauf werden technisch weitgehend unterbunden.

Eine grundlegende Voraussetzung für ein Projekt der Tiefen Geothermie ist eine genügend hohe Permeabilität im Untergrund, d.h. die Gesteinsschichten sind bereits vor der Maßnahme „porös“ bzw. von Klüften durchzogen, so dass Wasser durch das Reservoir fließen kann.

Im Gegensatz zu den zahlreichen Mineralwasser- und Thermalwasserbohrungen werden die Thermalwässer bei Tiefen Geothermievorhaben in das Reservoir rückgeführt und wandern im Untergrund durch den Kluft- und Porenraum, der damit fluidgefüllt bleibt. Damit bleibt auch der Porendruck im Reservoir weitgehend erhalten. Dadurch werden Setzungsvorgänge effektiv eliminiert.

Anders als beim Kohle- oder Salzabbau, bei denen im Untergrund sehr große Volumina Material aus dem Untergrund entfernt werden, wird bei der tiefen Geothermie das Wasser – und damit das geförderte Wasser wieder zurückgeführt. Durch diesen Transport können sehr feinkörnige Materialien die sich im Zwischenraum von Poren, Gestein oder Klüften befinden ausgewaschen werden. Die dadurch transportierten Mengen sind in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Mineralbrunnen, Erdöl oder Erdgasförderung und Thermalwasserbohrungen – mit dem Unterschied, dass bei Geothermievorhaben diese Materialien zum größten Teil wieder in das Reservoir zurückgeführt werden kann. Über die Förderbohrung gefördertes Feinmaterial (Schlämme) werden über Filter herausgefiltert, um auf der Injektionsseite keine Verstopfungen zu erzeugen. Meist fallen nur in der Anfangsphase einer Thermalwasserförderung nennenswerte Schlammengen in den Filtern an, während nach einem „Klarspülen“ der Reservoirzonen im Nahbereich der Bohrungen die Menge an gefördertem Feinmaterial schnell abnimmt⁵.

Weitere Details

Maßnahmen zur Verhinderung von Ausgasung und Ausfällung

Das Verhalten der Wässer bei Förderung und Wärmeentzug (Abkühlung) ist relativ gut untersucht. Dabei kann es sowohl auf Förder- wie auch auf Injektionsseite im Wesentlichen zu folgenden Reaktionen kommen:

- a) Ausfällungen von Karbonaten insbesondere bei CO₂-Entgasung bei Druckentlastung, von Eisen bei Sauerstoffzutritt und von Sulfiden. Dies kommt für mittlere Temperaturniveaus wie in Deutschland zum Tragen.
- b) Ausfällung von Silizium-Oxiden bei Abkühlung, das geschieht im Wesentlichen in Hochenthalpie-Lagerstätten wie Island oder Indonesien, in denen wesentlich höhere Temperaturen bereits in geringer Tiefe vorliegen.

⁵ Ansonsten würden Geothermieprojekte unwirtschaftlich aufgrund der Kosten für den Abtransport und die Entsorgung der Schlämme.

Daher werden, um Entgasungen und Sauerstoffzutritt zu vermeiden, Druckhaltemaßnahmen empfohlen, d.h. dass das System ist auch im oberirdischen Teil geschlossen und ein leichter Überdruck wird aufgebracht, um die Gasphasen in Lösung zu halten. Dem Medium Thermalwasser angepasst werden die Ausrüstungen der Anlage. Tritt z.B. ein hohes Korrosionspotenzial durch eine Salzfracht bei gleichzeitig hohen Temperaturen und evtl. geringen pH-Werten auf werden besonders korrosionsresistente Stähle (z.B. Edelstahl) eingesetzt oder die Rohre beschichtet– dies gilt insbesondere für die besonders belasteten Bauteile wie z.B. Wärmetauscher.

Mineralfracht in Tiefenwässern und Bildung von Hohlräumen

Die Gesamtkonzentration gelöster Bestandteile in den Thermalwässern ist die Summe aller gelösten Kationen und Anionen und wird häufig als Masse pro Volumeneinheit (z.B. mg/l) angegeben. Der Salzgehalt der Tiefenwässer ist standortabhängig. Tiefenwässer im Oberrheingraben beispielsweise sind meist hochkonzentrierte Na-Cl-Fluide (100 - 200 g/kg), die in der Regel CO₂-reich sind. In Norddeutschland können Gesamtkonzentrationen bis über 300 g/kg vorliegen. Dieses Salz wird nicht durch die Förderung des Thermalwassers gelöst, sondern liegt bereits gelöst im Wasser des Untergrundes vor.

Vergleich zu Thermalwasserbohrungen, die z.B. für Schwimmbäder oder Heilanwendungen Wässer aus wesentlich geringeren Tiefen fördern und bei denen anders als bei den in Deutschland praktizierten Geothermieprojekten, kein Wasser in die Entnahmehorizonte zurückgefördert wird:

Das Mineral- und Thermalwasser fließt nach der Nutzung komplett in einen Vorfluter und wird im lokalen Untergrund nicht ersetzt. Die Quellen werden aus Regionen in meist größerer Distanz gespeist (Abb. 2). Beispiel.: Die beiden Bohrungen Sprudel I und Sprudel II von Bad Nauheim fördern ca. 40 g/l an Mineralstoffen, bei einer Förderung von 580 bzw. 270 l/min. Es werden pro Jahr 446 Mio l entnommen. Dies bedeutet, dass ca. 17 Mio kg oder 17 000 t Salze sowie zusätzlich das Wasservolumen ausgetragen werden und im Untergrund fehlen. Macht man eine ähnliche Rechnung für die Mineralbrunnen von Stuttgart, bei denen 22 Mio Liter Wasser pro Tag aus dem Untergrund gefördert werden, erhält man bei einer Mineralisierung von 3 g/l⁶ eine Menge von ca. 24 Mio kg pro Jahr an Mineralstoffen, die über die Stuttgarter Brunnen aus der Erde gefördert werden. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über den Feststoffgehalt der Stuttgarter Mineralbrunnen.

