

Bericht
Geothermische Nutzung der Oberen Meeresmolasse
Phase 1

Auftraggeber:

Kanton Zürich Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Stampfenbachstrasse 12
8090 Zürich

Vertreten durch:
Michael Tobler

Autoren:

Dr. Andreas Ebert

Christian Häring

Liestal, 5.6.2025



| | |
|---|---|
| Projekt | Geothermische Nutzung der OMM- Phase 1 |
| Standort | Gesamter Kanton Zürich |
| Objekt | |
| Auftraggeber / Bauherrschaft Adresse | Kanton Zürich Baudirektion Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Stampfenbachstrasse 12 8090 Zürich |
| Referenz-Nr. | En-PP 24-22; BD01660813 |
| | |
| Ausführendes Büro | Geo Explorers AG Wasserturmplatz 1 4410 Liestal www.geo-ex.ch info@geo-ex.ch +41 61 821 60 40 |
| Projektleitung | Christian Häring |
| Qualitätssicherung | Dr. Andreas Ebert |
| Dateiname / Version | 2506 Bericht geothermische Nutzung OMM |
| Datum Bericht | 5.6.2025 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 4 |
| 2 | Projektidee | 5 |
| 3 | Projektorganisation | 8 |
| 4 | Projektziele | 8 |
| 5 | Projekttablauf | 9 |
| 6 | Machbarkeitsstudie | 10 |
| 6.1 | Wirtschaftlichkeitsrechnungen Energie 360° | 10 |
| 6.2 | Kapital- und Betriebskosten | 11 |
| 6.3 | Numerische Simulation | 12 |
| 6.3.1 | Numerisches Modell | 12 |
| 6.3.2 | Eichung an den Betriebsdaten von Bassersdorf | 14 |
| 6.3.3 | Varianten | 14 |
| 6.3.4 | Fazit Simulation | 19 |
| 6.4 | Zulässige Temperaturspreizung | 20 |
| 6.5 | Erkundungs- und Erschliessungskonzept | 20 |
| 6.5.1 | OMM Grundlagen aus EWS-Bohrungen | 20 |
| 6.5.2 | Potential und Zielgebiet | 21 |
| 6.5.3 | Erkundungsvorgehen | 22 |
| 6.5.4 | Bohrkonzept | 23 |
| 6.5.5 | Bohrkosten | 24 |
| 6.5.6 | Erhöhung der Durchlässigkeit | 24 |
| 6.5.7 | Ziele von der nächsten Erkundungsphase | 24 |
| 7 | Schlussfolgerung und Empfehlung | 25 |
| 8 | Anhang | 27 |

1 Zusammenfassung

Die Obere Meeresmolasse (OMM) ist im Mittelland flächig vorhanden und die darin vorkommenden Sandstein- und Konglomeratlagen sind oft wasserführend, was diese Schicht für eine thermische Nutzung interessant macht. Im Kanton Zürich ist die OMM im Norden direkt an der Oberfläche aufgeschlossen und taucht nach Süden ab. Im südlichen Kantonsteil wird die OMM erst nach mehreren hundert Meter bis in 1 km Tiefe angebohrt. Die OMM gehört einerseits zu den durchlässigsten Schichten in der Schweiz, andererseits ist sie im nördlichen Mittelland nicht tief versenkt, was sie für eine wirtschaftliche energetische Nutzung interessant macht, da nicht tief gebohrt werden muss. Die Datengrundlage (Bohrdaten) für die thermische Nutzung der OMM ist bescheiden, da sie bisher noch nie systematisch erkundet wurde.

Die bisherigen thermischen Nutzungen in der OMM beschränken sich auf Singletten (z.B. Bassersdorf), was bei neuen thermischen Nutzungen nicht mehr möglich sein wird. Bei thermischen Grundwasser-Nutzungen muss das thermisch genutzte Wasser wieder in den gleichen Grundwasserleiter zurückgeführt werden. Somit ist eine Dublette nötig, d.h. ein Förderbrunnen und ein Rückgabebunnen.

Bisherige Nutzungen zeigen, dass aus der OMM eine thermische Leistung von mehreren hundert Kilowatt möglich ist. Für diese Machbarkeitsstudie wurde eine Bandbreite der thermischen Leistung von 250-1'500 kW angenommen. Diese Machbarkeitsstudie soll zeigen, ob aus der OMM wirtschaftlich thermische Energie entzogen werden kann, resp. unter welchen Rahmenbedingungen (Nutzungsart, Bohrtiefe, Bohrkonzept) dies möglich ist.

Bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde definiert, wie hoch die maximal anfallenden Bohrkosten, inkl. fehlgeschlagener Sondierbohrungen sein dürfen, damit der Wärmepreis einer OMM-Anlage mit dem Wärmepreis einer thermischen Seewassernutzung (rund 23.5 Rp./kWh) vergleichbar ist. Bei einer OMM-Nutzung mit einer thermischen Leistung von 250 kW und einem Wärmepreis von 24.6 Rp./kWh stehen für die Erkundungs- und Brunnendublette rund 250'000 CHF zur Verfügung, für grössere thermische Anlagen entsprechend mehr. Für das Bohrkonzept bedeutet dies, dass die Brunnen bei einer 250 kW-Anlage nicht bis in grosse Tiefe erstellt werden können, um die Kosten im vorgegebenen Budget zu halten. Die Bohrtiefe ist für diesen Fall bei ca. 150 m limitiert, was den zusätzlichen Vorteil hat, dass der Ausbau des Brunnens mit PVC-Rohren erfolgen kann und nicht mit einer teureren Stahlverrohrung. Damit können die Budgetvorgaben eingehalten werden.

Für die Bestimmung des thermischen Potentials der OMM wurden numerische Grundwassersimulationen durchgeführt. Als Ausgangssituation wurden die hydrogeologischen Bedingungen von Bassersdorf gewählt. Wenn Bassersdorf als Dublette, d.h. mit der Rückgabeböhrung in max 200 m Entfernung, mit 10 l/s und einer Temperaturspreizung von 6K betrieben würde, wäre der thermische Kurzschluss problematisch und ein nachhaltiger Betrieb nicht möglich. Mit einer Dublette ist der mögliche Energieentzug aufgrund des thermischen Kurzschlusses limitiert, ausser die Distanz zwischen den Bohrungen liegt bei mehreren hundert Metern. Um eine höheren Energiebezug bzw. Leistung zu ermöglichen müssen die Abstände zwischen den Brunnen maximiert werden, ebenso die Temperaturspreizung. Idealerweise wird der Untergrund als saisonaler Speicher mit kalten und warmen Brunnen genutzt. Dann kann eine deutlich höhere Temperaturspreizung genutzt werden. Der thermische Kurzschluss ist nicht gegeben und die 3 K-Regel in 100m Entfernung, welche aktuell nach wie vor gilt, kann auch eingehalten werden. Auch Varianten mit einer Teilregeneration führen dazu, dass der Untergrund thermisch länger genutzt werden kann bis ein thermischer Kurzschluss erfolgt oder die 3°K-Regel nicht mehr eingehalten werden kann. Es kann von den Simulationen schlussgefolgert werden, dass eine geothermische Nutzung in der OMM für eine Areal- oder Quartiernutzung möglich ist, idealerweise mit einer Teilregeneration. Reine Heiznutzungen sind bis etwa 250 kW Kälteleistung mit gleichen geologischen Voraussetzungen wie Bassersdorf

möglich, grössere thermische Nutzungen bräuchten aufgrund eines thermischen Kurzschlusses zwischen den Bohrungen zwingend eine Regeneration des Untergrunds im Sommer.

Die Machbarkeitsstudie hat als Schlussfolgerung gezeigt, dass gemäss aktuellem Kenntnisstand das geothermische Potential in der OMM an keinem Standort $>1 \text{ MW}_{\text{th}}$ beträgt. Eine Nutzung der OMM für einen Wärmeverbund ist entsprechend eher unrealistisch. Die Simulationen zeigen, dass bei mind. gleichen Verhältnissen wie in Bassersdorf eine Areal- oder Quartiernutzung mit einer geothermischen Nutzung aus der OMM durchaus möglich ist und so die OMM einen Beitrag zur geothermischen Nutzung und Wärmespeicherung leisten kann. Geographisch liegen diese guten Bedingungen gemäss derzeitigem Wissensstands auf der Achse Urdorf-Bassersdorf, was als Zielgebiet für die erste Exploration in der OMM empfohlen wird. Für die nächste Phase wird empfohlen, dass max.10 Erkundungsbohrungen mit einer Bohrtiefe von max. 150 m auf der Achse Urdorf-Bassersdorf gebohrt werden, um die OMM systematisch zu erkunden und zu testen. Idealerweise werden diese Erkundungsbohrungen im Fündigkeitsfall zu Wärme- und Kühlzwecken genutzt.

2 Projektidee

Die Obere Meeresmolasse (OMM) im Mittelland, welche eine rund 250 - 500 m mächtige Schicht innerhalb der Molasse darstellt, wird generell als eine grundwasserführende Schicht (Aquifer) betrachtet. Diese besteht zum Grossteil aus tertiären Sandsteinen mit eingeschalteten Konglomeraten, welche unter flach-marinen Bedingungen vor rund 21-17 Mio. Jahren im Molassebecken abgelagert wurden. Die Schichten fallen im Mittelland nach Süden ein und erreichen im Alpenvorland Tiefen von $>1000 \text{ m}$. Die OMM liegt flächendeckend vor und deren Tiefe kann grundsätzlich gut abgeschätzt werden.

In den siebziger bis neunziger Jahren wurden einzelne Bohrungen / Brunnen in der OMM erstellt. Diese zeigten, dass die OMM-Ablagerungen Porositäten von 5 – 20 % und Durchlässigkeiten von bis zu 10^{-5} bis 10^{-7} m/s (= schwach bis durchlässig) aufweisen. Letztere gehören nach dem geklüfteten Muschelkalk zu den zweithöchsten in der Nordschweiz (Abbildung 1). Entsprechend gibt es einzelne funktionierende Brunnen in Zürich, Kloten, Bassersdorf und Kreuzlingen. Es handelt sich jeweils um Singletten. Die Schüttungsraten in den nutzbaren Singletten liegen bei rund 3 bis 8 l/s und die Fördertemperaturen bei ca. 19 – 25 °C (Ausfluss) mit thermischen Leistungen bis ca. 0.5 MW. Die Felsgrundwässer sind salzig und mineralisiert und entsprechend nicht für die Trinkwassernutzung geeignet.

