



Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Gewässerschutz



Saisonale Wärmespeicherung im Grundwasser

14.09.2022

Verfasst von der IG Zyklus

GEOTEST GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE



Mit Unterstützung von



Impressum

Projektteam

Marco Ghelfi (AWEL, Sektion Grundwasser und Wasserversorgung)

Andrea Schildknecht (AWEL, Sektion Grundwasser und Wasserversorgung)

Beat Lehmann (AWEL, Abteilung Energie, Sektion Energietechnik)

Rita Kobler (BFE, Sektion erneuerbare Energien)

Dr. Ulrich Jörin (GEOTEST AG)

Dr. Vincent Badoux (GEOTEST AG)

Dr. Emanuel Huber (GEOTEST AG)

Leila Iseli (GEOTEST AG)

Christian Gmünder (Simultec AG)

Moritz Leutenegger (Simultec AG)

Patric Baggi (Gruenberg + Partner AG)

Alice Hefti (Gruenberg + Partner AG)

Inhalt

1. Einleitung und Ziele	5
2. Grundlagen und Literaturstudie	6
2.1 Vorgehen bei der Literaturstudie	6
2.2 Erfasste Publikationen nach Themen	6
2.3 Übersicht zu Wärmespeichersystemen	7
2.4 Beispiele von oberflächennahen Aquiferspeichern (ATES)	8
2.5 Variabilität der Grundwassertemperatur	9
2.6 Entwicklung der Grundwassertemperaturen in der Schweiz	11
2.7 Gesetzliche Vorgaben im europäischen Kontext	12
3. Charakterisierung der Grundwasserträger im Kanton Zürich	14
3.1 Grundlagen und Vorgehen	14
3.2 Aquifereigenschaften im Kanton Zürich	15
3.3 Folgerungen für thermische Grundwassernutzungen	17
4. Annahmen zu den Gebäudetypen	19
5. Modellierung mit bestehenden Grundwassermodellen	22
5.1 Einleitung	22
5.2 Beschreibung der Modelle	22
5.3 Ausgeführte Modellierungen	23
5.4 Resultate	26
5.5 Interpretation und Folgerungen	30
6. Modellierung mit einem synthetischen Modell	31
6.1 Einleitung	31
6.2 Vorgehen	31
6.3 Modellaufbau	33
6.4 Resultate	36
6.5 Interpretation und Folgerungen	46
7. Folgerungen	47
7.1 Erkenntnisse der Modellierungsstudie	47
7.2 Potential von Wärmespeicherung in oberflächennahen Aquiferen	48
7.3 Entwicklungsziele für Aquifer-Wärmespeicher	49
7.4 Integration von Nachhaltigkeit im Gewässerschutz	50
Referenzen	52

1. Einleitung und Ziele

Die Anzahl der Konzessionsgesuche für Grundwassernutzungen zu Heiz- und Kühlzwecken hat im Kanton Zürich in den letzten 10-15 Jahren stark zugenommen. Insbesondere im Bereich des Grundwasserstroms im Limmattal ist die Nachfrage nach Energienutzungen und anderen Nutzungen so hoch, dass die Ressource Grundwasser an Nutzungsgrenzen stösst. Die Grundwassertemperaturen in den Abstromfahnen der thermischen Anlagen überschreiten mancherorts fast den zulässigen Grenzwert. Die zunehmende Anlagendichte führt zu den vermehrten gegenseitigen Beeinflussungen der Anlagen und damit gebietsweise zu thermischen Kaskadeneffekten in Abstromrichtung. In diesen Kaskaden führen benachbarte Nutzungen zu Beschränkungen, in selteneren Fällen auch zu Erweiterungsmöglichkeiten bei Nachbaranlagen. Die Abhängigkeit neuer Nutzungen von bestehenden Anlagen bezüglich Betriebsmöglichkeit und Bewilligungsfähigkeit ist gestiegen. Dies birgt das Risiko, dass bei Wegfall oder Änderung einzelner Konzessionen ganze Kaskadensysteme aus dem Gleichgewicht geraten. Damit sind raumplanerische Aspekte, Prognosen zur Machbarkeit neuer Anlagen und der Wunsch nach einer sinnvollen Nutzung der Ressource Grundwasser in Zielkonflikten. Diese Konflikte führen zur Suche nach optimierten Nutzungskonzepten, verbesserten Prognoseverfahren und einem zuverlässigen Aquifer-Management.

Mit der vorliegenden Potentialstudie sollen Eigenschaften und Potential der saisonalen Wärmespeicherung in Rezirkulationsanlagen anhand von Modellrechnungen untersucht werden. Bei der Rezirkulationsanlage handelt es sich um eine Grundwasserwärmenutzungsanlage mit 'umgekehrter' Anordnung der Brunnen. Dies bedeutet, dass sich die Entnahmebrunnen im Abstrom der Rückgabebrunnen befinden. Zweck ist die gezielte, überwachte und gesteuerte Nutzung von rezirkulierendem Grundwasser und damit die räumliche Entflechtung von Nachbaranlagen mit einer Reduktion der gegenseitigen Beeinflussungen und Abhängigkeiten in einem Aquifer.

Im Kanton Zürich existiert bisher keine Rezirkulationsanlage. Mit der Grundwasserwärmenutzung für das ewz-Areal Herdern in Zürich befindet sich eine erste Anlage in der Planungs- und Bewilligungsphase. Mit dieser Pilotanlage sollen erste Erfahrungswerte gesammelt werden.

Ziel des hier erläuterten Projektes «Zyklus» ist, Rezirkulationsanlagen auf Basis von Modellrechnungen hinsichtlich geeigneter Anlagengrösse, geeigneter Parzellengrösse und der Nutzungsbilanz zwischen Heizen/Kühlen zu charakterisieren. Bei der Modellwahl wurde das Ziel verfolgt, die im Kanton Zürich vorkommenden Aquifereigenschaften möglichst realitätsnah abzubilden, um Rückschlüsse auf günstige Aquifertypen zu erhalten. Dazu standen einerseits zwei Modelle vom AWEL zur Verfügung, andererseits wurden synthetische Modelle mit einer grösseren Bandbreite an Aquifertypen generiert. Diese Potentialstudie hatte aber nicht zum Ziel, ein konkretes Gebiet oder ein Pilotfeld im Kanton Zürich zu evaluieren oder die Anwendung solcher Anlagen grundsätzlich zu propagieren. Vielmehr soll aufgezeigt werden, welche weiteren Entwicklungsschritte erforderlich sind, um eine gewässerschutzrechtlich korrekte Realisierung zu erreichen.

2. Grundlagen und Literaturstudie

2.1 Vorgehen bei der Literaturstudie

Ein Teilbereich der Studie bildet eine Literaturrecherche und Auswertungen zu vorhandenen Erfahrungen betreffend Aquiferwärmespeicherung in benachbarten Regionen bzw. im Ausland. In diesem Kapitel werden die Resultate der Literaturrecherche ausgewertet.

Im internationalen Kontext hat sich der Begriff ATES, Aquifer thermal energy storage, durchgesetzt. Im Folgenden wird ATES und Aquiferspeicher als allgemeiner Überbegriff für solche Systeme verwendet. Falls nötig, werden genauere Bezeichnungen verwendet, z.B. untiefe Aquiferspeicherung für Systeme bis 400 m Tiefe.

In einem ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche in öffentlich zugänglichen Archiven und mit Abfragen von typischen Stichworten wie ATES, Wärmespeicherung, Grundwassertemperaturen, etc. durchgeführt. Danach wurde die Literatur ausgewertet im Hinblick auf eine weitere Verwendung und die Aufnahme in das Literaturverzeichnis dieser Studie. Dabei wurde der Fokus auf einige neuere Publikationen gelegt, welche das Thema in der Breite und mit aktuellen Beispielen behandeln. In diesem Bericht sind somit nicht sämtliche ausgewerteten Publikationen aufgeführt.

Die Literatur wurde für die Ausarbeitung des Berichtes intensiv benutzt. Der Bericht enthält aber nur wo nötig Literaturzitate, um eine einfache Lesbarkeit anzustreben.

2.2 Erfasste Publikationen nach Themen

Insgesamt wurden über 60 Publikationen in den Datenbanken gefunden und gesichtet. Die Publikationen lassen sich den folgenden Themenbereichen zuordnen:

- Lehrbücher zu Geothermie oder ATES
- Fallbeispiele von realisierten ATES
- Konzeptionelle Studien zum Design von ATES
- Modellierungen zur Effizienz und Wirtschaftlichkeit von ATES
- Untersuchungen zu Auswirkungen von Wärmespeicherung im Untergrund

Zudem wurden gezielt Publikationen zu den Grundwassertemperaturen und zu den gesetzlichen Vorgaben bei Grundwasserwärmenutzungen ausgewertet.

2.3 Übersicht zu Wärmespeichersystemen

Grundlagen zur Grundwassernutzung und Wärmespeicherung im Untergrund sind in den generellen Lehrbüchern [1]–[3] enthalten. Der Untergrund lässt sich als Wärme- resp. Kältespeicher verwenden, um die Nutzung einer gewonnenen Wärme resp. Kälte aufzuschieben bis Bedarf besteht [4]. So kann beispielsweise im Sommer einem Gebäude Wärme entzogen und in den Untergrund eingebracht werden, um diese Wärme im Winter z.B. für Heizzwecke wieder zurückzuholen. Der englische Begriff «Aquifer thermal Energy Storage», abgekürzt als *ATES*, beschreibt die Energiespeicherung (Wärme oder Kälte) in einem Aquifer [4].

Grundsätzlich kann für ein *ATES* das Grundwasser mit einem Bohrloch (sog. Singlette) oder mit einer Dublette (2 Brunnen) erschlossen werden. Bei einer Singlette werden zwei unterschiedliche Grundwasserstockwerke erschlossen. Bei der Anordnung als Dublette erfolgen die Entnahme und Rückgabe des Grundwassers in zwei unterschiedlichen Brunnen. Da in der Schweiz gem. [5] das genutzte Grundwasser vollständig in denselben Grundwasserleiter zurückzugeben ist, werden in der vorliegenden Studie nur Dublette Anordnungen betrachtet (s. Abbildung 1 aus [6]). In der Regel wird beim Doubletten-System die Fliessrichtung der Entnahme und Einspeisung des Grundwassers je nach Winter- oder Sommersaison umgekehrt, weshalb das System auch als bidirektional bezeichnet wird. Es gibt aber auch sogenannte monodirektionale Systeme [7].

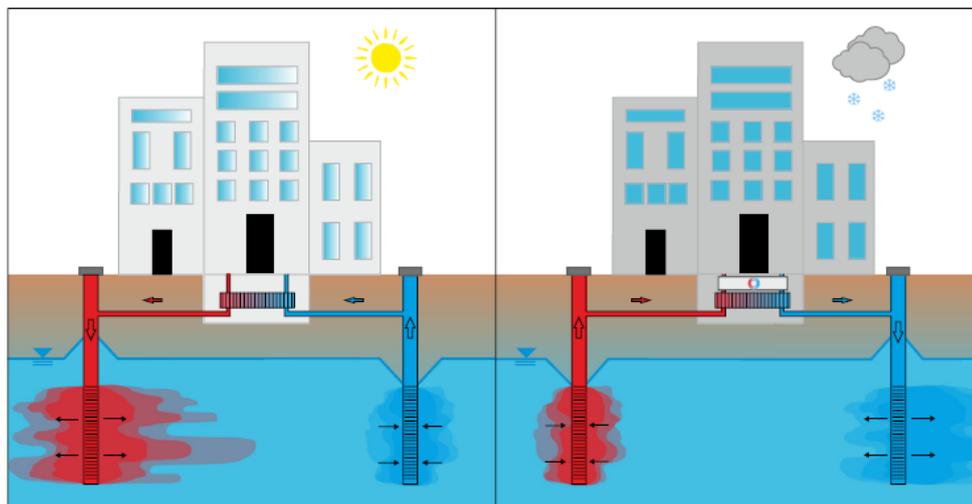


Abbildung 1 Prinzip einer *ATES* Anlage mit Doublette und bidirektionalem Betrieb (Grafik aus [6]. Links ist der Sommer- und rechts der Winterbetrieb dargestellt.

Eine hydrogeologische Voraussetzung für den bidirektionalen Betrieb der Anlage ist eine sehr geringe Grundwasserströmung im Ruhezustand, damit die gespeicherte Energie nicht durch die natürliche Grundwasserzirkulation vom Förderbrunnen weg transportiert wird. Dies ist z.B. in den flachen Küstenregionen in Nordeuropa der Fall. Im Schweizer Mittelland weist die natürliche Grundwasserströmung in den Aquiferen entlang der Hauptflusstäler eine vergleichsweise hohe Geschwindigkeit auf und eine stationäre Wärmespeicherung ist deshalb im Grundwasser nicht möglich.

Die Energiespeicherung im Grundwasserträger wird als offenes System bezeichnet, da das Wasser vom Aquifer in den Förderbrunnen strömt und nach der Nutzung wieder in den Aquifer zurück gepresst wird und dann im Untergrund zirkuliert.

Die ATES Systeme werden anhand ihrer Speichertemperatur in Niedrigtemperatur (NT)- und Hochtemperatur (HT)-Systeme unterteilt. Die NT-Systeme werden oft über die maximale Speichertemperatur von bis zu 25 °C (selten bis zu 40 °C) definiert [6]. HT-ATES werden als solche ab einer Speichertemperatur von ca. 50 °C bezeichnet [6].

Vorteile und Nachteile von ATES sind in den Fallbeispielen und summarisch z.B. in [6] aufgeführt. Je nach Anlagengrösse und energiepolitischen Randbedingungen werden ATES als sehr kostengünstig (schnelle Amortisation und günstige Energiequelle) oder als aufwändig (schwierige Verfahren, Erschliessungskosten etc.) beurteilt. Diese regional unterschiedlichen Voraussetzungen haben auch zu Variationen im Anlagenkonzept geführt. Eine Möglichkeit die Energiespeicherung im Aquifer zu optimieren sind Anlagen mit mehreren Brunnen oder besondere Pumpregimes: So wurden Anlagen als Rezirkulationssysteme oder als saisonale Kreislaufsysteme vorgeschlagen und auch realisiert.

Ein Schema mit einer Rezirkulationsströmung ist in Abbildung 2 visualisiert (modifiziert nach [8]).

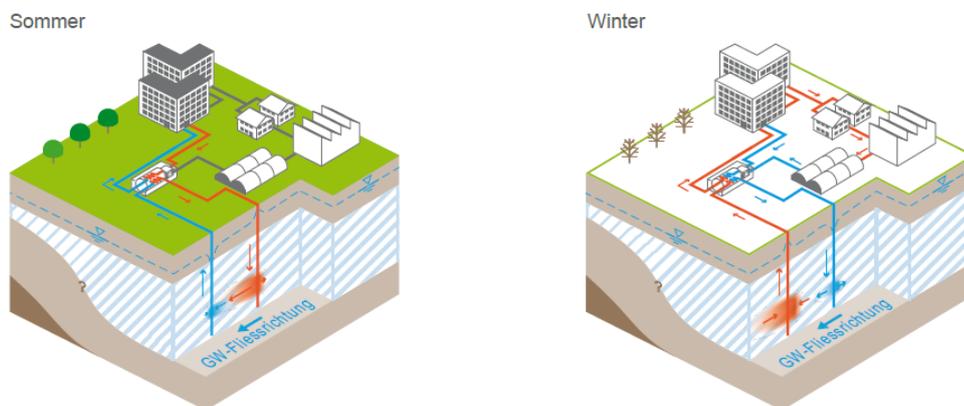


Abbildung 2 Kontinuierliche Strömung mit saisonal wechselnder Temperaturnutzung: Kühlung im Sommer und Heizen im Winter

2.4 Beispiele von oberflächennahen Aquiferspeichern (ATES)

Die globalen Anwendungen und Risiken von ATES Systemen werden in [9] zusammengefasst. ATES werden bereits seit den frühen 1970er Jahren weltweit getestet, modelliert und gebaut [9]. Weltweit wurden zwischen 1974 und 1991 an 25 Standorten (2 davon in der Schweiz) ATES Tests durchgeführt [9]. Basierend auf dem Fachartikel [9] wurden in den folgenden Ländern frühe ATES Tests durchgeführt: USA (6), die Schweiz

(2: Colombier und Lausanne-Dorigny), Frankreich (6), Kanada (2), Japan (2), Schweden (1), Deutschland (2), die Niederlande (3) und Dänemark (1).

In der Folge wurden ATES regional unterschiedlich häufig realisiert. In der Publikation von [9] wurden über 2'800 ATES Systeme weltweit bis zum Jahr 2020 erfasst. Führend in der Anzahl erfolgreich umgesetzter ATES Anlagen sind die Niederlande (2500 Anlagen), gefolgt von Schweden (220 Anlagen) und Dänemark (55 Anlagen). Die Gründe für eine geringe Verbreitung in der Praxis sind nicht systematisch untersucht. Vermutlich sind je nach Region verschiedene Ursachen dafür verantwortlich. Eine mangelnde Wirtschaftlichkeit trifft für die Anlagen in den Niederlanden, Deutschland und Schweden nicht zu, da diese eine rasche Amortisation aufweisen und so günstige Energie liefern können.

Fazit: Global wurden ATES-Systeme seit den 1970er Jahren untersucht. Nur in wenigen Ländern haben sich ATES-Anlagen in der Praxis verbreitet. Dies hängt auch mit den hydrogeologischen Verhältnissen zusammen: Einfach steuerbare Anlagen setzen flache Grundwasserspiegelgradienten voraus, wie sie vorzugsweise in sandigen Küstenregionen vorkommen. Bisher galt in Flussaquiferen eine Wärmespeicherung als wenig erfolgsversprechend, weil die Kontrolle des Systems im Vergleich zu einfachen Verhältnissen als Hindernis angesehen wurde (z.B.[10]).

2.5 Variabilität der Grundwassertemperatur

Der Bereich von Grundwassertemperaturen in Europa reicht von knapp über 0°C bis zu 20 °C (s. Abbildung 3 aus [11]).