⁶ Nach [www.stuttgart.de/item/show/19266/2_gchören_165_l/s_\(d.h._10296000_l\)_zu_den_hochmineralisierten_Wässern,_ca._die_Hälfte_davon_stammt_aus_Insel--bwz._Leuzequelle.](http://www.stuttgart.de/item/show/19266/2_gehören_165_l/s_(d.h._10296000_l)_zu_den_hochmineralisierten_Wässern,_ca._die_Hälfte_davon_stammt_aus_Insel--bwz._Leuzequelle.)

Tabelle 2: Gelöste Feststoffe in den Mineralbrunnen von Stuttgart

Erschlossenes Grundwasserstockwerk	Brunnen	Bohrtiefe (m)	Auslauf-temperatur (°C)	Gelöste Feststoffe (mg/l)	davon Chlorid (mg/l)	Freie Kohlensäure (mg/l)	Mineralwasser-Typ
Buntsandstein, Perm, Kristallin	Hofrat-Seyffer-Quelle	477	22	24.700	11.450	250	Natrium-Chlorid-Thermalesole
Grenzbereich Mittlerer und Oberer Muschelkalk	Gottlieb-Daimler-Quelle	135,5	18,2	10.600	4.715	450	Natrium-Calcium-Chlorid-Sole
Oberer Muschelkalk (teilw. mit Unterkeuper)	Inselquelle	38,0	20,2	5.615	1.505	2.020	Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Thermalsäuerling
	Leuzequelle	37,3	19,9	3.975	955	1.450	Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Thermalsäuerling
	Veldelequelle	26,4	18,0	3.500	960	1.225	Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Thermalsäuerling
	Wilhelmsbrunnen 1	69,7	18,0	5.570	1.375	1.850	Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Thermalsäuerling
	Wilhelmsbrunnen 2	41,5	17,5	4.500	990	1.385	Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Thermalsäuerling
	Berger Urquell	61,3	20,3	4.085	920	1.540	Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Thermalsäuerling
	Berg, Mittelquelle	61,3	18,4	3.150	600	975	Natrium-Calcium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Thermalsäuerling
	Berg, Nordquelle	62,0	18,0	2.870	500	830	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser
	Berg, Ostquelle	62,0	18,7	3.240	625	975	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser
	Berg, Südquelle 2	24,5	19,0	3.750	680	1.150	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser
	Berg, Westquelle	43,6	18,5	3.150	600	975	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser
	Auquelle	40,0	17,0	960	50	110	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser
	Brunnen Maurischer Garten	37,4	17,6	1.480	100	195	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser
	Kellerbrunnen alt	43,5	17,3	990	60	140	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser
Kellerbrunnen neu	59,4	16,3	1.040	55	125	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser	
Schiffmannbrunnen	67,6	17,9	1.115	75	165	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser	
Quellsee, Mineralwasser nicht gefasst	Mombachquelle	----	16,3	1.050	60	100	Calcium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Hydrogenkarbonat-Mineralwasser

Bei Geothermiebohrungen wird diese Salzfracht im Wasser gelöst wieder in das Reservoir zurücktransportiert aus dem es stammt. Durch das unterschiedliche chemische Löslichkeitsvermögen von warmem und kaltem Wasser werden geringe Mengen Salze wieder aus dem Untergrund gelöst bzw. ausgefällt. Auch diese werden – möglichst quantitativ im Kreislauf gehalten und damit wieder in das Reservoir zurückgeführt. Dadurch kann es zu einer Verlagerung von Material in den Bereich des kalten Wassers kommen. Dabei wird das Material im gesamten Volumen gelöst, so dass eine größere Hohlräumbildung sehr unwahrscheinlich ist – Karstregionen müssen gesondert betrachtet werden.

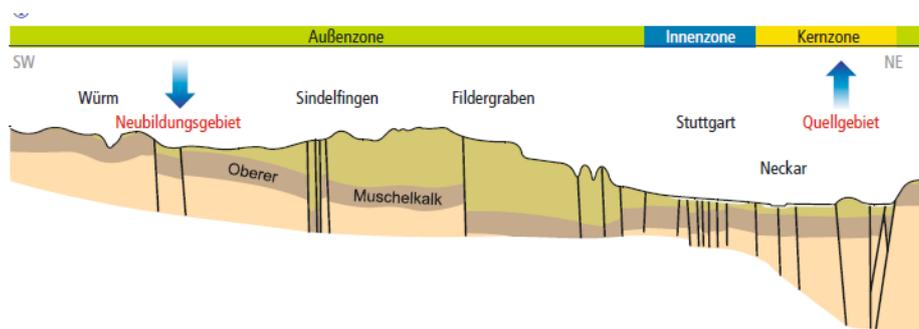


Abbildung 2 Skizze zur Verdeutlichung, dass die Quellenregion der Stuttgarter Mineralquellen deutlich vom Neubildungsgebiet der Wässer entfernt ist. (Amt für Umweltschutz Stuttgart)