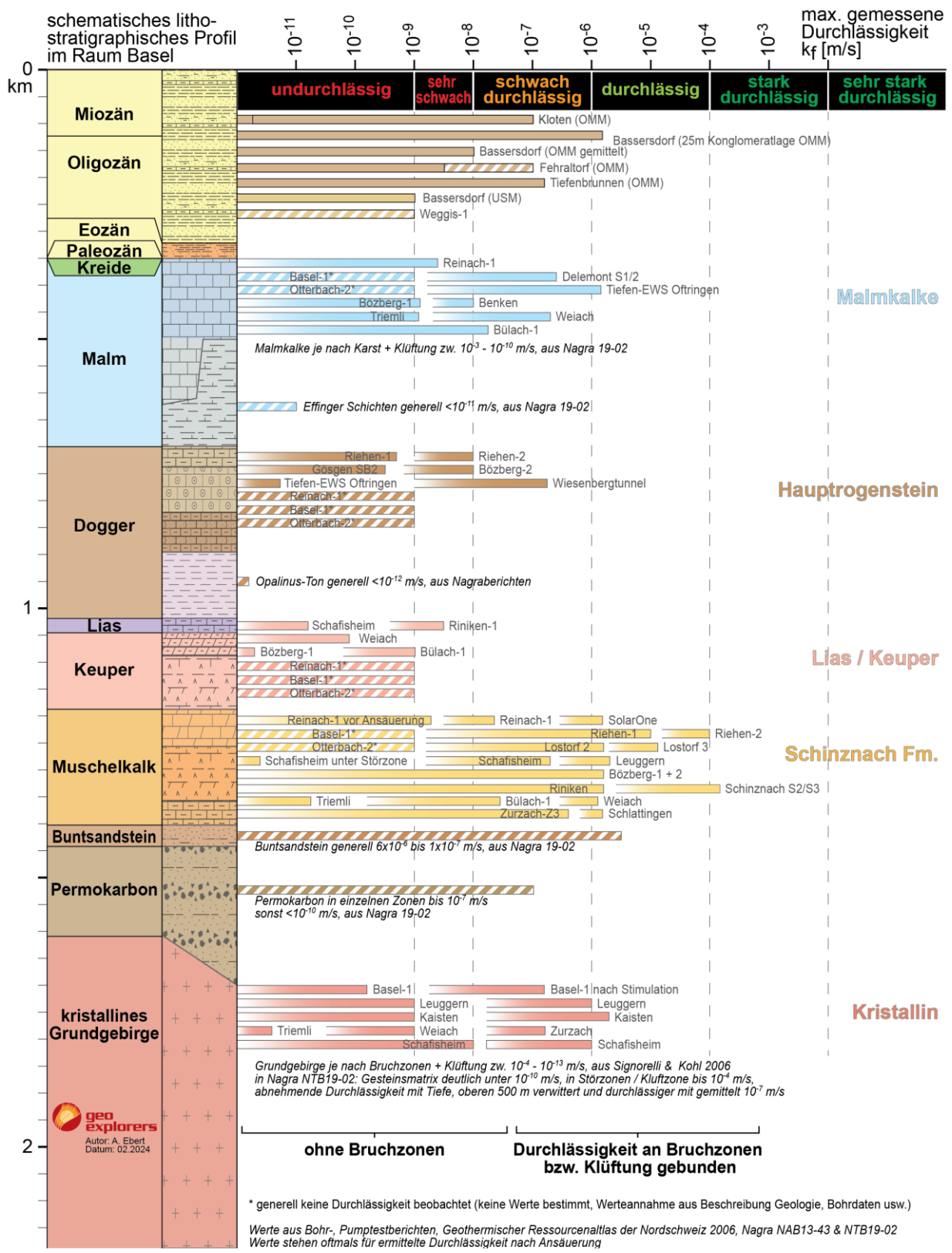


Abbildung 1 Bandbreite der hydraulischen Durchlässigkeiten in Tiefbohrungen
Es werden Daten aus Tiefbohrungen der Nordschweiz und Mittelland gezeigt.

Je weiter südlich, desto tiefer wurde die OMM versenkt und desto dichter und undurchlässiger scheinen die Sandsteine der OMM zu sein. Dies zeigt z. B. die Geothermiebohrung Fehraltorf, wie auch andere Tiefbohrungen (z. B. Weggis-1). Mit dem geringen Datenstand können derzeit aber keine Grenzen gezogen werden, ab wo in der OMM ausreichende Schüttungsraten möglich sind und wo nicht. Des Weiteren zeigen die Singletten in Zürich, Kloten und Bassersdorf, dass sie sich gegenseitig beeinflussen und die Nutzung zu Grundwasserspiegelabsenkungen im Pumpbetrieb von rund 200 m führen.

Obwohl generell die OMM als eine homogene Sandstein-Schicht angesehen wird, variieren die Porositäten und Durchlässigkeiten, welche in den wenigen bekannten Bohrungen bestimmt wurden. Es scheint, dass die höheren Durchlässigkeiten sich auf einzelne wenige Zehnermeter mächtige Lagen innerhalb der OMM (tendenziell eher im oberen Bereich der OMM in Nagelfluh-Bänken) begrenzen. Die maximalen Durchlässigkeiten liegen bei schwach durchlässig bis durchlässig. Entsprechend sind die Schüttungsraten mit bis 8 l/s trotz hohen Absenkungen in den Singletten eher bescheiden. Die resultierenden Kälteleistungen liegen bei wenigen 100 kW.

FAZIT: Die OMM kann geothermisch genutzt werden, wie einzelne funktionierende Brunnen zeigen. Es ist aber nicht überall eine wirtschaftliche Nutzung möglich. Zudem sind im Fall von Singletten die Schüttungsraten mit 3 – 8 l/s «noch» bescheiden. Da die OMM in den nördlichen Bereichen, wo sie durchlässiger zu sein scheint, weniger tief ist, liegen die max. Aquifertemperaturen «nur» bei ca. 20 – 35°C. Wird auch eine Einspeicherung von Wärme bzw. eine Regeneration angedacht, so sind die tieferen Temperaturen von Vorteil. Die angestrebte Leistung liegt bei bis zu 1 MW und die saisonal mögliche einzuspeichernde Energiemenge liegt bei rund 1 GWh.

Der derzeitige geringe Wissens- und Nutzungsstand hat dazu geführt, dass keine weiteren Nutzungen in der OMM umgesetzt wurden / werden.

Mit der beabsichtigten Machbarkeitsstudie, soll untersucht und evaluiert werden, wo die OMM erfolgsversprechende Parameter aufweist und eine wirtschaftliche Nutzung überhaupt möglich ist. Basierend darauf kann mit einem Pilotprojekt getestet werden, in welchen Schichten und Tiefen die OMM ergiebig ist, wie die Schüttungsraten maximiert werden können und ob mit einer zusätzlichen Regeneration die Wirtschaftlichkeit erhöht werden kann. Da die OMM im Gegensatz zu den meisten anderen geothermischen Plays in der Schweiz nicht an lokale Störzonen gebunden ist, sondern flächig vorliegt und somit geringere Fündigkeitsrisiken aufweist, können Folgeprojekte im Fall einer wirtschaftlichen Umsetzung viel einfacher und mehrfach dupliziert werden.

Der Leitstern von Energie 360° lautet: «Wir transformieren unser Unternehmen und liefern bis 2040 ausschliesslich erneuerbare Energie.» Somit ist die Energie 360° stetig auf der Suche nach innovativen erneuerbare Energiequellen, die aber auch wirtschaftlich sein müssen. Es ist der Energie 360° auch wichtig Energiequellen zu erschliessen, die für den einzelnen Verbraucher praktisch nicht zugänglich sind, aber für eine Gemeinde oder ein Areal eine effiziente erneuerbare Energiequelle mit einer hohen Reduktion von CO₂ bietet.

Bei Energie 360° existieren schon jetzt verschiedenen Projekte, die sich als innovatives Pilotprojekt eignen würden, ein Areal / grössere Immobilie mit Wärme zu versorgen und damit CO₂ durch die Reduzierung primärer Wärmequellen einzusparen.

3 Projektorganisation

Institution / Bauherr: Energie 360° AG

Projektleitung: André Wicki

Funktion: **Bauherr, Gesamtprojektleitung:** Planung Energiezentrale und -verteilung, Energie- / Wärmeversorger von Arealen, Quartieren, Industrie und Immobilien

Projektpartner: Geo Explorers AG

Projektleitung: Andreas Ebert / Christian Häring

Funktion: **Projektleitung Erkundung:** Konzeptidee, Ausarbeitung Erkundungskonzept, Planung, Begleitung, Auswertung der Erkundung / Bohrungen / Pumptests

4 Projektziele

Derzeit sind die bestehenden Singletten mit ihrer geringen Wärmeleistung von wenigen 100 kW wirtschaftlich nur mässig attraktiv. Ziel muss sein, dass in der Grössenordnung von mehreren 100 kW bis zu 1 MW funktionierende Dubletten erstellt werden können.

Für die vorliegende Machbarkeitsstudie wurden folgende Ziele angestrebt.

- **Nachweis der Machbarkeit mittels einer numerischen Modellierung.** Die Parameter der OMM wurden von den bestehenden Singletten für das statische numerische Modell übernommen. Mit Hilfe der Betriebsparameter der Singletten wurde das Modell geeicht. Danach konnten weitere Bohrungen (Rückgabebohrungen) in das Modell hinzugefügt werden und Varianten mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Bohrungen, mit unterschiedlicher Temperaturspreizung und mit saisonaler Speicherung simuliert werden. Die Simulationen sollten mit worst und best case Szenarien die Bandbreite, resp. die Modellsensibilität aufzeigen. Ziel der numerischen Modellierung war es aufzuzeigen, dass gemäss Modell genügend Energie und Leistung mit einer Dublette aus dem OMM-System für einen wirtschaftlichen Betrieb entzogen werden kann.
- **Abklärungen bezüglich der 3K-Regel.** In der Geothermie gibt es schweizweit mehrere Anlagen, die in den Felsgrundwässern eine hohe Temperaturspreizung nutzen und die 3K nicht einhalten können. Welche Temperaturspreizung in einem OMM-Projekt möglich ist, musste mit dem AWEL geprüft werden. Dazu diente auch die numerische Modellierung.
- **Bohrkonzept:** Es wurde mit Bohrunternehmern auf Basis der Erdwärmesondenbohrtechnik ein Bohrkonzept entwickelt, damit die Wirtschaftlichkeit für eine OMM-Nutzung gegeben ist. In den Bohrkosten sind eine Erkundungsbohrung und eine Dublette einzurechnen.
Wirtschaftlichkeitsrechnung: Die Energie 360° AG gab gemäss ihren Wirtschaftlichkeitsrechnungen vor, welche Kosten für die Erkundung und Erschliessung der OMM maximal für unterschiedliche Anlagegrössen vorhanden sind, damit ein Wärmeverbund oder Areallösung wirtschaftlich zu betreiben ist. Als Benchmark gelten thermische Seewassernutzungen. Geo Explorers hatte dann für verschiedene Anlagengrössen (250 - 1200 kW) ein Budget für die Erkundung und Erschliessung der OMM zu erstellen und

aufzuzeigen, ab welcher Anlagegrösse eine OMM-Nutzung wirtschaftlich ist. In die Wirtschaftlichkeitsrechnung waren auch die zu erwartenden Misserfolge bei der Erkundung von anderen Projektstandorten einzurechnen, d.h. die Wahrscheinlichkeit eines Misserfolgs, sowie die Abbruchkosten einer Sondierbohrung. Die Misserfolgskosten müssen von den erfolgreichen Projekten getragen, resp. kompensiert werden. Dabei soll die Machbarkeit im Feld (Phase 2) zeigen, wie die Sondierbohrkosten bei einem Misserfolg minimiert werden können und eine Aussage getroffen werden, wie viele Bohrungen nötig sein werden, um eine Erfolgswahrscheinlichkeit angeben zu können.

5 Projektablauf

Das Projekt wurde in mehrere Phasen unterteilt. Damit einhergehend wurden auch die Abbruchkriterien für jede Phase definiert.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich nur auf die erste Phase Machbarkeit / Wirtschaftlichkeit gemäss obiger Beschreibung. Die weiteren beschriebenen Phasen dienen nur zur Orientierung, wie sich das Projekt weiterentwickeln kann.

Phase 2 Prüfung der Machbarkeit im Feld

In der Phase 2 werden Sondierbohrungen ausgeführt, um die Machbarkeitsstudie zu überprüfen. Die Standorte der Sondierbohrungen werden nach folgenden Kriterien ausgesucht:

- Basis OMM bei max. 150m u.T. (aufgrund Bohrkosten und Bohrtechnik)
- Areal mit einem potentiellen Kunden
- Standort im Bereich mit bereits mehreren fündigen OMM-Bohrungen zwischen Urdorf und Bassersdorf

Fall 1: Eine Sondierbohrung wird neu erstellt oder eine EWS-Sondierbohrung wird vertieft. Wird in der Sondierbohrung Felsgrundwasser in der OMM angebohrt, werden mittels Logging die Zuflusszonen detektiert und mittels Säuerung die Durchlässigkeit in den Zuflusszonen verbessert werden. Danach kann ein Pumpversuch ausgeführt werden, um die hydraulischen Eigenschaften der Zuflusszone in der OMM zu bestimmen. Zeigt der Pumpversuch, dass eine wirtschaftliche Nutzung gegeben ist, so wird eine Rückgabeborung erstellt, damit ein Zirkulationstest ausgeführt werden kann. Hauptzweck der Zirkulation ist aufzuzeigen, ob die angestrebte Nutzung zu einem hydraulischen und somit auch zu einem thermischen Kurzschluss zwischen den Bohrungen führt. Im Erfolgsfall sind diese Bohrungen zu nutzen. Dies ist bei kleinen Wärmeanlagen eher möglich. Bei grösseren Anlagen müssen unter Umständen Bohrungen mit einem grösseren Bohrdurchmesser erstellt werden. In diesem Fall würden die Sondierbohrungen als Monitoringbohrungen eingesetzt und erhalten bleiben.

Fall 2: Wird die Sondierbohrung im Felsgrundwasser während des Bohrvortriebs nicht fündig, so wird der Standort aufgegeben, d.h. kein Ausbau der Bohrung, kein Pumpversuch und keine Rückgabeborung. Die Bohrung wird bei Nichtfündigkeit fachgerecht zurückgebaut.