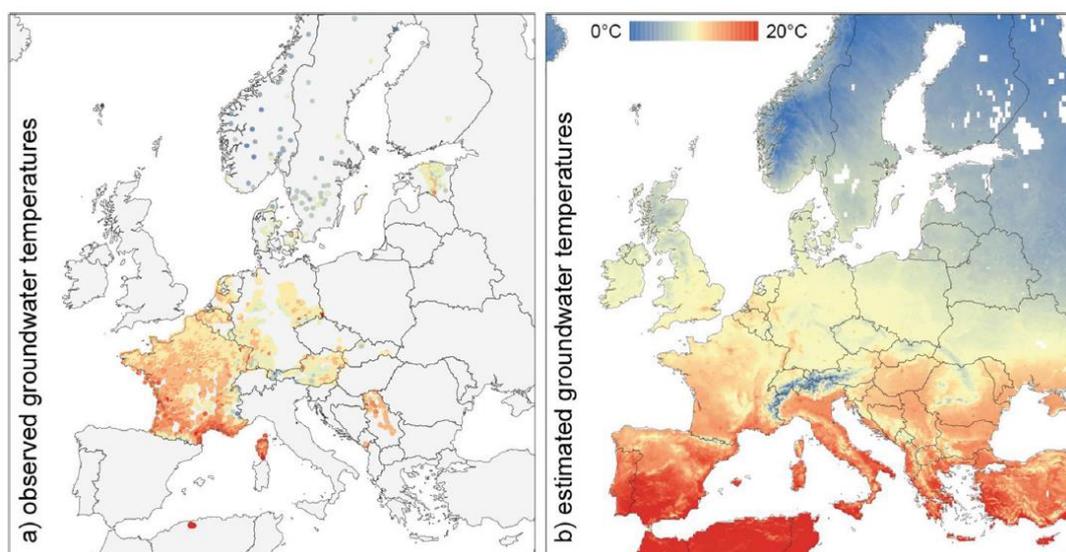


Abbildung 3 Gemessene (a) und abgeschätzte Grundwassertemperaturen in Europa aus [11].

Die Qualität des Grundwassers hängt stark mit der Temperatur respektive mit seinem Chemismus zusammen. Die Löslichkeit von Ionen und Molekülen sind stark Temperatur-abhängig. In der Schweiz wird das Naqua-Messnetz zur qualitativen Grundwasserüberwachung durch das BAFU betrieben [12].

Bei der Auswertung von Grundwasserüberwachungsstellen in Deutschland wurde von T. Riedel [13] der Effekt auf Qualitätsänderungen von Temperaturveränderung evaluiert. Die Messungen erfolgten im Grundwasser mit Temperaturen zwischen 5 °C und 20 °C [13]. Generell hatten die Proben einen tieferen pH-Wert und eine tiefere Sauerstoffsättigung bei höheren Temperaturen [13]. Die Parameter gelöster organischer Kohlenstoff, Kalium, Fluorid, Mangan, und Kohlendioxidpartialdruck zeigten den umgekehrten Trend, d.h. die Konzentrationen nahmen bei steigenden Temperaturen zu [13]. Die Organismen im Grundwasser sind zum grössten Teil auf den Sauerstoff angewiesen. Bei der Erwärmung des Grundwassers verringert sich die Sauerstoffsättigung und damit ändert sich auch die Fauna [13]. Bei der Nutzung von Grundwasser als Trinkwasser entsteht bei permanent höheren Grundwassertemperaturen einer höherer Aufwand für die Qualitätssicherung, sei es durch Monitoring oder Massnahmen zur Reinigung des Wassers.

Bei Erhöhung der (Grund-) Wassertemperatur steigt auch das Potential zur Ausfällung von Kalziumkarbonat (Englisch: «Calcium Carbonate Precipitation Potential», CCPP) [14]. Aus der Abbildung 4 wird deutlich, dass unbehandeltes Grundwasser («untreated groundwater», roter Graph) bei höheren Temperaturen ein höheres Potential hat, Kalziumkarbonat auszufällen.

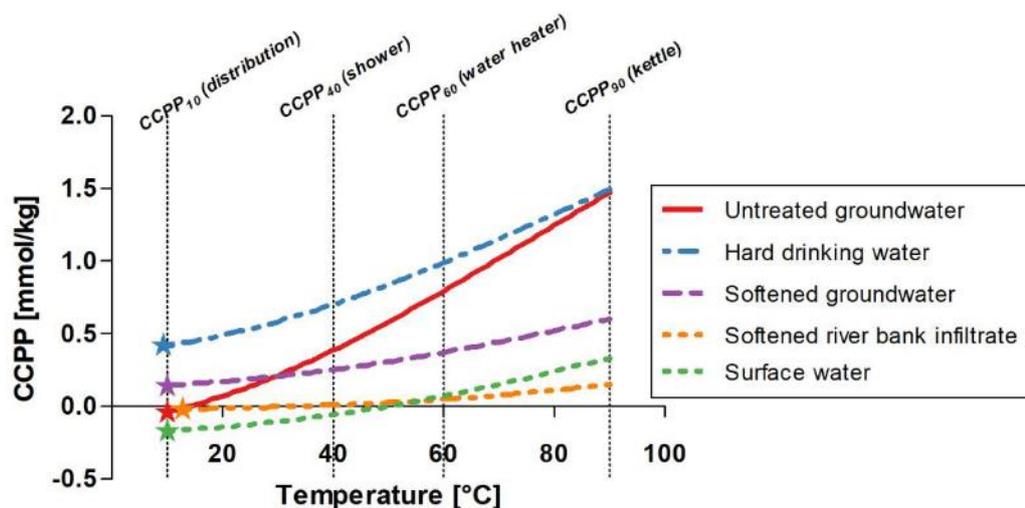


Abbildung 4 Kalziumkarbonat-Ausfällungspotential (CCPP) als Funktion von steigender Temperatur aus [14].

Fazit: In Europa liegen die Grundwassertemperaturen zwischen wenig über 0°C im Norden und bis zu knapp 25°C im Süden. In allen Regionen wird Grundwasser auch zu Trinkwasserzwecken gefördert, wobei heute in allen Regionen Europas i.d.R. eine Aufbereitung zur Sicherstellung der Wasserqualität angewandt wird. Veränderungen in der

Grundwassertemperatur haben Auswirkungen auf eine Vielzahl an Prozessen. Das Ausmass hängt sowohl vom Umfang der Temperaturveränderung als auch vom absoluten Temperaturniveau ab. Temperaturveränderungen von 5-10 K im Bereich zwischen 5 und 25 °C haben relativ geringe Auswirkungen im Vergleich zu Veränderungen von 20 bis 40 °C oder noch höheren Grundwassertemperaturen.

2.6 Entwicklung der Grundwassertemperaturen in der Schweiz

Verschiedene Forschungsprojekte haben den Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasservorkommen untersucht. Im Bericht des NCCS «Die Klimaszenarien für die Schweiz» [15] wird für die nächsten Jahrzehnte (2050 – 2080) eine Erwärmung der Atmosphäre je nach Szenario um 3 – 6°C und eine Veränderung der saisonalen Niederschlagsmengen prognostiziert. Je nach Aquifer ist der Anteil an Grundwasserneubildung durch Versickerung oder durch Infiltration von Fluss- oder Seewasser stark variabel. Ein Aquifer mit hoher Infiltration von stärker erwärmtem Seewasser wird sich stark erwärmen, während ein von Flussinfiltrat abhängiger Aquifer gedämpft reagieren wird. Die relevanten Prozesse sind in der Abbildung 5 gem. BAFU-Bericht Nr. 2101 [16] visualisiert.

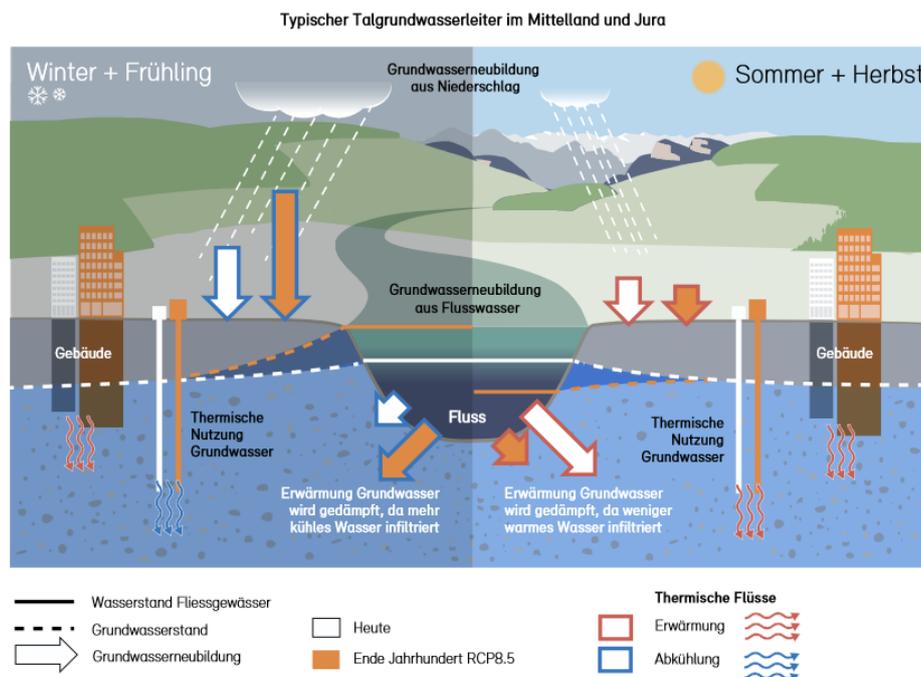


Abbildung 5 Wärme- und Kälteflüsse ins Grundwasser aus «Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer...», BAFU [16].

Der Klimawandel wird sich deshalb nicht gleichmässig auf die Grundwassertemperaturen auswirken. Aktuelle Prognosen gehen von einer Erwärmung der Grundwassertemperaturen um 1 bis 3 °C bis 2050 aus. In urbanen Gebieten wird der Effekt der Gebäudeabwärme einen verstärkenden Einfluss haben.

Fazit: Mit dem Klimawandel und infolge urbaner Abwärme werden sich die Grundwassertemperaturen in den nächsten Jahrzehnten um einige °C erhöhen.

2.7 Gesetzliche Vorgaben im europäischen Kontext

Zur Zeit gibt es nur in sechs europäischen Ländern rechtskräftige Gesetzgebungen über die Grenzwerte von Grundwasserwärmepumpen [17]. Die Gesetzgebung der folgenden Länder sind in der Tabelle 1 zusammengefasst: Österreich, Dänemark, Frankreich, Liechtenstein, die Niederlande und die Schweiz.

Tabelle 1 Rechtskräftige Grenzwerte für offene geothermische Systeme aus [17].

Land	Differenz der Grundwassertemperatur (°C)	Maximale Grundwassertemperatur (°C)	Minimale Grundwassertemperatur (°C)
Österreich	± 6	20	5
Dänemark	-	25	2
Frankreich	-	<32	-
Die Niederlande	-	25	5
Liechtenstein	- 3 / + 1.5	-	-
Schweiz	± 3	-	-

Offensichtlich gibt es zwei Ansätze für die Begrenzung der Grundwassertemperaturen: Eine Möglichkeit ist, die maximal und minimal zulässige Temperatur vorzugeben. Dazwischen gibt es eine Bandbreite, welche für die Energienutzung zur Verfügung steht. Die absoluten Temperaturen richten sich nach den geographischen bzw. klimatischen Voraussetzungen: nördliche Länder akzeptieren tiefere maximale Temperaturen als z.B. das südlichere wie Frankreich, wo die maximal zulässige Grundwassertemperatur auf 32°C beschränkt wird.

Als zweite Möglichkeit einer Begrenzung der Grundwassertemperaturen kann die Abweichung von der natürlichen Temperatur begrenzt werden. Dieser Regulierungsansatz

gilt in der Schweiz, indem die Gewässerschutzverordnung in Art. 31 vorschreibt, dass die Grundwassertemperatur im Umkreis von 100 m einer Grundwassernutzung maximal 3 °C von der natürlichen Grundwassertemperatur abweichen darf [18].

Fazit: In Europa kennen erst wenige Länder eine rechtskräftige Vorgabe der Grundwassertemperaturveränderungen bei thermischen Grundwassernutzungen. Die Regelung in der Schweiz ist im Vergleich mit den benachbarten Ländern als vorsichtig einzustufen.

3. Charakterisierung der Grundwasserträger im Kanton Zürich

3.1 Grundlagen und Vorgehen

Als Grundlage dient die Grundwasserkarte des Kantons Zürich [19] mit den Angaben zur Mächtigkeit der Aquifere und den Isohypsen des mittleren Grundwasserspiegels.

Auf der Karte wurden Aquifere im Bereich von Siedlungsflächen oder in deren unmittelbarer Nähe ausgewählt und die folgenden Kennwerte erhoben:

- Mächtigkeit des Aquifers
- Gradient des Grundwasserspiegels (bei mittlerem Wasserstand)

Anhand von Referenzbohrungen und regionalen Kenntnissen wurden die hydraulischen Durchlässigkeiten als Profil-K-Werte erfasst.

Aus den 18 Region (s. Abbildung 6) mit insgesamt 106 Abschätzungen wurden die Bandbreite der Werte, die Häufigkeitsverteilungen und die Mittelwerte statistisch ermittelt. Basierend auf diesen Auswertungen wurden typische Aquifere, welche im Kanton Zürich häufig vorkommen oder eine relevante Ausdehnung aufweisen, abgeleitet. Diesen können Aquifereigenschaften zugewiesen werden, welche für die Modellierungen benötigt werden.

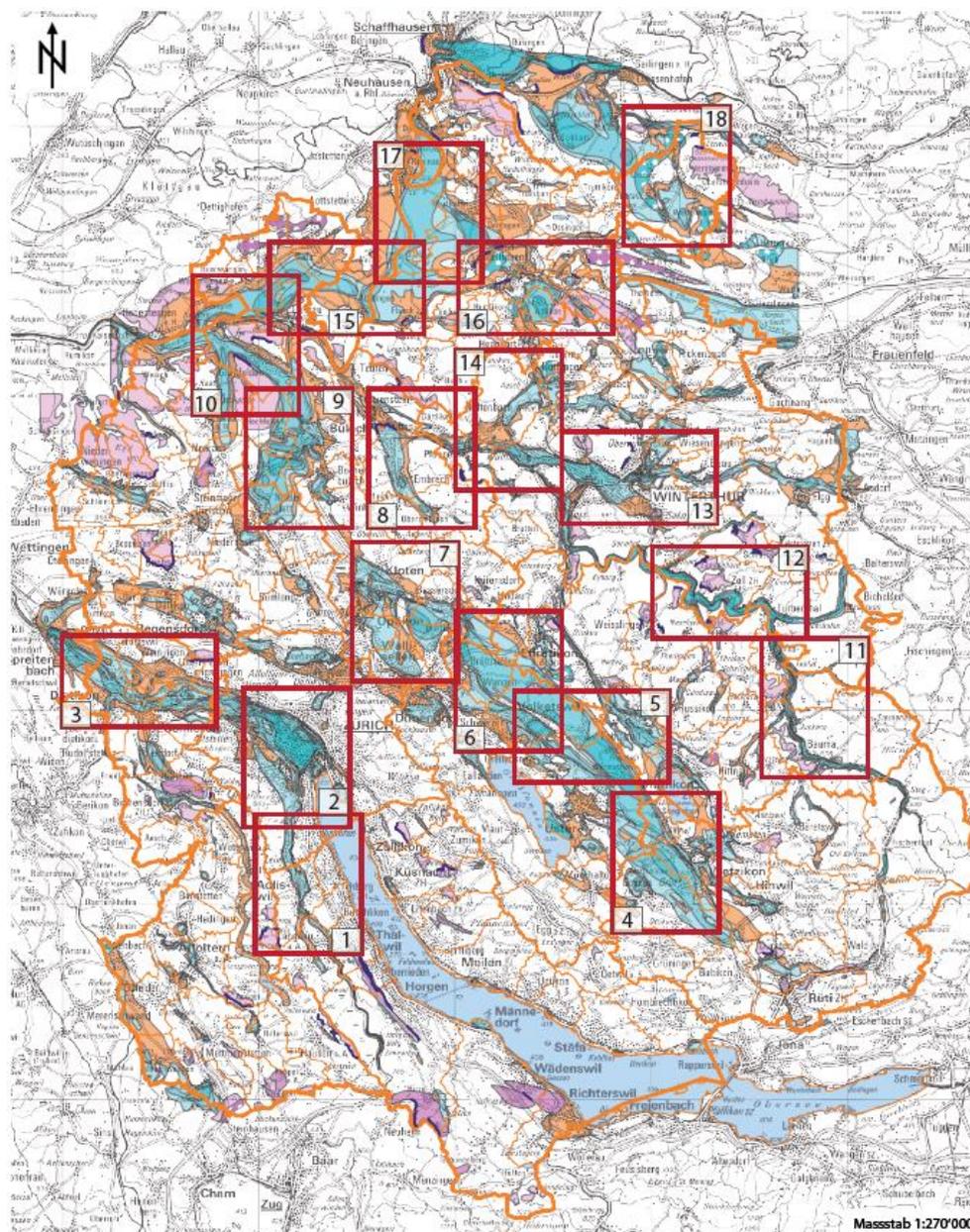


Abbildung 6 Grundwasserkarte Kanton Zürich, 18 erfasste Regionen in den roten Rechtecken.

3.2 Aquifereigenschaften im Kanton Zürich

Jede der 18 Regionen wurde an 2-10 Stellen ausgewertet. Insgesamt wurden 106 Auswertungen vorgenommen. Es wurden jeweils die folgenden Parameter erfasst oder

ausgewertet: Gebiet Nummer, Lokalität, mittlere Koordinaten des Gradienten, Mächtigkeit, Gradient des Grundwasserspiegels und mögliche Zusatzinformationen, wie z.B. schlecht durchlässige Deckschicht oder artesisches Grundwasser.

Tabelle 2 Beispiel Erfassung Grundwasserparameter.

