

Abschlussbericht

Phase 4 Aquiferspeicher Flughafen Zürich

2. Testbrunnen (Sondierbohrung V5, Seismik 2025,
Testbrunnen P18-1, Pump- und Zirkulationstests,
Simulationen, Nutzungskonzept)

Auftraggeber:

Flughafen Zürich
Postfach
8058 Zürich-Flughafen
vertreten durch:
Rolf Gisler



Hauptautor:

Andreas Ebert Geo Explorers AG

Mitautoren:

Kapitel Pumpversuche: Christian Häring
Kapitel Simulationen: Adriaan Visser
Kapitel Nutzungskonzept: Tobias Frei

Liestal, 05.12.2025

Projekt	Grosstechnischer Erdspeicher Flughafen Zürich in quartärer Rinne
Unterprojekt	Phase 4 mit 2. Testbrunnen und Zirkulationstest
Objekt / Standort	Flughafen Zürich
Auftraggeber	Flughafen Zürich AG
Adresse	Postfach, CH-8058 Zürich-Flughafen
Projekt- / Bestellnummer	P20AA015.01 / 197001
Ausführende Büros	Ingenieurgemeinschaft IG Rinne Arbeitsgemeinschaft der SC+P AG / Geo Explorers AG / e-axiom GmbH
Gesamtprojektleitung	Thomas Schirmer, SC+P Sieber Cassina + Partner AG
Projektleitung Testbrunnen, Seismik, Tests	Dr. Andreas Ebert, Geo Explorers AG
Sachbearbeitung	Andreas Ebert Christian Häring Marc Touzin Eva Dörner Tobias Frei, E-Axiom GmbH (Kap 12.2)
Dateiname / Version	25_11_Flughafen Zürich Phase 4.docx
Datum Bericht	05.12.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	4
2.1	Aufgabe und Ziele	4
3	Ziele des zweiten Testbrunnens P18-1.....	6
4	Bohrstandorte.....	6
5	Chronologie	7
6	Beteiligte	9
7	Vorerkundungen	10
7.1	Abtastbohrung	10
7.1.1	Bohrarbeiten	10
7.1.2	Geologie	11
7.1.3	Fazit	11
7.2	Reflexionsseismik 2025	12
7.2.1	Grund / Ziele	12
7.2.2	Ausführung	12
7.2.3	Interpretation	12
7.2.4	Fazit	13
8	Zweiter Testbrunnen P18-1	15
8.1	Einleitung.....	15
8.2	Bohrarbeiten.....	15
8.3	Bohrlochausbau.....	17
8.4	Geologie	18
8.5	Geophysikalisches Bohrlochlogging	20
8.6	Bohrprofil P6-1.....	25
8.7	Brunnenentwicklung	26
8.8	Fazit Brunnenbau und Brunnenentwicklung.....	28
9	Pumpversuche.....	29
9.1	Ziele	29
9.2	Chronologie / Vorgehen / Methodik.....	29
9.3	Pumpversuch in P18-1 ohne Rückgabe.....	32
9.4	Pumpversuch in P6-1 ohne Rückgabe.....	35
9.5	Kurz-Stufenpumpversuch im P6-1 mit hohen Pumpraten	37
9.6	Zirkulationstest P18-1 → P6-1	38
9.6.1	Pumpen mit 2'200 l/min	38
9.6.2	Pumpen mit 3'200 l/min	40
9.6.3	Tracertest	42
9.7	Zirkulationstest P6-1 → P18-1	45
9.8	Brunnenenergiebigkeit.....	46
10	Aquifereigenschaften	48
10.1	Physikalische Parameter	48
10.2	Geochemie	50
10.3	Hydraulisches Gefälle.....	51
10.4	Mikrofauna.....	52
10.5	Beeinflussung weitere GW-Nutzer	55
10.6	Trinkwasserpotential.....	58
10.7	Fazit	59
11	Simulationen	60
11.1	Modellaufbau: Eckwerte und Randbedingungen.....	60
11.2	Szenarien	63
11.3	Resultate	64
11.4	Diskussion	69