6 Machbarkeitsstudie

6.1 Wirtschaftlichkeitsrechnungen Energie 360°

Die Energie 360° hat bezüglich der Wirtschaftlichkeitsrechnung folgendes Vorgehen gewählt: Der Wärmepreis einer OMM-Nutzung muss konkurrenzfähig mit einer anderen nachhaltigen Wärmeerzeugung sein. Hierbei wurde der Wärmepreis einer thermischen Seewassernutzung als Benchmark genommen.

Folgende Annahmen wurden für die Wirtschaftlichkeitsrechnung gewählt:

| | |
|------------------------------------|-----|
| JAZ (Jahresarbeitszahl Wärmepumpe) | 3.5 |
| Abschreibungsdauer Brunnen [Jahre] | 30 |
| IRR (Interner Zinssatz) | 5% |

Es wurden verschiedene Anlagegrössen definiert mit einer Heizleistung zwischen 250 kW und 1'500 kW, gemäss folgender Tabelle 1. Je nach Anlagegrösse ergibt sich mit einem konkurrenzfähigen Wärmepreis die maximalen Kosten, welche für die Erstellung der Brunnen, inkl. Ausbau und Unterwasserpumpe möglich sind.

Tabelle 1 Unterschiedliche Heizleistung vs. max. zulässige Brunnenkosten

| Erzeugte Wärmeleistung nach WP [kW] | 250 | 500 | 1'000 | 1'500 |
|--|---------|---------|---------|-----------|
| Maximale Kosten für kompletten Brunnen [CHF] | 250'000 | 450'000 | 900'000 | 1'200'000 |

Die Tabelle zeigt klar, dass bei kleinen Leistungen die OMM nur nutzbar ist, wenn die Bohrkosten gering gehalten werden können. Dies wiederum ist vor allem eine Frage der Bohrtiefe. Bei kleinen Anlagen müssen die nutzbaren grundwasserführenden Schichten in der OMM in geringer Tiefe vorliegen. Dies bedeutet, dass eine Bohrtiefe von unter 150 m und Bohrkosten von unter 100'000 CHF notwendig ist. 300 bis 400 m tiefe Bohrungen sind erst ab einer Leistung von 1 MW realistisch.

Für die Erkundung sind zudem vorgängig einfache Sondierbohrung vorgesehen, welche die Wasserführung erkunden, bevor der teurere Brunnen erstellt wird. In die Wirtschaftlichkeit von funktionierenden Anlagen müssen auch die Misserfolge mit einkalkuliert werden. Eine Sondierbohrung im Stile einer Erdwärmesondenbohrung auf 150 m kostet rund 15'000 CHF. Unter der Annahme, dass jede zweite Erkundung kein nutzbares Wasser antrifft, müssen pro erfolgreiches Projekt zwei Erkundungsbohrung miteingerechnet werden. Für eine Anlage mit 250 kW Heizleistung steht für die Erkundung und Erschliessung somit ein Budget von 250'000 CHF zur Verfügung. Dies setzt sich wie folgt zusammen und enthält keine Planungskosten:

| | |
|---|--------------------|
| 2 Erkundungsbohrungen auf 150 m zu je 15'000 CHF: | 30'000 CHF |
| Eine Dublette mit 2 Brunnen auf 150 m zu je 95'000 CHF: | 190'000 CHF |
| Brunnenausbau/ Steigleitung/ Unterwasserpumpe: | 20'000 CHF |
| Reserve | 10'000 CHF |
| Total | 250'000 CHF |

Im Prinzip ist eine Anlage mit einer Heizleistung von 250 kW wirtschaftlich betreibbar, vorausgesetzt, die Brunnen haben eine maximale Tiefe von 150 m und können günstig erstellt werden. Für grössere Anlagen sind auch grössere Bohrtiefen in die OMM möglich, die Kosten steigen aber exponentiell und die Durchlässigkeit der OMM nimmt mit der Tiefe generell ab.

6.2 Kapital- und Betriebskosten

In der folgenden Tabelle 2 wurden die Kapital- und Betriebskosten berechnet und daraus der Wärmepreis ermittelt. Der Wärmepreis hängt von der Leistung einer OMM-Anlage ab. Eine kleine Anlage hat einen etwas höheren Wärmepreis als eine grosse Anlage. Bei einer 250 kW Anlage beträgt der Wärmepreis 24.6 Rp./kWh und liegt damit rund einen Rappen höher als der Wärmepreis einer thermischen Seewassernutzung mit einer thermischen Leistung von 1 MW. Bei grossen Anlagen mit 1.5 MW Leistung läge der Wärmepreis geringfügig tiefer als bei einer thermischen Seewassernutzung mit 1 MW_{th}.

Wenn die maximalen Bohrkosten pro Leistungsstufe gemäss Tabelle 1 eingehalten werden, so ist die thermische Nutzung in der OMM mit einer nachhaltigen Wärmenutzung wie beispielsweise einer Seewassernutzung konkurrenzfähig.

Tabelle 2 Berechnung des Wärmepreises in Rp./ kWh von den OMM-Anlagen mit unterschiedlicher Leistung im Vergleich zu einer Seewassernutzung. Die Tabelle liegt im Anhang in grösser Auflösung bei.

| Energiequelle | | OMM | OMM | OMM | OMM | Seewasser |
|---|---------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Installierte Leistung | kW | 250 | 500 | 1'000 | 1'500 | 1'000 |
| Vollaststunden | h | 2'100 | 2'100 | 2'100 | 2'100 | 2'100 |
| Energiebedarf pro Jahr | kWh/a | 525'000 | 1'050'000 | 2'100'000 | 3'150'000 | 2'100'000 |
| Investment | | | | | | |
| Honorare (Heizzentrale) | CHF | 34'938 | 67'375 | 134'750 | 194'625 | 124'750 |
| Gebäude für Heizzentrale | CHF | 73'750 | 147'500 | 295'000 | 442'500 | 295'000 |
| Energiegewinnung Quelle / Kosten für Brunnen komplett | CHF | 250'000 | 450'000 | 900'000 | 1'200'000 | 500'000 |
| Länge Anergieleitung zw. Quelle und HZ | m | - | - | - | - | 400 |
| Anergieleitung zw. Quelle und HZ | CHF | - | - | - | - | 200'000 |
| Wärmeerzeugung mit Elektroinstallation | CHF | 375'000 | 750'000 | 1'500'000 | 2'250'000 | 1'500'000 |
| Unvorhergesehenes (Heizzentrale) | CHF | 36'684 | 70'744 | 141'488 | 204'356 | 130'988 |
| Baunebenkosten (Heizzentrale) | CHF | 36'684 | 70'744 | 141'488 | 204'356 | 130'988 |
| Total Brutto-Investment | CHF | 807'056 | 1'556'363 | 3'112'725 | 4'495'838 | 2'881'725 |
| Finanzaufwand | | | | | | |
| Abschreibungsdauer Wärmeerzeugung | Jahre | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Kalkulatorischer Zinssatz | | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% |
| Annuität | | 9.63% | 9.63% | 9.63% | 9.63% | 9.63% |
| Finanzaufwand Wärmeerzeugung pro Jahr | CHF/a | 36'128 | 72'257 | 144'513 | 216'770 | 144'513 |
| Abschreibungsdauer Energiequelle, Anergieleitung | Jahre | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Kalkulatorischer Zinssatz | | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% |
| Durchschnittliche Abschreibungsdauer Gebäude | Jahre | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Kalkulatorischer Zinssatz | | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% |
| Finanzaufwand total pro Jahr | CHF/a | 60'450 | 117'360 | 234'719 | 341'459 | 220'559 |
| Finanzaufwand | Rp/kWh | 11.51 | 11.18 | 11.18 | 10.84 | 10.50 |
| Energieaufwand | | | | | | |
| JAZ | | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.20 |
| Strompreis für WP | CHF/kWh | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Hilfsstrom | CHF/a | - | - | - | - | - |
| Energieaufwand pro Jahr | CHF/a | 37'500 | 75'000 | 150'000 | 225'000 | 164'063 |
| Energiepreis | Rp/kWh | 7.14 | 7.14 | 7.14 | 7.14 | 7.81 |
| Betriebsaufwand (Wartung/Unterhalt/Instandhaltung) | | | | | | |
| Betriebsaufwand pro Jahr | CHF/a | 31'250 | 60'000 | 120'000 | 172'500 | 110'000 |
| Betriebskosten | Rp/kWh | 5.95 | 5.71 | 5.71 | 5.48 | 5.24 |
| Total Aufwand pro Jahr ohne Netz | CHF/a | 129'200 | 252'360 | 504'719 | 738'959 | 494'621 |
| Wärmegestehungskosten TOTAL ohne Netz | Rp/kWh | 24.61 | 24.03 | 24.03 | 23.46 | 23.55 |

6.3 Numerische Simulation

Neben der Wirtschaftlichkeitsrechnungen sollen Grundwassersimulationen zeigen, ob die OMM thermisch langfristig nutzbar ist. Neue thermische Nutzungen in die OMM müssen das thermisch genutzte Felsgrundwasser über einen Rückgabebrunnen wieder der grundwasserführenden Schicht zugeführt werden. Dies kann zu einem hydraulischen und somit zu einem thermischen Kurzschluss führen. Dies bedeutet, dass das kältere, zurück verpresste Wasser innert kurzer Zeit wieder zum Förderbrunnen gelangt. Mit der Zeit kühlt dann das Untergrundsystem aus und die Quelltemperatur am Förderbrunnen beginnt zu sinken. Dies ist bei geothermischen Nutzungen oft der Fall, zeigt aber, dass diese Systeme nicht nachhaltig im Sinne von dauerhaft betreibbar sind.

Bei den numerischen Simulationen wurde eine Vielzahl an Varianten gerechnet, nachfolgend werden vier davon vorgestellt.

6.3.1 Numerisches Modell

Es wurde im Feflow 7.0 ein numerisches 3D-Modell mit folgenden Inputparameter erstellt:

Tabelle 3 Modellparameter für die Grundwassersimulation

| | |
|------------------------|---|
| Länge Modell | 2 km |
| Breite Modell | 1 km |
| Höhe/Tiefe Modell | 0.6 km |
| Anzahl Schichten | 13 |
| Produktive Schichten | 3 Schichten à 25m mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von 1.8×10^{-6} m/s (Bassersdorf 1 Schicht à 25m mit 1.8×10^{-6} m/s) |
| Aquitarde | 1×10^{-8} m/s |
| Porosität | 10% |
| Temperaturgradient | 30 K/km |
| Hydraulischer Gradient | 2 m/km |

Die Breite des Modells beträgt 1 km, die Länge 2 km und die Höhe 0.6 km. In der Mitte der Grundfläche auf der langen Achse wurde ein 50 m breiter Streifen ausgeschieden, auf welchen die Knotenpunkte verdichtet wurden. In diesem Streifen wurden danach die Bohrpunkte gesetzt. Auf der folgenden Abbildung 3 ist der Temperaturverlauf gemäss geothermischen Gradient mit 30 K/km ersichtlich. Ausgangstemperatur an der Oberfläche ist 10 °C in 600 m Tiefe liegt eine Temperatur von 28 °C vor.

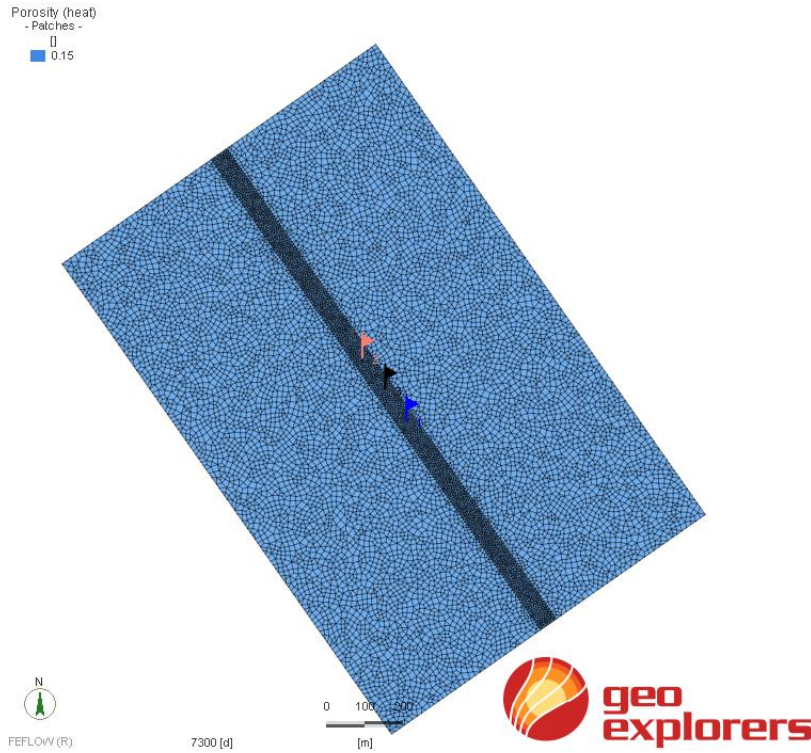


Abbildung 2 Grundfläche des numerischen Modells mit dem Gitternetz, in der Mitte gibt es einen verdichteten Mittelstreifen, in welchem die Bohrpunkte platziert wurden.