Volumen:

Das unter Reservoirdruck stehende Wasser dehnt sich auf dem Weg durch die Förderbohrung zur Oberfläche aufgrund der Druckabnahme (z.B. Aufsteigen) zunächst aus, verringert sein Volumen dann aber wieder aufgrund der Temperaturabnahme. Je nach Bohrprojekt könnte das rückgeförderte Wasser durch Süßwasser ergänzt werden. Allerdings ist das unseres Wissens nach keine gängige Praxis. Im Geothermieprojekt Bad Blumau (Steiermark) werden ca. 10 Kubikmeter pro Tag für balneologische Zwecke entnommen und nicht rückgefördert. Durch die Abkühlung des Wassers bekommt das Wasser eine höhere Dichte. Dies führt dazu, dass das Wasser meist ohne zusätzliche Pumpe reinjiziert werden kann.

Gleichzeitig nimmt das reinjizierte Wasser auf seinem Weg durch das Umgebungsgestein im Untergrund wieder Wärme aus dem Gestein auf und kühlt dieses ab. Durch die wesentlich geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mineralphasen im Gestein verglichen zu dem vergleichsweise hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Wasser reduziert sich der Porenraum bei Abkühlung nur unwesentlich. Dabei kann es im bohrlochnahen Bereich zu „thermal stress“ kommen, der in anderen Zusammenhängen als physikalische Stimulationsmaßnahme zur Verbesserung der Injektivität/Produktivität einer Bohrung eingesetzt wird. Bei tiefen Bohrungen wird immer eine Wassersäule in der Injektionsbohrung stehen, so dass der Porenraum und die Klüfte im Reservoir wassergefüllt verbleiben. Dabei sollte auch berücksichtigt werden, dass auch Wasser – wie bei Thermalwasser und Mineralwasserbohrungen ggf. auch in das Reservoir nachfließt. Interessant ist der Effekt, dass durch die Erhöhung der Dichte durch Abkühlung der Druck auf der Reinjektionsseite eher zunimmt als abnimmt, da der Effekt der Abkühlung (Gestein) geringer ist als der Effekt des höheren hydrostatischen Druckes durch die höhere Dichte der Wassersäule in der Injektionsbohrung.

Porosität und Stabilität der Gesteinsschichten:

Durch Förderung von Fluiden aus porösen geklüfteten Horizonten wie es bei Erdöl bzw. Erdgas der Fall ist, wird der Druck im Reservoir verringert und damit kann es zu Setzungsvorgängen im Reservoir kommen, die die Porosität im Untergrund verringern. Auch in diesen Fällen werden keine großen kavernenartigen Hohlräume beobachtet. Reservoirs im Untergrund entsprechen dabei eher einem Sand am Strand, dessen Porenraum mit Wasser gefüllt und dabei noch tragfähiger ist als große Karsthöhlen. Die Tragfähigkeit hängt dabei überwiegend an der Kornmatrix und weniger an der fluiden Phase. Im Untergrund ist der Sand zusätzlich fest verbunden (diagenetisch verfestigt „versintert“) und wird als Sandstein bezeichnet.

Aufgrund der Rückführung der Wässer bei Geothermievorhaben (im Gegensatz zu den zahlreichen Mineralwasser- und Thermalwasserbohrungen) wandert das Wasser im

Untergrund durch den Kluft- und Porenraum, der damit fluidgefüllt bleibt. Damit bleibt auch der Porendruck im Reservoir nahezu konstant und verhindert effektiv Setzungsvorgänge.



A) Wie ist sichergestellt, dass solche Gesteins-/Erdschichten (z.B. Gipskeuper etc.) nicht aufquellen oder chemisch reagieren und es so zu Erdhebungen kommt?

Kurzantwort :

Im oberflächennahen Bereich wird durch den sachgerechten Einsatz von Verrohrungen und der Zementation der Verrohrung in das Gestein sichergestellt, dass es zu keinem Kontakt zwischen wasserführenden Schichten und quellfähigen Horizonten kommt. Anders als bei Bohrungen in der flachen Geothermie ist bei Tiefbohrungen vorgeschrieben, dass alle Aquifere schon im Bohrprozess hydraulisch getrennt werden. Durch s.g. Bondlogs wird dabei überprüft, dass die Zementation sicher ausgeführt wird.

Dies ist Stand der Technik und wurde weltweit bei Tausenden von Tiefbohrungen erfolgreich angewandt.

Das Aufquellen von Gesteinsschichten hat zu Schäden bei Bauwerken geführt. Bei der Bohrung in Stufen wurde nicht mehrfach abgesetzt (d.h. in mehreren Schritten gebohrt und verrohrt), wie dies bei Tiefbohrungen ausgeführt wird. Ein Aufquellen in geringer Tiefe sorgte an der Erdoberfläche für eine stark variierende Verteilung der Hebung, die zu Schäden führt. Es werden dabei auch laterale Verschiebungen beobachtet. Da der Quelldruck von Anhydrit begrenzt ist, kann dieser Prozess in größeren Tiefen nicht zu einer Hebung führen, sobald der Quelldruck geringer als der lithostatische Druck (Gesteinsauflast) ist.