11.5	Fazit	70
12	Nutzungskonzept Dublette.....	71
12.1	Potential	71
12.2	Energiemodellierung für ATES-Wärmespeicher und Betriebskonzept	71
13	Nutzungskonzept Clusterlösung und Monitoring	74
13.1	Brunnenstandorte	74
13.2	Monitoringkonzept	75

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Phasenweise Erkundung & Erschliessung der quartären Rinne	5
Abb. 2	Bohrstandorte und Seismiklinien	7
Abb. 3	Bohrstandort Vorfeld V5	10
Abb. 4	Abtastbohrung V5	11
Abb. 5	Übersichtskarte der geophysikalischen Messungen	13
Abb. 6	Interpretation Seismik.....	14
Abb. 7	Bohrstandort P18	15
Abb. 8	Seilbagger und Prakla RB50 im Einsatz	16
Abb. 9	Bohrarbeiten und Bohrlochausbau	17
Abb. 10	Bohrlochausbau	18
Abb. 11	Stillwassersedimente von 96-144 m u. T.	19
Abb. 12	Gewaschenes Probenmaterial von 219-243 m u. T.	19
Abb. 13	Bohrprofil P18-1	21
Abb. 14	Logging im Brunnen P18-1	23
Abb. 15	Logging in P18-1	24
Abb. 16	Bohrprofil P6-1	25
Abb. 17	Kläranlage hinter dem Bohrgerät.....	26
Abb. 18	Pegeländerung während Brunnenentwicklung.....	26
Abb. 19	Überführung	27
Abb. 20	Kläranlage im Betrieb	28
Abb. 21	Absenkung während Stufenpumpversuch und Wiederanstieg in P18-1.....	33
Abb. 22	Auswertung und Typkurven Stufenpumpversuch in P18-1	34
Abb. 23	Absenkung während Stufenpumpversuch und Wiederanstieg in P6-1.....	35
Abb. 24	Auswertung und Typkurven Stufenpumpversuch in P6-1	36
Abb. 25	Absenkung in P6-1 während Kurzpumpversuch mit hohen Pumpraten	37
Abb. 26	Absenkcharakteristik im P6-1	38
Abb. 27	Leitungsführung zwischen den Brunnen.....	38
Abb. 28	Zirkulationstest von P18-1 nach P6-1 mit 2'200 l/min während 10 Tagen.....	39
Abb. 29	Zirkulationstest von P18-1 nach P6-1 mit 3'200 l/min während 4.5 Tagen.....	41
Abb. 30	Zirkulationstest von P18-1 nach P6-1 mit kurzfristig max. 4'000 l/min	41
Abb. 31	Anmischen von 200g Uranin	42
Abb. 32	Einbringen des Markierstoffs in die P6-1	42
Abb. 33	Messkurve Fluorometer 1614 beim Förderbrunnen P18-1 in Millivolt (mV).....	43
Abb. 34	Gesamte gemessene Tracerkurve	43
Abb. 35	Durchgangskurve des Tracers geglättet in Konzentration (ppb) über die Zeit.....	44
Abb. 36	Zirkulationstest von P6-1 zu P18-1 mit ca. 4'500-4'800 l/min.....	45
Abb. 37	Brunnenleistung von P6-1 und P18-1	47
Abb. 38	Aquifertemperaturen.....	49
Abb. 39	Lufttemperaturen Station Kloten (Quelle: meteoschweiz)	50
Abb. 40	Pegelmessungen in den Sondierbohrungen SE1 und P1	51
Abb. 41	BactoSense im Einsatz bei der P18-1	52
Abb. 42	Zellzahlen in verschiedenen Wassertypen	53
Abb. 43	Zeitlich aufgelöste Messresultate mit dem BactoSense	54