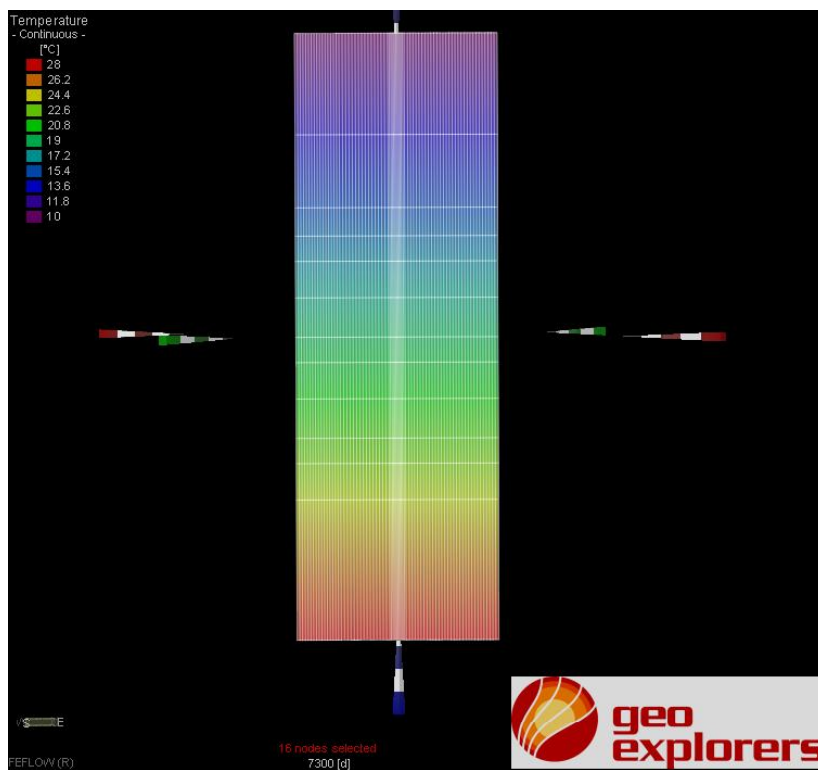


Abbildung 3 Temperaturverlauf im Modell

6.3.2 Eichung an den Betriebsdaten von Bassersdorf

Der Brunnen in Bassersdorf hat gezeigt, dass es eine produktive Zone mit einer Mächtigkeit von 25 m gibt, aus welcher das Felsgrundwasser gefördert wird. Im Modell wurden drei solcher Zonen mit gleicher Transmissivität wie in Bassersdorf integriert. Nach dem Modellaufbau wurde versucht, die effektive Absenkung des Felsgrundwasserspiegels in Bassersdorf abzubilden. Diese beträgt im Betriebszustand 195 m. Beim Modell wurde eine Absenkung von 142 m berechnet. Da im Betriebszustand in Bassersdorf mit zusätzlichen Brunneneffekten zu rechnen ist, welche zu einer zusätzlichen Absenkung führen und im Modell nicht berücksichtigt sind (z.B. Sandbrücken, Brunnenalterung, Ausfällungen), wird die Eichung als realistisch betrachtet.

6.3.3 Varianten

Es wurden 14 verschiedene Varianten simuliert, in dem verschiedene Input-Parameter variiert wurden:

- Die Abstände zwischen den Bohrungen in Meter
- die Anzahl der Doubletten
- die Anzahl der genutzten produktiven Schichten
- die Förderrate in l/s mit 2200 Volllaststunden
- die zusätzliche Förderrate für den Kühlbetrieb in l/s für teilweise oder vollständige Regeneration
- die Temperaturspreizung ΔT

Folgende Outputwerte wurden berechnet:

- Kälteleistung in kW
- Dauer bis zum thermischen Kurzschluss in Jahre
- Die jährliche Temperaturabnahme bei der Förderbohrung (Kurzschlussrate) in K/Jahr
- Die maximale Betriebsabsenkung im Förderbrunnen, resp. Aufstau im Rückgabeburgen in Meter

Die Übersicht der Simulationen ist in der folgenden Tabelle 4 abgebildet, wobei die Inputwerte in weiss dargestellt sind und die Outputwerte in grün. FB bedeutet Förderbrunnen und RB Rückgabeburgen. Bei Leistung bedeutet das «+», dass geheizt und gekühlt wird, z.B. Variante 3: 252 kW Heizleistung «+» 126 kW Kühlleistung im Falle eine Teilregeneration.

Tabelle 4 Simulierte Varianten und deren Inputparameter (weiss) und Outputwerte (grün). Die rot markierten Varianten werden vorgestellt.

| Variante | Distanz | Anzahl | Anzahl | Pumprate | Pumprate | Temperatur | Kurzschluss | | | Max Aufstau/ |
|----------|--------------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|----------------------------|------------------|------------------|
| | FB-RB [m] | Doublette | Schichten | heizen [l/s] | kühlen [l/s] | spreizung [°C] | Leistung [kW] | Kurzschluss [Jahre bis] | rate [K/Jahr] | Absenkung [m] |
| 1 | 500 | 1 | 1 | 10 | 0 | 6 | 252 | - | - | 120 |
| 2 | 200 | 1 | 1 | 10 | 0 | 6 | 252 | 10 | 0.07 | 115 |
| 3 | 200 | 1 | 1 | 10 | 5 | 6 | 252+126 | 12 | 0.045 | 110 |
| 4 | 100 | 1 | 1 | 10 | 0 | 6 | 252 | 2 | 0.34 | 100 |
| 5 | 100 | 1 | 1 | 10 | 5 | 6 | 252+126 | 2 | 0.17 | 95 |
| 6 | 200 | 2 | 1 | 15 | 0 | 6 | 378 | 9 | 0.12 | 110 |
| 7 | 200 | 2 | 1 | 15 | 7.5 | 6 | 378+189 | 9 | 0.05 | 100 |
| 8 | 200 | 1 | 3 | 10 | 0 | 6 | 252 | - | - | 37 |
| 9 | 200 | 1 | 2 | 10 | 0 | 6 | 252 | - | - | 56 |
| 10 | 200 | 1 | 1 | 20 | 20 | 10 | 840+840 | - | - | 200 |
| 11 | 200 | 1 | 2 | 20 | 20 | 10 | 840+840 | - | - | 100 |
| 12 | 200 | 1 | 3 | 20 | 20 | 10 | 840+840 | - | - | 65 |
| 13 | 200 | 1 | 3 | 20 | 0 | 10 | 840 | 12 | 0.037 | 75 |
| 14 | 200 | 1 | 2 | 20 | 0 | 10 | 840 | 9 | 0.1 | 115 |

Es werden von vier Simulationen die Ergebnisse vorgestellt und zwar von der Variante 2 (Basisszenario), Variante 7, Variante 9 und Variante 11

Variante 2

Bei dieser Basisvariante wurde ein Förderbrunnen und ein Rückgabebunnen in einer Entfernung von 200 m zueinander platziert und dem System mit den gleichen hydrogeologischen Eigenschaften wie in Bassersdorf (d.h. eine produktive Zone à 25 m) mit einer Kälteleistung von rund 250 kW Energie entzogen. Zwischen dem Förder- und Rückgabestandort wurde eine Beobachtungsbohrung platziert. Nach 10 Jahren kommt es zu einem Kurzschluss und die Quelltemperatur fängt an zu sinken (Abbildung 4). Die Rate der Temperaturabsenkung beträgt 0.07 K/Jahr. Das System ist ohne Regeneration zwar über mehrere Jahrzehnte nutzbar, aber nicht nachhaltig. Die 3 K-Regel (siehe Kap. 6.4) wird in diesem Fall nicht eingehalten (Abbildung 5).

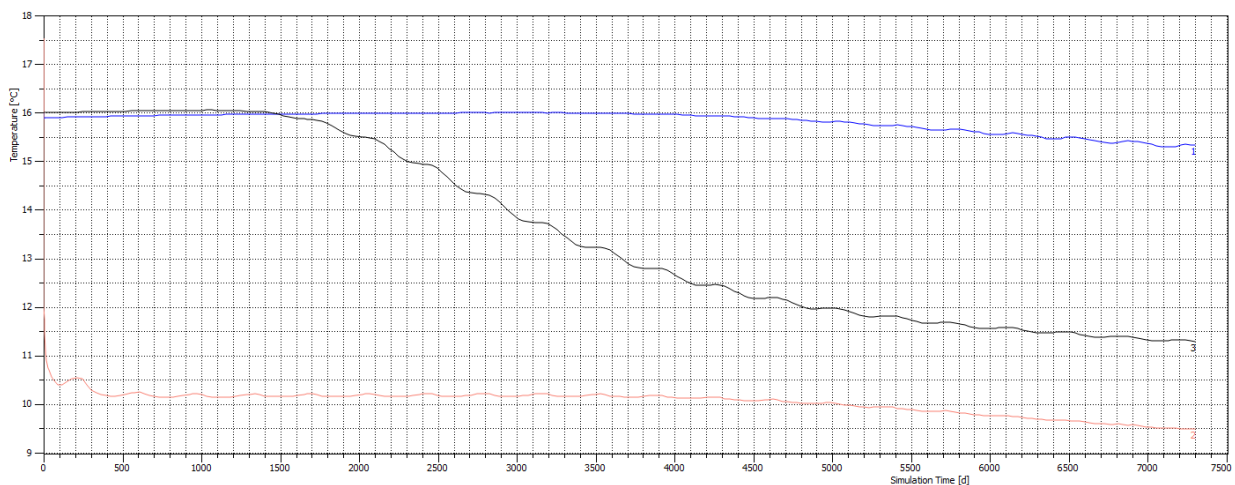


Abbildung 4 Temperaturentwicklung über 20 Jahre in den Förder- (blau) und Rückgabeböhrungen (rot), sowie der Beobachtungsbohrung in der Mitte (schwarz).

Die Temperatur fällt über Jahren in der Förderbohrung von 16 °C auf ca. 15.3 °C, in der Beobachtungsbohrung von 16 °C auf ca. 11.3°C.

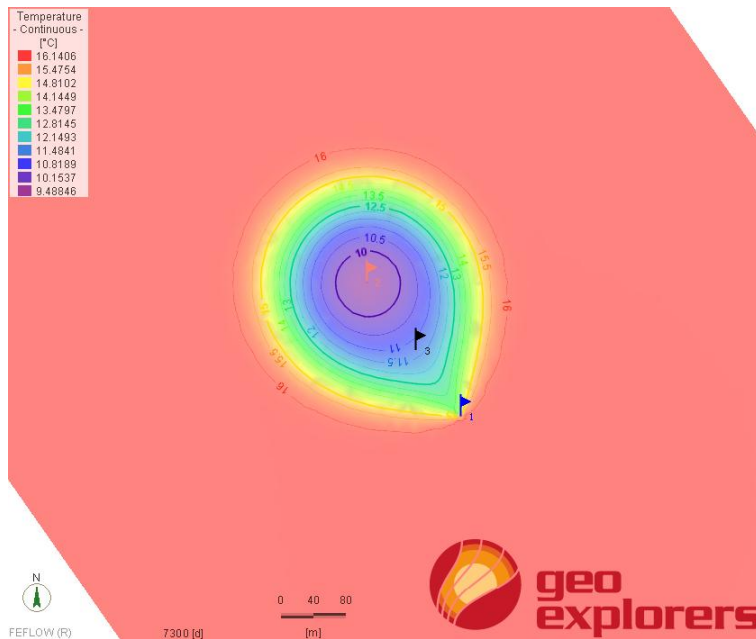


Abbildung 5 Temperaturfahne ausgehend von der Rückgabeborung in rot. Der thermische Kurzschluss ist im Förderbrunnen (blaue Fahne) erkennbar.