Karten_Namen	Gebiet Nr.	Lokalität	mittlere Koordinaten Gradient	Mächtigkeit (m)	Gradient	Notizen
12_Grundwasser_i1_ZellZH_Turbenthal	i 5	Turbenthal (E)	2'707'067/1'254'653	10-20	0.0155	Schlecht durchlässige Deckschicht von meist mehr als 5 m.
03_Grundwasser_n1_Dietikon_Schlieren	n 1 & n 33	Dietikon	2'672'487/1'251'136	2-20	0.0018	Gradient über 2 versch. Mächtigkeiten (2-10 m und 10-20 m)

Basierend auf den Auswertungen wurden die Parameter Mächtigkeit und Gradient in klein (2-10 m; <0.002), mittel (10-20 m; 0.002-0.01) und gross (> 20 m; 0.01-0.026) aufgeteilt. Die Häufigkeitsverteilungen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

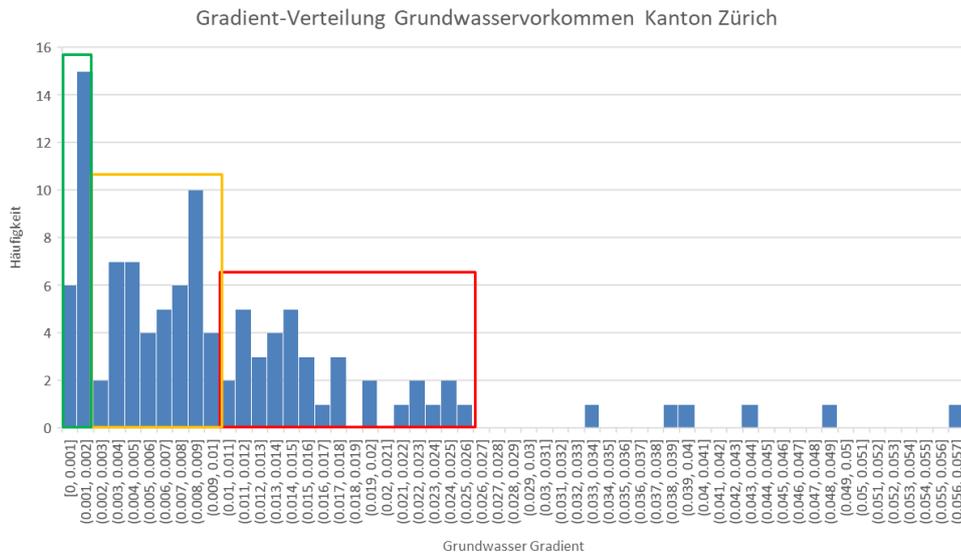


Abbildung 7 Verteilung der Gradienten bei mittlerem Grundwasserspiegel

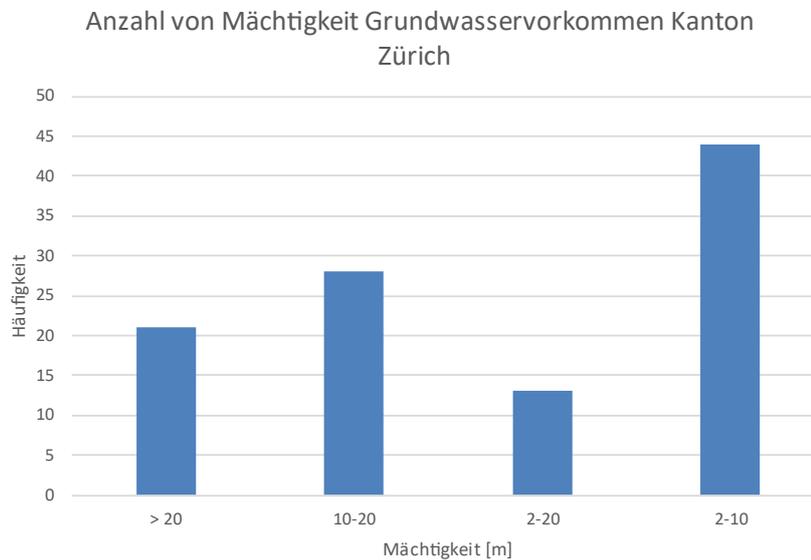


Abbildung 8 Häufigkeiten der Aquifere je Mächtigkeitsstufe

3.3 Folgerungen für thermische Grundwassernutzungen

Diese einfache Auswertung zu den Grundwasservorkommen repräsentiert die Vorkommen stichprobenartig. Damit wurde nicht ein flächenmässig gewichtetes oder strikt statistisches Verfahren angewandt. Dennoch lassen sich einige interessante Erkenntnisse ableiten:

Eine hohe Anzahl der Aquifere weist für Schweizer Verhältnisse einen relativ geringen Gradienten des Grundwasserspiegels von 0.001 bis 0.002 auf. Diese «flachen» Gradienten sind aber immer noch steil im Vergleich zu den Küstenregionen in Nordeuropa, wo Gradienten im Bereich von 0.0001 – 0.005 dominieren. Dieser Unterschied erklärt vermutlich, warum bisher vor allem in den flachen Küstenregionen Anlagen mit Wärmespeicherung in Aquifere erstellt wurden, da die Kontrolle des Wärmespeichers bei geringen Gradienten einfacher ist.

Die Mehrheit der Gefälle in Zürich liegt im Bereich von 0.002 bis 0.01. Dies hängt mit der Topographie der «typischen» mittelländischen Flusstäler zusammen. Steilere Gradienten kommen zwar auch häufig vor, diese sind aber meist an randlichere oder kleinere Aquifere gebunden, wo geringere Durchlässigkeiten bzw. eine steilere Topographie vorherrschen.

Die Mächtigkeiten der Aquifere im Kanton Zürich weist ein breites Spektrum auf. Dabei ist zu beachten, dass die Grundwasserkarten gebietsweise stark interpoliert sind und teilweise die lokale Mächtigkeit bzw. die wirklich fassführenden Schichten nicht im Detail erkundet sind. Trotzdem weist eine grosse Anzahl an Aquiferen eine grosse Mächtigkeit auf, was hinsichtlich einer Wärmespeicherung günstig ist, da so potentiell sehr hohe Energiemengen je Flächeneinheit durch Grundwasser erschliessbar sind.

Fazit: Im Kanton Zürich kommen überraschend viele Aquifere mit günstigen Eigenschaften hinsichtlich Wärmespeicherung vor. Noch nicht untersucht wurde, wie stark diese Aquifere bereits genutzt sind und wieviel die Überlappung mit Bauzonen beträgt.

4. Annahmen zu den Gebäudetypen

Gemäss Konzept ist das Potential von Grundwassernutzungen für drei Grössen und unterschiedlichen Nutzungen von Gebäuden zu untersuchen. Die drei Klassen orientierten sich an folgenden Heizleistungen und Nutzungen:

Gebäudetyp 1: Mehrfamilienhaus 60 kW

Gebäudetyp 2: Gewerbe- Verwaltungsbau 250 kW

Gebäudetyp 3: Bürobau 750 kW

Für die Modellierung von Grundwassernutzungen werden konkrete Energieprofile benötigt. Dazu wurden für die drei Gebäudetypen Szenarien entwickelt und anhand von Erfahrungswerten der Energiefluss je Monat ermittelt.

Da zu Beginn unklar war, wie gut eine Rezirkulationsströmung funktionieren würde, hat das Projektteam beschlossen, einen Energieausgleich anzunehmen, um über einen Jahreszyklus eine ausgeglichene Energiebilanz aufzuweisen. Daher wurde in den Sommermonaten eine Energiequelle eingeführt, welche z.B. von Solarthermie, einem lokalen Anergie-Netz oder von Fernwärme gespeisen würde.

Gebäudetyp 1

Der Gebäudetyp 1 geht von einem Mehrfamilienhaus mit heutigem Baustandard aus. Die Wärme für die Raumheizung und Wassererwärmung wird über eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 60 kW mit Grundwassernutzung erzeugt. Das Grundwasser wird über einen Filter auf einen Wärmetauscher geführt. Nach dem Wärmetauscher erfolgt die Leitungsführung im Zwischenkreis auf die Wärmepumpe. Die Wärmeabgabe erfolgt über eine Bodenheizung, die maximale Vorlauftemperatur beträgt 35 °C. Für die Wassererwärmung ist die Vorlauftemperatur bei max. 60 °C festgelegt. Im Sommer erfolgt ein Wärmeeintrag zum Beispiel über Solarthermie für den Energieausgleich.

Energiebilanz Grundwasser (Gebäudetyp 1)

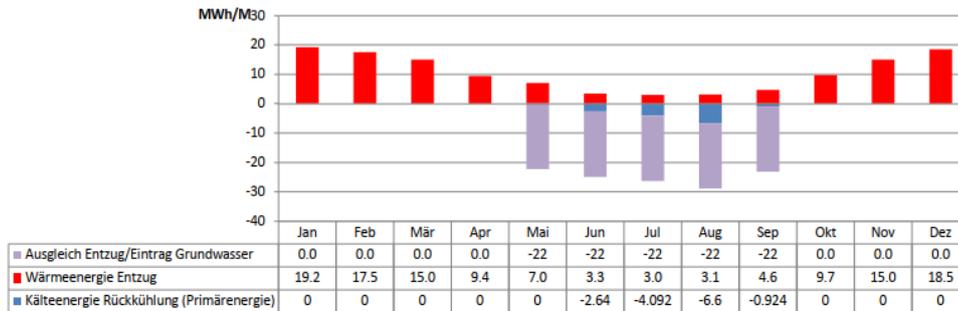


Abbildung 9 Energiebilanz Grundwasser für den Gebäudetyp 1 «MFH». Die monatlichen Werte sind in MWh für den Kältebedarf, den Wärmeentzug und den Ausgleich angegeben. Die Spitzenleistung beträgt 60 kW. Der Ausgleich erfolgt z.B. über Solarthermie.

Gebäudetyp 2

Der Gebäudetyp 2 "Gewerbe- Verwaltungsbau" geht von einem Neubau nach heutigem Baustandard aus. Die Wärme für die Raumheizung und Wassererwärmung wird über eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 250 kW mit Grundwassernutzung erzeugt. Für die Raumkühlung wird im Sommer über eine Kältemaschine Kaltwasser erzeugt. Die Wärme- und Kälteabgabe in den Räumen erfolgt über Heiz- bzw. Kühldeckensysteme. Im Sommer erfolgt ein Wärmeeintrag zum Beispiel über Solarenergie oder ein Anergie- Netz für den Energieausgleich.

Energiebilanz Grundwasser (Gebäudetyp 2)



Abbildung 10 Energiebilanz für den Gebäudetyp 2: monatliche Werte in MWh, Spitzenleistung mit 250 kW. Der totale Wärmebedarf liegt bei 500 MWh, wovon rund 400 MWh dem Grundwasser entzogen werden. Der Bedarf an Kälte liegt bei 225 MWh. Für eine ausgeglichene Bilanz werden 225 MWh Wärme aus einer anderen Quelle benötigt.

Gebäudetyp 3

Der Gebäudetyp 3 "Bürobau" geht von einem Neubau nach heutigem Baustandard aus. Die Nutzung ist analog dem Gebäudetyp 2, die Heizleistung ist um Faktor 3 höher und liegt bei 750 kW.

Energiebilanz Grundwasser (Gebäudetyp 3)

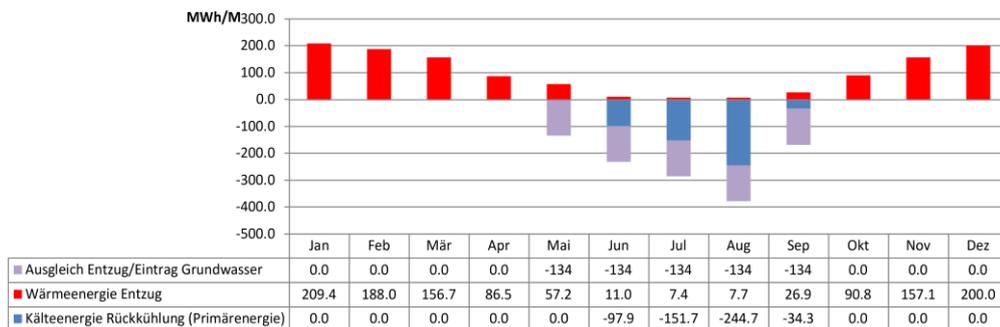


Abbildung 11 Energiebilanz für den Gebäudetyp 2: monatliche Werte in MWh, Spitzenleistung mit 750 kW. Der totale Wärmebedarf liegt bei 1'500 MWh, wovon rund 1'200 MWh dem Grundwasser entzogen werden. Der Bedarf an Kälte liegt bei 530 MWh. Für eine ausgeglichene Bilanz werden 670 MWh Wärme aus einer anderen Quelle benötigt.

5. Modellierung mit bestehenden Grundwassermodellen

5.1 Einleitung

Die Simultec AG hat im Auftrag des AWEL Grundwasserwärmtransportmodelle des Limmattals, des Eulachtals und des Tösstals aufgebaut. Die Modelle decken flächenmässig bedeutende Aquifere im Kanton Zürich ab. Durch die Kalibrierung und Validierung dieser Modelle sind die Strömungs- und Temperaturverhältnisse in diesen Aquifere gut bekannt. Innerhalb der Modellgebiete können an beliebiger Stelle über eine einfache Benutzeroberfläche Modelllupen erzeugt werden, welche ihre Randbedingungen aus den regionalen Modellen beziehen. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Modelle Limmattal und Eulachtal eingesetzt, um die zyklische Wärmenutzung unter typischen realen Randbedingungen zu simulieren.

Vor der Realisierung von Wärmenutzungsanlagen bestehen Unsicherheiten über die Strömungsrichtung, die Strömungsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung. Mit den Simulationen soll vor allem auch für verschiedene Anlagegrößen die Stabilität der zyklischen Wärmenutzung auf Abweichungen der Brunnenstandorte von der idealen Anordnung untersucht werden. Zudem sollen die Unterschiede zu einer herkömmlichen Anordnung der Entnahme- und Rückgabebrunnen aufgezeigt werden.

5.2 Beschreibung der Modelle

Die beiden verwendeten Modelle sind 2-dimensional, mit freiem Wasserspiegel. Für die numerische Berechnung wird die Software FEFLOW eingesetzt. Die Untergrenze des Modells wird durch die Basis der Limmattalschotter definiert. Die Topografie bildet die Obergrenze des Modells. Für den Wärmeaustausch mit den Gewässern und der Atmosphäre wurde FEFLOW um zwei Module erweitert. Im Gewässermodul wird die Tatsache umgesetzt, dass das Wasser, welches aus dem Gewässer in den Grundwasserleiter infiltriert, die Temperatur des Gewässers besitzt, wogegen aus dem Grundwasser ins Gewässer exfiltrierendes Wasser die Grundwassertemperatur aufweist. Im Atmosphärenmodul wird der Wärmtransport zwischen der Atmosphäre und dem Grundwasser in vertikaler Richtung modelliert. Dabei wird die Strecke zwischen der Topografie und dem Grundwasserleiter in 1 m dicke Volumenelemente unterteilt. Der Wärmeaustausch zwischen den Volumenelementen wird aufgrund des Wärmegradienten und der

Wärmeleitfähigkeit des ungesättigten Untergrunds berechnet. Dabei wird auch die Wärmespeicherung in den Volumenelementen berücksichtigt. Das oberste Element erhält die Atmosphärentemperatur als Randbedingung. Im untersten Element wird dem Grundwasser entsprechend dem Wärmegradienten Wärme entzogen oder hinzugefügt.

Die beiden Modelle werden nach unten durch Seeablagerungen, Grundmoränen oder die Felsoberfläche abgegrenzt, welche den Stauer für die Grundwasserströmung bilden. Die konduktive Wärmeleitung in die darunterliegenden Schichten wird in den 2D-Modellen vernachlässigt. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird der geringe geothermale Wärmezufluss aus dem Erdinnern.

Das Modell Limmattal umfasst den Grundwasserleiter zwischen der Sihl und der Grenze zum Kanton Aargau. Bei der Sihl ist der Grundwasserleiter bis zu 60 m mächtig aber langsam durchflossen. Nach Nordwesten nimmt die Mächtigkeit des Grundwasserleiters ab. Die im Untergrund strömende Grundwassermenge nimmt jedoch zu, da Wasser aus der Limmat infiltriert und Niederschläge versickern. Die Fliessgeschwindigkeit nimmt daher nach Nordwesten hin zu und der Grundwasserspiegel nähert sich der Erdoberfläche. Im Stadtgebiet sind bereits sehr viele Grundwasserwärmenutzungen realisiert worden. Weiter westlich, in Schlieren und Dietikon sind es deutlich weniger.

Das Modell Limmattal wurde bei der Erstellung an den Daten der Jahre 2007 bis 2009 kalibriert und an den Daten der Jahre 2004 bis 2006 validiert. Im Rahmen einer Nachführung und Nachkalibrierung wurden die Daten der Jahre 2004 bis 2017 verwendet. Das Modell ist in den Berichten [20] und [21] dokumentiert.

Das Modell Eulachtal umfasst den Talabschnitt zwischen Wiesendangen und Pfungen. Am östlichen Teil des Modells ist der Grundwasserleiter geringmächtig und nicht besonders gut durchlässig. Im Stadtgebiet nimmt die Mächtigkeit des Grundwasserleiters auf 10 bis 20 m zu. Insbesondere westlich des Bahnhofs ist die Durchlässigkeit des Eulachsotters sehr hoch. Im Rahmen der Planung für eine grosse Wärmenutzungsanlage wurden an dieser Stelle bereits Erkundungen ausgeführt und Pumpversuche durchgeführt. Die lokalen Verhältnisse sind deshalb besonders gut bekannt.

Das Modell Eulachtal wurde bei der Erstellung an den Daten der Jahre 2012 bis 2013 kalibriert. Im Rahmen einer Nachführung und Nachkalibrierung wurden für die Kalibrierung die Daten der Jahre 2012 und 2015, für die Validierung die Daten der Jahre 2016 bis 2018 verwendet. Das Modell ist in den Berichten [22] und [23] dokumentiert.

5.3 Ausgeführte Modellierungen

Für die Fallstudien wurden zwei Teilgebiete aus den beiden Modellen ausgewählt, welche unterschiedliche hydrogeologische Dispositionen repräsentieren (Tabelle 3). Insbesondere unterscheiden sich die beiden Standorte in ihrer Durchlässigkeit und

dem Flurabstand. Die Lage der Standorte ist in Abbildung 12 und Abbildung 13 abgebildet. Beiden Standorten gemeinsam sind eine relativ grosse Grundwassermächtigkeit und ein relativ kleiner Strömungsgradient.

Tabelle 3 Charakteristik der ausgewählten Modellstandorte.

	Schlieren	Winterthur Neuwiesen
Grundwassermächtigkeit	11 m	12 m
Flurabstand	2.5 m	15 m
Durchlässigkeit	4×10^{-3} m/s	1×10^{-2} m/s
Strömungsgradient	0.0018	0.0015

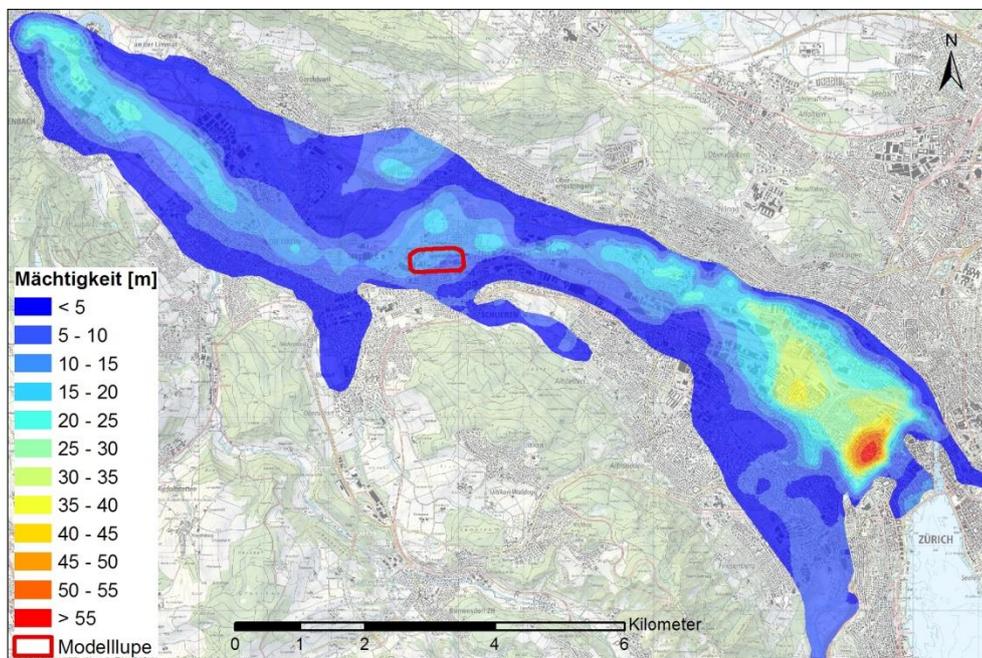


Abbildung 12 Lage des gewählten Modellstandortes in Schlieren.

