

Schlussbericht, Juli 2017

Erdwärmesonden in dicht bebautem Gebiet – Abklärung von Konsequenzen und mindernden Faktoren anhand von Fallbeispielen



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Auftraggeber

EnergieSchweiz, 3003 Bern

Auftragnehmer

AF-Consult Switzerland AG

Täferenstrasse 26

5405 Baden/Dättwil

Autoren

Dr. Joachim Poppei

Dr. Samuel Diem

Marine Pérus

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

EnergieSchweiz

Bundesamt für Energie BFE; Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: 3003 Bern

Tel. 058 462 56 11, Fax 058 463 25 00; contact@bfe.admin.ch; www.energie-schweiz.ch

Inhalt

1	Einordnung und Zielstellung	4
2	Evaluation von Standortfaktoren in der Schweiz	4
2.1	Aktuelle Situation	4
2.2	Brainstorming mit Sachverständigen am 15.11.2016	8
2.3	Bearbeitungskonzept	9
2.4	Evaluation der Standortverhältnisse im Birrfeld AG (Besprechung vom 28.11.2016).....	9
3	Erdwärmesonden im Grundwasser	11
3.1	Aktueller Kenntnisstand (Literatur).....	11
3.2	Modellkonzept für die Bewertung der vier Standortfälle	11
3.3	Modellbeschreibung und -ergebnisse	12
4	Einfluss der anthropogenen Erwärmung auf das Potenzial von Erdwärmesonden	17
4.1	Hintergrund und Datenbasis	17
4.2	Modellierung.....	18
5	Schlussfolgerungen und Empfehlung	22
6	Literatur.....	24

Anhang

1 Einordnung und Zielstellung

In drei Workshops „EWS in dicht bebautem Gebiet“, organisiert durch das BFE, wurde die Problematik einer (zumindest lokalen) Übernutzung des Untergrundes und eine Reduzierung des Angebotspotenzials durch konkurrierende Ansprüche diskutiert und nach praktikablen Wegen zur nachhaltigen und gerechten Nutzung des Untergrundes zum Wärmeentzug gesucht. Auf dem letzten Workshop, am 28.01.2016, haben wir einen vereinfachten Ansatz zur Bemessung und Kompensierung der gegenseitigen Beeinflussung benachbarter Erdwärmesonden (EWS) vorgestellt, der im Rahmen weitergehender Untersuchungen und Verifizierungen untersetzt werden soll.

Die Bearbeitung ist in zwei Arbeitspakete (AP1, AP2) gegliedert worden. AP1 „Untersuchungen zu neuen Bemessungs- und Planungsgrundlagen“ wurde bereits mit dem Bericht „Grenzabstände bei Erdwärmesonden – Untersuchungen zu neuen Bemessungs- und Planungsgrundlagen“ für das Amt für Hochbau der Stadt Zürich dokumentiert (AHB 03/2017). AP2 „Abklärung von Konsequenzen und mindernden Faktoren anhand von Fallbeispielen“ ist Gegenstand dieses Berichts für das Bundesamt für Energie. Beide Arbeitspakete gehören zu einem Gesamtpaket und wurden in enger Abstimmung der Auftraggeber und der AF-Consult bearbeitet.

Das AP2 „Abklärungen von Konsequenzen und mindernden Faktoren anhand von Fallbeispielen“ umfasst folgende Schwerpunkte:

1. Brainstorming zur Identifizierung und Charakterisierung von realitätsnahen Fallbeispielen; Sitzung mit Vertretern der AG AHB und BFE, sowie A. Huber, D. Pahud, W. Eugster und R. Kriesi
2. Evaluation von Konsequenzen bezüglich Auslegung und Einschränkungen der EWS in den Fallbeispielen
3. Recherche und Definition von Toleranzgrenzen und Sicherheitszuschlägen zur Auslegung und Betrieb von EWS („Stellschrauben“)
4. Untersuchung der Auswirkungen unter Berücksichtigung von Regeneration (auch teilweise) und Grundwasser
5. Untersuchungen zum Einfluss anthropogener Erwärmung auf den Betrieb von EWS

2 Evaluation von Standortfaktoren in der Schweiz

2.1 Aktuelle Situation

EWS sind die mit Abstand am weitesten verbreitete Technologie zur Erdwärmenutzung in der Schweiz (84% der installierten Heizleistung mit geothermischen Quellen stammen aus EWS). 2014 waren ca. 90'000 EWS [Geothermie.CH 2015] mit etwa 1,5 GW installiert, die 2'300 GWh Wärme erzeugten, wobei der Anteil geothermischer Energie bei etwa 73% lag [BFE 2014]. Seit 2011 werden jährlich ungefähr konstant 1'700 km neu abgeteuft und etwa 800 km saniert [FWS 2014].

Wieviel dieser EWS in Grundwasser-beeinflussten Gebieten abgeteuft werden, ist nicht erfasst. Einige Kantone verbieten EWS in grundwasserbeeinflussten Gebieten, andere lassen sie in wenig ergiebigen Randgebieten zu. Vergleicht man – unter Berücksichtigung der anhaltend hohen Attraktivität dieser Wärmequelle – die Verbreitungsgebiete von Grundwasservorkommen in Locker- und Festgesteinen (Abbildung 1) mit den bevorzugten Siedlungsgebieten (Abbildung 2), wird deutlich, dass wahrscheinlich ein hoher Anteil der EWS zumindest ausserhalb der hochergiebigen und zur Trinkwassergewinnung vorrangig ausgewiesenen und unter besonderen Schutz gestellten Schotteraquifere liegen dürfte. Regional grossräumige Gebiete ohne ergiebige Grundwasservorkommen in Locker- und Festgesteinen (in Abbildung 1 weiss) konzentrieren

sich lediglich auf das vergleichsweise gering-besiedelte südliche Mittelland, die Voralpen und Alpen.

Im Norden der Schweiz bilden der Malm und der Muschelkalk regionale Festgesteinsaquifere, die nach Süden in Richtung Alpenvorland hin abtauchen. Dies hat z.B. zur Folge, dass im Kanton Schaffhausen nahezu alle EWS unter Grundwassereinfluss stehen. Die beiden regionalen Aquifere sind hier allerdings nur im Rheintal, in Schaffhausen, im Zürcher Weinland (Malm), am Jurasüdfuss (Muschelkalk), im Vaud südlich des Neuenburger Sees und ggf. im Bereich des Aargauer oberen Limmattals (zwischen Hausen/Schinznach und Beznau/Böttstein) relevant, wo sie in Teufen < 200m angetroffen wurden. In Benken, z.B., wurde der Malm 199 m u.T. und der Obere Muschelkalk in 811 m u.T. erbohrt, in Treycovagnes liegt der Malm 178 m u.T. und der Obere Muschelkalk in über 2'500 m Teufe, wo er für EWS kaum von Interesse sein dürfte.

Die hydraulischen Parameter (K-Werte) überstreichen einen weiten Bereich:

Malm: Messungen in 13 Tiefbohrungen; geom. Mittel $5 \cdot 10^{-7}$ m/s ($1 \cdot 10^{-8}$... $2 \cdot 10^{-5}$ m/s)

Muschelkalk: Messungen in 20 Tiefbohrungen; geom. Mittel $9 \cdot 10^{-7}$ m/s ($3 \cdot 10^{-12}$... $7 \cdot 10^{-4}$ m/s)

Mit grossräumigen Gradienten entsprechend Abbildung 3 von 0.4%...4% (Malm) bzw. 0.5% ... 2% (Oberer Muschelkalk) lassen sich Darcyfliessgeschwindigkeiten von 0.1 m/a bzw. 0.3 m/a mit einem Bereich zwischen 0.01 und 20 m/a abschätzen. Wahrscheinlich dürften die Fließgeschwindigkeiten in den flacher gelagerten und höher durchlässigen, nördlichen Bereichen eher im oberen Bereich liegen.

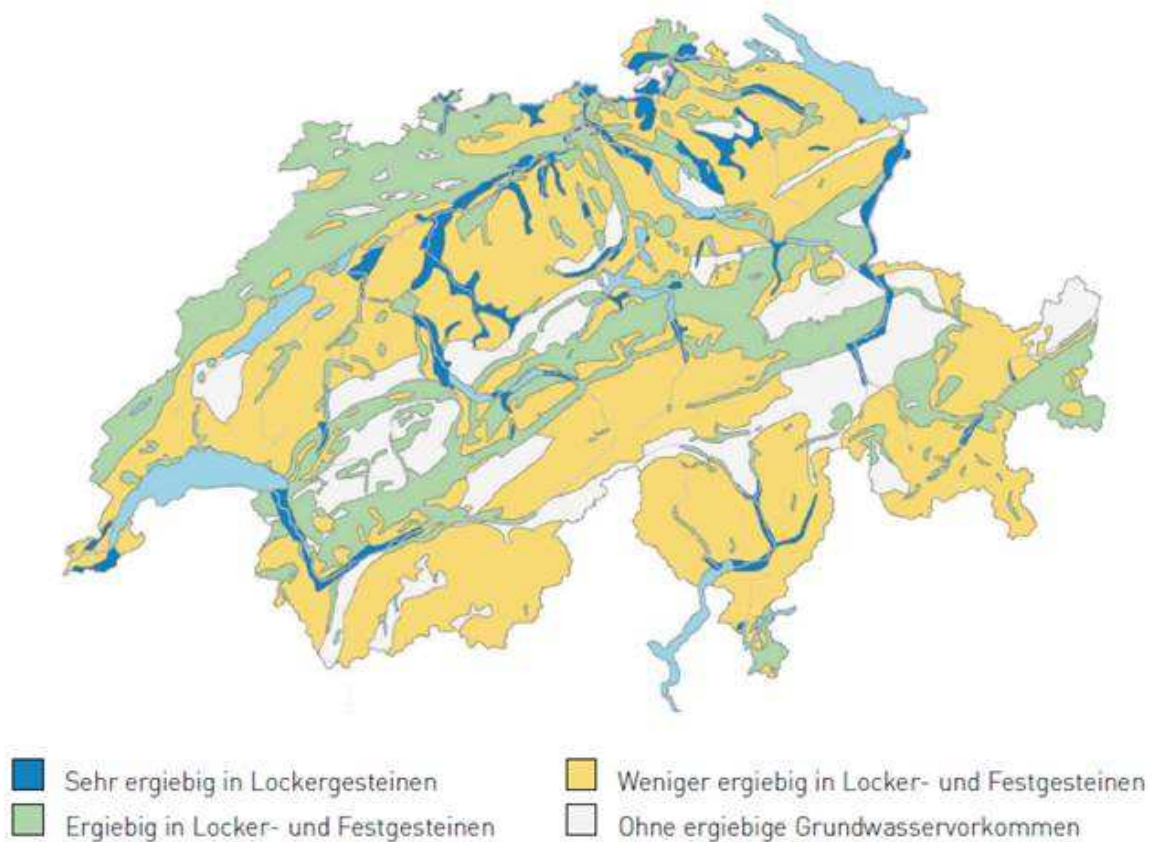


Abbildung 1: Grundwasservorkommen (aus: [Sinreich, M. et al. 2012])