Abb. 44	Standorte der beiden Pegelsonden und des Pumpbrunnens P18-1	56
Abb. 45	Pegel in umliegenden oberflächennahen Piezobohrungen	57
Abb. 46	Ausschnitt aus Abb. 45.....	57
Abb. 47	Modellausschnitt in Flugperspektive. Farbe entspricht der Felsoberkante.....	60
Abb. 48	In Gelb durchlässige Schichten um den P6-1	61
Abb. 49	In Gelb durchlässige Schichten um den P18-1	61
Abb. 50	Für die Simulation verwendetes Lastprofil für eine Dublette	63
Abb. 51	Grundwasserabsenkung und -aufbau in Brunnen P6-1 und P18-1	64
Abb. 52	Maximale Ausdehnung der Wärmefahne.....	65
Abb. 53	Aquifertemperaturen im Best-Case während den ersten 10 Betriebsjahren.....	66
Abb. 54	Aquifertemperaturen im Worst-Case während den ersten 10 Betriebsjahren.....	67
Abb. 55	Aquifertemperaturen plausibler Fall während den ersten 10 Betriebsjahren	68
Abb. 56	Temperaturspreizung im Aquifer zwischen P6-1 und P18-1	70
Abb. 57	Konzeptskizze Filteranlage.....	73
Abb. 58	Vorgesehene weitere Brunnenstandorte	74
Abb. 59	Erste Simulationsergebnisse mit warmen und kalten Brunnen	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Standortdaten der bisher erstellten Bohrungen (jüngste oben).....	6
Tabelle 2	Chronologie Erkundung quartäre Rinne	7
Tabelle 3	Beteiligte Firmen und Personen	9
Tabelle 4	Akquisitionsparameter.....	12
Tabelle 5	Zusammenfassung bohrtechnische Details vom Brunnen P18-1.....	16
Tabelle 6	Logging in der Bohrung P18-1.....	22
Tabelle 7	Chronologie Pump- und Zirkulationstests	30
Tabelle 8	Übersicht über die Pumpstufen in P18-1	32
Tabelle 9	Ergebnisse der Stufenpumpversuche im P18-1.....	34
Tabelle 10	Übersicht über die Pumpstufen in P6-1	35
Tabelle 11	Ergebnisse der Stufenpumpversuche im P6-1.....	36
Tabelle 12	Tracertests im Okt. 2025	42
Tabelle 13	Ungestörte Bohrlochtemperaturen in der produktiven Zone	48
Tabelle 14	Gesteinsparameter in den unterschiedlichen geologischen Einheiten	62
Tabelle 15	Zusammenfassung der wichtigsten Resultate	68

1 Zusammenfassung

Im Schweizer Mittelland gibt es mehrere lange und rund **300 m tiefe quartäre Rinnen**, welche während der Eiszeiten entstanden sind und mit Lockergestein gefüllt sind. An der Rinnenbasis wurden durchlässige und wasserführend Kieslagen abgelagert. Auf Grund der Rinnenform und abdichtenden Schichten über den Kieslagen sind die Grundwassererneuerung und der Grundwasserfluss gering. Entsprechend gut eignen sich diese tiefen Schotterlagen für die Wärme- und Kältespeicherung, welche bisher nicht genutzt werden. Am Flughafen Zürich wurde im Rahmen eines Leuchtturm-Pilotprojekts, welches vom Bundesamt für Energie (BFE) gefördert wird, ein solch tiefer Aquifer erstmals systematisch erkundet, erschlossen und getestet. Der vorliegende Bericht umfasst die Phase 4, die Erstellung eines zweiten Testbrunnens P18-1 und Zirkulationspumpversuche. Nachfolgend werden die vorgängigen Phasen zusammengefasst.