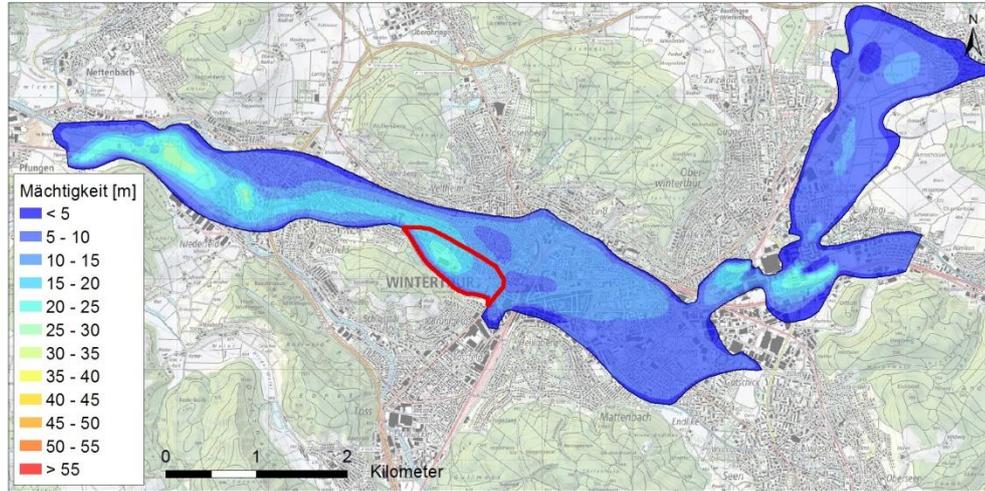


Abbildung 13 Lage des gewählten Modellstandortes in Winterthur Neuwiesen.

An den gewählten Standorten wurde je eine Modelllupe mit einer verfeinerten Unterteilung in finite Elemente erzeugt. Die Seitenlängen der Elemente betragen ca. 10 m, bei den Brunnen wird das Netz lokal auf Seitenlängen bis zu 2 m verfeinert. Bei der Netzgenerierung wurden 90 mögliche Standorte für die Entnahme- und Rückgabeburgen vorbereitet. Davon wurden anschliessend bei jeder Fallstudie ein bis zwei Standorte mit Entnahmen oder Rückgaben belegt.

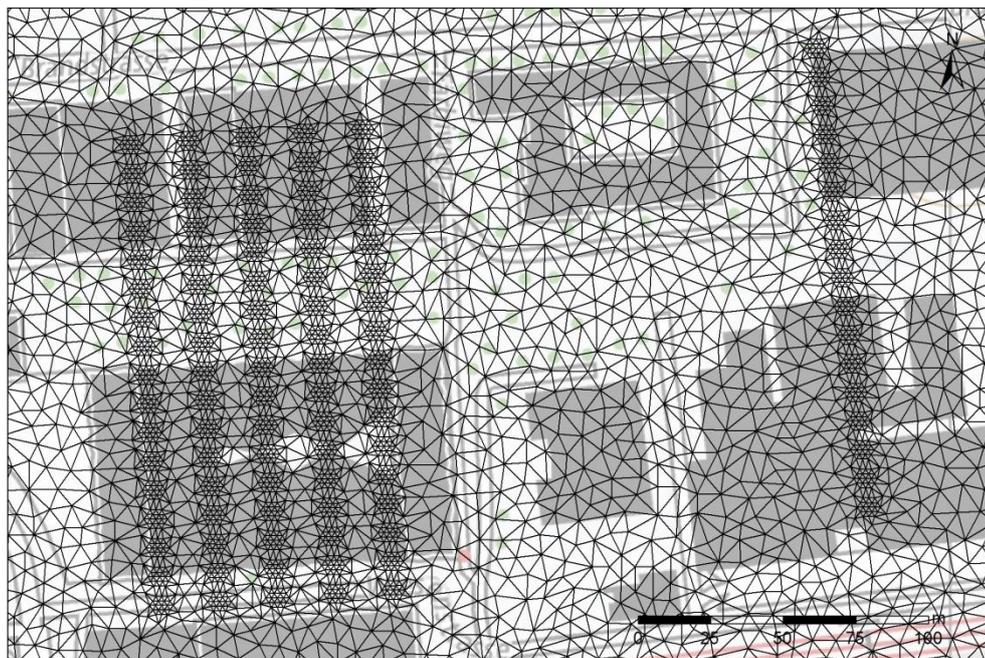


Abbildung 14 Ausschnitt aus dem Finite-Elemente-Netz.

Für die Wärmetransportmodellierung wurden die folgenden Parameterwerte vorgegeben:

Volumetrische Wärmekapazität Wasser:	4.2	[106 JK-1m-3]
Volumetrische Wärmekapazität Gestein:	2.3	[106 JK-1m-3]
Vol. Wärmekapazität ungesättigter Bereich:	1.35	[106 JK-1m-3]
Wärmeleitfähigkeit Wasser:	0.59	[Wm-1K-1]
Wärmeleitfähigkeit Gestein:	3.0	[Wm-1K-1]
Wärmeleitfähigkeit ungesättigter Bereich:	1.8	[Wm-1K-1]
Gesamtporosität:	20	[%]
Durchflusswirksame Porosität:	10	[%]

Die aus dem Grundwasser entnommenen, resp. zugegebenen Wärme- und Kälteenergien der Gebäudetypen G1 bis G3 wurden in monatliche Fördermengen umgerechnet und in den Modellen vorgegeben. Die Temperatur des geförderten Wassers im Entnahmebrunnen der Anlage wird dabei für jeden Zeitpunkt direkt aus dem Modell übernommen. Um die Temperatur des Rückgabewassers rechnen zu können, wird das Plug-In "Open Loop" der Software FEFLOW verwendet, welches die Definition einer Temperaturdifferenz zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen erlaubt. Für die Wärmenutzung wurde eine Abkühlung von 8 Grad, für die Kühlnutzung eine Erwärmung um 8 Grad Kelvin vorgegeben.

Vorgängig wurde für beide Standorte die Distanz zwischen der Rückgabe und Entnahme ermittelt, bei welcher die durch die Rückgabe verursachte maximale Erwärmung, resp. Abkühlung um ein halbes Jahr verzögert im Entnahmebrunnen ankommt. Für den Standort Schlieren betrug diese Distanz 200 m, für den Standort Winterthur 300 m.

5.4 Resultate

Zum Vergleich wurde die Wärme- und Kühlnutzung als Erstes in Form einer konventionellen Anlage, mit Entnahmebrunnen im Anstrom und Rückgabebrunnen im Abstrom berechnet. Abbildung 16 zeigt die resultierende Wärme- und Kältefahne im Abstrom. Der in der Abbildung eingezeichnete Punkt befindet sich in 100 m Distanz im Abstrom der Anlage. In diesem Punkt ergibt die Berechnung eine maximale Temperaturdifferenz von 7 Grad K. Die gesetzlichen Vorgaben (max. 3 Grad Veränderung gegenüber dem natürlichen Zustand) wären bei einer konventionellen Anordnung der Brunnen also nicht erfüllt.

Abbildung 16 zeigt die gleiche Nutzung, wenn der Entnahmebrunnen im Abstrom und der Rückgabebrunnen im Anstrom angeordnet werden. Die Beeinflussung der Grundwassertemperatur beschränkt sich in diesem Fall auf den Bereich zwischen Rückgabe und Entnahme. Im Abstrom der Anlage ist nur noch eine schwache Beeinflussung der Grundwassertemperatur erkennbar. Dies ist dadurch bedingt, dass praktisch das

ganze, im Rückgabebrunnen zurückgegebene Wasser wieder im Entnahmebrunnen gefasst wird (s. Abbildung 17). Ein Teil der Wärmefahne strömt am Entnahmebrunnen vorbei, da in den Übergangsmonaten April/Mai und September/Oktober nicht viel Wasser gefördert wird. Die Wärmefahne bewegt sich in dieser Zeit in Abstromrichtung weiter.

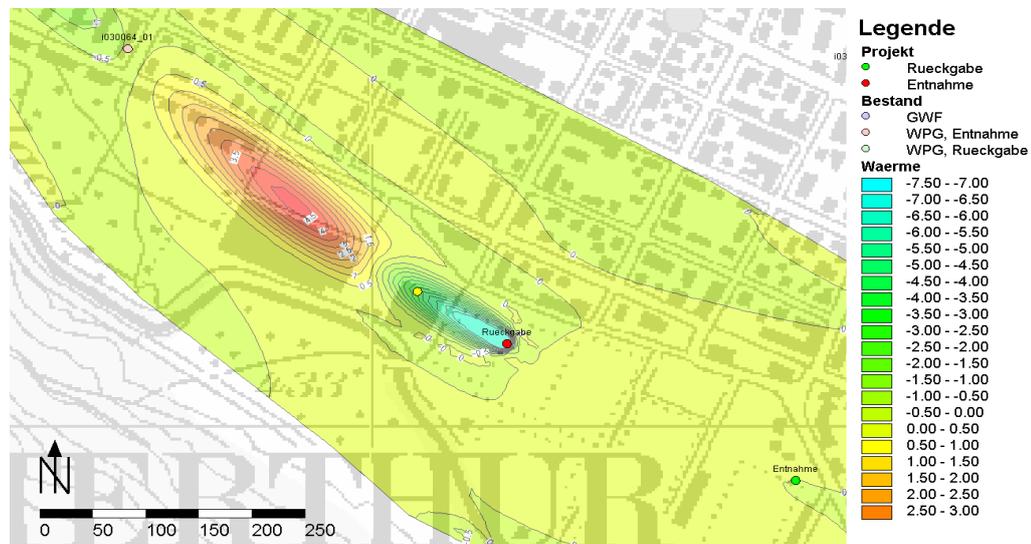


Abbildung 15 Wärme- und Kältefahne bei konventioneller Anordnung der Brunnen.

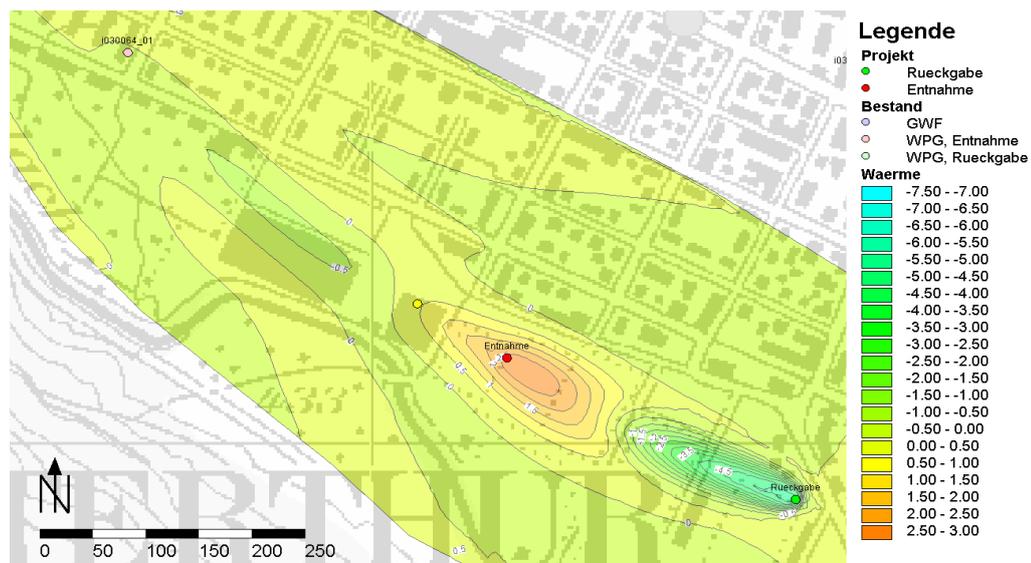


Abbildung 16 Wärme- und Kältefahne bei umgedrehter Anordnung der Brunnen.

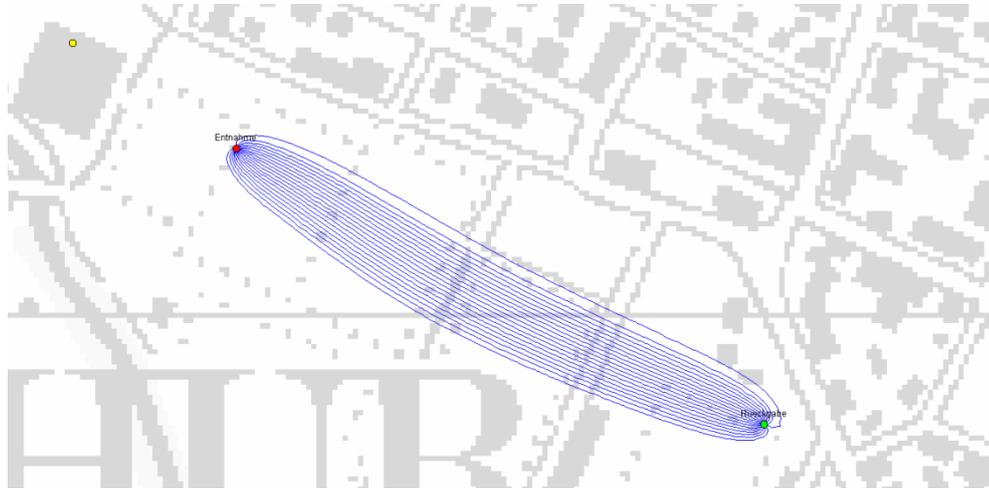


Abbildung 17 Fließwegberechnung. Die Fließwege werden im Rückgabebrunnen gestartet und erreichen am Schluss den Entnahmebrunnen.

Wird der Entnahmebrunnen nicht genau in der Strömungsrichtung und mit der richtigen Distanz zum Rückgabebrunnen angeordnet, oder variiert während des Jahres die Strömungsrichtung, so wird die Effizienz der Anlage verschlechtert. Mit Hilfe einer Reihe von Fallstudien wurde dies untersucht. Bei den Fallstudien wurde der Entnahmebrunnen jeweils um einen vorgegebenen Betrag aus der Strömungsrichtung verschoben oder die Distanz zum Rückgabebrunnen wurde verändert. Anschliessend wurde jeweils in 100 m im Abstrom des Entnahmebrunnens die maximale Abweichung der Grundwassertemperatur von der Referenz ausgewertet.

Die Resultate sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 zusammengestellt. Es ist erkennbar, dass die maximale Temperaturdifferenz mit zunehmender Auslenkung zunimmt. Etwa ab einer Auslenkung von 10-15 Grad wird die kritische Temperaturdifferenz von 3 Grad überschritten. Bei einer Veränderung der Distanz hingegen betrug die maximale Temperaturdifferenz bei allen Fallstudien weniger als 3 Grad.

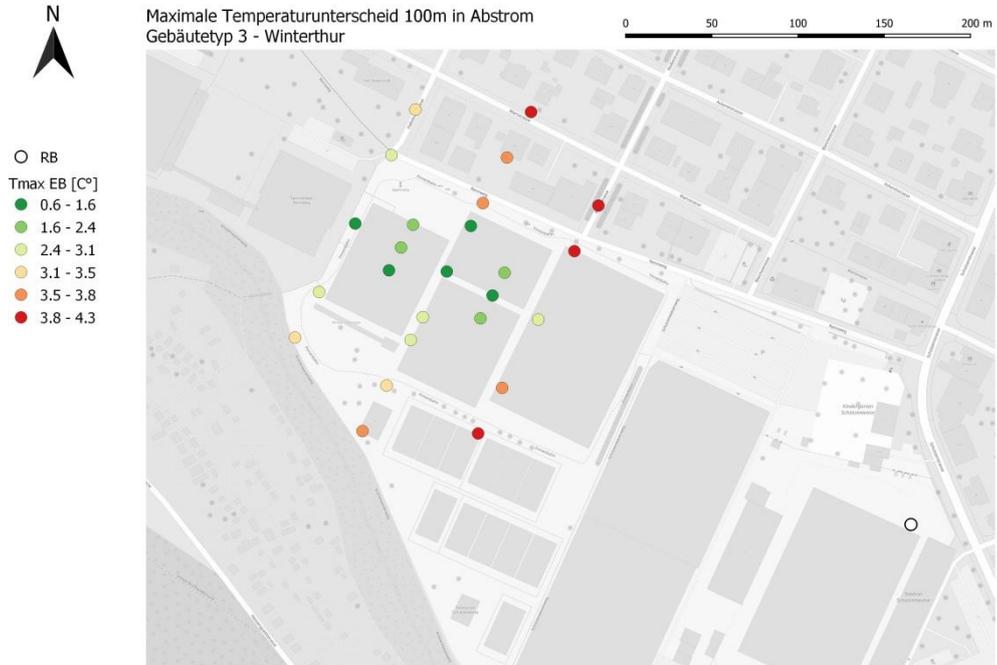


Abbildung 18 Einfluss der Lage des Entnahmebrunnens auf die maximale Erwärmung / Abkühlung in 100 m Distanz zur Anlage im Grundwassermodell Winterthur.

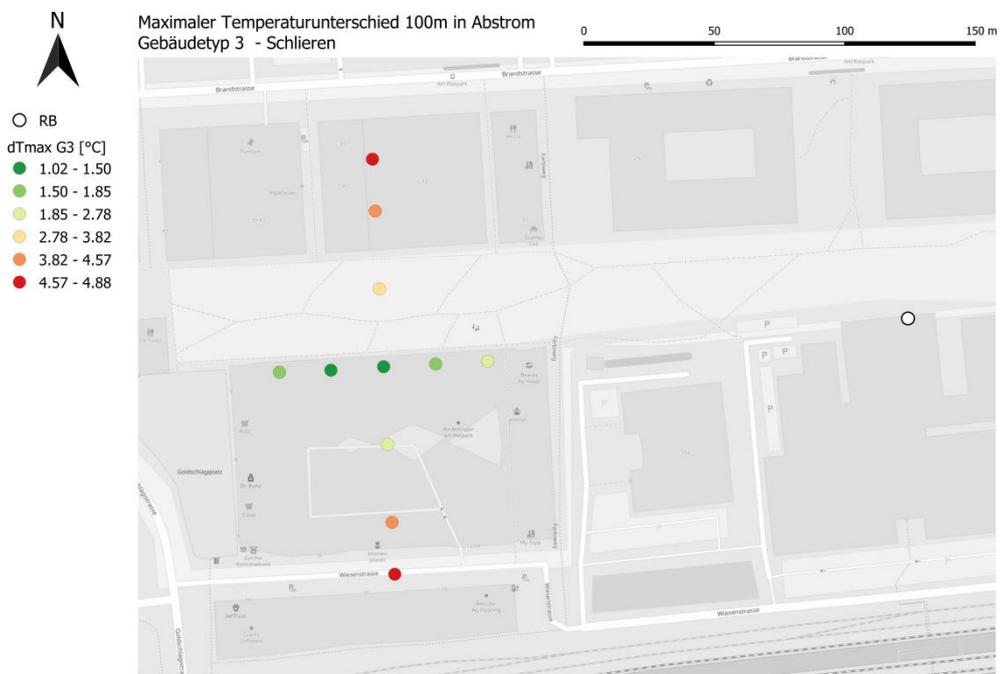


Abbildung 19 Einfluss der Lage des Entnahmebrunnens auf die maximale Erwärmung / Abkühlung in 100 m Distanz zur Anlage im Grundwassermodell Schlieren.