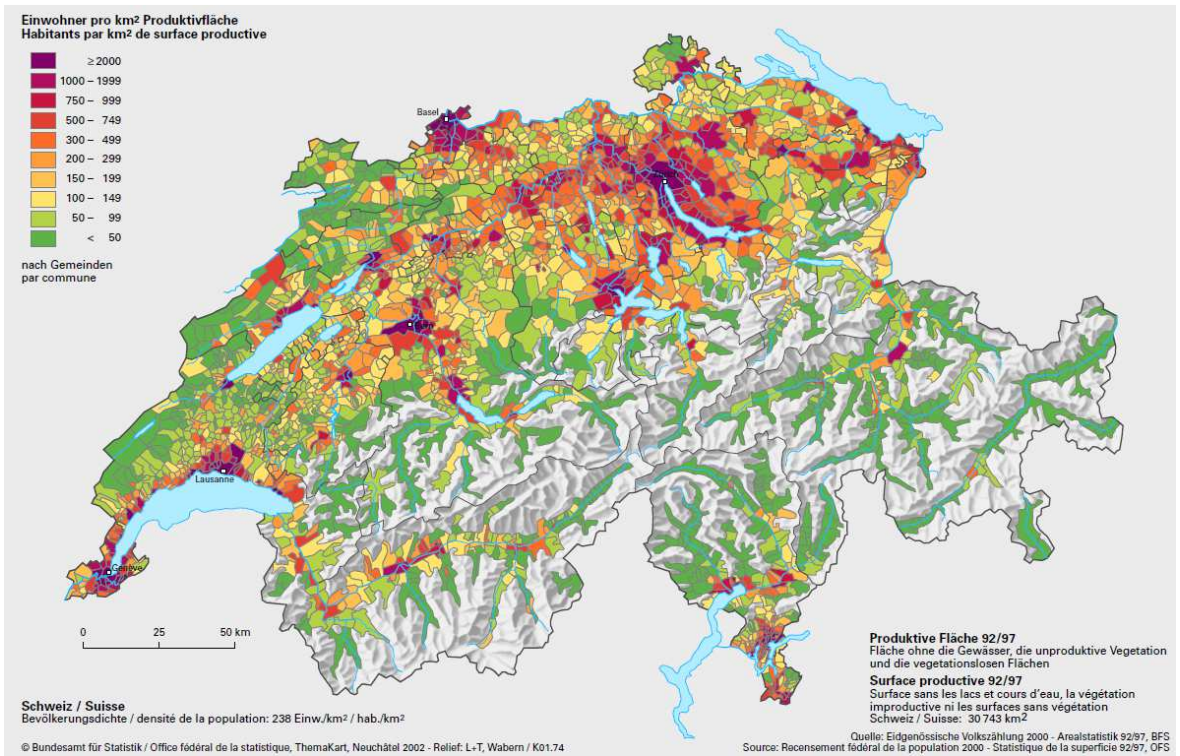
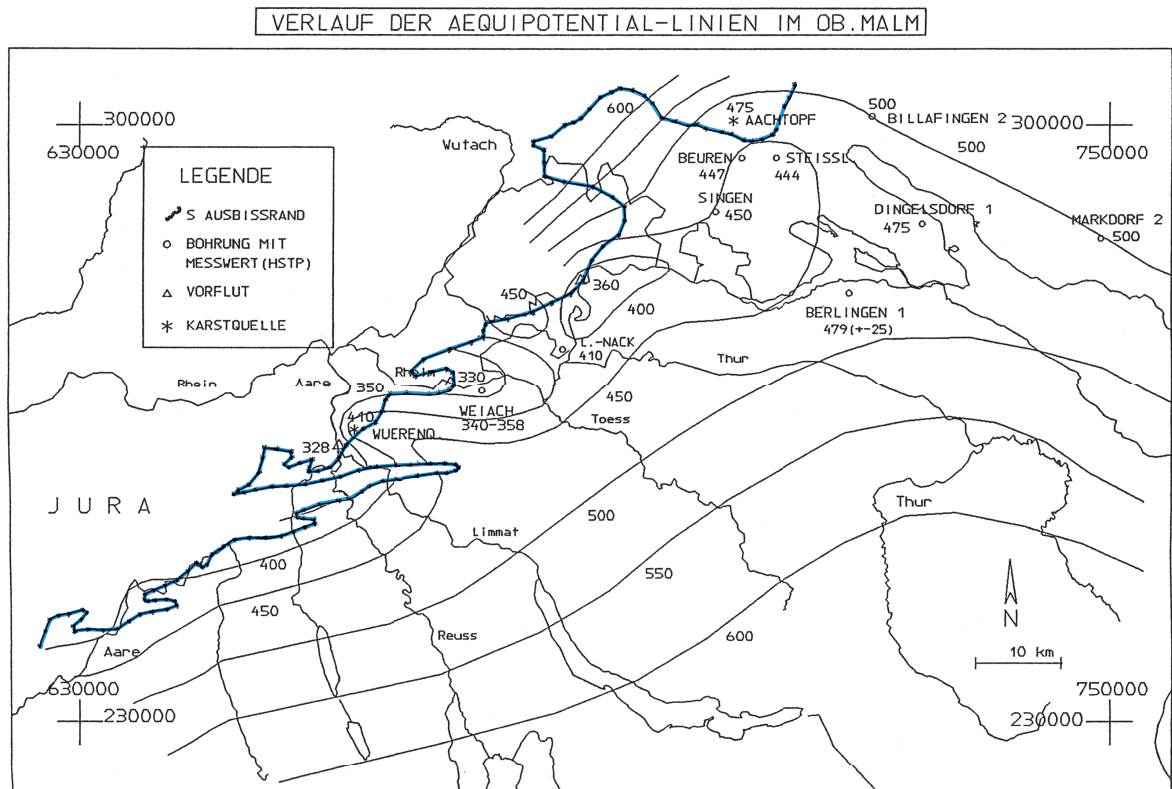


Abbildung 2: Bevölkerungsdichte (Einwohner pro Quadratkilometer Produktivfläche, Bundesamt für Statistik 2002)



PLTF02 GHM.V0 19.05.89 16:14

VERLAUF DER AEQUIPOTENTIAL-LINIEN IM OBEREN MUSCHELKALK

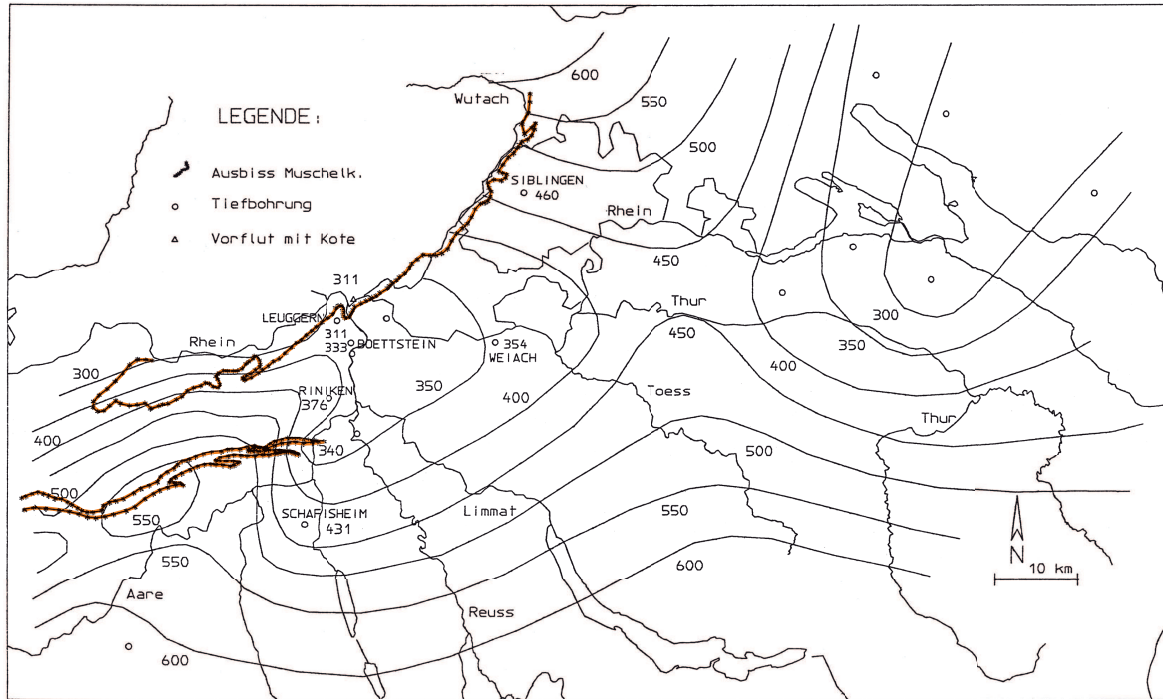


Abbildung 3: Isohypsen und Ausbiss des Malms und des Muschelkalkaquifers [Voborny et al. 1993].

Der Vollständigkeit halber sei hier auch noch die Obere Süsswassermolasse (OSM) genannt¹. In Nagra NIB 89-19 werden horizontale Durchlässigkeiten (parallel zur Schichtung von 10^{-6} ... 10^{-10} m/s angegeben.

Die Untergrenze der OSM zeigt Abbildung 4.

¹ Ober Meeressmolasse (OMM) und Malm dürfen im Kanton Zürich nicht erbohrt werden (AWEL Tiefenbeschränkung 2015).

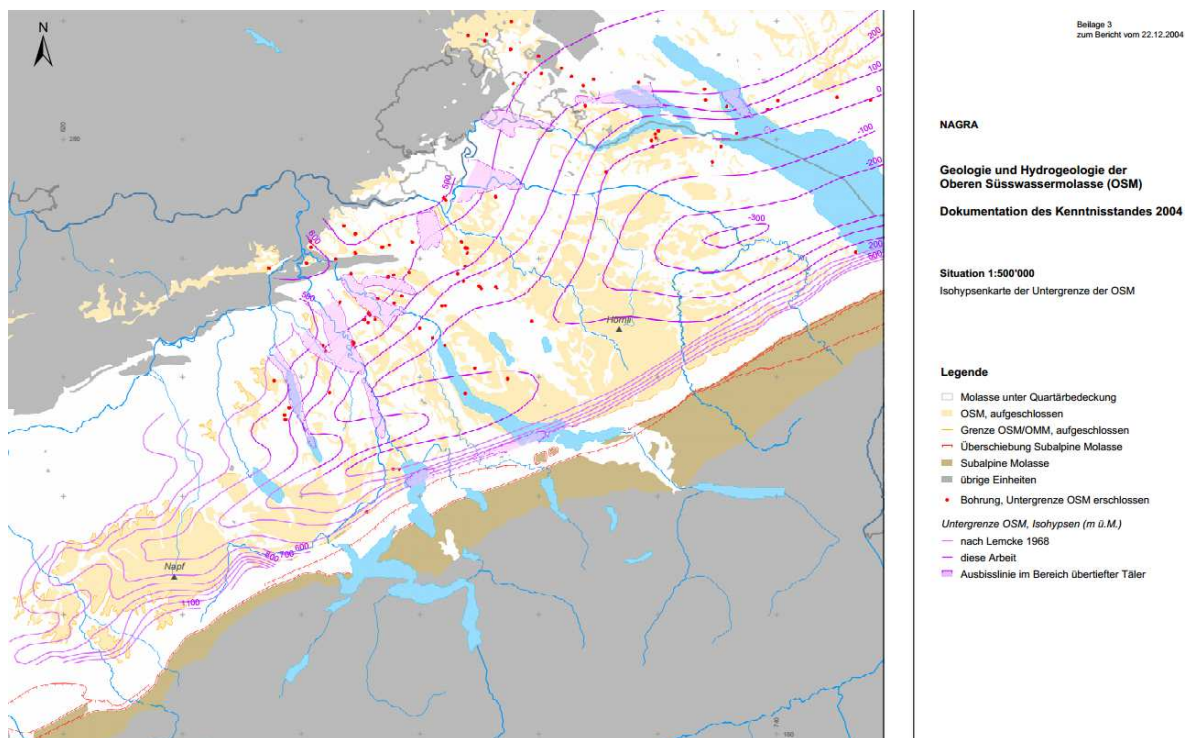


Abbildung 4: Geologie und Hydrogeologie der Obere Süsswassermolasse [Nagra NAB 04-04]

Die aktuelle Norm zur Auslegung von EWS SIA 384/6 betrachtet den Einfluss des Grundwassers auf den Wärmeentzug nicht. Wie international üblich, wird der Wärmeentzug rein konduktiv durch Wärmeleitung aus dem die Sonde umgebenden Gestein betrachtet. Auf weiterführende Literatur wird unter 3.1 eingegangen.

2.2 Brainstorming mit Sachverständigen am 15.11.2016

Am 15.11.2016 fand in Bern (Welle 7) eine Sitzung unter Leitung des Vertreters des BFE, Rita Kobler, mit den Sachverständigen statt:

Walter Eugster, Polydynamics Engineering

Daniel Pahud, Hochschule für Engineering und Management Vaud (HEIG-VD)

Ruedi Kriesi, Kriesi Energie GmbH.

Arthur Huber, Huber Energietechnik AG, und Roland Wagner, AHB ZH, waren verhindert.