Weitere Details:

Bei Tiefbohrungen werden Bohrungen von der Oberfläche aus teleskopartig verrohrt. Die Rohre bilden das Gerüst -die Bewehrung der fertiggestellten Tiefbohrung - und geben ihre die mechanische Festigkeit und Dichtigkeit. Dabei werden verschiedene sogenannte Rohrtouren unterschieden.

An der Oberfläche wird ein Standrohr in der Regel ohne Bohrspülung über den Teufenbereich des Grundwasserhorizonts hinweg in den Boden eingerammt. Wird gebohrt, dann wird meist Trinkwasser als Bohrspülung verwendet, um eine Beeinträchtigung des Grundwassers zu vermeiden und dann das gesamte

Standrohr einzementiert. Innerhalb dieser schützenden Rohrtour (Standrohr) wird die Ankerrohrtour gesetzt, auf die der sogenannte Blow-Out Preventer⁷ aufgesetzt werden kann und innerhalb derer die weiteren technischen Rohrtouren eingebaut werden (Abbildung 3). Dabei gibt es auch Rohrtouren (Liner), die in die vorhergehende Verrohrung über einen Keilsitz eingehängt werden und nicht bis zur Oberfläche reichen. Oft wird bei tieferen Bohrungen damit der letzte Abschnitt verrohrt. Die Tiefen der einzelnen Abschnitte richten sich nach den Tiefen der Wasserhorizonte bzw. dem Bereich der Förderung für Thermalwasser sowie den z.B. durch Seismik erfassten geologischen Gesteinsschichten, Störungszonen und den zu erwartenden Drücken.

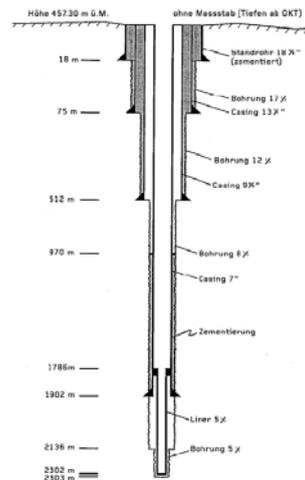


Abbildung 3: Verrohrungsschema von Tiefbohrungen (Abb. aus Rota et al, 2007)

Nach dem Einbau der Verrohrung wird der Zwischenraum zwischen Verrohrung und Bohrlochwand mit Zement aufgefüllt und damit gegen das Gestein bzw. die äußeren Rohre abgedichtet. Damit die Zementation erfolgreich durchgeführt werden kann, ist es notwendig, vorher ein Bohrlochmessprogramm durchzuführen, um eventuelle ausgebrochene Bohrlochbereiche zu identifizieren und bei der Zementation zu berücksichtigen. Mit Cement Bond Logs kann dann nach der Zementation kontrolliert werden, wie gut die Abdichtung zwischen Verrohrung und Bohrlochwand ist und ggf. eine Nachzementation erfolgen.

Diese Technik ist in Tausenden von Tiefbohrungen erfolgreich verwendet worden und so können z.B. auch Flüssigkeiten wie Erdöl durch die Grundwasserhorizonte hindurch gefördert werden ohne mit dem Grundwasser in Kontakt zu kommen. Wichtig ist dabei die Qualitätskontrolle und dass die Arbeiten nach dem Stand der Technik sorgfältig durchgeführt werden. Der „Open-Hole“ Bereich der tiefen Geothermiebohrungen liegt – damit auch

⁷ Ein Preventer dient dazu, bei plötzlich auftretenden erhöhten Druckbedingungen (z.B. „Kicks“), das Bohrloch zu kontrollieren (sichern). Dabei handelt es sich um eine spezielle Anordnung von massiven Ventilen.

genügend hohe Temperaturen erreicht werden können –i.d. Regel in Reservoirzonen bei Tiefen größer als 3 km.

Die Beobachtung des Aufquellens war bei oberflächennahen Geothermiebohrungen (Staufen) aufgetreten. In Staufen ist die Beschädigung der Häuser deshalb so groß, weil sich a) die quellfähigen Horizonte in geringer Tiefe befinden. Der Gebirgsbereich, der die Quellhebung verursacht, liegt in einer Tiefe zwischen 61,5 m und 99,5 m unter der Geländeoberfläche (LGRB, 2010), und

b) diese Höhenänderung aufgrund der Heterogenität der Quellung lateral stark variieren. Insbesondere wegen dieser ungleichmäßigen Hebungen und damit verbundener lateraler Bewegungen, kam es zu den Schäden in Staufen.

Sollten in größerer Tiefe quellfähige Horizonte angetroffen werden, so können sie durch das Gewicht des überlagernden Gesteins beim Überschreiten des Quelldruckes nicht aufquellen. So kann die Gipskeuper-Quellung in Tiefen > 1km nicht auftreten (Bsp.: I.d. Regel liegt der maximale Quelldruck bei 4.4 MPa⁸, das entspricht bei einer Gesteinsdichte von 2.1 g/cm³ dem lithostatischen Druck einer Tiefe von ca. 214 m, lokal können aufgrund der Heterogenität des Quellhorizonts auch fast doppelt so hohe Werte⁹ auftreten, die zu Horizontal- und Vertikalbewegungen führen können, solange die Schichten in Tiefen geringer als 400 m liegen. Bei Tiefbohrungen sind diese Bereiche verrohrt und zementiert. Befindet sich der Anhydrit in größeren Tiefen, ist kein Quellen mehr zu erwarten.

⁸ Madsen & Nüesch 1990, Nagra Technischer Bericht 90-17.