5.5 Interpretation und Folgerungen

Die beiden Standorte in Schlieren und Winterthur weisen eine sehr hohe natürliche Abstandsgeschwindigkeit und Durchlässigkeit auf, weshalb die Anlagen grosse Gebiete beanspruchen. An den betreffenden Standorten ist die zyklische Nutzung der Grundwasserwärme nur bei grossen Anlagen lohnenswert. Kleinere Anlagen wären auch mit konventioneller Anordnung bewilligungsfähig.

Der Vergleich der beiden ausgewählten Standorte zeigt, dass die optimale Distanz zwischen Rückgabe- und Entnahmebrunnen von den hydraulischen Gegebenheiten (Strömungsgradient, Durchlässigkeit, Porosität) abhängt. Aus den durchgeführten Fallstudien kann abgeleitet werden, dass eine Abweichung von der optimalen Distanz keinen sehr grossen Einfluss auf die Temperaturdifferenz im Abstrom hat.

Werden Rückgabebrunnen und Entnahmebrunnen nicht in der Strömungsrichtung des Grundwassers angeordnet, so nimmt die maximale Temperaturdifferenz im Abstrom der Anlage schnell zu. Die Ausrichtung der Anlage ist deshalb von grossem Gewicht. Zyklische Anlagen funktionieren auch nicht optimal, wenn die Strömungsrichtung im Jahresverlauf stark schwankt.

Die Berechnungen zeigen, dass auch bei zyklischen Wärmenutzungen ein kleiner Teil der Wärme- resp. Kältefahne am Entnahmebrunnen vorbeiströmt. Dies ist einerseits auf die dispersive seitliche Ausbreitung der Wärmefahne, andererseits auf das Vorbeifliessen zu Zeiten mit geringer Entnahme zurückzuführen.

Aus der Sicht der Anlagenplanung ist es günstig, dass die seitliche Auslenkung der Anlagenachse einen grösseren Einfluss ausübt als die Distanz zwischen Rückgabe und Entnahme. Die Messung der Fliessrichtung kann nämlich durch das Anbringen von drei, in Dreiecksform angeordneten, Piezometern recht genau bestimmt werden. Die Durchführung eines Versuches zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Temperatursignals ist deutlich aufwändiger.

6. Modellierung mit einem synthetischen Modell

6.1 Einleitung

Es soll für die Wärmenutzung der drei Gebäudetypen (Kapitel 4) untersucht werden, welche hydrogeologische Gegebenheiten eine thermisch stabile Rezirkulationsströmung erlauben. Die ausgewählten hydrogeologischen Gegebenheiten lehnen sich an den unterschiedlichen hydrogeologischen Verhältnissen im Kanton Zürich an (s. Kapitel 3).

Die Beurteilung des Potentials der Rezirkulationsströmungen ist entscheidend, um die Chancen und den Nutzen der weiteren Entwicklung abzuschätzen. Die Machbarkeit ist bedingt durch die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften und eine möglichst minimale Änderung der Grundwassertemperatur im Abstrom der Rezirkulationsanlage, um Kaskadeneffekte zu vermeiden.

6.2 Vorgehen

Um das Potential der Rezirkulationsströmung zu beurteilen, wurde ein 3-dimensionales synthetisches Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell mit der Software FEFLOW (DHI) erstellt.

In diesem Box-Modell sind die hydraulischen und thermischen Eigenschaften isotrop und homogen. Der Grundwassergradient ist konstant und der Wärmeaustausch mit der Erdoberfläche, der Atmosphäre und dem tiefen Untergrund ist nicht berücksichtigt. Der Stauer ist im Modell dargestellt, da er als Zwischenwärmespeicher einen signifikanten Einfluss auf den Wärmetransport ausübt. Die hydraulische und thermische Rezirkulation ist anhand von zwei gekoppelten Brunnen simuliert, die mit einer Durchflussrate und einem ΔT definiert sind (s. Abbildung 20).

In einer ersten Phase wurde das synthetische Modell in Anlehnung an das Grundwassermodell Limmattal aufgebaut, um es zu plausibilisieren und die Vergleichbarkeit zu erhöhen.

In der zweiten Phase wurde untersucht, welche Modellparameter einen Einfluss auf die thermische Rezirkulationsströmung haben. Anhand eines Skriptes wurde eine Sensitivitätsanalyse der wichtigsten Parameter durchgeführt: die Parameter wurden systematisch variiert, die Simulation durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.

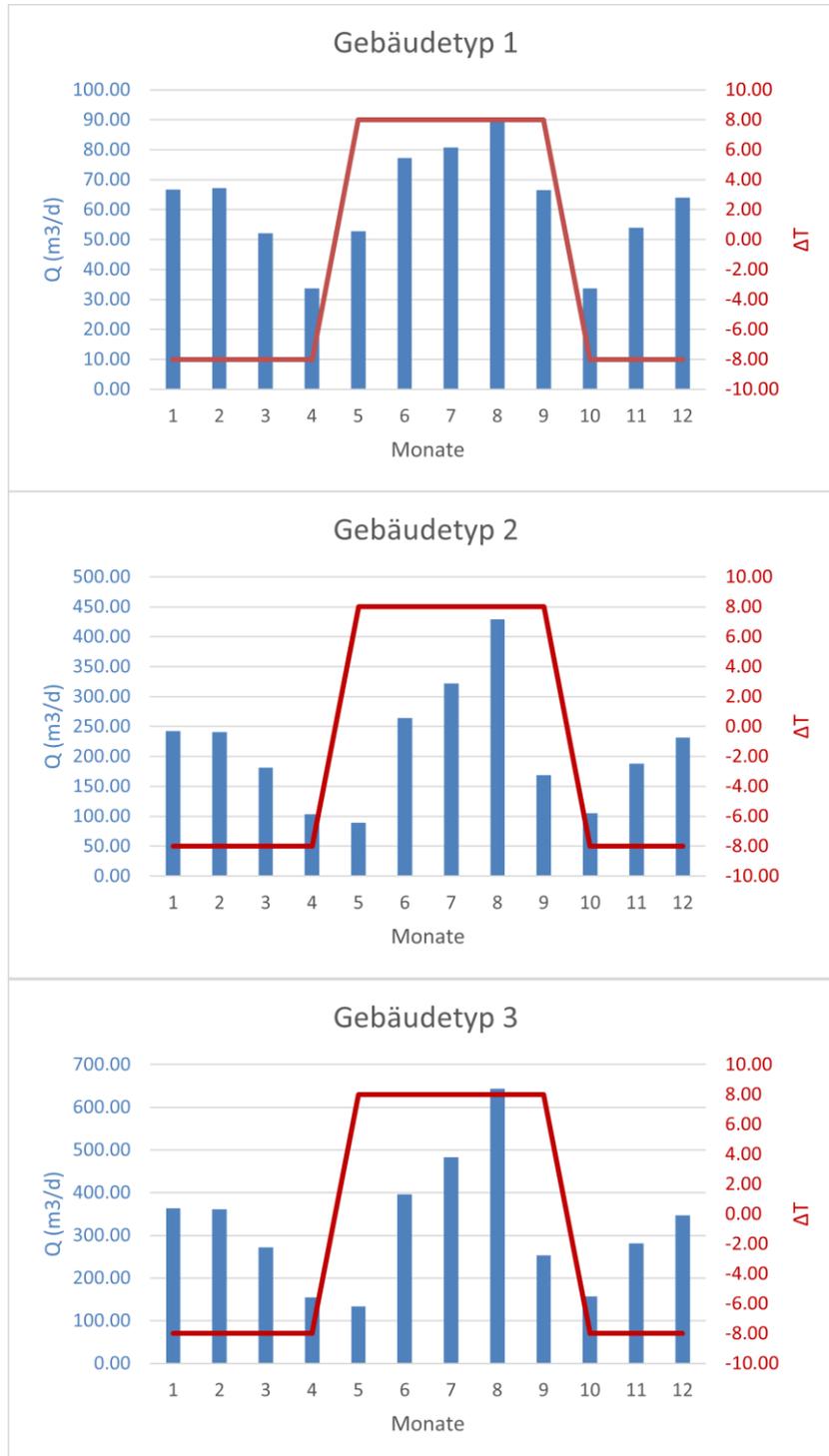


Abbildung 20 Durchflussrate und entsprechenden ΔT für die drei Gebäudetypen (beim Gebäudetyp 3 ist die Durchflussrate halbiert, da es angenommen wurde, dass die Anlage auf zwei Brunnen verteilt ist).

6.3 Modellaufbau

Das synthetische Grundwassermodell besteht aus einer 3D Box, die 550 m lang, 300 m breit und 45 m mächtig ist. Diese Box ist mit dem Grundwassergradient geneigt (Abbildung 21) und ist in 9 Schichten unterteilt: 5 Schichten entsprechen die Schotterablagerungen und 4 den Stauer. Das Modellnetz besteht aus 15370 Knoten und aus 27207 prismatischen 3D Elements. Die konstanten Parameter sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

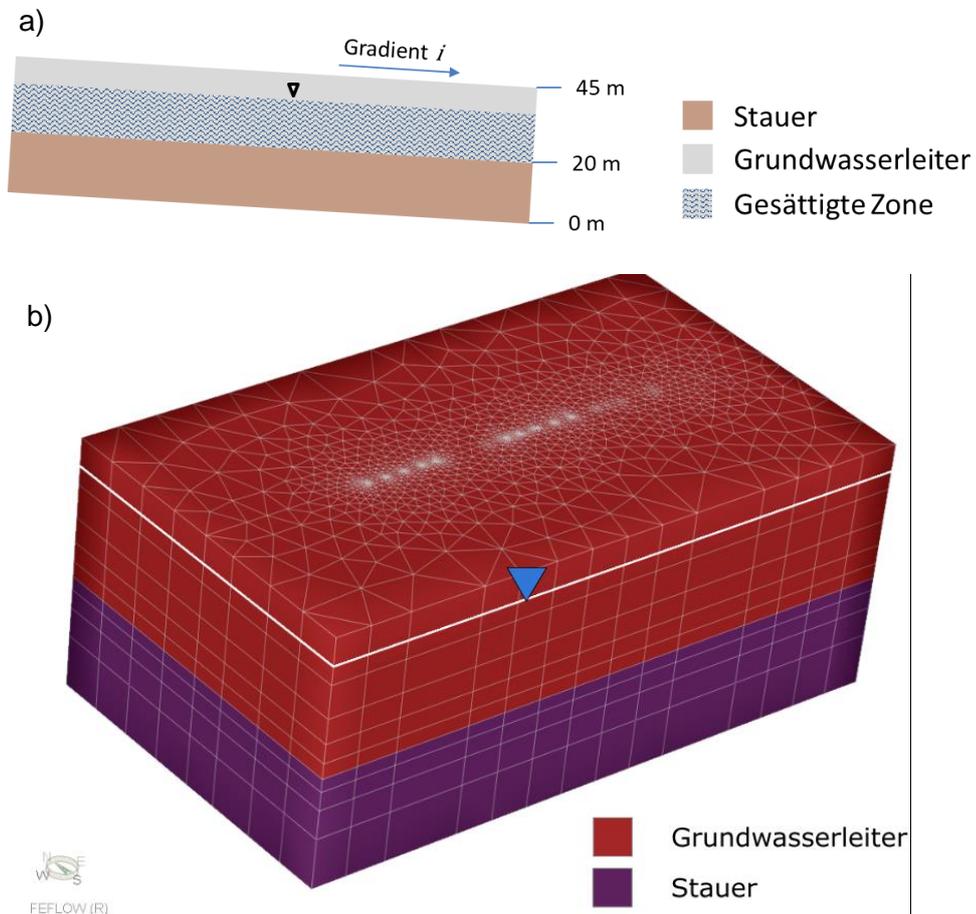


Abbildung 21 Konzeptuelles Modellschnitt und b) Modellgitter.

Tabelle 4 Im Modell konstante Parameter.

Parameter	Wert	Einheit
Grundwasserleiter (Schotter)		
Volumetrische Wärmekapazität ¹	2.0	MJ/K/m ³
Wärmeleitfähigkeit ¹	2.0	W/m/K
Longitudinale Dispersion ¹	5.0	m
Laterale Dispersion ¹	0.5	m
Spezifischer Speicherkoeffizient ¹	0.0001	m ⁻¹
Mächtigkeit	25	m
Stauer (Molasse)		
Volumetrische Wärmekapazität ²	2.1	MJ/K/m ³
Wärmeleitfähigkeit ²	2.6	W/m/K
Longitudinale Dispersion ¹	5.0	m
Laterale Dispersion ¹	0.5	m
Spezifischer Speicherkoeffizient ¹	0.0001	m ⁻¹
Mächtigkeit	20	m
K-Wert	1·10 ⁻⁶	m/s
Porosität ¹	0.1 ¹	-
Wassereigenschaften		
Volumetrische Wärmekapazität Wasser ¹	4.2	MJ/K/m ³
Wärmeleitfähigkeit Wasser ¹	0.6	W/m/K
Brunnen		
Durchmesser	0.25	m
Filterstrecke	vollkommen bis Stauer	
Simulation		
Dauer	20	Jahre
Start	Januar	

¹ Analog Limmattal-Modell

² SIA-Norm 384/6:2021

6.3.1 Vergleich mit dem Limmattal-Modell

Für den Vergleich mit dem Limmattal-Modell wurde das Modell in Anlehnung an das Limmattal-Modell angepasst (s. Tabelle 5). Da der Stauer im Limmattal-Modell nicht modelliert ist, wurden Simulationen mit dem synthetischen Box-Modell einmal mit und einmal ohne Stauer durchgeführt.

Tabelle 5 Angepasste Parameter für den Vergleich mit dem Limmattal-Modell.

Parameter	Wert	Einheit
Mächtigkeit Grundwasserleiter	13.24	m
Mächtigkeit gesättigte Zone	10.43	m
K-Wert Grundwasserleiter	0.005	m/s
Brunnenabstand	202	m
Grundwassergradient	0.0017	-
Simulationsdauer	3650	d

6.3.2 Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse wurden sechs Parameter über drei Werte variiert (Tabelle 6). Das ergibt $3^6 = 729$ mögliche Kombinationen, bzw. Simulationen.

Auswertet werden folgenden Eigenschaften

- min. und max. Temperaturkarte (min. und max. Temperatur über die Zeit an jedem Knoten)
- Temperaturverlauf in Entnahmebrunnen
- Temperaturverlauf in 100 m Abstrom der Entnahmebrunnen.

Um die Rechenzeit zu reduzieren, wurden die Simulationen, wenn gewissen Kriterien erfüllt wurden, abgebrochen. Folgenden Kriterien wurden festgelegt:

- **Absenkungsregel:** Grundwasserabsenkung > 0.25 der Mächtigkeit der gesättigten Zone
- **3K-Regel:** Temperatur 100 m Abstand der Entnahmebrunnen > 3 K

Tabelle 6 Parameterwerte für die Sensitivitätsanalyse.

– Parameter	Min.	Mittl.	Max.
Mächtigkeit gesättigte Zone (m)	5	12	20
K-Wert Grundwasserleiter (m/s)	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Brunnenabstand (m)	70	95	130
Grundwassergradient (-)	0.001	0.005	0.01
Porosität (-)	0.1	0.15	0.2
Energieprofil	Typ 1	Typ 2	Typ 3*

** Die Hälfte des Durchflusses (Annahme: Anlage auf 2 Brunnen verteilt)*

6.4 Resultate

6.4.1 Vergleich zum Grundwassermodell Limmattal

Abbildung 22 zeigt den Temperaturverlauf im Entnahmebrunnen nach 10 Jahre Simulationszeit für das Grundwassermodell Limmattal sowie für das synthetische Grundwassermodell mit und ohne Stauer. Die Übereinstimmung zwischen dem 2D Grundwassermodell Limmattal und dem synthetischen Grundwassermodell ohne Stauer ist gut: die maximale und minimale Temperatur treten zur gleichen Zeit auf und die maximale Abweichung erreicht ca. 1 K beim Temperaturpeak.

Der Effekt des Stauers auf den Temperaturverlauf zeigt sich durch eine ca. 3 K kleiner Amplitude, ohne einer Verzögerung der Peaks zu verursachen. Der Stauer wirkt wie einen Wärmespeicher, der den Temperaturverlauf abflacht.

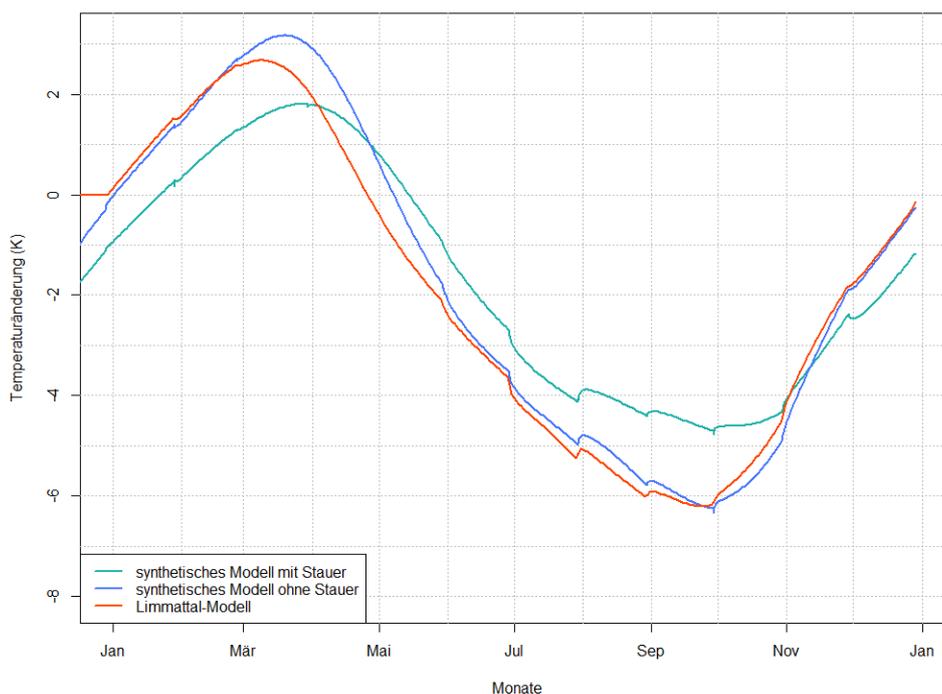


Abbildung 22 Temperaturänderung im Entnahmebrunnen im 20. Simulationsjahr berechnet im synthetischen Modell mit und ohne Stauer und im Limmattal-Modell

Dank dem Vergleich zum Grundwassermodell Limmattal kann das synthetische Grundwassermodell als völlig plausibel erachtet werden. Im Folgenden werden nur Ergebnisse vom synthetischen Grundwassermodell mit Stauer dargestellt und diskutiert.