AF stellte die Ergebnisse des AP1 vor. Die Anwesenden kamen zu folgenden Schlüssen:

- Bei der Auslegung von Erdwärmesonden nach SIA 384/6 wird i.d.R der Entzug ohne Grundwassereinfluss berücksichtigt.
- Langsame Grundwasserbewegungen werden durch einen Thermal Response Test (TRT) eher unterschätzt.
- Der lokale Untergrund ist meist nicht ausreichend gut bekannt, um Grundwasser (irgendwo auf der Länge der ganzen EWS) zu berücksichtigen.
- Einzelsonden/Sondenfelder, die nach SIA 384/6 berechnet wurden, sind überall dort, wo es Wasserströmungen hat, überdimensioniert (positiv formuliert: haben eine gute Effizienz).

- Für die optimale energetische und nachhaltige Nutzung der Geothermie sollte nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass es dort, wo EWS gebohrt werden dürfen, keine Wasserströmungen zwischen 0 MuT. und Sondenlänge (z.B. 200m) hat. (MuT = Meter unter Terrain).
- Auch eine perfekt ausgelegte Anlage könnte durch Benutzerverhalten / Gewerbewechsel im Rahmen der Lebensdauer von >50 Jahren übernutzt werden.
- Eine andere Möglichkeit wäre, dass Anlagen überwacht werden und bei einer Übernutzung zukünftig regeneriert werden muss. Auch dazu fehlen noch gewisse Grundlagen die erarbeitet werden müssten. Ein Teil dazu befindet sich in Erarbeitung.
- Kantone wie z.B. Basel Stadt + Land, Bern und Genf haben Regionen mit Erdwärmesonden im oberflächennahen Grundwasser. Der Wärmeeintrag durch Regeneration muss in solchen Regionen ab einer gewissen Intensität beachtet werden.

2.3 Bearbeitungskonzept

Im Ergebnis der Brainstorming-Sitzung wurde von AF folgendes Bearbeitungskonzept zur Bewertung des Einflusses von Grundwasser auf den Betrieb von EWS vorgeschlagen:

1. Definition eines räumlichen Betrachtungsraums (Skala und Schärfe = Flughöhe)
2. Evaluation des grossräumigen Kenntnisstands regionaler Grundwasserleiter (bis 200 m Tiefe) in der Nordschweiz
3. Exemplarische Berechnungen zum Einfluss von Grundwasserströmung in Modellschichten > 2m in Abhängigkeit von hydraulischer Durchlässigkeit und hydraulischen Gradienten
4. Konzept für eine lokale Bewertung der Hydrogeologie in Hinblick auf EWS: welche Daten werden gebraucht, liegen in welcher Form vor (Grundlagen: Gewässerschutzkarten der Kantone 1:25'000; Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100'000)

Dieses Konzept wurde am 28.11.2016 im Hause des BFE in Anwesenheit von Vertretern von Swisstopo, des Kantons Aargau (BVUAFU) und der Universitäten Bern und Neuenburg diskutiert.

2.4 Evaluation der Standortverhältnisse im Birrfeld AG (Besprechung vom 28.11.2016)

Die Teilnehmer der Sitzung kamen überein, das Gebiet um das Birrfeld im Kanton Aargau als exemplarisches Untersuchungsgebiet zu nutzen. Das Gebiet ist einerseits durch eine hohe Dichte von EWS gekennzeichnet, andererseits durch spezielle hydrogeologische Verhältnisse, die einerseits zu einer erhöhten Ergiebigkeit der EWS beitragen können, andererseits auch Schwierigkeiten beim Abteufen und Installieren erwarten lassen (Spülverluste, Arteser und Grundbruchgefährdung).

Aus dem Bestand der Unterlagen beim Department Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau werden exemplarisch vier Zonen ausgewiesen:

- Bereich mit Festgesteins- und geringmächtigen Grundwasservorkommen (Zone A)
- Bereich mit geringmächtigem Grundwasser (Zone B)
- Bereich mit wasserführenden Festgesteinen (Zone C) und
- Bereiche ohne Aquifereinfluss (Zone D).

Letzterer dient als Referenzfall. Anhang A enthält vier thematische Karten, die die Lage und Charakteristik der ausgewählten Standortgebiete illustrieren. Für die Zonenstandorte werden exemplarisch Bohrprofile aufbereitet, die insbesondere den Grundwasserfluss berücksichtigen.

Die vier Standortgebiete sind aus hydrogeologischer Sicht durch folgende Eigenschaften charakterisiert, die sich aus den 11 ausgewählten Bohrprofilen des BVUAFU ableiten lassen:

- Zone A: Untere Süßwassermolasse, beginnend unterhalb von 30...40 m u.T.; Wasserzutritte in 90 bzw. 130 m Tiefe in Wechsellagerungen mit geringmächtigen Feinsandsteinbänken
- Zone B: unterhalb des Kies-Schotters See(boden-)ablagerungen (Silt) mit lokalen Wasserzutritten in 50 m (gering) bzw. 90 m ...110 m Tiefe (stark)
- Zone C: Wasserzutritte im Fels (Villigen-Formation [Malm]) bei 100, 120 oder 140 m Tiefe
- Zone D: durchgehender Mergel (feucht).

Bereiche ohne Grundwassereinfluss lassen sich tiefenunabhängig durch mittlere Wärmeleitfähigkeiten von 1.6 bzw. 1.8 W/mK charakterisieren (EED Datenbank: Ton, feucht: 0.9 ... 1.6 ... 2.2 W/mK; mittlere Wärmekapazität 2.4 MJ/m³K; Silt, feucht: 1.0 ... 1.8 ... 2.3 W/mK; 2.2 MJ/m³K). Entsprechend dürfte die Normleistung einer EWS (ohne Grundwasser) bei knapp 30 W/m liegen (gem. SIA 384/6, Figur 7).

3 Erdwärmesonden im Grundwasser

3.1 Aktueller Kenntnisstand (Literatur)

Zur Analyse von EWS unter Einfluss von Grundwasser gibt es vergleichsweise nur wenig Literatur. Poppei & Fischer haben im damals jährlich stattfindenden Symposium „Erdgekoppelte Wärmepumpen“ in Rauschholzhausen (D), veröffentlicht als IZW-Berichte 1997, einen Beitrag präsentiert [Poppei/Fischer 1997], wo sie exemplarisch den Einfluss von Grundwasserflüssen auf das Temperaturfeld um eine EWS berechnet haben. Als Beispiel diente eine 60 m tiefe EWS, die in den oberen 30 m eine gering durchlässige Mergelschicht und darunter eine Sandschicht durchteuft, die mit verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten ausgestattet ist. Das Beispiel machte deutlich, dass Strömungen von weniger oder gleich 0.1 m/a vernachlässigbar sind, bei 1 m/a bereits deutliche Regenerationseffekte wirksam sind und bei 10 m/a der Wärmeentzug faktisch vollständig regeneriert wird.

Signorelli (2004) spricht in ihrer Dissertation zwar den positiven Effekt von Grundwasser auf die Wärmeextraktion aus EWS an, konzentriert sich dann aber auf die Aspekte während eines Thermal Response Tests, die im Vergleich zur langzeitigen Nutzung eher von kurzer Dauer sind.

2010/11 hat AF Colenco im Auftrage des Kantons St. Gallen Untersuchungen zu EWS in Randbereichen des Rheintalaquifers durchgeführt [AF-Colenco 2011]. Als Beispiel diente eine 2 m resp. eine 20 m mächtige Kiesschicht unterhalb einer geringmächtigen ungesättigten Zone und oberhalb der Stillwassersedimente. Es wurden zwei Fälle von Strömungsgeschwindigkeiten untersucht, die charakteristisch für das Rheintal bei Buchs sind: $0.2\% \cdot 10^{-3} \text{ m/s} = 0.17 \text{ m/d}$ (Median im Rheintal bei Buchs) resp. $0.5\% \cdot 10^{-3} \text{ m/s} = 0.43 \text{ m/d}$.

Die Berechnungen bestätigen die Aussagen von 1997: Bei hohen Fließgeschwindigkeiten, die typisch für die alluvialen Schotteraquifere sind, wird der umströmte Bereich vollständig regeneriert. Im vorliegenden Fall lässt sich der Entzug der Sonde um einen Faktor von 70 bzw. 130 erhöhen [AF-Colenco 2011].

[Zhu et al. 2010] sprechen zwar den Einfluss erhöhter Grundwassertemperaturen unter urbanen Zentren an, nutzen diesen erhöhten Wärmeinhalt aber lediglich zur Diskussion des geothermischen Potentials. Zwei Arbeiten von [Rivera et al. 2010a, 2010b] befassen sich mit analytischen Lösungen zur Berechnung der Bilanzgrößen (2010a) und der Wärmeausbreitung um EWS im Einfluss von Oberflächeneffekten und advektivem Wärmetransport. (2010b). Letzteres wird illustriert an einem hypothetischen Beispiel moderater Grundwasserfließgeschwindigkeit ($v_D=2.3 \text{ m/a}$). Sie zeigen, dass unter dem Einfluss des Grundwasserflusses wesentlich schneller quasistationäre Verhältnisse erreicht werden als ohne. Dies steht in Übereinstimmung zu den o.g. Berechnungen für St. Gallen. Bei einer Fließgeschwindigkeit von 0.17 m/d (und einem Faktor 70 höheren Entzug) würde die Auslegungsgrenztemperatur bereits im ersten Jahr erreicht, durch Regeneration aber nicht weiter unterschritten.

3.2 Modellkonzept für die Bewertung der vier Standortfälle

Das Modellkonzept orientiert sich an der Aufgabenstellung, möglichen Vereinfachungen und erforderlichem Detaillierungsgrad.

Für die Aufgabenstellung relevant sind

- der Einfluss lokaler Grundwasserströmung in bestimmten Tiefen mit bestimmten Fließgeschwindigkeiten und
- die Vergleichbarkeit zu unbeeinflussten Verhältnissen.

Von untergeordneter Bedeutung sind

- Oberflächen- und Sondenfusseffekte

- Stratigraphische thermophysikalische Stoffkennwerte
- Ausbau, Teufe und Nachbarn der EWS.

Daraus folgt:

- Das Modell ist 2D. 3D-Effekte sind vernachlässigbar.
- Modellbereiche ohne Grundwassereinfluss können durch homogene Stoffkennwerte parametrisiert werden (der Einfluss vertikal variierender Stoffkennwerte ist vernachlässigbar),
- Ein Sondenmodell mit Abbildung der Ausbau- und Hinterfüllungsmaterialien ist nicht erforderlich.

Die „Sonde“ und ihre Umgebung sind 160 m tief, an den Oberflächen findet kein Wärmeaustausch statt. Entsprechend der hydrogeologischen Charakterisierung der Zonen A ... C werden exemplarisch Bereiche mit Grundwasserfluss ausgewiesen. Die Grundwasserfließgeschwindigkeit und Mächtigkeit der hydraulisch wirksamen Bereiche orientiert sich an den typisierten Profilen von 2.4.

Der mögliche Wärmeentzug wird verglichen mit der Referenzvariante D (oder einer trockenen Bohrung).

3.3 Modellbeschreibung und -ergebnisse

Die hydrogeologische Charakterisierung wird – mangels genauerer Daten – stark vereinfacht wie folgt beschrieben:

Tabelle 1: Hydrogeologische Charakterisierung der drei Modellgebiete A – C

Zone	Charakterisierung	Tiefe (m unter Terrain)	Hydraulische Durchlässigkeit (m/s); Unter- und Obergrenze	Mächtigkeit der Zuflusszone (m)
A	Wechsellage (Modellkluftzone)	140	$10^{-10} \dots 2 \cdot 10^{-5}$	1 m / 5 m
B	Lokal durchlässige, wassergesättigte Schichten	110	$10^{-10} \dots 10^{-6}$	5 m / 10 m / 20 m
C	Kluftzonen im Fels	140	$10^{-8} \dots 2 \cdot 10^{-5}$	1 m / 5 m

Der Gradient aller Kluft- oder Porengrundwasserleiter wird vereinfacht mit 1% angesetzt.

Zur äquivalenten Abbildung des radialen Wärmeentzugs um eine EWS auf eine 2D-Ebene muss der Wärmestrom $q_{\text{äq}}$ in W/m^2 so eingestellt werden, dass nach der Betriebszeit sich die gleiche Temperatur wie in einer Sonde einstellt:

$$T(t = 50a) = \frac{q_{\text{äq}}}{\lambda} \sqrt{\frac{4at}{\pi}} = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (1)$$

λ ... effektive Wärmeleitfähigkeit der Formation = $n \cdot \lambda_w + (1 - n) \cdot \lambda_G$

n Porosität; w ... Wasser, G ... Gestein

a ... Temperaturleitfähigkeit = $\frac{\lambda}{\rho \cdot c}$

$$\rho c = n \cdot \rho c_w + (1 - n) \rho c_G$$

r ... Radius der EWS in m

t ... Zeit in s

q ... Wärmeentzug in W/m

γ ... Euler-Mascheroni-Konstante

ρc ... Dichte · spezifische Wärmekapazität.