Variante 7

Bei der Variante 7 wurden zwei Förder- und zwei Rückgabeburungen erstellt mit einer totalen Kälteleistung von rund 380 kW. Mit rund 190 kW wird im Sommer mit 50% der Heizenergie regeneriert. Mit 4 Bohrungen lässt sich ein grösseres Untergrundvolumen anschliessen. Mit der Teilregeneration kann gemäss Simulation eine nahezu nachhaltige Nutzung erreicht werden. Der thermische Kurzschluss findet nach 9 Jahren statt und findet auf einem tieferen Temperaturniveau (ca. 0.5 °C tiefer) ein nahezu neues Gleichgewicht. Auf der folgenden Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die Entwicklung der Temperatur, resp. Temperaturfahne über 20 Jahre, resp. nach 20 Jahren dargestellt. Die 3K-Regel wird in diesem Fall eingehalten.

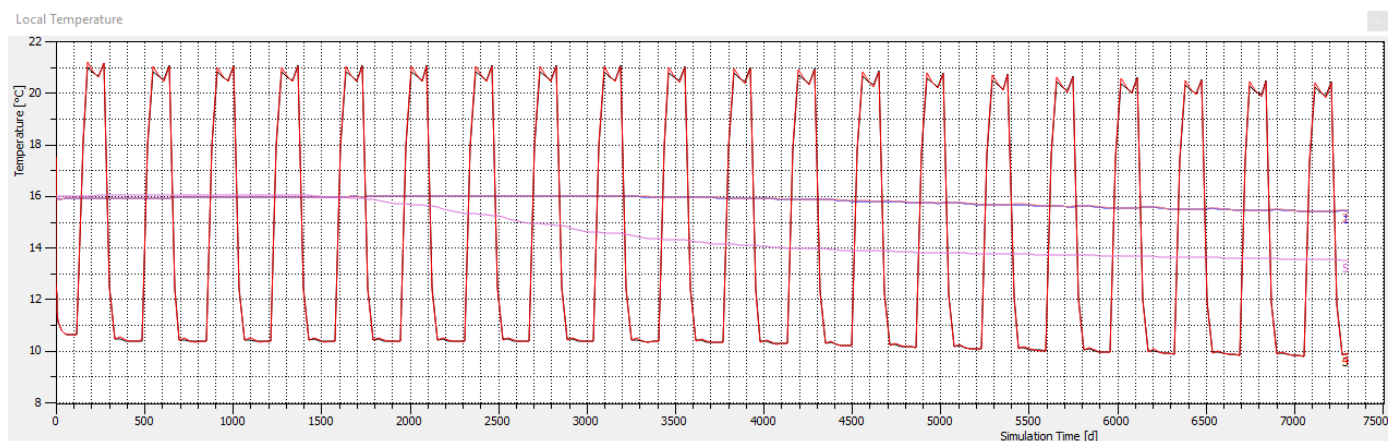


Abbildung 6 Temperaturentwicklung über 20 Jahre in den Förder- (violett) und Rückgabeborungen (rot), sowie der Beobachtungsbohrung in der Mitte (pink).

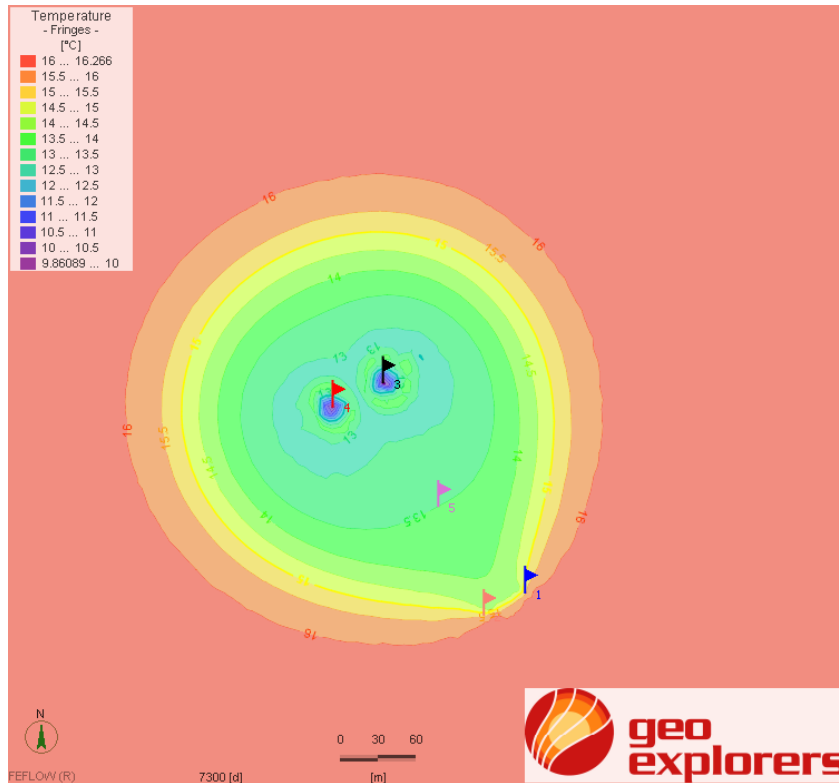


Abbildung 7 Temperaturfahne ausgehend von den Rückgabebohrungen in rot und blau. Der thermische Kurzschluss ist in den Förderbrunnen erkennbar.

Variante 9

Bei der Variante 9 werden zwei produktive Schichten (d.h. 2x Bassersdorf) genutzt. Die Absenkung im Brunnen ist mit 56 m deutlich geringer und nach 20 Jahren wurde kein thermischer Kurzschluss festgestellt. Für eine reine Wärmenutzung mit 250 kW Kälteleistung wäre dies die Mindestvoraussetzung. Die 3K-Regel kann nach 20 Jahren noch klar eingehalten werden, auch wenn die Temperatur in der mittig liegenden Beobachtungsbohrung abnimmt (Abbildung 8 und Abbildung 9).

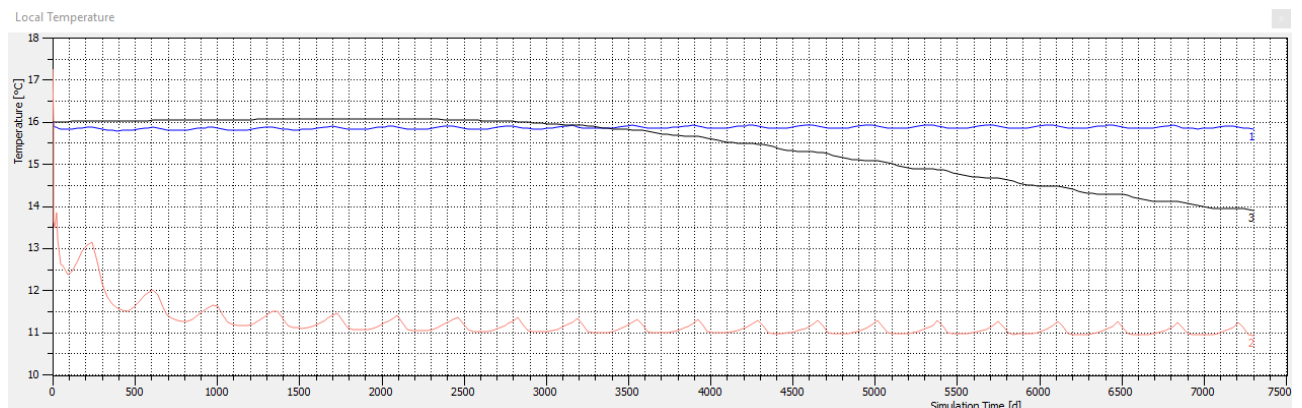


Abbildung 8 Temperaturentwicklung über 20 Jahre im Förderbrunnen (blau), Rückgabebrunnen (rot) und Beobachtungsbohrung in der Mitte (schwarz)

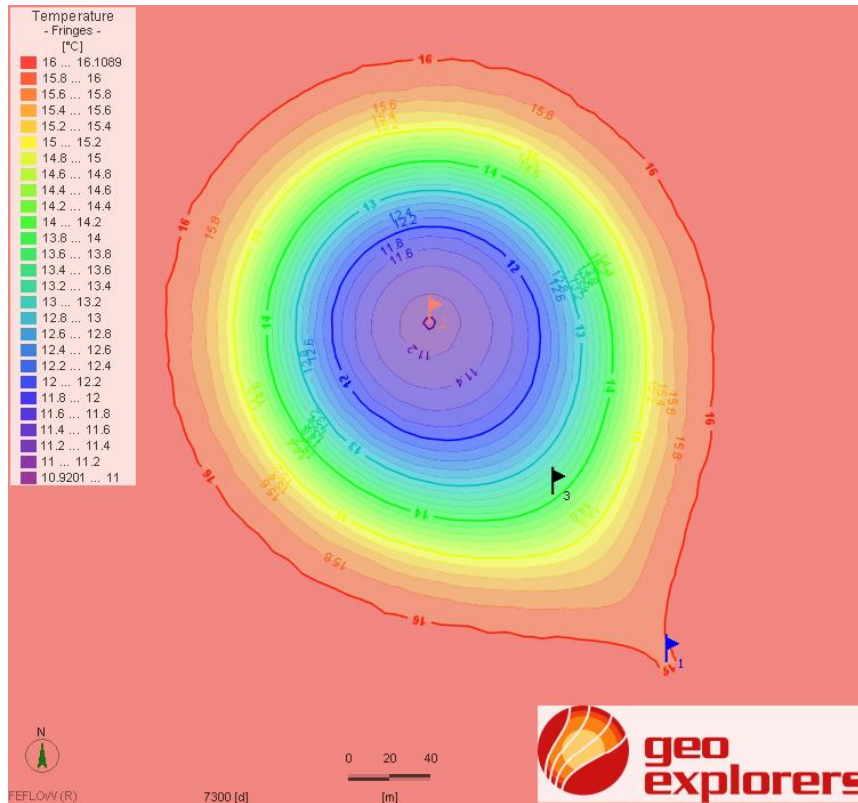


Abbildung 9 Temperaturfahne ausgehend von der Rückgabebohrung in rot. Nach 20 Jahren ist noch kein thermischer Kurzschluss erreicht.

Variante 11

Bei der Variante 11 wird der Untergrund als saisonaler Speicher mit einem «kalten» und «warmen» Brunnen betrieben, in dem die Förder- und Rückgabebrunnen je nach Betriebsart (Heizen oder Kühlen) mit einer Kälteleistung von 840 kW gewechselt werden. Bei dieser Simulation werden zwei produktive Schichten angeschlossen. Die Temperaturspreizung ist 10 K und könnte noch weiter erhöht werden, da es in 100 m Entfernung zu den Brunnen keine thermische Beeinflussung gibt (Abbildung 10 und Abbildung 11). Die Energiebilanz ist ausgeglichen und eine nachhaltige Nutzung somit gegeben .