6.4.2 Ergebnisse der Simulation Nr. 212 als Beispiel

Die Ergebnisse der Simulation Nr. 212 werden im Folgenden exemplarisch gezeigt.

Die Simulation 212 wurde mit folgenden Parameter durchgeführt:

- maximale Mächtigkeit der gesättigten Zone (20 m)
- minimaler K-Wert ($5 \cdot 10^{-4}$ m/s)
- minimaler Brunnenabstand (95 m)
- maximaler Grundwassergradient (0.01)
- mittlerer Porosität (0.15)
- Energieprofil Typ 2

Die Simulation 212 ist besonders interessant, weil der Abstand zwischen Entnahme und Rückgabe gerade etwas kleiner als 100 m ist und damit die geltenden Vorschriften betreffend Temperaturveränderungen bei thermischen Nutzungen eingehalten werden. Zudem wurde bei einem doch beachtlichen Energieentzug (Energieprofil 2 = 400 MWh/Winter, Spitzenleistung = 250 kW) rasch ein stationärer Zustand erreicht.

Abbildung 23 zeigt den Temperaturverlauf im Entnahmebrunnen sowie in 100 m Abstrom des Entnahmebrunnens. Aus den Temperaturverläufen sowie der räumlichen Verteilung der Temperaturanomalie (siehe Abbildung 24) wird ersichtlich, dass die Vorschriften eingehalten werden.

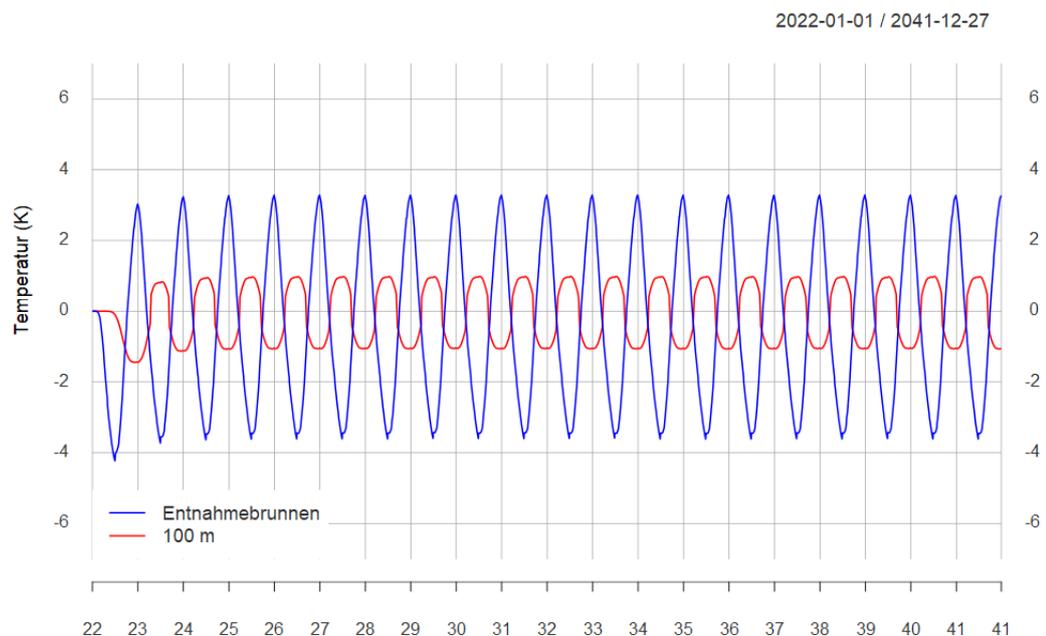


Abbildung 23 Temperaturverlauf im Entnahmebrunnen und in 100 m Abstrom für die Simulation Nr. 212 für die Modelljahre 2022 (Beginn) bis 2041 (Ende nach 20 Jahren Modellzeit).

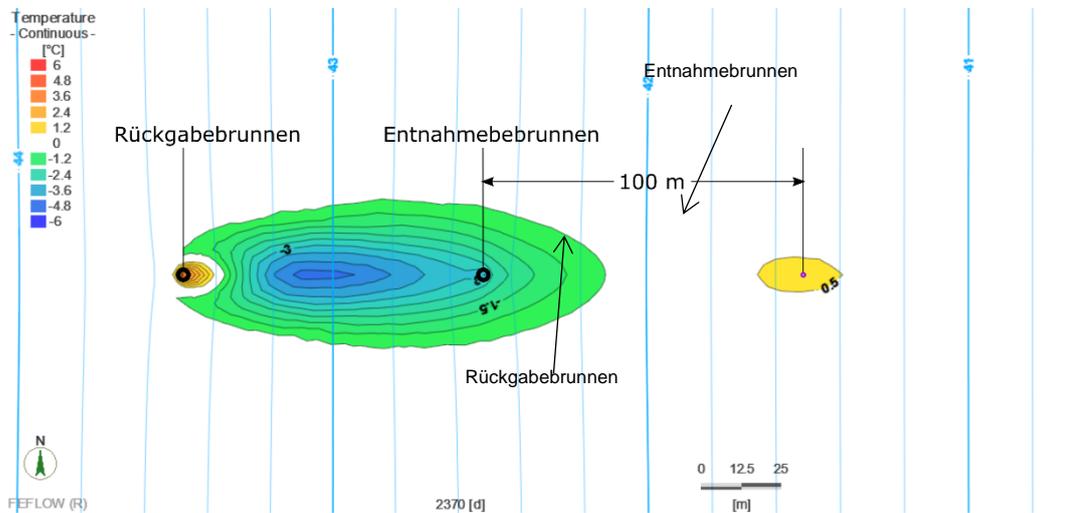
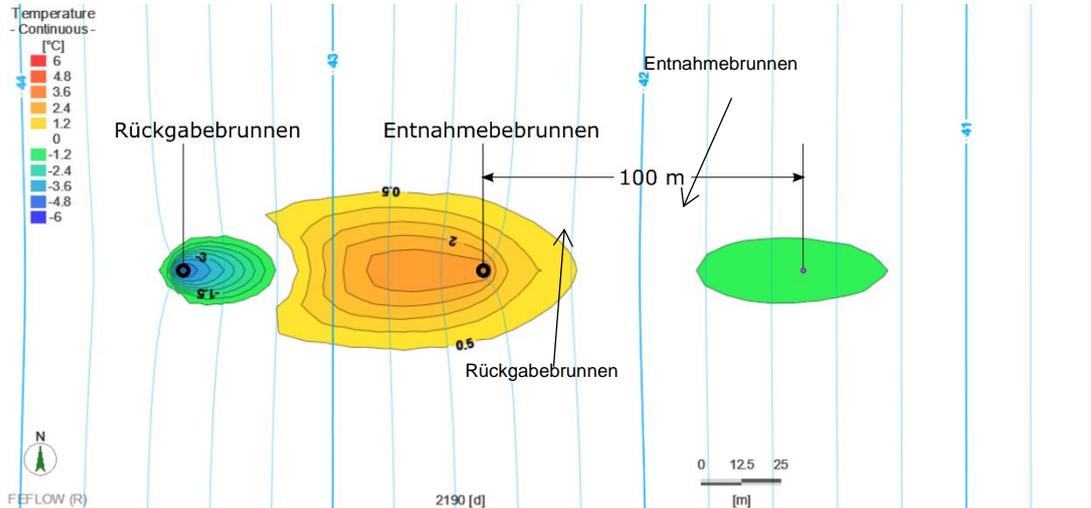


Abbildung 24 Wärmefahne der Simulation Nr. 212 als horizontale Schnitte unmittelbar über dem Stauer nach 6 Jahren im Winter (Januar, oben) und im Sommer (Ende Juni, unten). Isolinien der Temperaturveränderung mit 0.5°C Intervall.

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen die Temperaturverteilung der Simulation Nr. 212 nach 6 Jahren in einem horizontalen bzw. vertikalen Schnitt durch das GrundwassermodeLL jeweils nach Ende der Heiz- bzw. Kühlperiode. Die Wärmespeicherung des Stauers sowie die aufeinanderfolgenden Wärme- und Kältefahne sind gut sichtbar.

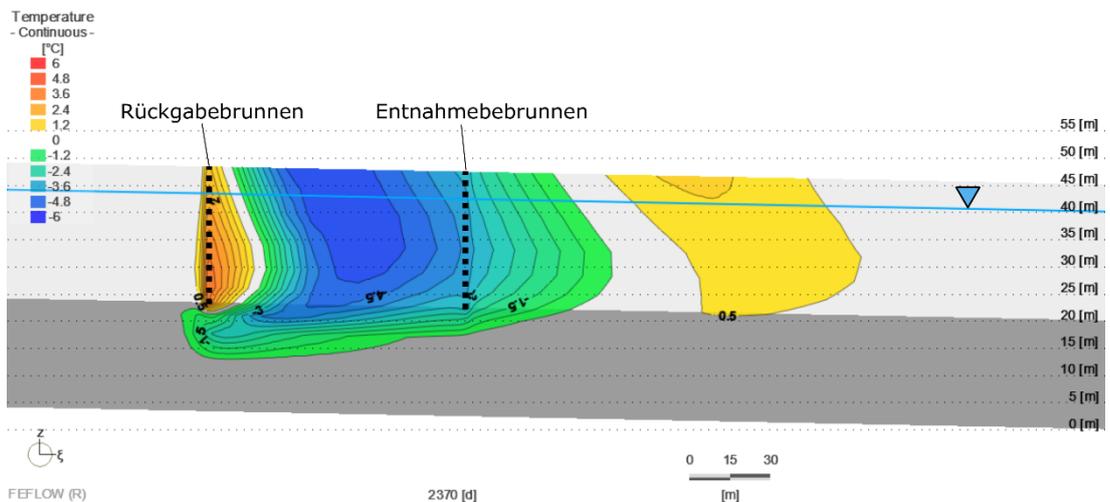
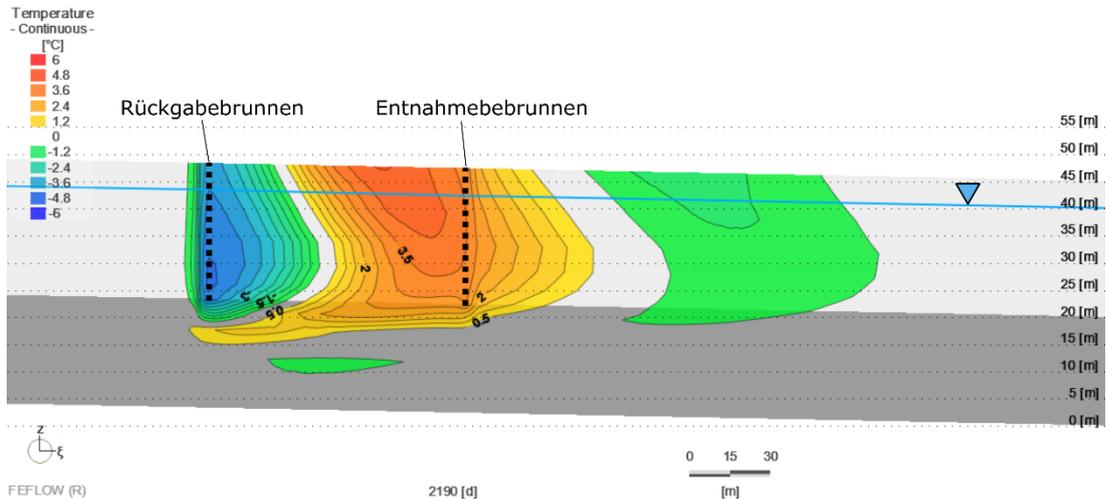


Abbildung 25 Wärmefahne der Simulation Nr. 212 als vertikale Schnitte entlang der zentralen Achse nach 6 Jahren im Winter (Januar, oben) und im Sommer (Ende Juni, unten). Isolinien der Temperaturveränderung mit 0.5°C Intervall.

6.4.3 Auswertung der Simulationen

Zuerst wurde der Temperaturverlauf aller Simulationen grafisch dargestellt. Die abgebrochenen Simulationen aufgrund einer zu hohen Temperatur ($> 3K$) waren gut erkennbar. Viele Simulationen haben einen periodisch-stationäre Verlauf. Da die Auswertung von solchen Zeitreihen-Abbildung schwierig ist, wurden einige Statistiken über die Simulationen ausgeführt und anschliessend die Zusammenhänge zwischen diesen Statistiken und den Parametern untersucht.

Von 729 Simulationen wurden ca. 15% der Simulationen frühzeitig aufgrund der Überschreitung der 3K-Regel abgebrochen. Zudem wurden 22% der Simulationen wegen der Absenkungsregel abgebrochen. Dies bedeutet, dass die Förderrate im Verhältnis

zur Ergiebigkeit des Aquifers zu hoch war. Damit sind 63% der Simulation vollständig über die 20 Jahre Simulationszeit ausgeführt worden.

6.4.4 Stationarität des Temperaturverlaufs

Es stellt sich die Frage, wie viel der nicht frühzeitig abgebrochenen Simulationen eine periodische Stationarität aufweisen und über wie viele Jahre (bzw. wie schnell wird der Temperaturverlauf stationär). Die Stationarität wurde wie folgt berechnet:

- die Temperatur-Zeitreihen wurden mit der minimalen und maximalen Temperatur des letzten Simulationsjahr normiert, um eine relative Amplitude zu berücksichtigen
- der Temperaturverlauf ist über n Jahre stationär, wenn die Änderung der maximalen und minimalen normierten Temperaturen zwischen dem letzten Simulationsjahr und die n vorherigen Jahre weniger als 0.1 beträgt.

Gemäss dieser Berechnungsmethode ist die Simulation Nr. 212 über 18 Jahre stationär (vgl. Abbildung 23).

Während mehr als 90% der Simulationen einen stationären Temperaturverlauf im Entnahmehrunnen aufweisen, sind es nur noch ca. 60% in 100 m Abstom des Entnahmehrunnens (Abbildung 26). In ca. 20% der Fälle zerstört der Entnahmehrunnen die Stationarität der Wärmefahne.

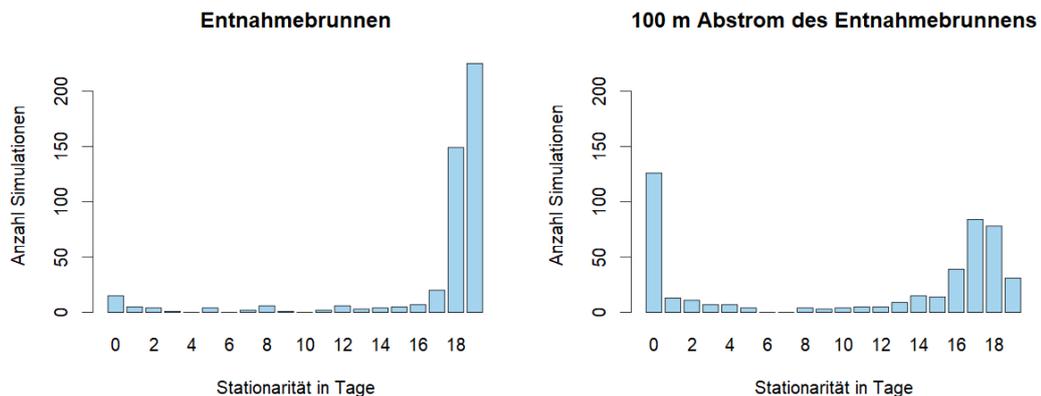


Abbildung 26 Stationarität der Temperaturverläufe im Entnahmehrunnen und in 100 m Abstom des Entnahmehrunnens.

6.4.5 Maximale absolute Temperatur im letzten Simulationsjahr

Die Verteilung der maximalen absoluten Temperatur im letzten Simulationsjahr, T_{max} , im Entnahmehrunnen und in 100 m Abstom des Entnahmehrunnens ist in Abbildung 27 für die nicht frühzeitig abgebrochenen Fälle dargestellt.

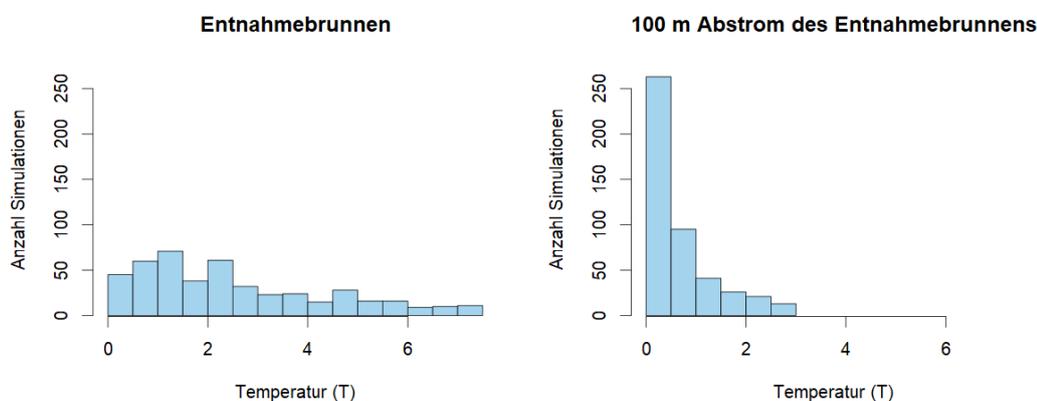


Abbildung 27 Verteilung der maximalen absoluten Temperatur der nicht abgebrochenen Simulationen im letzten Simulationsjahr im Entnahmebrunnen und in 100 m Abstrom des Entnahmebrunnens.