Als effektive Wärmeleitfähigkeit nehmen wir für die Malmkalke einen Wert von 2.4 W/mK an, der in näherer Umgebung (Erdwärmesondenfeld Aarau, Schlussbericht Eberhard & Partner AG, 2005) in einem Thermal Response Test ermittelt wurde (effektiver Entzug 27.7 W/m).

Stellvertretend sind die Temperaturen um die Sonde (hier als 2D-ebener Schnitt) nach 50 Jahren ununterbrochener Betriebszeit für die Fälle mit hoher hydraulischer Durchlässigkeit der Grundwasserbereiche in den Zonen A bis C und im Vergleich dazu der Fall D (ohne Grundwasser) dargestellt (Abbildung 5 bis Abbildung 8).

Der konduktive Wärmeentzug ist in allen „Sonden“ (am linken Modellrand) in etwa gleich und beträgt 0.76 W/m² (das entspricht einem radialen Wärmeentzug von 28 W/m bzw. auf der Länge von 160 m 4.48 kW). Die Temperaturen erreichen am Modellrand (EWS) negative Temperaturen. Für die Vergleichbarkeit des effektiven Wärmeentzugs ist das aber unerheblich.

In der Zone A sorgt das Kluft- und Porenwasser zu massgeblichen Energiezuflüssen (fast in der gleichen Grössenordnung wie der konduktive Wärmeentzug), wenn die Durchlässigkeit der wasserführenden Schichten hoch ist. Die Mächtigkeit der Zuflussbereiche spielt dabei eine geringere Rolle als die hydraulische Durchlässigkeit.

In der Zone B mit geringmächtigen porösen Grundwasserleitern liegt deren Energiebeitrag im Prozentbereich vom Wärmeentzug, wenn die hydraulische Durchlässigkeit der hydraulisch wirksamen Schichten relativ hoch ist (10⁻⁶ m/s). Die Beiträge sind etwa linear proportional zur Mächtigkeit dieser Schichten.

In der Zone C mit Kluftwasserzutritten im Fels können diese einen wesentlichen Beitrag liefern, wenn deren Durchlässigkeit etwa 10⁻⁵ m/s beträgt. Bei Durchlässigkeiten von 10⁻⁸ m/s liegt der Beitrag bei etwa 1% und ist vernachlässigbar.

Der Gradient (als 2. Faktor der Fließgeschwindigkeit) wurde hier nicht variiert. Nach vorliegenden Isohypsenplänen kann der lokal auch um einen Faktor 2 höher oder 10 tiefer liegen. Diese Variabilität ist aber durch die Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit abgedeckt.

Tabelle 2: Verhältnis advektiver Wärmegewinn zu konvektivem Wärmeentzug bei hohen Durchlässigkeiten

Zone	Hydraulische Durchlässigkeit (m/s)	Mächtigkeit (m)	Verhältnis advektiv/konduktiv
A	$2 \cdot 10^{-5}$	1	32%
	$2 \cdot 10^{-5}$	5	55%
B	10^{-6}	5	3%
	10^{-6}	10	10%
	10^{-6}	20	18%
C	Kluft $2 \cdot 10^{-5}$	1	24%
	Kluft $2 \cdot 10^{-5}$	5	44%

Bei allen Berechnungen mit hydraulischer Durchlässigkeit an der unteren Grenze ist der advective Beitrag weniger als 1% vom Wärmeentzug. Auf die Darstellung der Ergebnisse wird hier verzichtet.

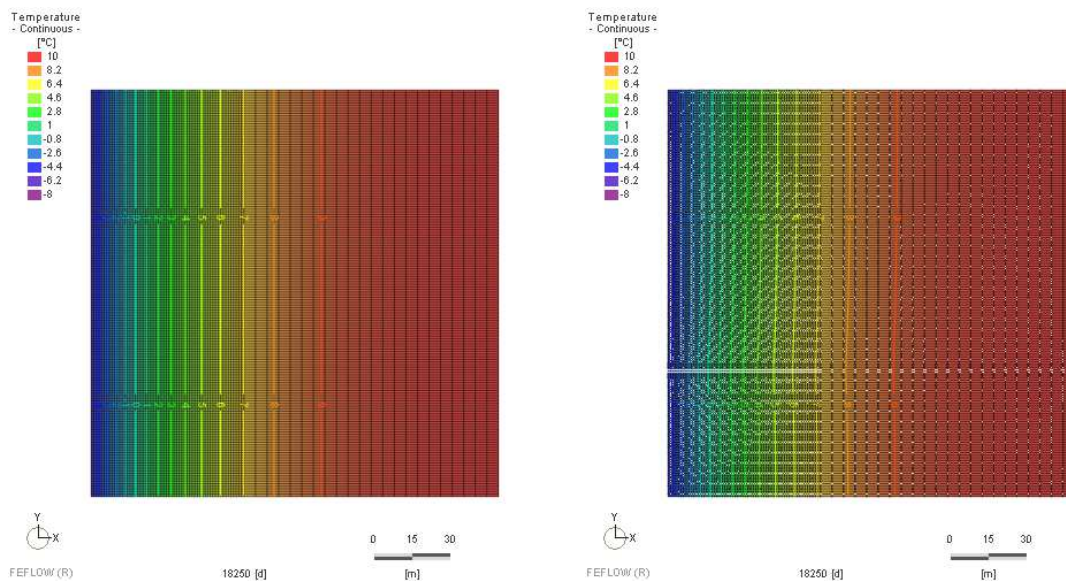


Abbildung 5: Zone D (Vergleichsfall, ohne Grundwasser, links); Zone B (hydraulisch durchlässiger Bereich 110m unter Terrain, rechts) 5m; Wärmeentzug jeweils am linke Rand

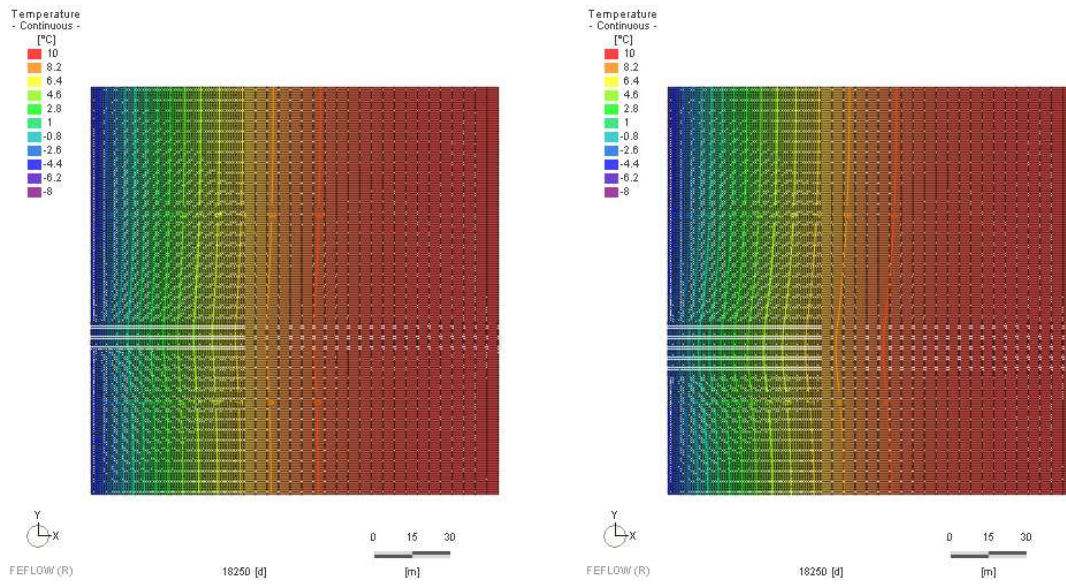


Abbildung 6: Zone B: hydraulisch wirksame Zone 10m (links), 20m (rechts)

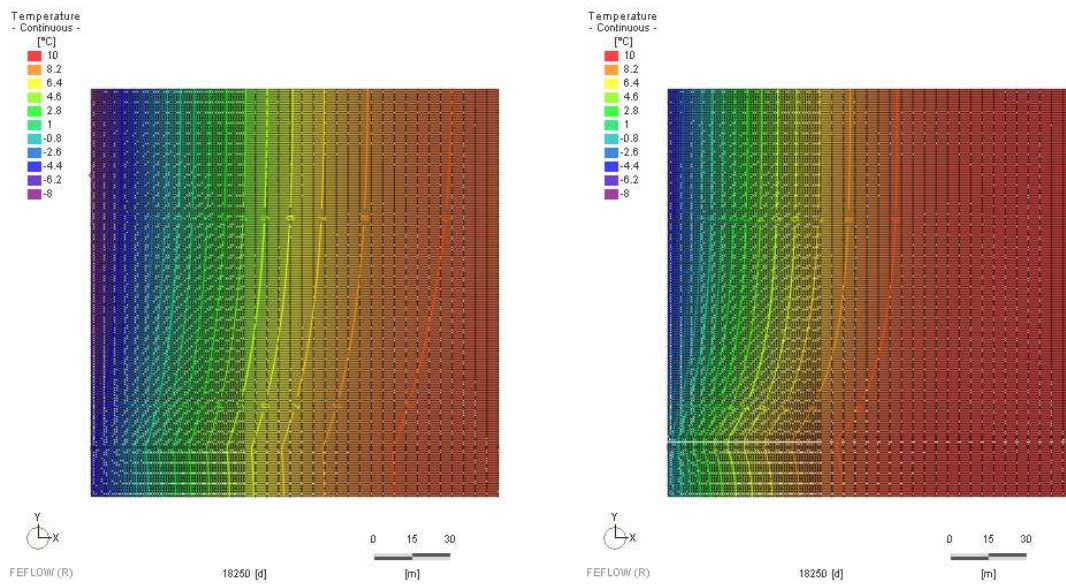


Abbildung 7: Zone C (Kluftzonen im Fels), $k=k_{max}$, Mächtigkeit 1 m (links) und 5 m (rechts)

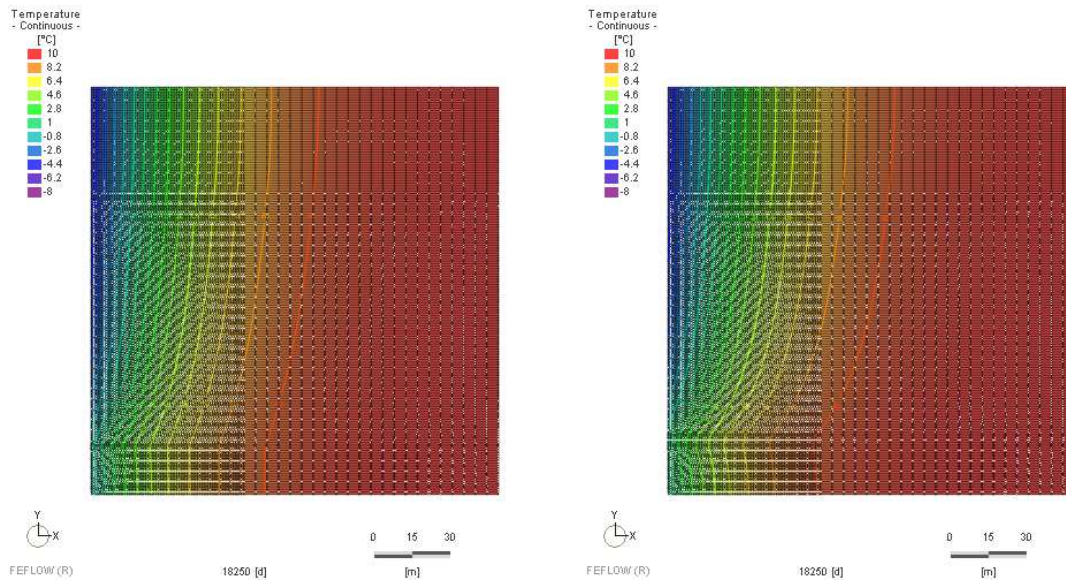


Abbildung 8: Zone A (geringmächtige Feinsandschichten), $k=k_{max}$, 1 m (links) und 5 m (rechts)

4 Einfluss der anthropogenen Erwärmung auf das Potenzial von Erdwärmesonden

4.1 Hintergrund und Datenbasis

Es ist unbestritten und seit einigen Jahrzehnten vielfach nachgewiesen, dass – besonders in Grossstädten – sich der Untergrund durch den permanenten Wärmeeintrag aufheizt. Zhu et al. (2010) sprechen von einer Erwärmung unter Köln und Winnipeg (Kanada) von bis zu 5K. Quellen der Erwärmung sind

- der Eintrag durch Gebäude(-keller) und Tunnel
- der Eintrag durch Fernwärme- und Abwasserkanäle und Leitungen
- Kühlwasserrückgabe und Leckagen und
- eine erhöhte Terrainoberflächentemperatur infolge Klimaerwärmung.