⁹ Pers. Mitteilung KIT-Experten



A) Im Saarland kommt es aktuell aufgrund von unterirdischen Hohlräumen, die der Kohlebergbau hinterlassen hat, zu unkontrollierten Einstürzen und Erdbeben der Stärke 4 auf der Richterskala. In Thüringen wurden im Kali-Bergbau bereits Beben der Stärke 5,6 gemessen.

Wie stellen Sie sicher, dass dauerhafte Stimulationsmaßnahmen, d.h. unnatürliche Eingriffe in Erdtiefen - auch in Verbindung mit über in Jahren hinweg entstehenden Hohlräumen - nicht zusätzliche Erdbewegungen auslösen?

Im Kohlebergbau kommt dies häufig vor. Wie wird bewiesen, dass dies bei Geothermie nicht vorkommen kann? Falls auch hier wieder von einem so genannten Restrisiko gesprochen wird, kommt das einem Freibrief zur Zerstörung unserer Heimat gleich!

Kurzantwort:

Durch Thermalwasserförderung in Geothermieanlagen werden aufgrund der (Re)Injektion des Thermalwassers in den Untergrund keine kavernenartigen Hohlräume wie im Kohle- oder Kali-Bergbau geschaffen (s.o.). Deshalb sind hier keine Bergstürze zu erwarten.

Stimulationsmaßnahmen sind kurzzeitige Maßnahmen (Stunden bis max. Tage). Induzierte Seismizität im Zusammenhang mit hydraulischer Stimulation bei Tiefer Geothermie entsteht durch den Versatz an präexistierenden Störungszonen im Untergrund aufgrund einer lokalen Veränderung des Porendrucks.

Wie oben angeführt, ist es Stand der Technik, vor Inbetriebnahme einer Geothermieanlage einen Zirkulationstest durchzuführen. Ist eine Zirkulation durch das Reservoir natürlich ausreichend vorhanden, d.h. die Durchlässigkeit gut, werden keine Stimulationsmaßnahmen benötigt. Das Landesforschungszentrum Geothermie lehnt dauerhafte hydraulische Stimulationsmaßnahmen ab. Die meisten Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Quelle fühlbarer Beben die natürlich vorhandene tektonische Vorspannung im Untergrund ist, die z.B. durch Änderung des Porenwasserdrucks oder durch Spannungsumlagerungen an Untertagebauwerken zu Bewegungen im

Untergrund führt.

Die im Kali-Bergbau aufgetretene Seismizität (Erdbeben) erreichte eine maximale Magnitude von 5,6 (Gebirgsschlag) in 700-900 m Tiefe. Die bei der Geothermie in Basel maximal beobachtete Magnitude erreichte laut Schweizer Erdbebendienst 3,4 (andere Quellen geben 3.6 an) in ca. 5 km Tiefe¹⁰. Damit ist der Energieinhalt des Basel-Bebens 1000x geringer als bei den Ereignissen im Kalibergbau. (zwei Magnitudenstufen in der Erdbebenmagnitudenskala entsprechen einem Unterschied im Energieinhalt um den Faktor 1000). Nach Auffassung des Landesforschungszentrum Geothermie sollten die Stimulations-Maßnahmen im Vorfeld so ausgelegt und der Anlagenbetrieb durch seismisches Monitoring so überwacht und gesteuert werden, dass Erschütterungen wie in Basel vermieden werden.

Weitere Details:

Zu Bergbaumaßnahmen wie bei Kalisalzgewinnung oder Kohlebergbau bestehen mehrere Unterschiede:

1. Die Tiefe des Reservoirs bei Tiefer Geothermie ist deutlich größer als die Abbautiefe im Bergbau. Das Beben der Magnitude 4 im Bergwerk Saar ist in ca. 1500 m Tiefe aufgetreten. Im Ruhrgebiet sind im Steinkohlebergbau Beben der Magnitude 3 beschrieben. Nach Grünthal und Minkley (2005) ereigneten sich die weltweit energiereichsten bergbauinduzierten seismischen Ereignisse bzw. Gebirgsschläge in den deutschen Kali-Bergbaugebieten. Magnitudenwerte von bis zu $ML = 5,6$ wurden erreicht – so beim Gebirgsschlag am 13.03.1989 im Kalibergbaurevier des Werratal. Wegen der für seismische Ereignisse relativ geringen Herdtiefe solcher Gebirgsschläge im Bereich der Abbau-Horizonte (im Falle des Gebirgsschlages vom 13.03.1989 in ca. 700-900 m Tiefe unter dem übertägigen Geländeniveau) wurden in den Ortschaften über den Bruchfeldern strukturelle Schäden verursacht (Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die seismischen Ereignisse mit Magnituden und Intensitäten). Laut Aussagen von Experten handelte es sich beim Beben im Thüringer Kali-Bergbau allerdings um eine Ausnahmesituation, bedingt durch den extrem großräumigen Abbau von Kali im Untergrund in der damaligen DDR, bei der die Stützpfeiler unterdimensioniert waren. Im Gegensatz zum Steinkohlebergbau, wo ein quasi kontinuierlicher Nachfall erfolgt, erfolgt in Thüringen der kettenreaktionsartige Einsturz von Stützpfeilern in Zusammenhang mit einer Sprengung und Gasexplosion in Grubenfeldern auf Flächen von 0.2 km² bis 8 km² [Grünthal und Minkley, 2005; Herrmann, 1998].