Auf Grund fehlender Untergrunddaten wurde in einer **ersten Phase** die Lage, Form und Tiefe sowie der interne Aufbau der quartären Rinne mit **geophysikalischen Methoden** erkundet. Im September und Oktober 2022 erfolgten die Messungen. Es kamen drei Methoden zum Einsatz: die Reflexionsseismik, die passive Seismik und die ERT (Elektrische Resistivitäts Tomographie). Die passive Seismik und ERT wurden ins Messprogramm aufgenommen, da im Rahmen von Förderbeiträgen durch das BFE auch neuere, weniger aufwändige und bisher unübliche Methoden getestet werden sollten. Die reflexionsseismischen Messungen erfolgten entlang von 5 Linien längs und quer über das Flughafengelände mit einer totalen Länge von 12.75 km. Für die passive Seismik wurden 3 NNE-SSE verlaufende Linien quer zur quartären Rinne gewählt. Diese weisen eine totale Länge von 5.38 km auf. Entlang von 2 ERT-Linien mit total 5.72 km Länge wurde die Tauglichkeit der ERT-Methode hinsichtlich der Erkundung von tiefen Rinnen überprüft. Die Lage, Tiefe und Geometrie der Rinne sowie deren interner Aufbau konnten gut abgebildet werden und somit Bohrziele für die nachfolgenden Sondierungen definiert werden. Die maximale Tiefe der Rinne konnte auf ca. 300 m definiert werden.

Da bisher keine Bohrung die tieferen Bereiche der Rinne erbohrt hat, der lithologische Aufbau der Rinne sowie deren genaue Tiefe unbekannt waren, wurden in einer **2. Phase** im Juni und Juli 2023 über das Flughafengelände verteilt, drei bis zu 346 m tiefe **Sondierbohrungen** entlang der quartären Rinne erstellt. Diese hatten zum Ziel, tiefliegende, durchlässige und wasserführende Schichten / Schotterlagen an der Basis der Rinne nachzuweisen. Zudem sollten diese Bohrungen notwendige geologische Daten für die Planung eines Testbrunnens liefern und helfen, den besten Standort zu wählen. Die Bohrungen haben unter mächtigen Stillwasserablagerungen je zwei sehr durchlässige Kieslagen mit einer totalen Mächtigkeit von 42 bis 56 m an der Basis der Rinne erbohrt. In diesen erfolgten deutliche Spülverluste. Jede Bohrung wurde zu einer Monitoringbohrung ausgebaut. Abgeleitete hydraulische Durchlässigkeiten aus einfachen Auffüllversuchen in den nicht entwickelten Bohrungen lagen bei min. 10^{-4} bis 10^{-5} m/s.

In der **3. Phase** wurde im Juli bis Oktober 2024 der **erste Testbrunnen P6-1** erstellt. Mit diesem wurden die Grundwasserparameter und Brunnenleistung bestimmt. Die Bohrung erreichte eine Tiefe von 290 m u. T., wobei der Fels der Oberen Meeresmolasse bereits bei 270 m u. T. angetroffen wurde. Dies bedeutet, dass der Brunnen nicht in der Rinnenmitte, sondern am Rinnenrand zu liegen kam. Es wurden total 42 m saubere bis wenig siltig-tonige, wasserführende und durchlässige Kieslagen erbohrt, in welchen wiederholt totale Spülverluste erfolgten. Es wurde ein 6"-Filterrohr mit einer totalen Filterstrecke von 36 m eingebaut. Trotz mehrmaliger Versuche konnte das Filterrohr wegen Blockaden nur bis auf 258.6 m u. T. eingebaut werden. Auf Grund der geringen Grundwassererneuerung wurde die Brunnenentwicklung vorzeitig abgebrochen und auf später verschoben, wenn ein zweiter Brunnen erstellt ist, damit das geklärte Grundwasser aus der Entsandung wieder in den Aquifer zurück gegeben werden kann. Es hatte sich nämlich gezeigt, dass sich der Grundwasserspiegel während der Entsandung und Entnahme von über 5'800 m³ Wasser kontinuierlich um max. 2.6 m absenkte und erst nach ca. 4-6 Wochen regeneriert hatte. Dies hat gezeigt, wie wichtig die Erhaltung der Grundwasserbilanz ist. Folglich