Menberg et al. (2013) haben die Wärmeströme und Energieeinträge in Karlsruhe analysiert. Sie schätzten den Wärmestrom ins Erdreich in 1977 zu 0.76 W/m^2 und in 2011 0.82 W/m^2 , wovon Gebäude zu $244 \pm 440 \text{ mW/m}^2$ und 2011 $276 \pm 481 \text{ mW/m}^2$ beitrugen. Bayer et al. (2016) verweisen auf einen in Städten gemessenen Beitrag durch urbane Strukturen von $1.2 \dots 4.8 \text{ W/m}^2$. Es gibt zahlreiche Publikationen zu diesem Thema, u.a. Menberg et al. (2013), Epting et al. (2013a,b), Köhler et al. (2015), Maxil (2015), Attard et al. (2016), Barla et al. (2016), auch zu einzelnen Emittenten, wobei oftmals nicht klar wird, über welche Fläche hier gemittelt wurde.

Für die nachfolgenden Betrachtungen gehen wir von einem einfachen, praktikablen Ansatz aus: Ein Mehrfamilienhaus im bestehenden, unsanierten Gebäudebestand hat einen Wärmebedarf von 300 MJ pro m^2 beheizter Grundfläche und Jahr (SIA-Empfehlung 380/1, 1988). Davon betragen 60% Transmissionsverluste und 40% Lüftungswärmeverluste. Von den Transmissionsverlusten gelangen $10 \dots 15\%$ ins Erdreich über erdberührte Bauteile. Bei einem zweigeschossigen Gebäude sind die über das Jahr gemittelten Wärmeströme ins Erdreich in der Grössenordnung von $ca. 1 \text{ W/m}^2$. Diese Schätzung ist etwas höher als die Angaben aus der Literatur für Karlsruhe oder Zürich, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Literaturangaben wahrscheinlich auch nicht-bebaute Flächen mit einbeziehen.

Die Erwärmung des Untergrunds durch die Oberfläche ist von der Zeit der Einwirkung abhängig. In dicht bebauten Städten mit langer Fernwärmemetradition dürfte dieser Eintrag sicher seit 100 Jahren existieren. In lockeren, neuen Überbauungen wird er wahrscheinlich erst mit der Erschliessung wirksam. Die Temperatúrausbreitung in einem halbumendlichen Körper mit konstanter Beheizung an der Oberfläche lässt sich nach Gleichung (2) beschreiben:

$$T(x, t) = \frac{q}{\lambda} \sqrt{4at} \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4at}} \quad (2)$$

$\operatorname{interfc}$ = Integral der komplexen Fehlerfunktion:

$$\operatorname{interfc}(x) = \int_x^{\infty} \operatorname{erfc}(t) dt$$

Das Integral ist vernachlässigbar ($\leq 1 \cdot 10^{-3}$), wenn das Argument $\frac{x}{\sqrt{4at}} \geq 2$ ist. Dies ist nach 10 Jahren in ca. 70 m und nach 50 Jahren in ca. 160 m der Fall ($a=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Die Temperaturerhöhung in der Tiefe in Abhängigkeit von der Einwirkzeit zeigt Abbildung 9.

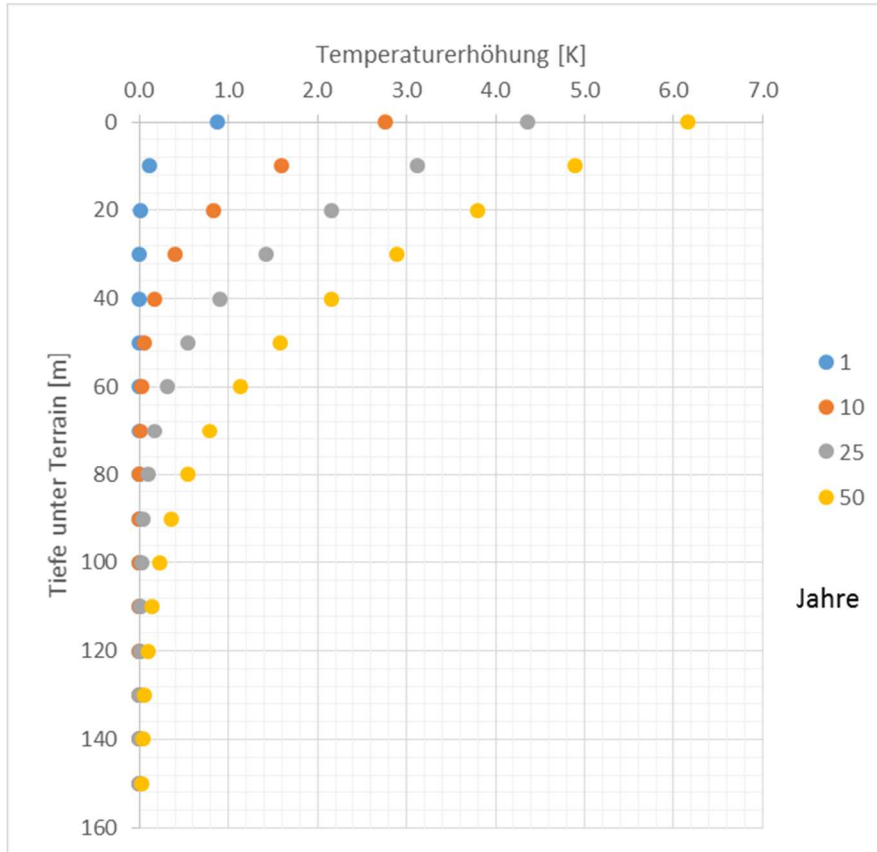


Abbildung 9: Temperaturerhöhung bei konstantem Eintrag von 275 mW/m^2 (Wärmeleitfähigkeit $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)

In etwa 70 m dürfte das Temperatursignal einer 50 jährigen „Beheizung“ unter 1 K und damit kaum nachweisbar sein.

Flache EWS profitieren mehr von der Erwärmung als tiefe. Da flache EWS innerhalb der Betriebszeit stationäre Zustände erreichen können (vgl. Berichtsteil 1), sind die spezifischen Entzugsleistungen relativ hoch, und der nachhaltige Wärmeentzug² ist gleich dem Auslegungswärmeentzug bei einer 50 jährigen Nutzung (s. Rivera et al. 2017, table 2: $H=50\text{m}$, $B=\infty$). Bei tiefen EWS werden innerhalb der Betriebszeit keine stationären Verhältnisse erreicht; entsprechend ist auch der Bonus einer erhöhten Oberflächentemperatur geringer (Rivera et al 2017; gleiche Tabelle: $H = 200\text{m}$).

4.2 Modellierung

Um den Einfluss des Wärmeeintrags auf EWS zu testen, wird das hypothetische Beispiel aus dem Bericht zum AP1 „Grenzabstände bei Erdwärmesonden – Untersuchungen zu neuen Bemessungs- und Planungsgrundlagen“ (AHB 03/2017) herangezogen. Es wird aus diesem Szenario

² Rivera unterscheidet den „renewable“ Wärmeentzug vom „depletion scenario“. Das „renewable scenario“ setzt stationäre Verhältnisse voraus, bei denen der Wärmeentzug durch nicht-radialen Wärmegewinn am Sondenkopf und -fuß kompensiert wird.

rio nur die Phase I, Betrieb des Sondenfeldes A, simuliert. Einzige Änderung: Mit Inbetriebnahme der Sonden im Feld A im Jahr 1990 beginnt auch der Wärmeeintrag mit einer konstanten Heizleistung von 1 W/m^2 auf der Grundfläche der Überbauung des Feldes A. Wir betrachten den Effekt einer zusätzlichen Wärmeeinspeisung durch das Gebäude auf das Temperaturfeld der Sonden. Es findet keine Grundwasserströmung statt.

Die stärkste Beeinflussung ist für die zentrale EWS des Feldes zu erwarten Abbildung 10 zeigt die Temperaturen in der Hinterfüllung zu vier verschiedenen Zeiten, jeweils vor Beginn der Betriebsphase, wo die Auswirkungen der Erderwärmung am deutlichsten sind.

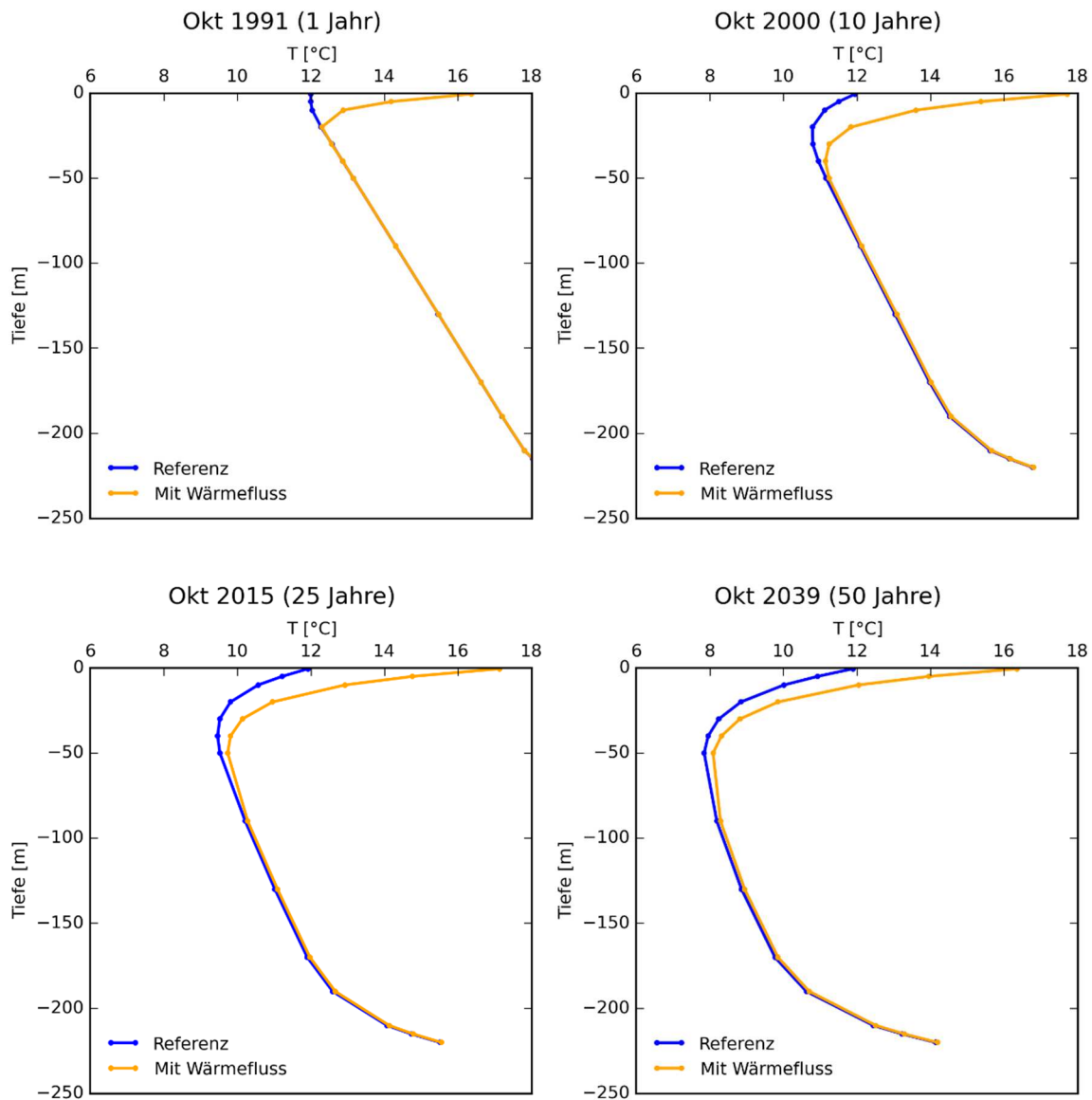


Abbildung 10: Temperaturen in der Hinterfüllung der zentralen EWS zu vier Zeiten; im Vergleich zu den Temperaturen ohne zusätzlichen Wärmeeintrag (Berechnungen aus Berichtsteil 1)³

Die zunehmende Tiefe der Front wird deutlich: Unterschiede im Temperaturverlauf zum Szenario ohne Erderwärmung sind nach einem Jahr oberhalb einer Tiefe von 20 m, nach 10 Jahren

³ Die relativ hohen Temperaturen im Referenzfall an der Terrainoberkante von 12°C (blaue Linie) sind einer Temperaturrandbedingung im Referenzmodell geschuldet, die im aktuellen Beispiel durch den Wärmeeintrag ersetzt wird.

oberhalb 50 m, nach 25 Jahren bis 100 m und nach 50 Jahren geringfügig darunter erkennbar. Die zunehmende Erwärmung (von oben) konkurrenziert mit zunehmenden Abkühlung des sondennahen Raums durch den Betrieb der EWS.