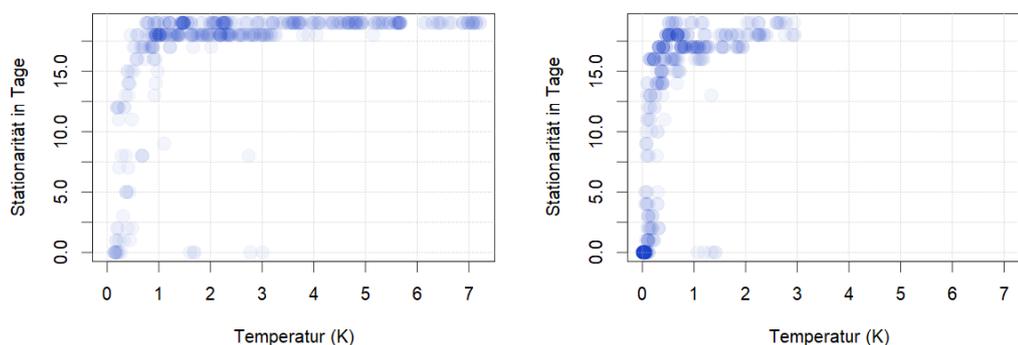


Abbildung 28 Stationarität als Funktion der maximalen absoluten Temperatur im letzten Simulationsjahr im Entnahmebrunnen (links) und in 100 m Abstrom des Entnahmebrunnens (rechts).

Diese Verteilungen sind linksschief, was bedeutet, dass die absolute maximale Temperatur für die Mehrheit der Simulationen eher klein ist. Die linksschiefe Verteilung der absoluten maximalen Temperatur in 100 m Abstrom des Entnahmebrunnens ist stärker ausgeprägt.

Die Verteilung der Stationarität als Funktion der maximalen absoluten Temperatur im letzten Simulationsjahr (Abbildung 28) zeigt, dass die Simulationen mit einer ausgeprägten Stationarität fast ausschliesslich hohe Temperaturen aufweisen.

6.4.6 Sensitivitätsanalyse für die 3K-Regel und die Absenkungsregel

Es stellt sich nun die Frage, welche Parameterkombination zu einer Überschreitung der 3K-Regel bzw. der Absenkungsregel oder zu einer bestimmten Temperatur T_{max} führen. Um den Zusammenhang zwischen einem Simulationsparameter P_i

und einer bestimmten Ergebnisklasse K_j (z.B. T_{max} , zwischen 1 K und 2 K), wurde die Verteilung von P_i über alle Simulationen mit der Verteilung von P_2 über alle

Simulationen mit der Ergebnisklasse K_j verglichen. Ist die Distanz zwischen beiden Verteilungen gross, gibt es einen möglichen Zusammenhang zwischen P_i und K_j . Diese Distanz wurde zwischen 0 und 1 normalisiert. Da es nicht auszuschliessen ist, dass die Distanz zwischen beiden Verteilungen aufgrund der kleinen Menge an Daten eher ein Produkt des Zufalles ist, wurde die Signifikanz dieser Distanz anhand Stichprobenwiederholung (engl. *Resampling*). Die Signifikanz ist durch den p-Wert (engl. *p-value*) angegeben. Je kleiner der p-Wert, desto signifikanter ist die Distanz. Das Ergebnis dieser Verteilungsanalyse ist in Abbildung 30 dargestellt.

Der Einfluss der Porosität und des Brunnenabstandes auf einer Überschreitung der 3K-Regel oder der Absenkungsregel ist nicht erkennbar. Folgende Parameterkombination führt tendenziell zu einer Überschreitung der 3K-Regel:

- hoher Gradient
- hoher K-Wert
- grosse Mächtigkeit
- eher ein hohes Energieprofil (hohe Durchflussrate)

Die drei oben aufgelisteten Parametern bestimmen die Transportgeschwindigkeit v :

$$v = K \cdot i / n$$

mit K = hydraulische Leitfähigkeit, i = Gradient und n = Porosität.

Deshalb wurde die gleiche Verteilungsanalyse für den Parameter v («Transportgeschwindigkeit») durchgeführt (Abbildung 30). Nur hohe Transportgeschwindigkeiten führen zu einer Überschreitung der 3K-Regel. Der Zusammenhang zwischen der Transportgeschwindigkeit und der Absenkungsregel ist nicht eindeutig.

Nicht überraschend führen die folgenden Gegebenheiten zu einer Überschreitung der Absenkungsregel:

- tendenziell ein hoher Gradient
- ein tiefer K-Wert
- kleine Mächtigkeiten
- tendenziell ein hohes Energieprofil (hohe Durchflussrate)

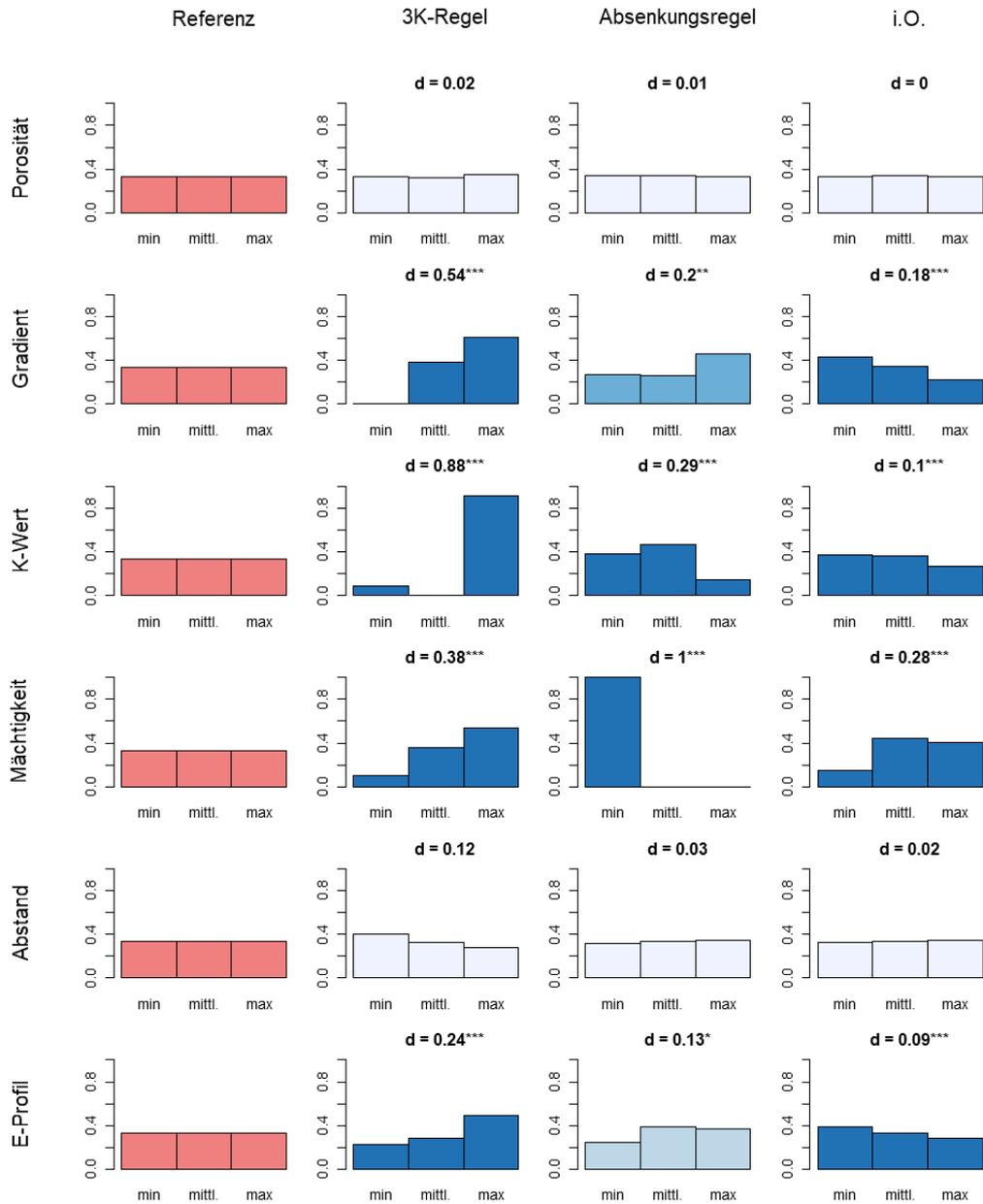


Abbildung 29 Verteilung der Parameterwerte für alle Simulationen («Referenz») und für die Simulationsklassen Überschreitung 3K-Regel, Überschreitung Absenkungsregel und restlichen Simulationen («i.O.»). Die Distanz zwischen der Referenz-Verteilungen und der entsprechenden Verteilungen der Klassen ist mit «d» angegeben. Ein Stern bedeutet p-Wert = 0.05, zwei Stern p-Wert = 0.01 und drei Stern p-Wert = 0.001.

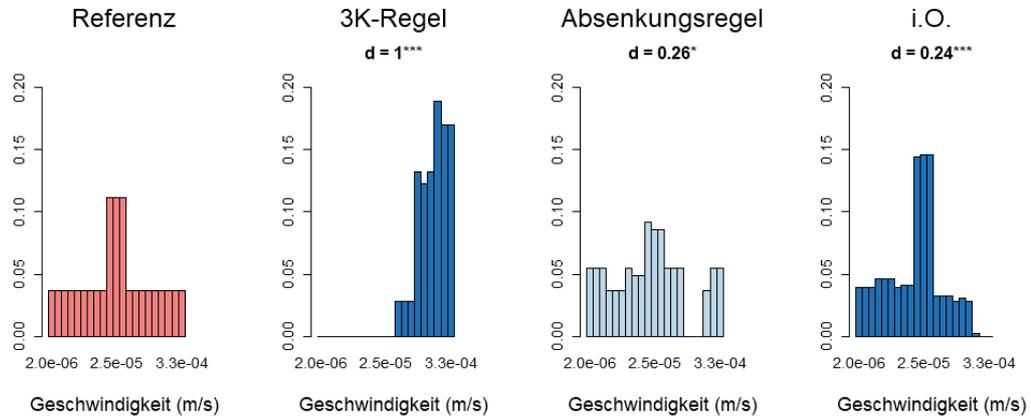


Abbildung 30 Verteilung der Parameterwert «Transportgeschwindigkeit» für alle Simulationen («Referenz») und für die Simulationsklassen Überschreitung 3K-Regel, Überschreitung Absenkungsregel und restlichen Simulationen («i.O.»). Die Distanz zwischen der Referenz-Verteilung und der entsprechenden Verteilungen der Klassen ist mit «d» angegeben. Ein Stern bedeutet p-Wert = 0.05, zwei Stern p-Wert = 0.01 und drei Stern p-Wert = 0.001.

6.4.7 Sensitivitätsanalyse für die maximale absolute Temperatur im letzten Simulationsjahr

Im Hinblick auf die Grundwassertemperatur stellt sich die Frage, welche Konfigurationen zu einer minimalen Temperatur in 100 m Abstrom der Entnahmebrunnen führen. Die Verteilungsanalyse wurde wieder durchgeführt. Diesmal wurden die Simulationen in drei Klassen anhand der absoluten maximalen Temperatur im letzten Simulationsjahr, T_{max} , unterteilt:

- Klasse T1: $0 < T_{max} \leq 1$ (358 Simulationen)
- Klasse T2: $1 < T_{max} \leq 2$ (67 Simulationen)
- Klasse T3: $2 < T_{max} \leq 3$ (34 Simulationen)

Der Zusammenhang zwischen der Parameterverteilung und den Klassen T1, T2 und T3 wurde untersucht. Abbildung 31 zeigt die Parameterverteilungen für alle Klassen und lässt sich anhand der Analyse der Parameterverteilungen der Transportgeschwindigkeit (Abbildung 32) besser interpretieren. Temperaturen $T_{max} \leq 1$ lassen sich erreichen mit kleiner Geschwindigkeit, eher grosser Mächtigkeit, tendenziell grossem Abstand und kleinerem Energieprofil.

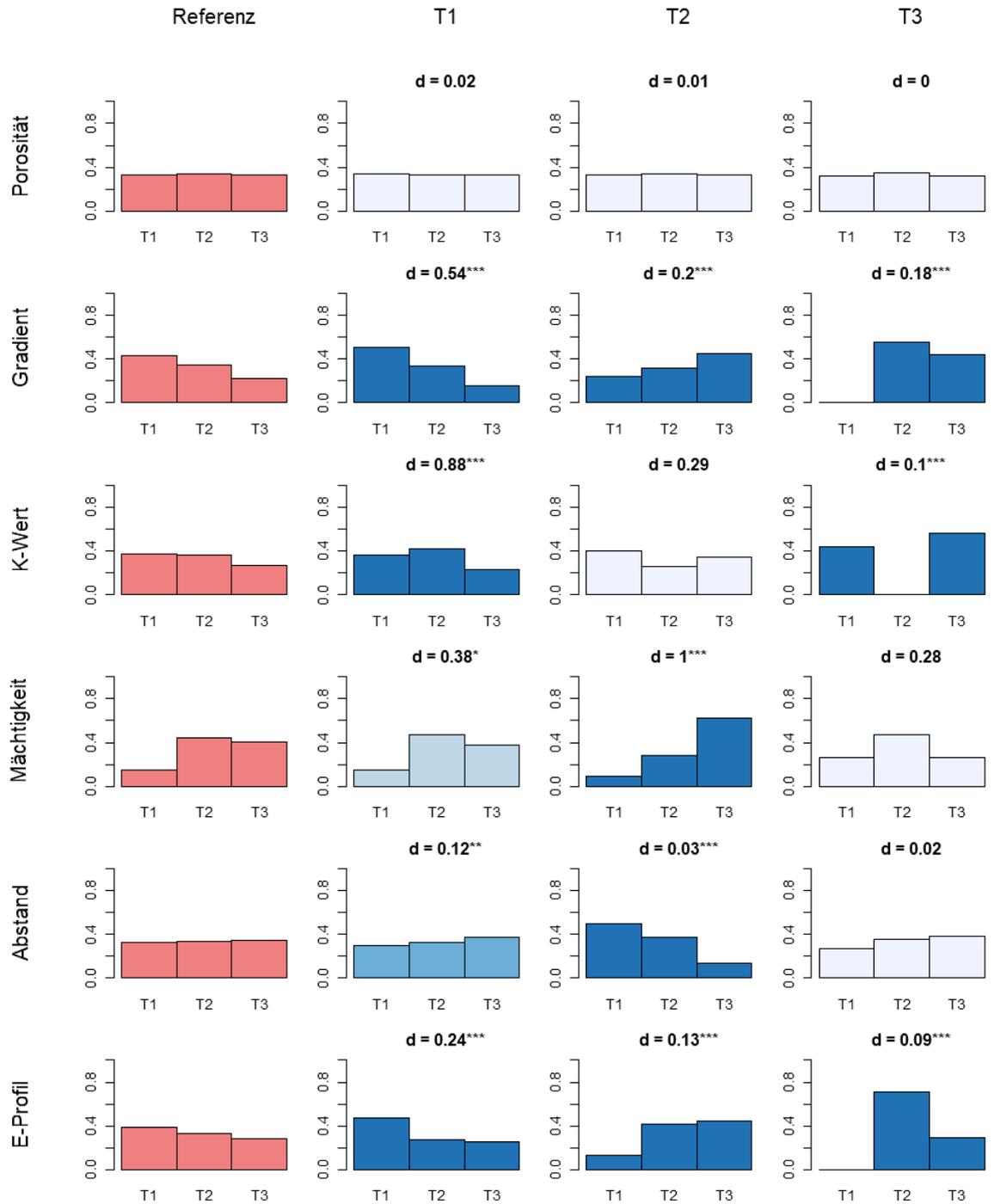


Abbildung 31 Verteilung der Parameterwerte für alle Simulationen («Referenz») und für die Simulationsklassen T1, T2 und T3 (Details im Text). Die Distanz zwischen der Referenz-Verteilungen und der entsprechenden Verteilungen der Klassen ist mit «d» angegeben. Ein S

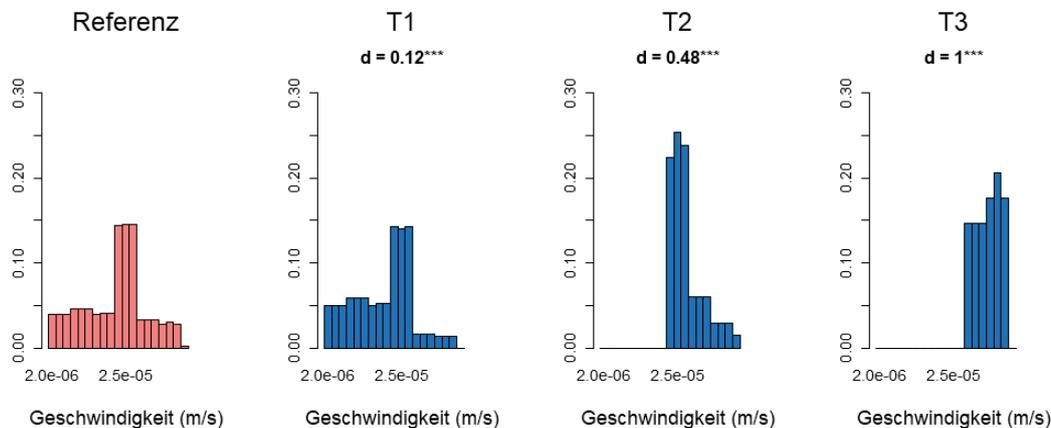


Abbildung 32 Verteilung der Parameterwert «Transportgeschwindigkeit» für alle Simulationen («Referenz») und für die Simulationsklassen T1, T2 und T3. Die Distanz zwischen der Referenz-Verteilung und der entsprechenden Verteilungen der Klassen ist mit «d» angegeben.

6.5 Interpretation und Folgerungen

Diese Studie mit einem synthetischen Grundwassermodell und Parameterwerte, die sich an die hydrogeologischen Gegebenheiten des Kantons Zürich anlehnen, unterstreicht die Machbarkeit der saisonalen Wärmespeicherung in Rezirkulationsanlagen mit ausgeglichenen Energieprofile. Die Machbarkeit erhöht sich mit kleineren Energieprofilen. Die Erfüllung der gesetzlichen Vorschriften (3K-Regel) hängt auch sehr stark von der Transportgeschwindigkeit ab. Je höher die Transportgeschwindigkeit ist, desto grösser ist die Chance, dass die 3K-Regel überschritten wird. Der Zusammenhang zwischen der absoluten maximalen Temperatur im letzten Simulationsjahr und die Transportgeschwindigkeit folgt dem gleichen Muster. Tiefere Temperaturen im Abstrom der Entnahmebrunnen sind ein bedeutender Vorteil bei der Anwendung von Rezirkulationsanlagen auf einer regionalen Skala (reduzierte Kaskadeneffekte).

Die Analyse konnte keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Parametern Porosität und Brunnenabstand und der Machbarkeit der Rezirkulation zeigen.

Der Stauer als temporärer Wärmespeicher und die Dispersivität haben einen signifikanten Einfluss auf den Wärmetransport. Dieser Einfluss wurde nicht im Detail untersucht. Wenn der Stauer in der Wärmetransportmodellierung nicht berücksichtigt wird, werden die Abweichungen der Grundwassertemperaturen überschätzt, d.h. der Energiefluss in den Stauer wirkt sich dämpfend auf die Temperaturanomalie im Aquifer aus.