konnte nur ein Kurzpumpversuch ausgeführt werden. Es wurde mit 3000 l/min bei einer Absenkung von ca. 17-19 m gepumpt. Zudem wurde mit 4000 l/min gepumpt, aber zu kurzfristig, als dass sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hätte. Die geförderte Grundwassertemperatur lag mit 19.4°C etwas tiefer als in der benachbarten Sondierbohrung mit 22.4°C, welche aber auch 56 m tiefer ist. Bereits die ersten Untersuchungen hatten gezeigt, dass die Kieslagen in den Sondierbohrungen und im Brunnen P6-1 trotz unterschiedlichem lithologischem Aufbau und unterschiedlich tiefen Filterstrecken hydraulisch miteinander verbunden sind. Dies zeigten die simultan ähnlichen Wasserspiegel-Reaktionen auf den Pumpbetrieb. Zusammen mit der geringen Grundwasserneubildung wurde berechtigt angenommen, dass es sich um einen zusammenhängenden, abgeschlossenen und einen nicht bis kaum fließenden tiefen Aquifer handelt. Somit eignet sich der tiefe Aquifer gut für eine thermische Aquiferspeicherung. Die Ergebnisse waren so vielversprechend, dass die nächste Phase 4 «Erstellung einer Dublette mit Zirkulationspumptests» gestartet werden konnte.

Mit der **Phase 4** sollte ein **zweiter Testbrunnen für Zirkulationspumpversuche** erstellt werden. Auf Grund von Bauarbeiten auf dem Vorfeld sollte der zweite Testbrunnen dort entstehen. Da dieser Standort aber weiter weg von der prognostizierten Rinnenmitte lag, wurde entschieden vorgängig eine Abtastbohrung durchzuführen. Diese über den Jahreswechsel 2024/2025 erfolgte 274 m tiefe Bohrung V5 hat in den Rinnenrand gebohrt und deshalb zu wenig mächtige Kieslagen angetroffen. Sie wurde deshalb verfüllt und rückgebaut. Um den Verlauf der Rinne unter dem südlichen Flughafenareal besser definieren zu können, wurden vor Ostern 2025 drei weitere seismische Linien vermessen. Dies zeigten, dass sich die Rinnenmitte östlich der bisher erstellten Bohrungen befindet. Damit können nun weitere Brunnenstandorte besser lokalisiert werden. Parallel wurde entschieden, den zweiten Brunnen direkt neben der Sondierbohrung SE-1 auf dem Parkplatz P18 zu erstellen. Da in der Sondierbohrung bereits mächtige, durchlässige und wasserführende Kiese angetroffen wurden, wurde die Chance hoch eingestuft, dass ein benachbarter zweiter Brunnen ebenfalls ausreichend Kieslagen erschliessen würde.

Der zweite Testbrunnen P18-1 wurde von Mai bis Juli 2025 erstellt und ausgebaut. Dieser erreichte eine Tiefe von 337 m u. T. und wurde ebenfalls mit einem 6" Filterrohr ausgebaut. Es wurden wieder unter mächtigen Stillwasserablagerungen bis 220 m u. T. eine Wechselfolge von glaziofluvialen Kiesen und Moränen angetroffen. Der Anteil von sauberen bis wenig siltig-tonigen Kiesen lag bei rund 15 m. Im Gegensatz zur benachbarten Sondierbohrung wurden die basalsten durchlässigen Kieslagen nicht angetroffen. In beiden Brunnen wurden verschiedenste geophysikalische Messungen, unter anderem auch Spinnerlogs durchgeführt. Letztere haben gezeigt, dass in beiden Brunnen sehr durchlässige Zuflussbereiche bestehen, welche mit den anderen Logs und erbohrten Kieslagen korrelieren.

Die Brunnentwicklung erfolgte diesmal mit einer Kläranlage, welche kontinuierlich die Feianteile aus dem geförderten Wasser «klärte». Somit konnte durch die Rückgabe des Wassers in den Aquifer die Bilanz erhalten werden und die Grundwasserpegel erholten sich nach Abschalten des Pumpbetriebes praktisch unmittelbar.