In den 3D-Schnitten ist die räumliche Ausbreitung erkennbar (Abbildung 11). Dargestellt sind Temperaturänderungen von mehr als 0.5 K. Es wird deutlich, dass diese – bezogen auf die Sondelänge – nur begrenzt wirksam werden.

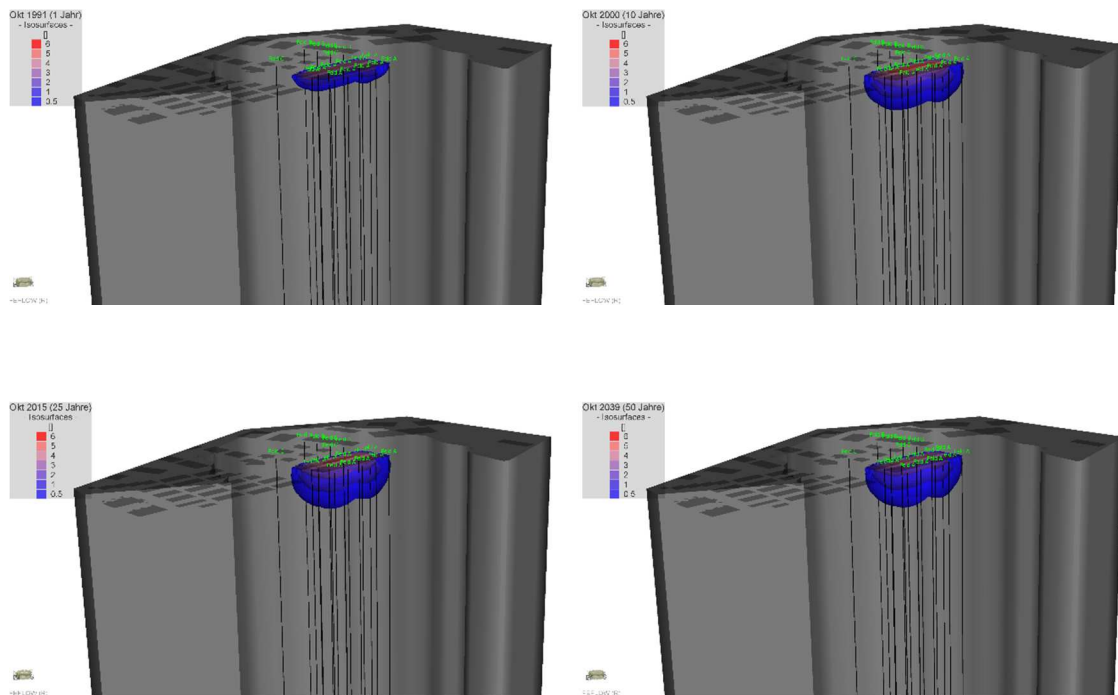


Abbildung 11: Temperaturänderung durch den Wärmeeintrag im Vergleich zum Referenzfall

Vergleichen wir die Fluidtemperaturen am Sondenkopf (Rücklauf der Sonde, Abbildung 12), werden zwar die höheren Temperaturen während des Stillstands der EWS sichtbar, die minimalen Temperaturen jeweils am Ende der jährlichen Betriebsphase sind aber nur marginal höher.

Das wird deutlich an einem Zoom in die letzten 5 Betriebsjahre (Abbildung 13).

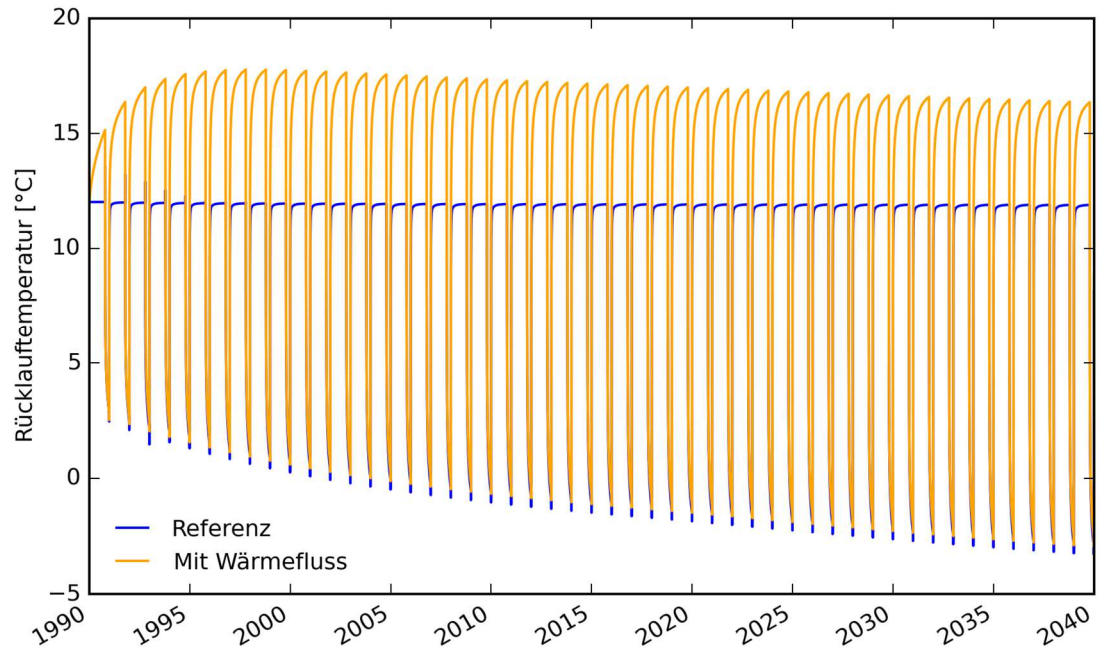


Abbildung 12: Rücklauftemperaturen der Sonde im Vergleich zum Referenzfall (blaue Linie)

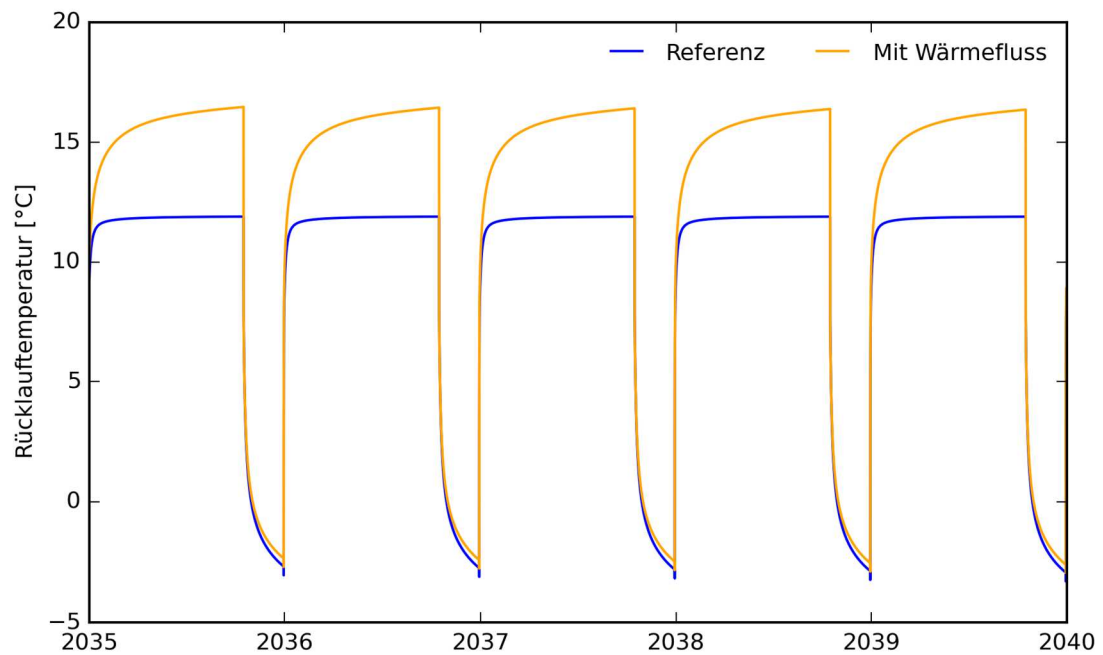


Abbildung 13: Zoom in die letzten 5 Betriebsjahre aus Abbildung 12

5 Schlussfolgerungen und Empfehlung

Die Untersuchungen zum Berichtsteil AP1 «Grenzabstände bei Erdwärmesonden - Untersuchungen zu neuen Bemessungs- und Planungsgrundlagen» haben deutlich gemacht, dass eine unkontrollierte Verdichtung des Wärmeentzugs in dicht bebauten Gebieten mögliche Konsequenzen bzgl. der Effizienz benachbarter EWS (Felder) haben kann. Zwei Faktoren, die dem entgegen wirken, sind bei den bisherigen Verfahren und Normen zur Dimensionierung von EWS nicht berücksichtigt worden: fliessendes Grundwasser und anthropogener Wärmeeintrag.

Der vorliegende Bericht fasst diese beiden Aspekte auf und versucht, einen quantitativen Einfluss der beiden Prozesse abzuschätzen, ohne auf lokale Gegebenheiten belastbar einzugehen. Vielmehr wird anhand einfacher Prozessmodelle ein Verständnis für die Effizienz der Prozesse entwickelt. Bei den Schlussfolgerungen aus diesen Modellrechnungen sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Die Kenntnisse der hydrogeologischen Verhältnisse tiefer oder nicht genutzter (weil gering ergiebiger) Grundwasserleiter sind stark eingeschränkt. Ausbreitung, hydraulische Durchlässigkeit und Fliessgefälle unterliegen extremen Unsicherheiten. Die hydraulische Durchlässigkeit ist – im Gegensatz zur thermischen Leitfähigkeit - logarithmisch normalverteilt und überstreicht in den entsprechenden Formationen etliche Grössenordnungen. Deshalb lassen sich einfache Auslegungsempfehlungen, z.B. für die betrachteten Gebiete im Birrfeld, nicht ableiten.
- Die Charakterisierung dieser Wässer ist i.A. nicht Gegenstand des Abteufens von Bohrungen zum Ausbau von EWS. Entsprechend wissen die Bohrer bestenfalls, dass „Wasser angetroffen wurde“.

Es ist wahrscheinlich, dass in relativ grossen Bereichen der Nord- und der Westschweiz EWS auch tiefes Grundwasser durchteufen. Wenn die hydraulische Durchlässigkeit dieser Kluftzonen oder Wechsellagerungen hinreichend hoch ist, dass eine Fliessgeschwindigkeit von mehr als 0.1 m/a oder höher stattfinden kann, ist der Beitrag zur Regeneration der EWS erheblich (mehrere Prozent). Es fehlen aber gegenwärtig verlässliche Angaben zur Charakterisierung der tieferen Grundwässer.