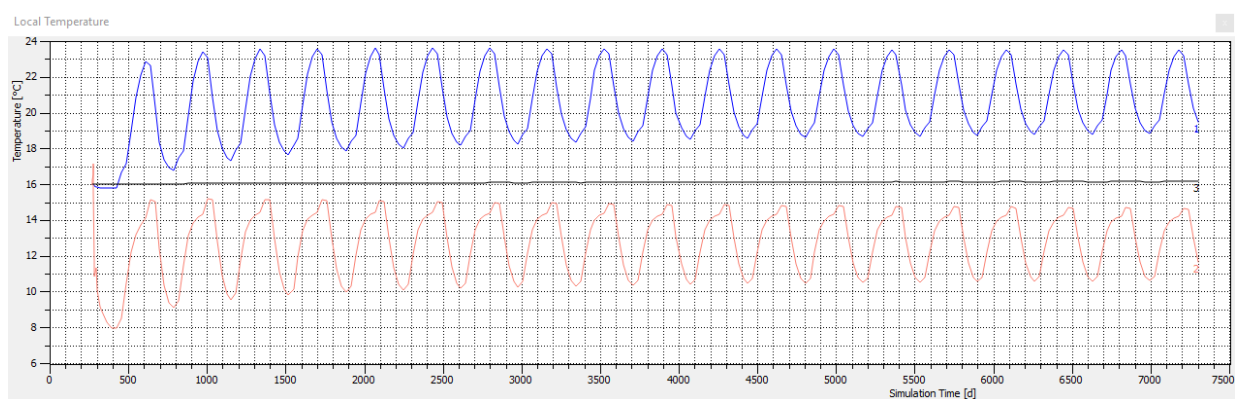


Abbildung 10 Temperaturentwicklung über 20 Jahre im «warmen» Brunnen (blau), «kalten» Brunnen (rot) und Beobachtungsbohrung in der Mitte (schwarz)

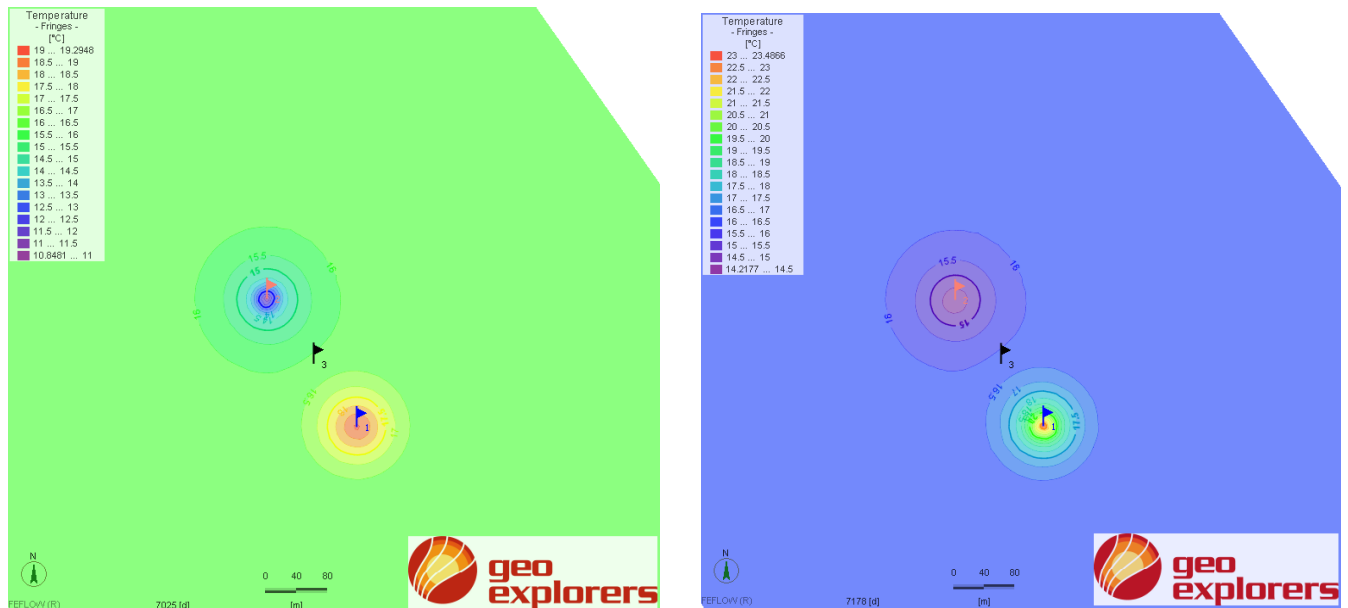


Abbildung 11 Bild links entspricht dem Temperaturzustand im März nach der Heizperiode nach 20 Jahren Betrieb; Bild rechts entspricht dem Temperaturzustand im September nach der Kühlperiode nach 20 Jahren Betrieb.

6.3.4 Fazit Simulation

Als Ausgangssituation wurden die hydrogeologischen Bedingungen von Bassersdorf gewählt. Wenn Bassersdorf als Dublette, d.h. mit der Rückgabeburung in max 200 m Entfernung, betrieben würde, wäre der thermische Kurzschluss problematisch und ein nachhaltiger Betrieb nicht möglich.

Mit einer Dublette ist der mögliche Energieentzug aufgrund des thermischen Kurzschlusses limitiert, ausser die Distanz zwischen den Bohrungen liegt bei mehreren hundert Metern. Um eine höheren Energiebezug bzw. Leistung zu ermöglichen müssen die Abstände zwischen den Brunnen maximiert werden, ebenso die Temperaturspreizung.

Idealerweise wird der Untergrund als saisonaler Speicher mit kalten und warmen Brunnen genutzt. Dann kann eine deutlich höhere Temperaturspreizung genutzt werden. Der thermische Kurzschluss ist nicht gegeben und die 3 K-Regel kann auch eingehalten werden. Auch Varianten mit einer Teilregeneration führen dazu, dass der Untergrund thermisch länger genutzt werden kann bis ein thermischer Kurzschluss erfolgt oder die 3°K-Regel nicht mehr eingehalten werden kann.

Damit die Absenkung im Förderbrunnen und der Aufstau im Rückgabeburungen bei einer Förderrate von 10 l/s in einem nutzbaren Bereich liegt, müssten zwei grundwasserführende Schichten oder eine mächtigere oder eine durchlässigere Schicht wie in Bassersdorf angebohrt werden.

Somit kann aus der Simulation abgeleitet werden, dass eine geothermische Nutzung in der OMM für eine Areal- oder Quartiernutzung möglich ist, idealerweise mit einer Teilregeneration. Reine Heiznutzungen sind bis etwa 250 kW Kälteleistung mit gleichen geologischen Voraussetzungen wie Bassersdorf möglich, grössere thermische Nutzungen bräuchten eine Regeneration.

Als saisonaler Wärmespeicher für Wärmeverbände oder Areale hat die OMM das grösste Potential.

6.4 Zulässige Temperaturspreizung

Stand heute gilt im Kanton Zürich nach wie vor die 3 K-Regel, welche besagt, dass die natürliche Grundwassertemperatur 100 m nach der Rückführung des thermisch genutzten Wassers in den Grundwasserleiter nicht um mehr als 3 K beeinflusst werden darf. Dies bedeutet auch, dass das Grundwasser in einem Radius kleiner als 100 m um mehr wie 3 K beeinflusst werden darf und die Temperaturspreizung >3 K sein kann.

Im Moment ist diese 3 K-Regel in Überarbeitung, insbesondere im Hinblick auf die geothermische Nutzung des Untergrunds. Eine höhere Temperaturspreizung und / oder eine Erweiterung der 100 m werden erwartet, aber das genaue Regelwerk, wie auch der Zeitpunkt der Inkraftsetzung sind derzeit noch nicht bekannt.

6.5 Erkundungs- und Erschliessungskonzept

6.5.1 OMM Grundlagen aus EWS-Bohrungen

Der Kanton hat in den letzten 10 Jahren einige Erdwärmesonden in die OMM bewilligt, obwohl diese eine Zeitlang in weiten Gebieten ausgeschlossen waren. Dabei wurde versucht, über des produzierte Wassers aus der Bohrung zu quantifizieren, wieviel Felsgrundwasser aus der OMM während des Bohrvortriebs in die Bohrung zufliesst (Abbildung 12). Geo Explorers AG hat die Bohrprofile und Angaben zu den Wasserzuflüssen ausgewertet und eine Karte erstellt, woraus ersichtlich ist, in welchem Gebiet die Erfolgchancen auf eine ergiebige Findigkeit am grössten sind (Abbildung 13).

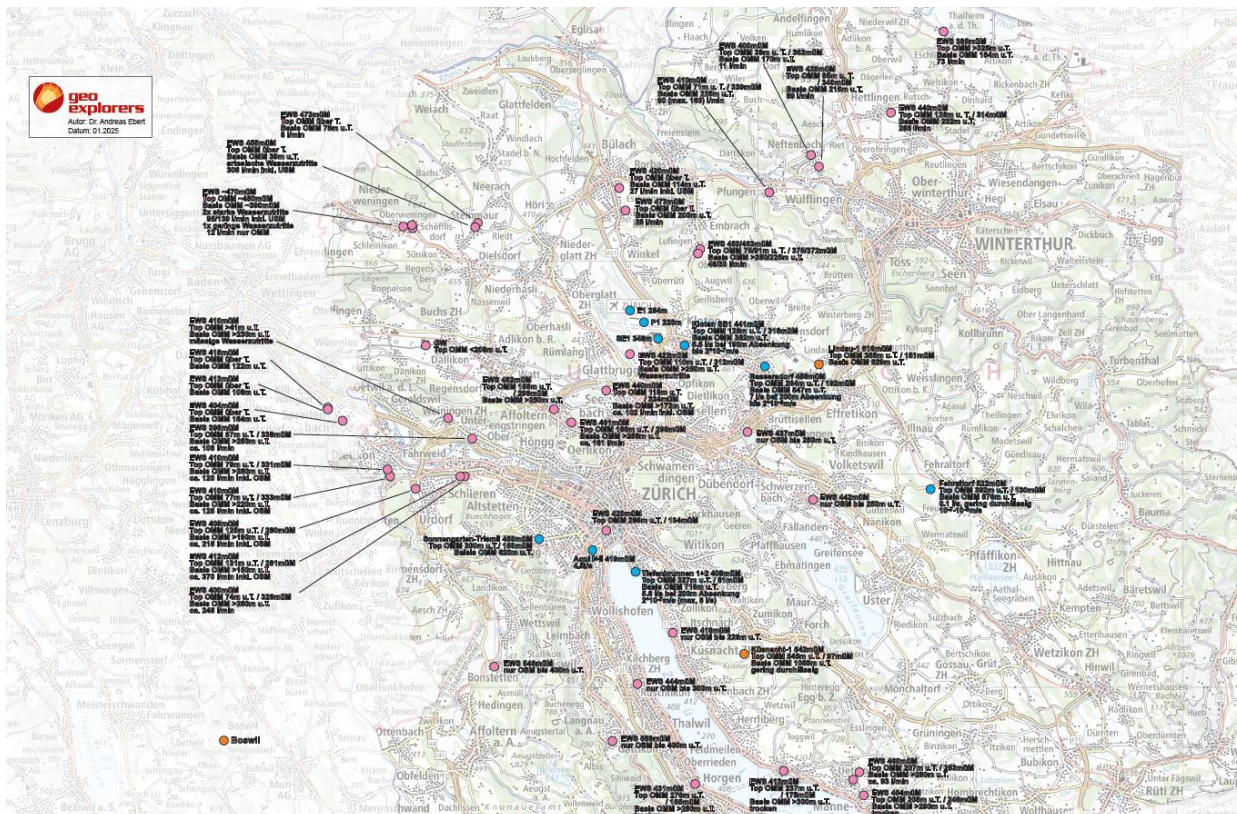


Abbildung 12 Datengrundlage für die Bewertung der potentiell interessantesten Gebiete im Kanton Zürich (siehe Abbildung 13). PDF mit grösserer Auflösung liegt dem Anhang bei.

6.5.2 Potential und Zielgebiet

Die besten Aussichten auf Erfolg sind im Bereich zwischen Urdorf und Bassersdorf, grün dargestellt auf der folgenden Abbildung 13. Einerseits haben diese Gebiete während des Bohrvortriebs im Vergleich zu anderen Gebieten die stärksten Wasserzutritte verzeichnet, andererseits muss in diesem Gebiet nicht so tief gebohrt werden. Beschränkt man sich zunächst nur auf den nördlichen Teil der grünen Fläche, sind Bohrtiefen von unter 150 m möglich, wie die Wasserzutritte in zahlreichen EWS gezeigt haben.

In Schlieren beispielsweise wurden aus den EWS ohne Brunnenentwicklung bis 370 l/min mit einer Temperatur von rund 15 °C gefördert. Mit einer Temperatursteigerung von 6 K würde eine Kälteleistung von 155 kW und eine Heizleistung von rund 190 kW resultieren. Mit zusätzlichen Massnahmen (z.B. Brunnenentwicklung, Säuerung) könnte die Durchlässigkeit im bohrlochnahen Bereich noch technisch erhöht werden, was in der Projektphase 2 zu zeigen ist.