Wenn die Brunnen nicht parallel zur Hauptfliessrichtung angeordnet sind, verringert sich die Effizienz der Rezirkulation.

7. Folgerungen

7.1 Erkenntnisse der Modellierungsstudie

- Die synthetischen Modellierungen zeigen, dass Rezirkulationsanlagen über grosse Wertebereiche der Aquifereigenschaften bei ausgeglichenen Energiebilanzen stabil betrieben werden können. Je nach Anlagengrösse (Spitzennutzung, jährlicher Energieumschlag) und Aquifereigenschaften folgen die Brunnenkonfigurationen (Abstand zwischen Entnahme und Rückgabe, Anzahl Brunnen für die erforderliche Entnahmemenge) und saisonale Temperaturanomlien.
- Die Modellierungen in bestehenden thermischen 2D Grundwassermodellen des Kantons Zürich zeigen, dass die Wahl eines günstigen Brunnenabstandes stark von der Porosität und dem k-Wert abhängen. Für die beiden Aquifere «Limmattal» und «Winterthur» waren bei grossen Energienutzungen stabile Anlagen mit Brunnenabständen von 130 bis 200 m thermisch stabil im Modell.
- Der Abstand der Brunnen ist robust gegenüber geringen hydrogeologischen Veränderungen oder Veränderungen im jährlichen Energiebedarf bzw. der daraus abgeleiteten notwendigen Grundwasserförderung.
- Hingegen führen Abweichungen der Anlagenachse zur natürlichen Strömungsrichtung zu einer Verschlechterung der Wärmespeicherung und zu erhöhten Temperaturanomalien abstromig der Anlage.
- Bei günstigen Rezirkulationsverhältnissen kommen im Vergleich zu bisherigen Grundwassernutzungen nur sehr geringe abstromige Temperaturanomalien (auch sog. Temperaturfahnen) vor. Anlagen mit einer saisonalen Wärmespeicherung bewirken lokal grosse Temperaturveränderungen im Bereich zwischen den Brunnen. Sie haben deshalb einen markant geringeren Flächenbedarf (bei gleicher Energienutzung wie eine konventionelle Anlage).
- Die Berücksichtigung des Energieaustausches mit dem Stauer und der Oberfläche (bei geringem Flurabstand des Grundwasserspiegels) ist relevant für die Berechnung der Temperaturanomalien.
- Die Unsicherheiten bei den Prognosen mittels Modellierungen bestehen vor allem in der Wahl des Dispersionskoeffizienten und der Porosität. Diese Parameter können nur über Kalibrationsverfahren der Modelle anhand der Datenreihen beim Betrieb einer Anlage mit Monitoring näher bestimmt werden.

7.2 Potential von Wärmespeicherung in oberflächennahen Aquiferen

Im Kanton Zürich kommen hydrogeologisch günstige Voraussetzungen für saisonale Wärmespeicherung in oberflächennahen Aquiferen vor. Bedeutende Flächen sind für eine Erschliessung vorhanden (Überlappung Siedlung und Aquifere).

Ein breites Spektrum an Anlagengrössen ist realisierbar. Die aktuellen gesetzlichen Vorgaben zur zulässigen Temperaturanomalie (sog. 3K-Regel) kann bei kleinen bis mittleren Anlagengrössen in mächtigen Aquiferen problemlos eingehalten werden. Die Simulationen zeigen aber auch, dass grosse Anlagen in den Aquiferen des Limmattals oder bei Winterthur nur mit Brunnenabständen von > 100 m realisierbar sind, d.h. die heutigen Vorgaben nicht ganz erfüllbar sind. Ebenso können weniger mächtige Aquifere heute nur mit geringen Energieumschlägen genutzt werden, wohingegen mit Rezirkulationsanlagen auch solche «wenig ergiebigen» Aquifere interessant für eine Nutzung sind.

Rezirkulationsanlagen weisen bezüglich Bau und Betriebskosten relevante wirtschaftliche Vorteile auf: Bei Rezirkulationsanlagen mit Wärmespeicherung ist die Grundwassertemperatur im Winterhalbjahr gegenüber dem natürlichen Zustand um einige K erhöht. Daraus resultiert ein geringerer Strombedarf für den Wärmetauscher im Vergleich zu bisherigen Anlagen. Gleichzeitig führt die höhere Temperaturspreizung zu geringeren Förderraten, weshalb die Erschliessung des Aquifers günstiger ist (Die Einsparung an Pumpenstrom ist i.d.R. sehr gering). Als Zusatzaufwand ist eine aufwändigere Planung und ein aktives Management während des Betriebs zu erwähnen (Temperaturmessstellen, Steuerung der Anlage, Netz für saisonalen Energieausgleich)

Durch die Wärmespeicherung wird thermisch verändertes Grundwasser gefördert und dem Heiz-/Kühlsystem zugeführt. Dadurch entstehen bessere Wirkungsgrade bei den Wärmepumpen, sodass sich der Strombedarf für die gleiche Heizleistung reduziert. Bei Kühlanwendungen ist der Wirkungsgrad um ein Vielfaches höher gegenüber Klimaanlage, was zu signifikanten Stromeinsparungen führt.

Je nach Betriebsstrategie und Anlagen-Design sind besonders während Bedarfsspitzen relevante Beiträge zur Reduktion des Stromverbrauchs möglich (auf täglichen, wöchentlichen und saisonalen Skalen), womit grosse Anlagen durchaus einen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten können.

Die Rezirkulation verändert den Aquifer nur lokal und verursacht keine langen / grossflächigen Temperaturanomalien ausserhalb des Standortes. Dadurch können mehr Anlagen in einem Aquifer platziert werden und es gibt weniger gegenseitige Abhängigkeiten. Eine Verkettung der Auswirkungen von Anlagen kann vermieden werden, die Anlagen können autonom gesteuert werden. Bereits heute dicht genutzte Aquifere können in Zukunft mit Rezirkulationsanlagen und saisonaler Wärmespeicherung noch dichter genutzt werden.

Diese Reduktion der gegenseitigen Beeinflussungen vereinfacht das Aquifer-Management.

Eine Modifikation der 3K-Regel ist dringend zu diskutieren, da sich dadurch das vielseitige Potential von saisonaler Wärmespeicherung mittels Rezirkulationsanlagen an vielen Standorten zum Vorteil der Gesellschaft entfalten kann. Im Gegenzug zu einer solchen Ausnahmegewilligung sollte geprüft werden, welche Auflagen in Bezug zu Monitoring und Anlagenkonzept (d.h. Beitrag zur Reduktion von Spitzenenergie durch Zwischenspeicherungen) sinnvoll sind.

7.3 Entwicklungsziele für Aquifer-Wärmespeicher

Modellierungen auf Basis der typischerweise vorhandenen Aquifereigenschaften belegen, dass Rezirkulationsströmungen mit saisonaler Wärmespeicherung thermisch stabil sind. Die Anordnung der Brunnen hängt dabei von den unterschiedlichen Aquifereigenschaften ab. Damit zeigen die Abklärungen, dass die vorhandenen Aquifere ein grosses Potential für die Nutzung als saisonale Wärmespeicher aufweisen. Nach diesen ersten hydrogeologischen Erkenntnissen sind folgende weiteren Entwicklungsschritte sinnvoll, um Rezirkulationsanlagen zu einer zuverlässigen, planbaren Technologie und vor allem auch zu einem nachweisbar bewilligungsfähigen System zu entwickeln.

- A) Die Funktionsfähigkeit einer oberflächennahen, saisonalen Wärmespeicherung in einer Rezirkulationsströmung muss mit einer Demonstrationsanlage bewiesen werden. Dazu sind folgende Schritte zu verfolgen:
 - Vertiefte Studie zum Anlagen-Design, Energiebilanz, Steuerungsstrategie
 - Standortsuche / Standortwahl
 - Erstellen einer Pilot- und Demonstrationsanlage mit Temperaturmessfeld
 - Betrieb der Anlage und Nachweis der Wirksamkeit der Wärmespeicherung und ggf. unterschiedlicher Betriebsstrategien
 - Eichung der thermischen Modellierungen zur Verbesserung der Prognosen und des Aquifer-Managements

- B) Der Umbau von bestehenden Anlagen zu Rezirkulationsanlagen ist abzuklären: Da heutige konventionelle Grundwassernutzungen grossflächige Temperaturanomalien abstromig aufweisen, sind erhebliche Unsicherheiten für die weitere, dichtere Nutzung des Aquifers vorhanden. Der hohe Flächenbedarf je Energienutzung ist ein Nachteil, ebenso die daraus entstehenden Kaskadeneffekte. Für ein zukünftiges Aquifer-Management ist ein entscheidender Vorteil, solche Anlagen mittelfristig durch Rezirkulationsanlagen zu ersetzen. Der Ersatz grosser

(konventioneller) Grundwassernutzungen führt zu signifikanten Einsparungen beim Stromverbrauch, Senkung des Strombedarfs zu Spitzenzeiten und für die Betreiber auch zu Kostenvorteilen. Damit gehen Vorteile bei der Versorgungssicherheit und der Zuverlässigkeit des Aquifer-Management einher. Dazu sind folgende Schritte nötig:

- Evaluation bestehender Anlagen bezüglich Potential eines Umbaus
- Auswahl einer Pilotanlage
- Wirtschaftlichkeitsrechnungen zum Umbau (Effizienzgewinne)
- Pilotprojekt für einen Umbau zu einer Rezirkulationsanlage im Rahmen einer Sonderkonzession

- C) Eine dichtere Nutzung der Aquifere stellt höhere Anforderungen die Bewilligungsverfahren hinsichtlich Raumausnutzung, thermische Nachweise und gegenseitige Konflikte von benachbarten Anlagen. Die daraus entstehenden Problemstellungen oder Datenbedürfnisse können nur mit einem aktiven Aquifermanagement gelöst werden, welches stets aktuelle Daten, die effektiven Nutzungen und Modellresultate mit dem zeitlich-räumlichen Zustand des Aquifers verfügbar macht.

Als Voraussetzung für hochauflösende Temperaturdaten sind Konzepte und Messgeräte für Temperaturmessfelder zu entwickeln. Diese Datensammlung ist auch für die Eichung von Modellresultaten nötig. Zudem ist absehbar, dass ein Temperatur-Monitoring von grossen Anlagen für den effizienten Betrieb nötig ist. Sowohl Temperaturmessfelder wie auch das Monitoring von Anlagen benötigen tiefenabhängige Messungen im Aquifer und Stauer, was mit den heutigen Messstellen i.d.R. nicht möglich ist.

7.4 Integration von Nachhaltigkeit im Gewässerschutz

Das Konzept einer Konzession entstand bereits vor mehr als 100 Jahren. In dieser früheren Epoche wurden natürliche Ressourcen abgebaut, ein «minderwertiges Abfallprodukt» als Abraum deponiert und ein ausgebeuteter Untergrund produziert. Analog zum Ressourcenabbau wurde die Grundwasserkonzession aufgefasst: Das abstromig zuströmende Grundwasser wird in einem Brunnen gefasst, energetisch verändert (Entzug für Heizung, Energieanreicherung für eine Kühlung) und anschliessend abstromig als thermischer Abfall wieder ins Grundwasser zurück gegeben.

Aktuell gilt das Prinzip, dass der erste Konzessionär sich so viel vom Allgemeingut Grundwasser nehmen kann, wie er braucht. Die späteren Konzessionsgesuche müssen nach-

weisen, dass sie bestehende Nutzungen nicht nachteilig beeinflussen oder dass die Ausnutzung der Ressource nicht zu gross wird. Befindet sich ein Unterlieger in der Abstromfahne einer bestehenden Konzession, so hat dieser oft keine oder nur eine reduzierte Möglichkeit, eine Grundwassernutzung bewilligt zu erhalten, da er die 3°-Regel summarisch einhalten muss. Die abstromige Anlage befindet sich in einer «thermischen Altlast» des obstromigen Nutzers.

Die aktuelle Gesetzgebung basiert auf einem veralteten Konzept der Interaktion des Menschen mit der Umwelt und bedarf einer Modernisierung: Nachhaltige Nutzungen sind nicht nur ein Mode-Trend, sondern ein umweltpolitischer Imperativ. Wissenschaftlich belegt und gesellschaftlich akzeptiert sind heute Konzepte, welche langfristig Ressourcen erhalten oder nach dem Prinzip von Recycling funktionieren. Solche Systeme weisen eine bedeutend höhere Effizienz auf und führen damit zu komparativen Vorteilen der gesamten Gesellschaft.

Die Gewässerschutzverordnung gibt mit der sog. 3°-Regel vor, dass die energetische Ressource nicht mehr als 3°C im Umkreis von 100 m einer Anlage verändert werden darf. Diese Betrachtung ist auf die bisherigen Anlagenkonzepte ausgerichtet. Die 3°-Regel ist für Anlagen ohne Steuerung der Energiebilanz und ohne Monitoring der effektiven Temperaturveränderungen sinnvoll. Im Hinblick auf neue Nutzungsarten sollte diese Vorgabe ergänzt werden:

Für thermische Grundwassernutzungen, welche eine annähernd ausgeglichene Energiebilanz aufweisen, über ein Monitoring der effektiven Temperaturveränderungen verfügen sowie eine Steuerung der Anlage bzw. der Temperaturveränderung (Energiebilanz, Pumpmenge, Ort der Rückgaben/Entnahmen) enthalten, sind Ausnahmen von der 3°-Regel zwischen Entnahme- und Rückgabeburgen zu ermöglichen. Dies würde bedeuten, dass eine Sonderbewilligung für eine intensivere Nutzung des Aquifers auch mit zusätzlichen Auflagen betreffend Monitoring und Steuerung der Anlage einhergehen.

Die Konzessionsbehörden regeln die Ausnahmen, die Vorgaben der zulässigen Temperaturveränderungen (Wo, wieviel, wann) sowie die Art der Überwachung und der Massnahmen zur Einhaltung der Temperaturvorgaben (z.B. Reduktion der Heizleistung in der Folgeperiode). Dies ist erforderlich, damit je nach Komplexität und Grösse der Anlage sowie Vulnerabilität des Aquifers die adäquaten Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden.

Die Herleitung und Definition der Anforderungen an eine Konzession für eine energetisch ausgeglichene Rezirkulationsanlage mit hohen Temperaturspreizungen und einer saisonalen Wärmespeicherung im Aquifer stellt die Grundlage dar, um eine sinnvolle Modifikation der Gewässerschutzverordnung zu diskutieren. Wir empfehlen deshalb, eine Wegleitung für das Konzessionsverfahren von Grundwassernutzungen mit Wärmespeicherung und Rezirkulationsströmungen zu erstellen.

Referenzen

- [1] I. Stober und K. Bucher, „Potentiale und Perspektiven geothermischer Energienutzung“, in *Geothermie*, I. Stober und K. Bucher, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020, S. 71–74. doi: 10.1007/978-3-662-60940-8_5.
- [2] I. Stober und K. Bucher, „Geschichte geothermischer Energienutzung“, in *Geothermie*, I. Stober und K. Bucher, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020, S. 19–28. doi: 10.1007/978-3-662-60940-8_2.
- [3] L. F. Cabeza, „2 - Advances in thermal energy storage systems: methods and applications“, in *Advances in Thermal Energy Storage Systems (Second Edition)*, L. F. Cabeza, Hrsg. Woodhead Publishing, 2021, S. 37–54. doi: 10.1016/B978-0-12-819885-8.00002-4.
- [4] B. Nordell, A. Snijders, und L. Stiles, „5 - The use of aquifers as thermal energy storage systems“, in *Advances in Thermal Energy Storage Systems (Second Edition)*, L. F. Cabeza, Hrsg. Woodhead Publishing, 2021, S. 111–138. doi: 10.1016/B978-0-12-819885-8.00005-X.
- [5] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Gesetz zum Schutz der Gewässer (GSchG), SR 814.20*. 2020.
- [6] P. Fleuchaus, S. Schüppler, R. Stemmler, K. Menberg, und P. Blum, „Aquiferspeicher in Deutschland“, *Grundwasser*, Bd. 26, Nr. 2, S. 123–134, Juni 2021, doi: 10.1007/s00767-021-00478-y.
- [7] „ATES“, *Bundesverband Geothermie*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/a/ates.html> (zugegriffen 24. Januar 2022).
- [8] U. J. Vincent Badoux, „Niedertemperatur-Aquiferspeicher, Kurzstudie“, Bundesamt für Energie (BFE), 1320125.1, Dez. 2020.
- [9] P. Fleuchaus, „Global application, performance and risk analysis of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)“, PhD Thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020.
- [10] C. Synwoldt, „Aspekte der Dezentralität“, in *Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien: Technik, Märkte, kommunale Perspektiven*, C. Synwoldt, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021, S. 281–351. doi: 10.1007/978-3-658-33733-9_2.
- [11] P. Blum u. a., „Is thermal use of groundwater a pollution?“, *J. Contam. Hydrol.*, Bd. 239, S. 103791, Mai 2021, doi: 10.1016/j.jconhyd.2021.103791.
- [12] B. für U. B. BAFU, „Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA“. <https://www.bafu.admin.ch/>
- [13] T. Riedel, „Temperature-associated changes in groundwater quality“, *J. Hydrol.*, Bd. 572, S. 206–212, Mai 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.059.
- [14] C. Tang u. a., „Procedure for Calculating the Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP) in Drinking Water Supply: Importance of Temperature, Ionic Species and Open/Closed System“, *Water*, Bd. 13, Nr. 1, S. 42, Dez. 2020, doi: 10.3390/w13010042.
- [15] NCCS (Hrsg.), „Klimaszenarien für die Schweiz“, National Centre for Climate Services, Zürich, ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2, 2018.
- [16] BAFU (Hrsg.), „Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft.“, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern., Umwelt-Wissen Nr. 2101.
- [17] S. Haehnlein, P. Bayer, und P. Blum, „International legal status of the use of shallow geothermal energy“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 14, Nr. 9, S. 2611–2625, Dez. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.069.

- [18] SR 814.201 - Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV). [Online]. Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/2863_2863_2863/de
- [19] AWEL - Sektion Grundwasser und Wasserversorgung, „Grundwasserkarte des Kantons Zürich“. [Online]. Verfügbar unter: <https://maps.zh.ch/>
- [20] Simultec AG, „Strömungsmodell Limmattal, Nachbildung der Strömungsverhältnisse im Limmattal. Im Auftrag des AWEL, Kanton Zürich“, 2014.
- [21] Simultec AG, „Wärmetransportmodell Limmattal, Nachkalibrierung der Grundwassertemperaturen im Limmattal. Im Auftrag des AWEL, Kanton Zürich“, 2019.
- [22] Simultec AG, „Grundwasser-Wärmenutzung QMV Aquifer Mühle, Numerische Modellierung. Im Auftrag der Stadtwerk Winterthur“, 2015.
- [23] Simultec AG, „Wärmetransportmodell Eulachtal. Im Auftrag des AWEL, Kanton Zürich“, 2020.