¹⁰ Erdbebenliste des Schweizer Erdbebendienstes:

http://www.seismo2009.ethz.ch/basel/index.php?m1=events&show_events=all

2.

2. Bei Kohle- oder Kaliabbau werden im Gebirge Schächte und Gänge angelegt. Diese verändern den Spannungszustand um die neu geschaffenen Hohlräume, so dass Spannungszustände, die ein mehrfaches der Spannungsmagnitude des Fernfeldes betragen auftreten können und zum Einsturz der Grubenbaue führen können, insbesondere im Zusammenhang mit auslösenden Faktoren wie Gewinnungs-Sprengungen oder Unterdimensionierung der Stützpfiler. Je nach Höhe der Grubenbaue können darüberliegende Gesteinsmassen mehrere Meter in die Tiefe rutschen. Lt. Grünthal und Minkley (2005) wurde z.B. in der Grube Teutschenthal im Saale-Revier ca. 12 Mio m³ Hohlraum durch den Abbau geschaffen. Die Einsturzbeben im Bergbau können von tektonischen Beben seismologisch unterschieden werden, da eine Einsturzquelle (Implosionsquelle) eine spezifische Herdflächenlösung aufweist, also einen anderen seismischen Fingerabdruck besitzt als tektonische Beben.

3.

Tabelle 3: Tabelle 1 aus Grünthal und Minkley (2005) mit induzierten seismischen Ereignissen in Bergbaugebieten der Bundesrepublik Deutschland mit $M_L > 4$. M_L bezeichnet die Lokalmagnitude, I_0 die Intensität der Erdbeben.

Datum			Koordinaten		Lokalisierung	M_L	I_0
Jahr	Monat	Tag	Länge	Breite			
1888	3	18	51,53	7,45	Ruhrgebiet NW	3,6	VI
1936	11	3	51,55	7,30	Ruhrgebiet NW	3,9	VI-VII
1940	5	24	51,48	11,79	Krüttershall, Saale-Revier	4,9	VII
1943	3	5	51,75	11,52	Schierstedt b. Aschersleben, N-Harz	3,9	VI-VII
1953	2	22	50,92	10,00	Heringen, Werra-Revier	5	VII-VIII
1958	7	8	50,82	10,11	Merkers, Werra-Revier	4,7	VII
1961	6	29	50,82	10,11	Merkers, Werra-Revier	3,6	VI
1971	4	4	51,75	11,52	Aschersleben, N-Harz	3,9	VI-VII
1975	6	23	50,79	10,00	Sünna, Werra-Revier	5,2	VIII
1981	7	13	52,26	7,71	Ibbenbüren	4,1	VI
1989	3	13	50,80	10,05	Völkershausen, Werra-Revier	5,6	VIII-IX
1991	5	16	52,28	7,76	Ibbenbüren	4,3	VI
1996	9	11	51,45	11,85	Teutschenthal, Saale-Revier	4,9	VII
2003	1	6	52,33	7,76	Ibbenbüren	4,2	VI

Im Gegensatz zu Bergbau oder der Thermalwasserförderung für balneologische Zwecke und Mineralwässer werden bei der Tiefen Geothermie die Wässer über Injektionsbohrungen wieder in den Untergrund zurückgeführt. Es entstehen dadurch keine kavernenartigen Hohlräume, die wie beim Bergbau aufgrund der Spannungen oder durch Versagen der Stollenausbaumaßnahmen einsturzgefährdet sind.

Unter Stimulationsmaßnahmen versteht man kurzzeitige chemische oder hydraulische Maßnahmen zur Verbesserung der Ankopplung der Bohrung an das Reservoir durch Verbesserung der Wegsamkeiten für das Thermalwasser im Untergrund. Die Reichweite solcher Maßnahmen beträgt in der Regel wenige Meter bis max. einige hundert Meter um die Bohrungen. Es wird dabei nicht über Jahre hinweg kontinuierlich chemisch oder hydraulisch stimuliert. Dauerhafte Stimulationsmaßnahmen mit hohem Druck sind wirtschaftlich für die Firmen nicht tragbar. Sie sind sehr teuer und zudem kann während einer Stimulation kein Betrieb der Anlage erfolgen. Ob eine Stimulation erforderlich ist, zeigen Zirkulationstests nach Abteufen der Bohrung bzw. Veränderungen der Förderrate während des Betriebs.

Hydraulische Stimulation ist als Maßnahme nur bei sogenannten Enhanced Geothermal Systems vorgesehen, die im Kristallingestein in große Tiefen (z.B. 5000 m) eine Verbesserung der Wegsamkeiten im Untergrund benötigen. Dabei kommt es zu induzierter Seismizität, die nur in wenigen Fällen eine Stärke erreicht hat, die von Menschen gespürt wird.

Veränderung des Porendrucks im Untergrund kann zur Reaktivierung von kleinen Brüchen oder auch Störungszonen und damit zur induzierten Seismizität führen, wie es z.B. bei Erdöl- und Erdgasförderung der Fall sein kann. Bei Geothermievorhaben ist die Druckänderung im

Reservoir wesentlich geringer, außer bei den oben erwähnten Stimulationsmaßnahmen, bei denen kurzzeitig mit höherem Druck injiziert wird. Daher ist Sorge zu tragen, dass unter Berücksichtigung des vorherrschenden Spannungszustands der Injektionsdruck in den Reservoirzonen so gewählt wird, dass die induzierte Seismizität unter der Fühlbarkeitsschwelle bleibt.