Anschliessend erfolgten mehrere Pumpversuche mit und ohne Rückgabe in den Aquifer, sowie ein Markierversuch und diverse Messungen wie z. B. chemische Messungen und Mikrofauna-Analysen. Mit zweitägigen Stufenpumpversuchen ohne Rückgabe des Wassers wurden die Aquifereigenschaften bestimmt. U.a. wurde in den Brunnen P6-1, P18-1 und der Bohrung P1 eine sehr hohe Transmissivitäten von gemittelt $4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ bestimmt. Die Brunnenergiebigkeit von beiden Brunnen liegt bei max. 5'000 l/min bei Absenkungen von ca. 30 m. Damit die Brunnen diese Fördermenge schlucken können, werden Druckleitungen benötigt. Im Dauerbetrieb ist eine Förderleistung mit Reserve von ca. 4'000 l/min realistisch. Es wurden mehrtägige Zirkulationspumptests mit 2'200 l/min und 3'200 l/min durchgeführt. Bei 2'200 l/min stellten sich während 10 Tagen stationäre Bedingungen ein. Mit dieser Pumprate und dem Betrieb von 6 Brunnen (3 Förder- und 3 Rückgabeburten) könnte rund 90% der Energie in der Ausbaustappe 2 eingelagert werden. Bei 3'200 l/min wurde ein langsamer Druckanstieg beobachtet. Da keine

Filter zwischengeschaltet waren und wahrscheinlich die Brunnen noch nicht vollständig entsandet waren, wurden kontinuierlich wenig Partikel vom einen in den anderen Brunnen gepumpt. Somit kam es zu einer sukzessiven Aufsandung im Rückgabebrunnen, welche die Schluckfähigkeit verschlechtert hat. Deshalb wurden der Zirkulationstests abgebrochen und die Brunnen wurde vor der Erhöhung der Pumprate nochmals entwickelt. Die Partikelfracht, überwiegend aus Quarzkörnchen bestehend, hat sich während dem erneuten Entsandens des P6-1 deutlich reduziert. Während der Brunnenentwicklung wurde ein einstündiger Zirkulationstest vom P6-1 zum P18-1 mit max. Förderraten von 4'500 bzw. 4'800 l/min durchgeführt. Während diesem haben sich im Förderbrunnen stationäre Bedingungen eingestellt. Der P18-1 lief bei 4'800 l/min über.

Während dem Pumpversuch mit 2'200 l/min wurde in den P6-1 ein Tracer eingegeben. Die dominante Fliesszeit betrug 6 Tage und die Rückgewinnungsrate war mit ca. 6-9 % sehr gering. Dies ist vorteilhaft für die thermische Nutzung, da dies auf ein grosses hydraulisch erschliessbares Untergrundvolumen hinweist und trotz der sehr durchlässigen Kieslagen gegen einen raschen und direkten hydraulischen / thermischen Kurzschluss. Dies kann mit dem sehr heterogenen Aufbau des Untergrundes und der Tatsache, dass keine durchgängigen Kieslagen vorliegen, erklärt werden.

Die Aquifertemperatur liegt bei rund 20°C bzw. je nach Tiefenlage leicht darüber. Aus chemischer Sicht ist das Wasser sehr vorteilhaft, da Kalziumionen nur in sehr geringer Konzentration, sowie gelöste Mangan- und Eisenionen nicht vorliegen. Das Potential für Ausfällungen ist somit gering. Da das Grundwasser nahezu sauerstofffrei ist, wird empfohlen das Brunnen- und Leitungssystem in einem geschlossenen Kreislauf zu betreiben, um Oxidationen durch Luftsauerstoff zu vermeiden. Erste Analysen mit einer totalen Zellzahl von 40'000 Zellen pro ml zeigen, dass Zellen von Mikroben bzw. Bakterien im Wasser vorhanden sind. Allerdings sind diese auf Grund von äusseren Einflüssen wie z. B. der Trübung beeinflusst und somit noch nicht abschliessend. Zudem haben die Messungen einen Tagesgang, der evtl. von der Witterung verursacht ist, gezeigt. Es werden noch DNA-Analysen durchgeführt, deren Resultate aber noch nicht vorliegen; genauso wie die Altersbestimmung des Grundwassers.