Für eine hydrogeologische Erkundung gibt es Standardverfahren, die in der Regel aber nicht beim Abteufen von Bohrungen für EWS zum Einsatz gelangen. Diese Verfahren setzen ein ausgebauten Bohrloch voraus. Der (zusätzliche) Aufwand dazu wird sich nur bei a) grösseren Anlagen (Feldern) und b) der Höffigkeit eines Grundwasservorkommens⁴ lohnen.

Die Verfahren zur Charakterisierung der thermischen Untergrundverhältnisse (TRT, EGRT) sind aufgrund ihrer Zielgrössen und Messkonzeption nur in Ausnahmefällen geeignet, durchströmte Bereiche zu detektieren und deren Beitrag zur langfristigen Regeneration zu quantifizieren. Eine Auslegung von EWS muss daher – wenn nicht die hydrogeologischen Verhältnisse am Standort bekannt oder erkundet sind – nach den konventionellen Verfahren unter Annahme eines ausschliesslich konduktiven Wärmezugs erfolgen. Dies ist konservativ und sichert die geplante Lebensdauer ohne Vereisung.

Der anthropogene Wärmeeintrag ist insbesondere in den Grosstädten mit dichter Bebauung und langer Tradition der Fernwärmetrassen und Abwässerkanalisation ein unbestrittener Fakt. Eine entsprechende Temperaturerhöhung kommt der Auskühlung des sondennahen Raumes entgegen. Auf die Auslegung von relativ flachen EWS kann sie positiv angerechnet werden. Bei EWS von deutlich über 100 m bleiben die Effekte während der Betriebsphase auf die Zirkulationstemperatur des Fluids sehr begrenzt; damit ist ein „Bonus“ (noch) nicht ableitbar. Entsprechend ist bei tiefen EWS auch der Einfluss der anthropogenen Erwärmung auf die gegenseitige

⁴ Für eine erste Prüfung sind bei den untiefen Grundwässern die kantonalen Gewässerschutzkarten eine gutes Mittel

Beeinflussung benachbarter EWS gering. Dies steht in Übereinstimmung mit den Berechnungen von Rivera et al. (2017), nach denen 200 m EWS mit Abständen von 10 m in urbanen Gebieten mit einer Oberflächenerwärmung von 5 K lediglich 3.1 W/m entzogen werden können (depletion rate; z.Vgl. ohne Erwärmung: 2.8 W/m).

Die zunehmende Verdichtung des Wärmeentzugs in dicht-bebauten Gebieten einerseits und die Zentralisierung von Versorgungslösungen durch EWS-Felder andererseits erzwingt und eröffnet vom Planer optimierte Konfigurationen, die entweder die Regeneration einschliessen oder eine standortkonkrete Erkundung rechtfertigen. Es besteht damit die Hoffnung, dass dieser Aspekt auch ein Gegenstand der anstehenden Diskussionen zur Revision der SIA-Norm 384/6 und der Erstellung der Europäischen Norm CEN/TC 451 wird.

6 Literatur

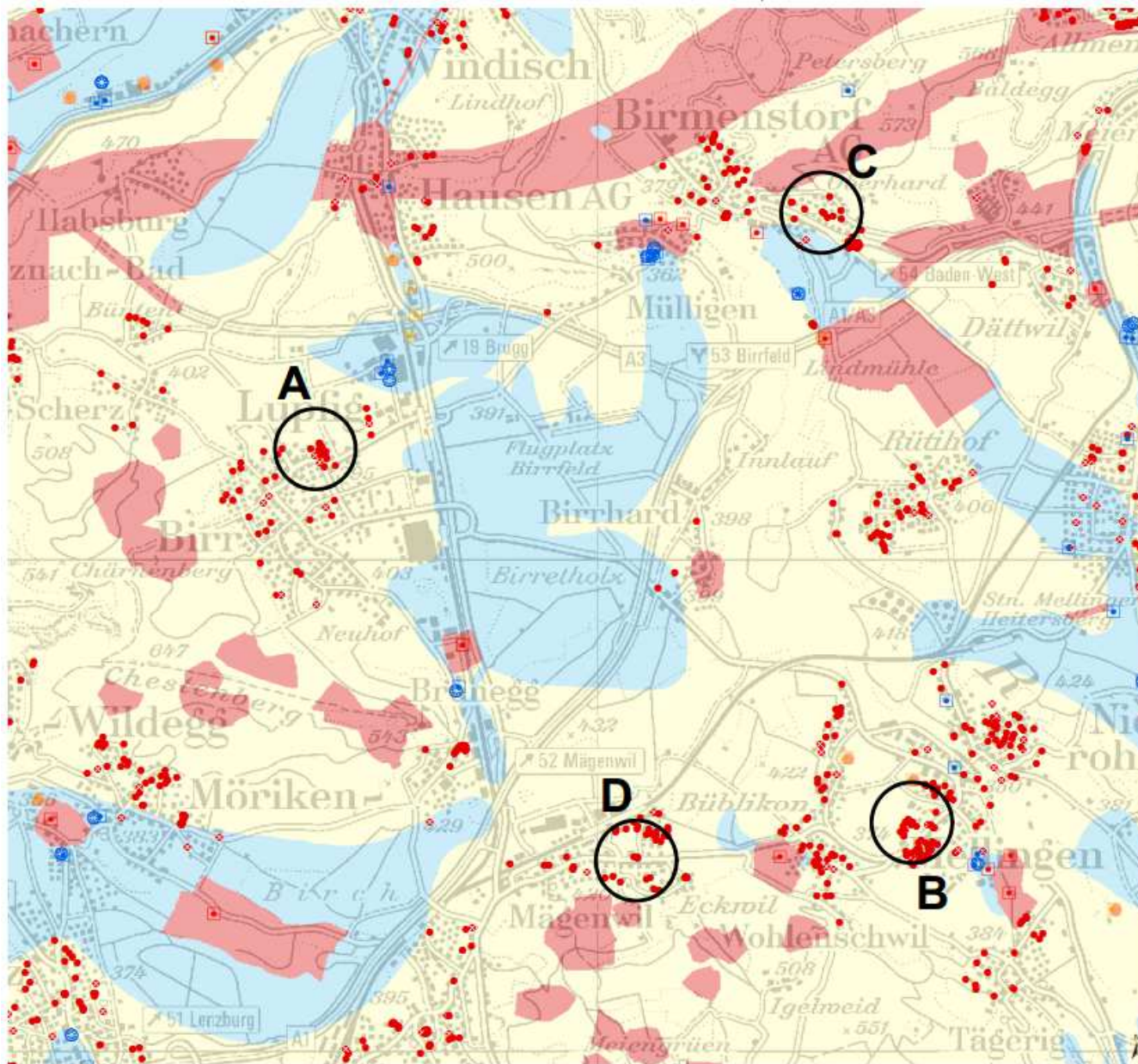
- [AF-Colenco 2011] Erdwärmesonden im Grundwasserbereich – Modell und Simulationsergebnisse; ME 1991/04.; im Auftrag des Kantons St.Gallen, Amt für Umwelt, 11.04.2011
- [Attard et al.] Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature, 2016, Science of the Total Environment
- [Barla et al. 2016] Application of energy tunnels to an urban environment, Geothermics 61 (2016) 104–113
- [Bayer et al. 2016] Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles. Geothermics 64(2016) 289–299
- [BFE 2014] Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz. Geowatt AG, Ausgabe 2014; energieschweiz
- [Eberhard 2005] Erdwärmesondenfeld Aarau, Schlussbericht Oktober 2005, DIS-Projekt Nr. 44'128, Eberhard & Partner AG Aarau
- [EED 2015] Earth Energy Designer; T. Blomberg et al.; Version 3.21, 2015
- [Epting et al. 2013a] Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – Definition of a potential natural state, Journal of Hydrology 501 (2013) 193–204
- [Epting et al. 2013b] Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1851–1869, 2013
- [FWS 2014] <http://www.fws.ch/statistiken.html>
- [Geothermie.CH 2015] www.geothermie-schweiz.ch/waerme/untief/definition-und-nutzen/
- [Hydrologischer Atlas der Schweiz 2004] <http://hydrologischeratlas.ch/de/produkte/druckausgabe/boden-und-grundwasser/tafel-8-6>
- [Köhler et al. 2015] Numerical evaluation and optimization of depth-oriented temperature measurement for the investigation of thermal influences on groundwater resources, Energy Procedia 76 (2015) 371 – 380
- [Maxil 2015] Heat modeling of wastewater in sewer networks, Determination of thermal energy content from sewage with modeling tools, Dissertation, 2015
- [Menberg et al. 2013] Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island, dx.doi.org/10.1021/es401546u, Environ. Sci. Technol. 2013, 47, 9747–9755
- [Nagra 1989] Durchlässigkeitsverhältnisse mittelländischer Molasse: Erste Annäherung an Schätzwerte. Schneider, J.F., Matousek, F. (1987); NIB 89-19. Nagra, Wettingen;
- [Nagra 2004] Geologie und Hydrogeologie der Oberen Süsswassermolasse, P. Gander, Nagra, NAB 04-04
- [Poppei, Fischer 1997] Theoretische und praktische Untersuchungen zur Auslegung von Erdwärmesonden im Lockergestein ...; 3. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen. Systeme zum Heizen und Kühlen; Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW), Karlsruhe, 1997
- [Revesz et al. 2016] Ground source heat pumps and their interactions with underground railway tunnels in an urban environment: A review, Applied Thermal Engineering 93 (2016) 147–154
- [Rivera et al. 2015a] Ground energy balance for borehole heat exchangers: Vertical fluxes, groundwater and storage; Renewable Energy 83(2015)1341–1351
- [Rivera et al. 2015b] Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers; Applied Energy 146(2015) 421–433

- [Rivera et al. 2017] Increased ground temperatures in urban areas: Estimation of the technical geothermal potential. *Renewable Energy* 103(2017) 388-400
- [SIA 384/6] Schweizer Norm SN 546 384/6; Schweizerischer Ingenieur.- und Architektenverein, 2010
- [Signorelli 2004] Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems; Diss. ETH No. 15519
- [Sinreich et al. 2012]: Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas* 9, 16-28
- [Voborny et al. 1993] Voborny O., Adank P., Hürlimann W., Thompson B.M.: Hydrogeologische Modellierung im Opalinus-Ton und in der Unteren Süsswasser-Molasse der Nordostschweiz. *Nagra NTB* 90-14
- [Zhu et al. 2010] The geothermal potential of urban heat islands; *Eviron. Res. Lett* 5(2010)044002; doi: 10.1088/1748-9326/5/4/044002

Anhang

Karten des DBVUAFU Birrfeld (16.12.2016):

- Eignungskarte (gelb: ohne Einschränkung)
- Grundwasserkarte (braun: Randzonen des (Haupt-)Grundwasserleiters)
- Festgesteinsaquifer (Verbreitung und Tiefenlage)
- Problemfälle