B) Wie kann sichergestellt werden, dass die Kläranlage Brühl / Ketsch den zu erwartenden Bodenbewegungen unbeschadet standhält? Gibt es eindeutige Aussagen hierzu von Gutachtern, die nicht versuchen, sich durch das Erwähnen möglicher Restrisiken abzusichern?

Kurzantwort:

Als Landesforschungszentrum Geothermie können wir keine Aussagen zur baulichen Qualität der Kläranlage machen. Die zulässigen Bodenbewegungen für Gebäude in Deutschland regelt die DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“, Teil 3 „Einwirkungen auf bauliche Anlagen“ (02-1999). Wenn – und davon gehen wir aus – die Anlage nach dem Stand der Technik errichtet wurde, sollte die Kläranlage für die in DIN 4150 angegebenen Bodengeschwindigkeitswerte ausgelegt sein.

Seismische Ereignisse können etwa einer Bodenschwinggeschwindigkeit¹¹ von 0.3 mm/s von Menschen gespürt werden (Beispiel Basel).

Die lokale Magnitude eines Erdbebens ist ein Maß für die Energieabstrahlung der Quelle. Ihre Berechnung auf Basis gemessener Schwinggeschwindigkeiten ist nur nach Berücksichtigung einer Amplituden-Entfernungskorrektur möglich. Die Magnitude ist

¹¹ Auszug aus Informationen des Schweizer Erdbebendienstes zur Erläuterung der Begriffe Bodenbeschleunigung und Bodenschwinggeschwindigkeit:

Erdbebenwellen bewirken eine beidseitige Bewegung des Bodens in horizontaler Richtung (in Ausbreitungsrichtung der Wellen und senkrecht dazu) sowie eine senkrechte Auf- und Abbewegung. Wie groß und schnell (Beschleunigung und Geschwindigkeit) diese Auslenkung ist, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab: Länge des Bruchs (bzw. Magnitude), Distanz zum Bruch und geologischer Untergrund. Generell aber nimmt die Beschleunigung mit grösser werdender Distanz zum Bruch ab. Zur Berechnung der maximalen Bodenbeschleunigung bezieht man sich auf die horizontale Erdbewegung. Die Beschleunigung wird als ein Teil oder Vielfaches der Erdschwerebeschleunigung, $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$, angegeben. Die maximale Bodengeschwindigkeit wird an den Stationen in cm/s gemessen. Zur Berechnung bezieht man sich wie bei der Erdbeschleunigung auf die horizontale Erdbewegung. Bei mittleren und stärkeren Beben reflektiert das sich ergebene Geschwindigkeitsmuster normalerweise die Geometrie des Bruches: die höchsten Geschwindigkeiten treten in der Nähe des Bruches auf sowie in Ausbreitungsrichtung. Ebenso wie bei der Beschleunigung hat die Beschaffenheit des geologischen Untergrundes einen Einfluss auf die Geschwindigkeiten, dies jedoch in viel kleinerem Masse. Große Schäden und Schäden an elastischen Strukturen sind in der Regel mit hohen Geschwindigkeiten in Einklang zu bringen. Die größte je gemessene Bodengeschwindigkeit betrug $183 \text{ cm/s} = 1830 \text{ mm/s}$. Bei kleinen Beben (Magnitude < 3) ist es v.a. die Beschleunigung, die von der Bevölkerung gespürt wird.

üblicherweise definiert als der Logarithmus der Maximalamplitude der Bodenschwinggeschwindigkeit. Bei ihrer Ausbreitung nimmt die Amplitude von Erdbebenwellen im Falle von Raumwellen mit $1/r$ ab und mit $1/\sqrt{r}$ im Fall von Oberflächenwellen. Außerdem wird ein Teil der von den Erdbebenwellen mitgeführten Energie gedämpft und daraus ergibt sich meist eine exponentielle Abnahme der Amplitude der Bodenbewegung. Die lokale Einwirkung eines Bebens vor Ort ist aber von der lokalen Bodengeschwindigkeit abhängig. Dies nennt man technisch eine Immissionsmessung (DIN 4150).

Die Anhaltswerte nach der Din-Norm 4150 sind in Abb. 4 abgebildet. Für Fundamentalschwingungen für die verschiedenen Frequenzen dargestellt. Bei geringen Frequenzen sind die Richtwerte dabei am schärfsten. Man erkennt aber, dass die Spürbarkeitsgrenze von Menschen noch deutlich unter der Randbedingung von 3 mm/s für den empfindlichsten Gebäudetyp liegt. Für normale Wohngebäude ist der Grenzwert auf 5 mm/s festgelegt bei Frequenzen zwischen 1 Hz und 10 Hz. Für Industriebauten liegt der Wert bei 20 mm/s. Auf diese DIN-Werte sind neue Gebäude in Deutschland in der Regel bautechnisch mindestens ausgelegt.