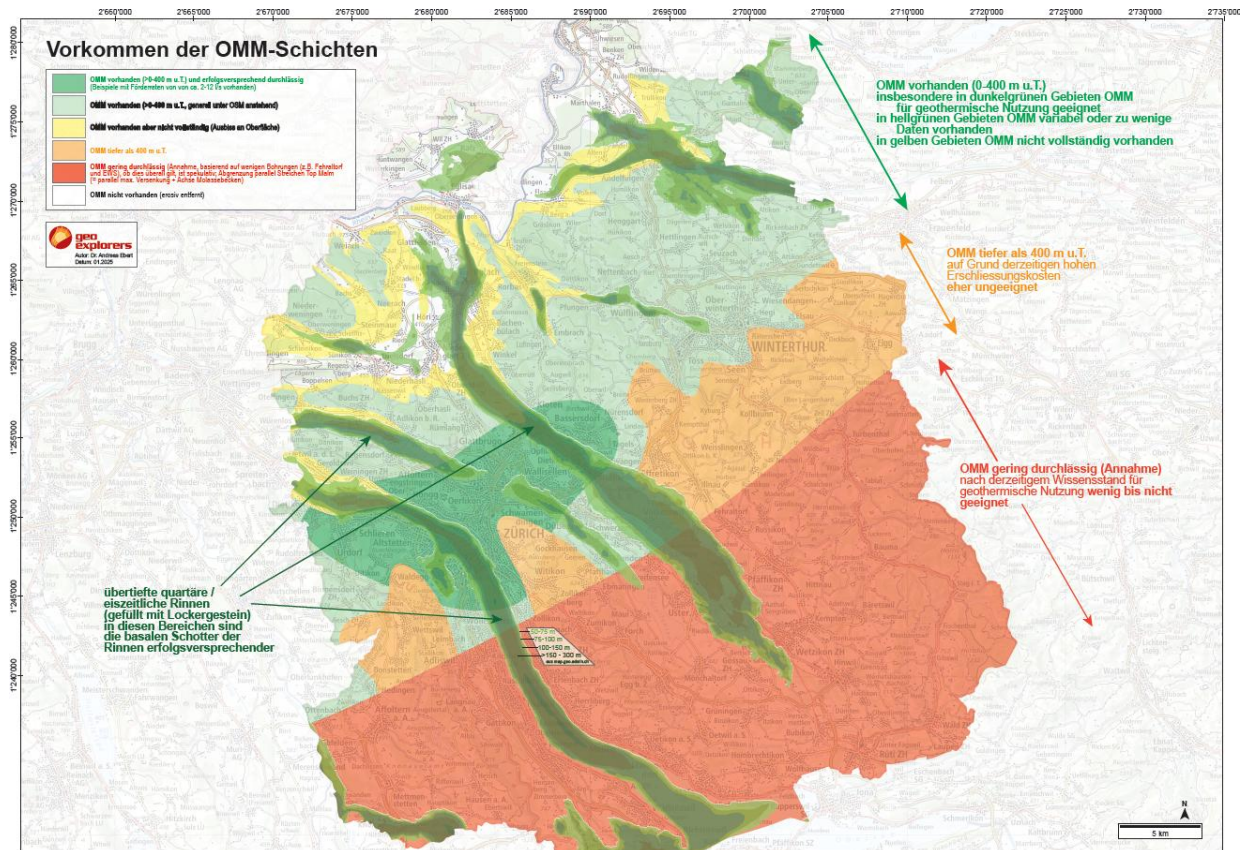


Abbildung 13. Die Potentialkarte OMM liegt im Anhang mit einer besseren Auflösung vor. Der grüne Bereich zwischen Urdorf und Bassersdorf scheint für die OMM-Nutzung basierend auf dem derzeitigen Kenntnisstand am günstigsten.

6.5.3 Erkundungsvorgehen

Wie die bisherigen Erkundungen und das geothermische Potential im vorhergehenden Kapitel zeigt, wird zu Beginn der OMM-Erkundung auf Anlagen mit 250 kW Heizleistung oder Speicherlösungen auf der Achse Urdorf-Bassersdorf fokussiert. Die Bohrtiefen sollten 150 m nicht überschreiten (Siehe Bohrkosten 6.5.5), einerseits wegen den Bohrkosten, andererseits wegen der Durchlässigkeit, welche in den unteren Lagen tendenziell höher ist. Dadurch werden Grundlagen der hydrogeologischen Eigenschaften der OMM gesammelt. Wenn es Gebiete gibt, welche über höhere Grundwasserpotentiale verfügen, kann die Anlage entsprechend nach oben skaliert werden. Aber das Ziel ist es, die Wirtschaftlichkeit von einer 250 kW Anlage zuerst mit möglichst geringen Bohrkosten nachzuweisen, was nach aktuellem Wissensstand dem geothermischen Potential der OMM nahe kommt.

Mit der Limitation der Bohrtiefe auf 150 m wird das ursprüngliche Konzept von Sondierbohrungen mit zusätzlich vertieften EWS erstmals nicht weiterverfolgt. Bei dieser Erkundungstiefe muss keine EWS vertieft werden, sondern es kann von vorneherein eine eigene Sondierbohrung erstellt werden. Zeigt die OMM grosses thermisches Potential können auch tiefere als 150 m tiefe Brunnen wirtschaftlich erstellt und betrieben werden. Mit deutlich tieferen Brunnen wären Sondierungen mit vertieften EWS wieder eine Option.

6.5.4 Bohrkonzept

Für eine thermische Nutzung sollten im Minimum die gleichen hydrogeologischen Verhältnisse wie in Bassersdorf erreicht werden. Was sich gegenüber der Nutzung von Bassersdorf ändern muss, ist die Vorgabe, dass das thermisch genutzte Wasser wieder in den Grundwasserleiter zurückgespiesen wird. Damit wird die Grundwasserbilanz erhalten und bei hoher hydraulischer Durchlässigkeit auch der Grundwasserspiegel gestützt (geringere Absenkung im Betrieb). Eine Dublette mit Förder- und Rückgabebohrung erhöht dafür das Risiko eines hydraulischen und thermischen Kurzschlusses. Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen den Brunnen maximiert werden muss oder mehrere Förder- und Rückgabebrunnen erstellt werden müssen. Weil bei den möglichen thermischen Leistungen eher Arealnutzungen als Wärmeverbünde im Vordergrund stehen, ist die verfügbare Fläche und somit Distanz zwischen dem Förder- und Rückgabebrunnen begrenzt. Dies kann je nach Projektstandort bedeuten, dass die Bohrungen als Schrägbohrungen abgeteuft werden müssen, um auf der Brunnensohle den Abstand zu maximieren.

Wenn von der Grundwasserleistung in Bassersdorf ausgegangen wird, ist eine thermische Leistung von ca. 250 kW realistisch. D.h. die Brunnenbohrungen dürfen aus Wirtschaftlichkeitsgründen mit max. 150 m nicht tief sein. In diesem Fall hat man einen doppelten Kostenvorteil. Einerseits hat man einen Kostenvorteil durch eine relativ geringe Anzahl an Bohrm Metern, andererseits kann der Brunnen mit einem günstigen PVC-Rohr anstatt mit einem korrosionsanfälligen Stahlrohr ausgebaut werden. PVC Rohre sind bis eine Tiefe von maximal 200m einsetzbar. Die korrosionsfreie Edelstahlvariante wäre nochmals mit zusätzlichen Kosten verbunden.

Mit einer Leistung von rund 250 kW dürfen gemäss Tabelle 1 die Bohrkosten inkl. Unterwasserpumpe max. 250'000 CHF betragen, d.h. wenn ein Förder- und ein Rückgabebrunnen erstellt werden muss, heisst das rund 100'000 CHF pro Brunnen. Die restlichen 50'000 CHF werden für die Sondierbohrungen und Unterwasserpumpe mit Steigleitung benötigt. Aus vergleichbaren Projekten sind Brunnen bis 150 m Tiefe, erstellt mit einem PVC-Filter, für unter 100'000 CHF möglich. Ein Richtpreis von unter 100'000 CHF von einer auf Brunnenbau spezialisierten Firma liegt vor.

Dabei kann mit einer temporären 323 mm Schutzverrohrung je nach Notwendigkeit bis rund 20 m in das Lockergestein abverrohrt werden. Danach wird bis auf Endteufe von rund 150 m mit einem Bohrdurchmesser von 280 mm destruktiv mit Luft gebohrt. Ausgebaut wird der Brunnen mit einer dickwandigen 7" PVC-Verrohrung, welche im Bereich der wasserführenden Schichten mit Filterschlitz versehen ist. Über den Filterschlitz wird der Ringraum des Brunnens mit Hilfe eines Strumpfs und Stufenzementation hinterfüllt. Nach Einbringen der Hinterfüllung kann die temporäre 323 mm Schutzverrohrung ausgebaut werden. Die Grösse der Unterwasserpumpe hängt von der Förderleistung ab. Bei einer Förderleistung von ca. 5 l/s und einer Steighöhe von 100m wäre eine 4" Pumpe möglich, bei grösseren Förderraten wäre es eine 6" Pumpe. Der oben beschriebene Brunnen ist auf eine 6" Pumpe ausgelegt.

Geologische Voraussetzung für diese Art von Brunnen ist, dass die Lockergesteinsmächtigkeit weniger als 20m beträgt und die wasserführenden Schichten in einer Tiefe von weniger als 150 m vorliegen. **Diese geologischen Voraussetzungen sind im Gebiet Urdorf-Bassersdorf grundsätzlich gegeben** Durch das Limmattal verläuft noch eine tiefe eiszeitliche Rinne, welche eine eigene geothermische Nutzung darstellt und deutlich tiefer als 150m vorliegt. D.h. eine OMM- Nutzung muss ausserhalb der eiszeitlichen Rinne liegen.

6.5.5 Bohrkosten

Aus vergleichbaren Projekten sind Brunnen bis 150 m Tiefe, ausgebaut mit einem PVC-Filter für unter 100'000 CHF möglich. Die Kosten setzen sich grob wie folgt zusammen:

| | |
|--------------------------|------------|
| Mobilisation: | 10'000 CHF |
| Bohrung: | 40'000 CHF |
| Ausbau mit PVC: | 20'000 CHF |
| Hinterfüllung: | 10'000 CHF |
| Entwicklung der Bohrung: | 10'000 CHF |
| Entsorgung: | 5'000 CHF |

Total: ca. 95'000 CHF exkl. MwSt.

Voraussetzung: Bohrung auf einem Hartplatz, Wasser und Strom in unmittelbarer Nähe vorhanden

Der Potentialnachweis erfolgt mittels Pumpversuchen. Diese werden in der Regel über mehrere Stunden bis wenige Tage ausgeführt. Bei den ersten Projekten werden intensivere Pumpversuche mit Loggingarbeiten und Wasseranalysen durchgeführt, welche über 1-2 Wochen andauern können. Die Kosten für die intensiveren Pumpversuche werden auf 30'000 CHF geschätzt.

6.5.6 Erhöhung der Durchlässigkeit

Wenn das Gebirge nur schwach durchlässig ist, gibt es nur begrenzt Möglichkeiten dies zu ändern. Am Häufigsten wird in Karbonaten oder karbonatisch gebundenen Gesteinen eine Säure eingesetzt, welche eingespült wird, um die Durchlässigkeit zu erhöhen. Man muss sich aber bewusst sein, dass dies nur im bohrlochnahen Bereich geschieht und keine Tiefenwirkung hat. Aber mit einer Säuerung wird der Bohrlochdurchmesser künstlich erweitert, was die Mantelfläche für die Zuströmung von Grundwasser erhöht. Da die OMM karbonatisch gebunden ist, würde auch im Filterbereich von diesen Brunnen Säure eingesetzt, um die Durchlässigkeit zu erhöhen.

Bohrtechnische Methoden wie *underreaming* oder einfache *sidetracks* sind weiter zu prüfen, führen aber in der Regel zu hohen Zusatzkosten und können oftmals nicht von jeder Bohrfirma ausgeführt werden.

6.5.7 Ziele von der nächsten Erkundungsphase

Werden in der nächsten Phase Erkundungsbohrungen in der OMM durchgeführt, so müssen folgende Ziele erreicht werden:

- Datenerhebung von der Lithologie und Hydrogeologie der OMM für eine geothermische Nutzung.
- Erstellen von Pilotprojekten, welche Nachahmer findet
- Duplizieren der thermischen Leistung von Bassersdorf als Minimalziel bei gleichzeitig geringerer Absenkung.
- Wirtschaftlichkeitsnachweis von der Nutzung der OMM auch für Kleinanlagen ab 250 kW, d.h. insbesondere die Umsetzungen von Brunnen bis 150 m Tiefe unter 100'000 CHF (exkl. Planungskosten).

- Nachweis, dass die Durchlässigkeit der OMM im Nahbereich der Bohrung künstlich erhöht werden kann.
- Zirkulationstest zwischen zwei Brunnen zur Bestimmung des geothermischen Potentials und der Geochemie mit deren Ausfällungspotential.
- Bestimmung der generellen Erfolgchancen auf der Achse Urdorf-Bassersdorf und darüber schrittweise über die angrenzenden Gebiete hinaus.

7 Schlussfolgerung und Empfehlung

Als Grundszenario für die Analyse wurden die hydrogeologischen Bedingungen von Bassersdorf gewählt. Für weitere mögliche thermische Anlagen in der OMM müssen im Minimum diese hydrogeologischen Bedingungen von Bassersdorf erreicht werden. Geographisch liegen diese guten Bedingungen gemäss derzeitigem Wissensstands auf der Achse Urdorf-Bassersdorf, was als Zielgebiet für die erste Exploration in der OMM empfohlen wird.