KANTON AARGAU

WASSERWEGSAMKEIT UM ERDSONDEN

DEPARTEMENT BAU, VERKEHR UND UMWELT

Kartenherstellung Aarau, 18.12.2016, AMC4

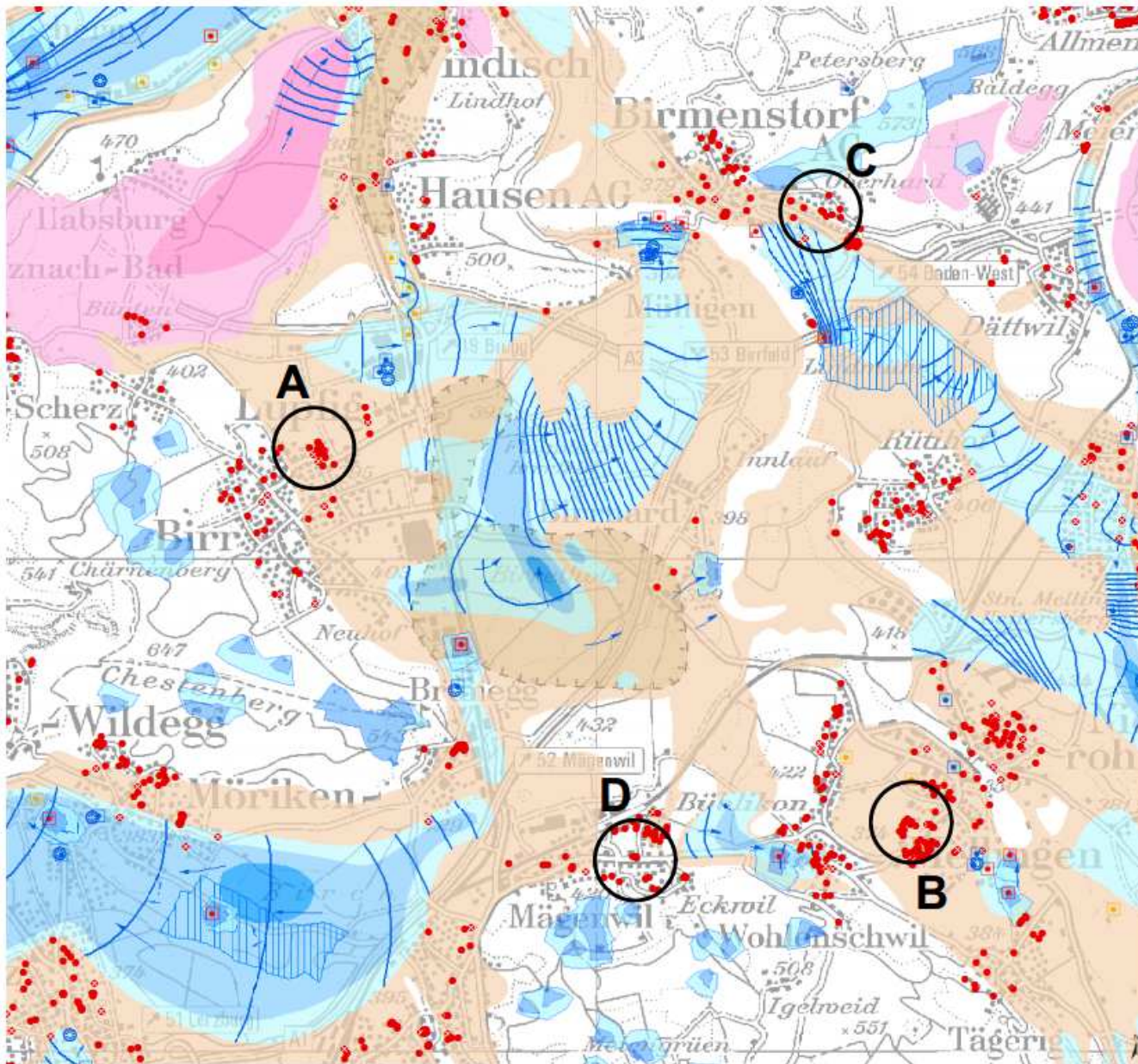
Stand 06.04.2014

- A: Bereich mit Festgesteins- und geringmächtigem Grundwasservorkommen
- B: Bereich mit geringmächtigem Grundwasser
- C: Bereich mit wasserführenden Festgesteinen
- D: kein Aquifer erwartet

0 0.75 1.5 km Massstab 1:20'000
Karte 420 • 297 mm (A3)

Dateiname H:\medMap_naq_MAIN.mxd
Quellen

agis



KANTON AARGAU

WASSERWEGSAMKEIT UM ERDSONDEN

DEPARTEMENT BAU, VERKEHR UND UMWELT

Kartenherstellung Aarau, 16.12.2016, AMC4

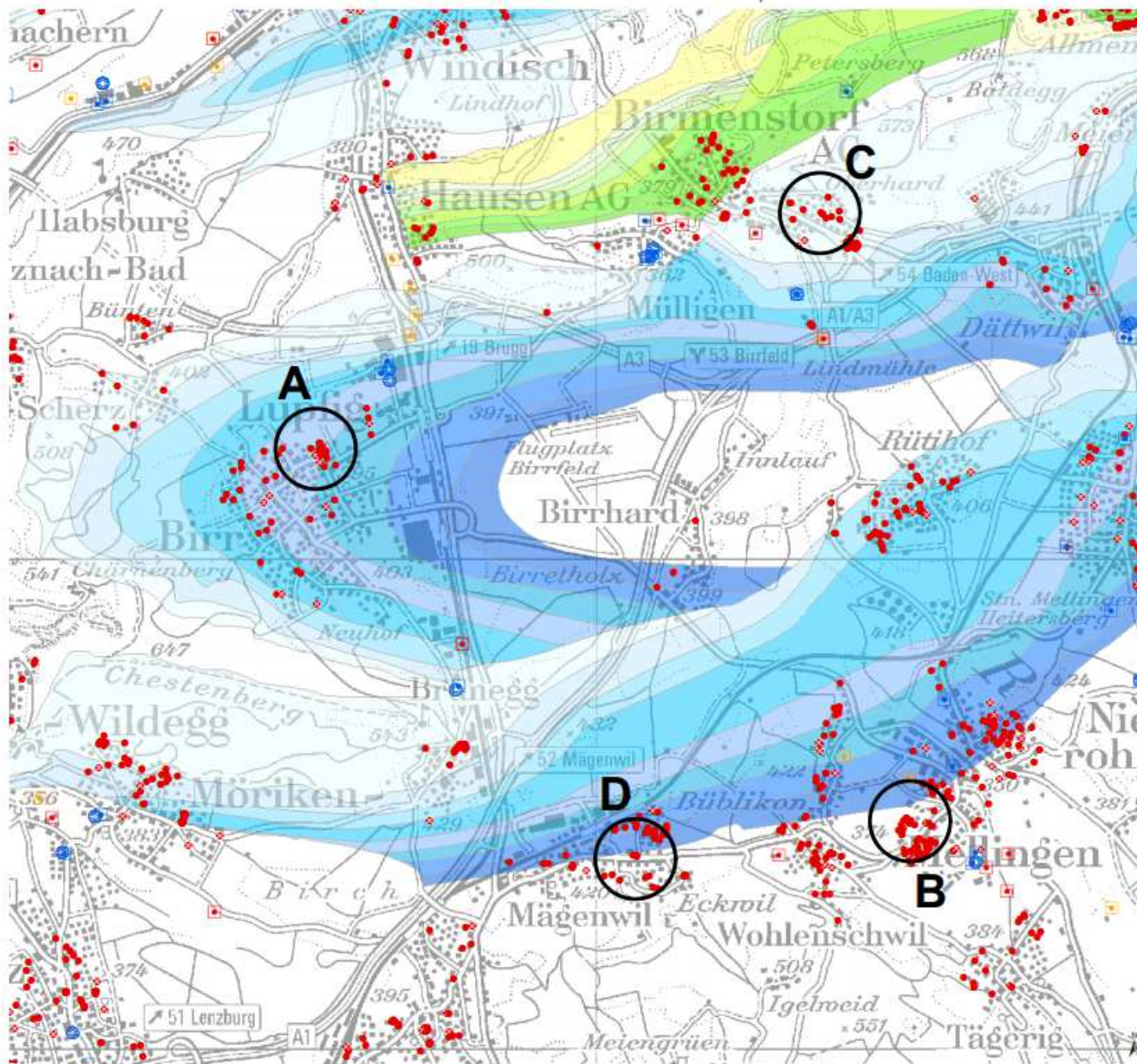
Stand 06.04.2014

- A: Bereich mit Festgesteins- und geringmächtigem Grundwasservorkommen
- B: Bereich mit geringmächtigem Grundwasser
- C: Bereich mit wasserführenden Festgesteinen
- D: kein Aquifer erwartet

0 0.75 1.5 km Massstab 1:30'000
Karte 420 x 297 mm (A3)

Dateiname H:\med\Map_naq_MAN.mxd
Quellen

agis



KANTON AARGAU

WASSERWEGSAMKEIT UM ERDSONDEN

DEPARTEMENT BAU, VERKEHR UND UMWELT

Kartenherstellung Aarau, 16.12.2016, AMC4

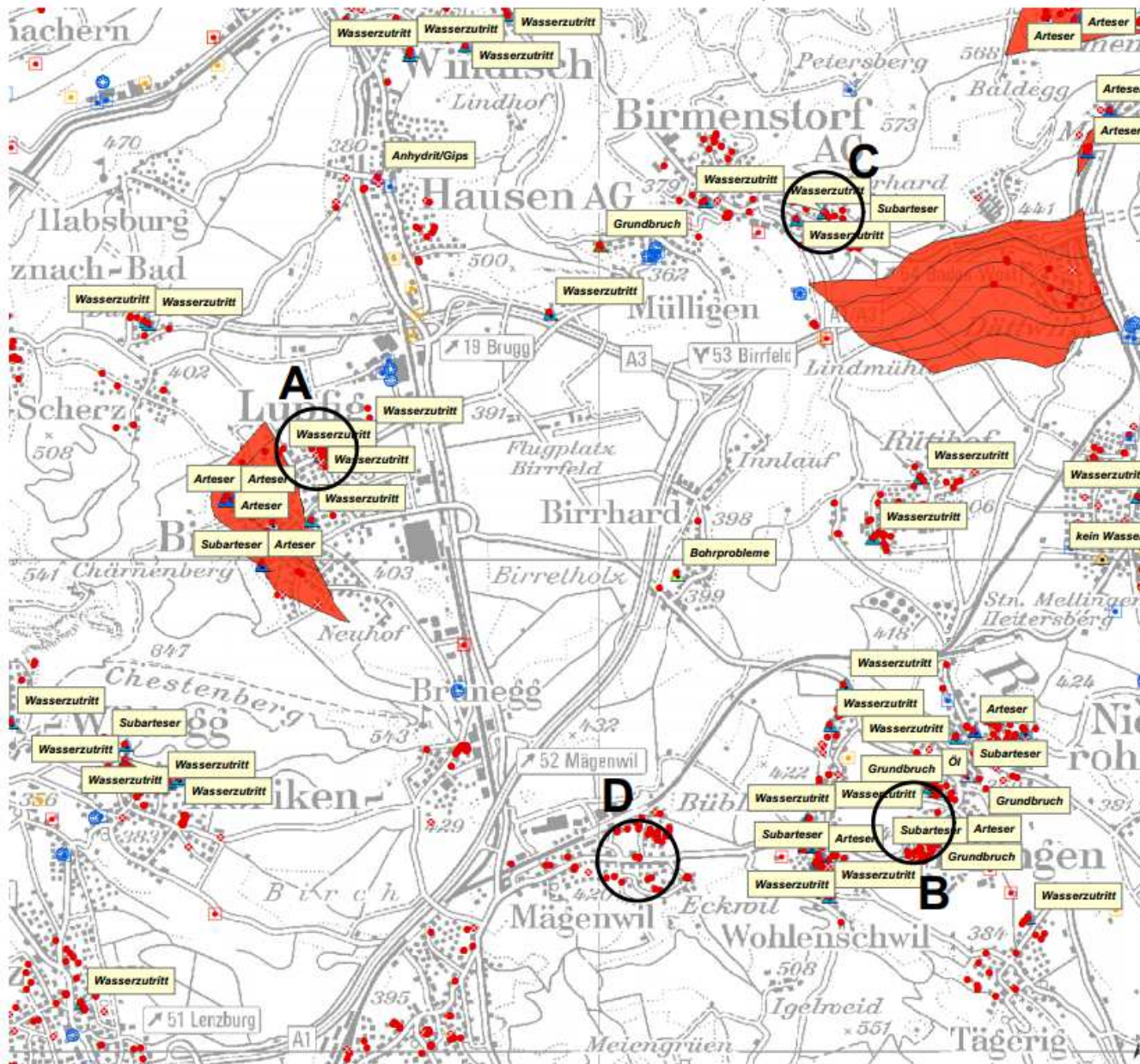
Stand 06.04.2014

- A: Bereich mit Festgesteins- und geringmächtigem Grundwasservorkommen
- B: Bereich mit geringmächtigem Grundwasser
- C: Bereich mit wasserführenden Festgesteinen
- D: kein Aquifer erwartet

0 0.75 1.5 km Massstab 1:30'000
Karte 420 x 297 mm (A3)

Dateiname HmfWap_maa_MAN.mxd
Quellen

agis



WASSERWEGSAMKEIT UM ERDSONDEN

DEPARTEMENT BAU, VERKEHR UND UMWELT

Kartenherstellung Azau, 16.12.2016, AMC4

Stand 06.04.2014

- A: Bereich mit Festgesteins- und geringmächtigem Grundwasservorkommen
- B: Bereich mit geringmächtigem Grundwasser
- C: Bereich mit wasserführenden Festgesteinen
- D: kein Aquifer erwartet



Dateiname H:\müllig_top_mae_MAR.mxd
Quellen