Das Beben vom 15. August in Landau hat auf einer Messstation Bodenschwinggeschwindigkeiten von 4.7 mm/s im Frequenzbereich zwischen 5 und 10 Hz ergeben. Dieser vergleichsweise hohe Wert resultiert aus der geometrischen Lage des Hypozentrums (nahe an der Erdoberfläche) und der Gesteinsschichten im Untergrund (geringe Dämpfung). Die Station befand sich ca. 1.5 km entfernt vom Epizentrum und ca. 2900 m vom Hypozentrum. Würde ein vergleichbares Beben in den Zielhorizonten der Bohrung Brühl auftreten (Obere Muschelkalk in einer Tiefe von 3000-3050 m und Mittlere Buntsandstein in einer Tiefe von ca. 3200-3450 m) und würden die Bodengegebenheiten von Landau übertragbar sein, so könnte man direkt über dem Beben eine Bodenschwinggeschwindigkeit von 4.6 mm/s erwarten (Überschlags-Rechnung LFZG). Auch dieser Wert liegt unter den geforderten Grenzwerten für normale Wohngebäude (5 mm/s) und deutlich unter den geforderten Grenzwerten für gewerblich genutzte Gebäude und Industriebauten (20 mm/s).

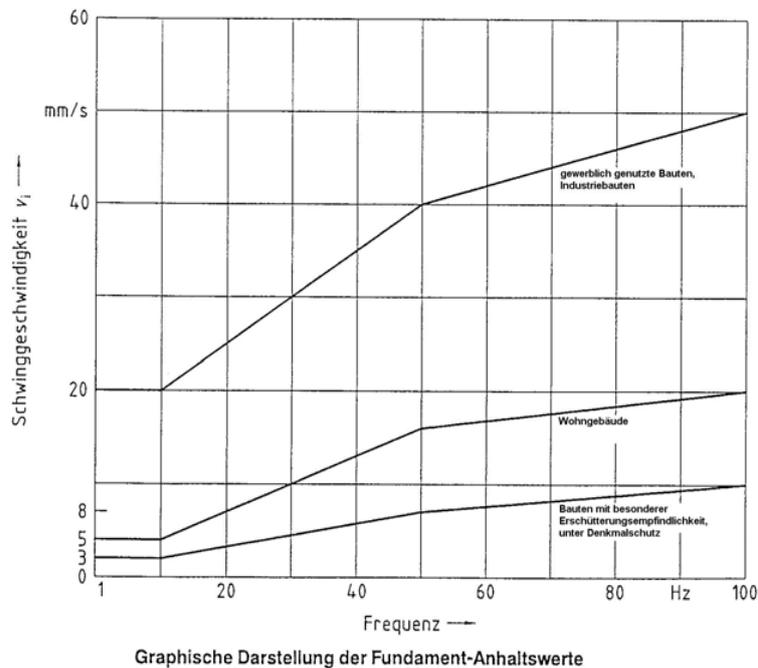


Abbildung 4: Anhaltswerte der DIN 4150-3 für kurzzeitige Fundamentalschwingungen.

Bemerkung zum Begriff „Restrisiko“. Bei Betrachtungen in nichtlinear, komplex rückgekoppelten Systemen sind Prognosen immer mit einem endlichen Fehler behaftet. Das Bundesverfassungsgericht definiert 1978 im Kalkar Urteil das Restrisiko als „hypothetisches Risiko, das nach dem Stand der Wissenschaft unbekannt, aber nicht auszuschließen“ ist. Mit jeder technischen Anlage existiert ein „Restrisiko“. Im BVerfGE Band 49¹² Seite 89 ff heißt es dazu „(Leitsatz 6:) Vom Gesetzgeber im Hinblick auf seine Schutzpflicht eine Regelung zu fordern, die mit absoluter Sicherheit Grundrechtsgefährdungen ausschließt, die aus der Zulassung technischer Anlagen und ihrem Betrieb möglicherweise entstehen können, hieße die Grenzen menschlichen Erkenntnisvermögens verkennen und würde weithin jede staatliche Zulassung der Nutzung von Technik verbannen.“

Ausblick: Gerne stehen wir als LFZG für weitere Fragen zur Verfügung, z.B. über eine weiterführende Diskussion mit Interessierten in Karlsruhe oder vor Ort.

¹² Zitiert nach Büdenbender, U., Heintschel von Heinegg, W., Rosin, P. Energierecht I, 1999.

Referenzen:

Amt für Umweltschutz – Stuttgart 2012: <http://www.stuttgart.de/item/show/192662>

Büdenbender, U., Heintschel von Heinegg, W., Rosin, P. (1999) Energierecht I, de Gruyter Verlag, ISBN 3 11 015770 5, .

DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“, Teil 3 „Einwirkungen auf bauliche Anlagen“ (02-1999).

Grünthal, G., Minkley, W. (2005): Bergbauinduzierte seismische Aktivitäten als Quelle seismischer Belastungen - Zur Notwendigkeit der Ergänzung der Karte der Erdbebenzonen der DIN 4149:2005-04. - Bautechnik, 82, 8, 508-513, 10.1002/bate.200590167.

Herrmann, a.G. (1998): Langfristig sichere Deponien: Situation, Grundlaen, Realisierung, Springer Verlag ISBN 3-540-64233-1.

Laplaigne, p. & Jaudin, F. (1999): Geothermal development in France – Country update report. – Proceedings of the European Geothermal conference Basel 1999, vol. 2: 5-14

LGRB 2010: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufeu i.Br. Kurzfassung zur Informationsveranstaltung am 22. Februar 2010 in Staufeu.

Madsen & Nüesch 1990, Nagra Technischer Bericht 90-17.

Rota, A., Macek, A., Wyss, R. (2007): Technik für tiefe Bohrungen, TEC21 11/2007.

Schweizer Erdbebendienst, Erdbebenliste des Schweizer Erdbebendienstes:

http://www.seismo2009.ethz.ch/basel/index.php?m1=events&show_events=all.