Es konnte mit den Simulationen gezeigt werden, dass die OMM auch mit einer Dublette ein geothermisches Potential aufweist. Aufgrund der Problematik eines thermischen Kurzschlusses ist das geothermische Potential vor allem davon abhängig wie gross die Regeneration in den Sommermonaten ist. Anzustreben wäre eine ausgeglichene Bilanz zwischen Energieentzug und Energieeintrag. Ohne Regeneration ist die Entzugsleistung auf rund 250 kW Kälteleistung limitiert, ausser die geologischen Bedingungen sind deutlich besser als in Bassersdorf oder der Abstand zwischen den Förder- und Rückgabeböhrung kann deutlich gegenüber den simulierten Abständen von meist 200 m erhöht werden.

Die thermische Leistung und die entzogene Energie geben vor, wie hoch die Bohrkosten für einen wirtschaftlichen Betrieb sein dürfen. Bei einer Anlage mit rund 250 kW Heizleistung dürfen die Bohrkosten für die Erkundungsbohrungen und Brunnendublette 250'000 CHF betragen. Wie Abklärungen diesbezüglich ergeben haben, sind diese Kosten realistisch, wenn die Bohrtiefe maximal 150 m beträgt und die Brunnen mit PVC-Kunststoffrohren ausgebaut werden. Mit höheren thermischen Leistungen würde grundsätzlich auch mehr Geld zur Verfügung stehen, die Bohrkosten steigen mit der Tiefe jedoch exponentiell an.

Die OMM liegt im Mittelland über mehrere Kantone flächig im Untergrund vor und zeigt eine gewisse Grundwasserführung. Klar ist, dass gemäss aktuellem Kenntnisstand das geothermische Potential in der OMM an keinem Standort mehrere MW_{th} beträgt. Eine Nutzung der OMM für einen Wärmeverbund ist entsprechend eher unrealistisch. Die Simulationen zeigen, dass bei mind. gleichen Verhältnissen wie in Bassersdorf eine Areal- oder Quartiernutzung mit einer geothermischen Nutzung aus der OMM durchaus möglich ist und so die OMM einen Beitrag zur geothermischen Nutzung und Wärmespeicherung beitragen kann. Für einen Langzeitbetrieb über 30-50 Jahre ist in der Regel eine (Teil-) Regeneration des Untergrunds je nach Situation (Brunnen nahe beieinander, wenig Platz für mehrere Förderbrunnen, Geologie gibt nicht so viel her, schneller Grundwasserfluss) notwendig.

Für die zweite Phase wird folgendes Vorgehen empfohlen:

Durchführung von max. 10 Erkundungsbohrungen mit max. 150 m Bohrtiefe auf der Achse Urdorf - Bassersdorf. Idealerweise aber nicht zwingend in der Umgebung von einem potentiellen Kunden (z.B. Gebäude in öffentlicher Hand).

Bei Wasser-Fündigkeit wird in rund 200 m Entfernung ein zweiter Brunnen für die Rückgabe erstellt. Danach soll ein Langzeitzirkulationstest das geothermische Potential und das Kurzschlussrisiko ermitteln und die Bohrungen Langzeit überwacht werden.

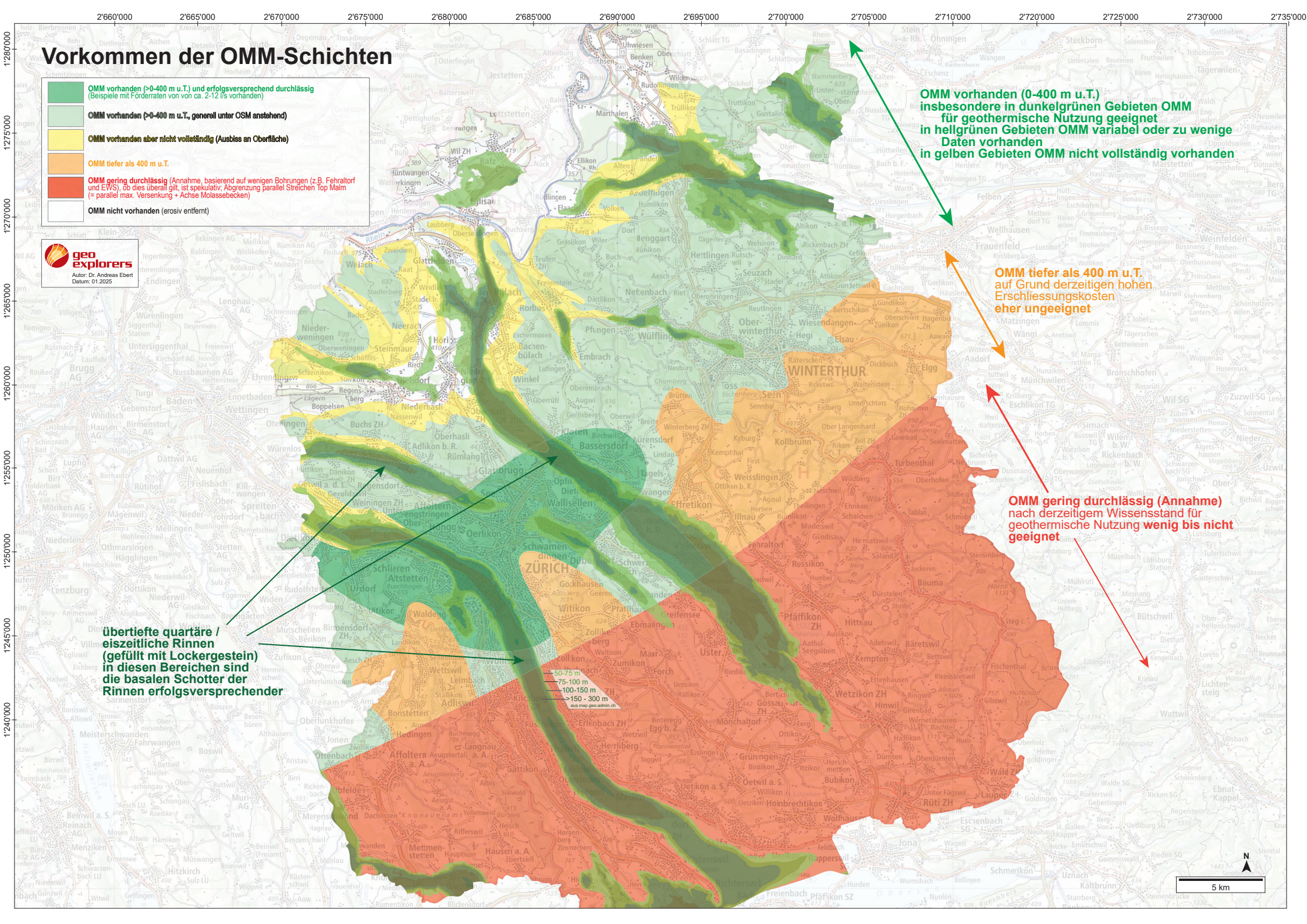
Bei Nicht-Fündigkeit wird dieser Standort nicht weiterverfolgt. Mindestens drei Brunnen sind zu erstellen, danach wird eine Zwischenbilanz gezogen, ob die Erkundung weitergeführt wird oder nicht.

8 Anhang

| Energiequelle | | OMM | OMM | OMM | OMM | Seewasser |
|---|---------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Installierte Leistung | kW | 250 | 500 | 1'000 | 1'500 | 1'000 |
| Vollaststunden | h | 2'100 | 2'100 | 2'100 | 2'100 | 2'100 |
| Energiebedarf pro Jahr | kWh/a | 525'000 | 1'050'000 | 2'100'000 | 3'150'000 | 2'100'000 |
| Investment | | | | | | |
| Honorare (Heizzentrale) | CHF | 34'938 | 67'375 | 134'750 | 194'625 | 124'750 |
| Gebäude für Heizzentrale | CHF | 73'750 | 147'500 | 295'000 | 442'500 | 295'000 |
| Energiegewinnung Quelle / Kosten für Brunnen komplett | CHF | 250'000 | 450'000 | 900'000 | 1'200'000 | 500'000 |
| Länge Anergieleitung zw. Quelle und HZ | m | - | - | - | - | 400 |
| Anergieleitung zw. Quelle und HZ | CHF | - | - | - | - | 200'000 |
| Wärmeerzeugung mit Elektroinstallation | CHF | 375'000 | 750'000 | 1'500'000 | 2'250'000 | 1'500'000 |
| Unvorhergesehenes (Heizzentrale) | CHF | 36'684 | 70'744 | 141'488 | 204'356 | 130'988 |
| Baunebenkosten (Heizzentrale) | CHF | 36'684 | 70'744 | 141'488 | 204'356 | 130'988 |
| Total Brutto-Investment | CHF | 807'056 | 1'556'363 | 3'112'725 | 4'495'838 | 2'881'725 |
| Finanzaufwand | | | | | | |
| Abschreibungsdauer Wärmeerzeugung | Jahre | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Kalkulatorischer Zinssatz | | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% |
| Annuität | | 9.63% | 9.63% | 9.63% | 9.63% | 9.63% |
| Finanzaufwand Wärmeerzeugung pro Jahr | CHF/a | 36'128 | 72'257 | 144'513 | 216'770 | 144'513 |
| Abschreibungsdauer Energiequelle, Anergieleitung | Jahre | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Kalkulatorischer Zinssatz | | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% |
| Durchschnittliche Abschreibungsdauer Gebäude | Jahre | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Kalkulatorischer Zinssatz | | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% | 5.0% |
| Finanzaufwand total pro Jahr | CHF/a | 60'450 | 117'360 | 234'719 | 341'459 | 220'559 |
| Finanzaufwand | Rp/kWh | 11.51 | 11.18 | 11.18 | 10.84 | 10.50 |
| Energieaufwand | | | | | | |
| JAZ | | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.20 |
| Strompreis für WP | CHF/kWh | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Hilfsstrom | CHF/a | - | - | - | - | - |
| Energieaufwand pro Jahr | CHF/a | 37'500 | 75'000 | 150'000 | 225'000 | 164'063 |
| Energiepreis | Rp/kWh | 7.14 | 7.14 | 7.14 | 7.14 | 7.81 |
| Betriebsaufwand (Wartung/Unterhalt/Instandhaltung) | | | | | | |
| Betriebsaufwand pro Jahr | CHF/a | 31'250 | 60'000 | 120'000 | 172'500 | 110'000 |
| Betriebskosten | Rp/kWh | 5.95 | 5.71 | 5.71 | 5.48 | 5.24 |
| Total Aufwand pro Jahr ohne Netz | CHF/a | 129'200 | 252'360 | 504'719 | 738'959 | 494'621 |
| Wärmegestehungskosten TOTAL ohne Netz | Rp/kWh | 24.61 | 24.03 | 24.03 | 23.46 | 23.55 |

Vorkommen der OMM-Schichten

- OMM vorhanden (>0-400 m u.T.) und erfolgsversprechend durchlässig (Beispiele mit Förderdaten von von ca. 2-12 l/s vorhanden)
- OMM vorhanden (>0-400 m u.T., generell unter OSM anstehend)
- OMM vorhanden aber nicht vollständig (Ausbaus an Oberfläche)
- OMM tiefer als 400 m u.T.
- OMM gering durchlässig (Annahme, basierend auf wenigen Bohrungen (z.B. Fehraltorf und EWS), ob dies überall gilt, ist spekulativ; Abgrenzung parallel Streichen Top Malm (= parallel max. Versenkung + Achse Molassebecken)
- OMM nicht vorhanden (erosiv entfernt)



OMM vorhanden (0-400 m u.T.) insbesondere in dunkelgrünen Gebieten OMM für geothermische Nutzung geeignet in hellgrünen Gebieten OMM variabel oder zu wenige Daten vorhanden in gelben Gebieten OMM nicht vollständig vorhanden

OMM tiefer als 400 m u.T. auf Grund derzeitigen hohen Erschliessungskosten eher ungeeignet

OMM gering durchlässig (Annahme) nach derzeitigem Wissensstand für geothermische Nutzung wenig bis nicht geeignet

übertiefte quartäre / eiszeitliche Rinnen (gefüllt mit Lockergestein) in diesen Bereichen sind die basalen Schotter der Rinnen erfolgsversprechender

- 50-75 m
 - 75-100 m
 - 100-150 m
 - 150-300 m
- aus map.geo.admin.ch