Auf Grund der sehr geringen Neubildungsrate ist bei einer Nutzung eine Erhaltung der Grundwasserbilanz zwingend. Die Neubildungsrate ist mit 100-150 m³/Tag gering. Eine Beeinträchtigung oder Beeinflussung von anderen Grundwassernutzern im oberflächennahen Lockergestein können nachweislich ausgeschlossen werden; ebenso thermischen Nutzungen in der OMM aufgrund des geringen bzw. kaum vorliegenden hydraulischen Gefälles, der Distanz zu den Nutzungen (im Falle der OMM) und der Erhaltung der Grundwasserbilanz ausgeschlossen werden.

Es wurden verschiedenste Szenarien simuliert. Es hat sich gezeigt, dass die bestehende Dublette mit ca. ¼ des geplanten Endausbaus bewirtschaftet werden kann, also eine Energiemenge von 6.4 GWh einspeichern bzw. liefern kann, bei maximalen Förderraten von 3'900 l/min. Die thermischen Verluste der saisonalen Speicherung sind beim Aufladungsprozess gering, weil kaum ein hydraulisches Gefälle vorliegt. Um die Brunnen bilden sich konzentrische Wärme-, resp. Kälteinseln, welche kaum abströmen. Die 3K-Regelung kann entsprechend eingehalten werden und ein thermischer Kurzschluss ist nicht zu erwarten. Dies kann i. W. mit dem inhomogenen Aufbau der basalen Rinnenfüllung erklärt werden, welche keine durchgängigen Kieslagen aufweist, was auch die Tracertests wie auch die geologischen Befunde bestätigen.

Die Partikelführung hat gezeigt, dass eine Filteranlage und angepasste Rohrleitungen zwingend sind. Zudem ist vorgesehen bei den folgenden Brunnen das Bohr- und Spülkonzept wie auch den Ausbau mit einer Filterkiespackung anzupassen. Auf dies wurde im ersten Schritt verzichtet, da mit Risikokapital erst einmal ein «kostengünstiger» Nachweis der Quelle im Vordergrund stand. Technische Optimierungen können nun mit dem vorliegenden Nachweis erfolgen.

2 Einleitung

2.1 Aufgabe und Ziele

Die vom Bund erteilte Betriebskonzession berechtigt und verpflichtet die Flughafenbetreiber-Gesellschaft Flughafen Zürich AG, den Flughafen Zürich bis ins Jahr 2051 zu betreiben. Dafür baut, unterhält und betreibt die Flughafen Zürich AG grossflächig Infrastrukturbauten am Flughafen Zürich mit den dazugehörigen technischen Installationen und Anlagen sowohl im Wärme- als auch im Mittelspannungsbereich. Zur Versorgung der Infrastruktur mit Wärme und Kälte sind im Systemperimeter umfangreiche Anlagen im Einsatz u.a. eine grosse Heizzentrale mit Wärme-Kraft-Kopplung (120 MW_{th}, 10 MW_{el}; 90 GWh_{th}/Jahr, 25 GWh_{el}/Jahr), deren Wärme über ein Fernwärmenetz abgegeben wird. Weitere Energiezentralen mit Wärmepumpen und Abwärme bestehen z.B. im DOCK E und Circle mit Energiepfählen und Erdwärmesonden zur Nutzung von Kälte und Wärme, sowie zwei Kältezentralen mit Kompressionsmaschinen, Rückkühlern und Abwärmenutzung. Deren Kennzahlen sind:

- Dez. Energiezentralen (Circle, M1, W23, etc.): ca. 8 MW_{th} (Wärme), ca. 12 MW_{th} (Kälte); ca. 7 GWh/Jahr (Wärme), ca. 12 GWh/Jahr (Kälte)
- Kältezentralen (A11, A40, B): ca. 24 MW_{th} (Kälte)
- Abwärmenutzung Kältezentralen (A11, A4): ca. 5 GWh /Jahr)

Mit der Energiestrategie 2030 stehen eine sichere, wirtschaftliche und ökologische Energieversorgung des Flughafens Zürich im Fokus. Zudem hat die Flughafen Zürich AG die Ambition, die Treibhausgas-Emissionen aus den Scopes 1 und 2 bis 2040 auf netto null zu senken. Zum Erreichen dieser Ziele soll u.a. zukünftig ein grosstechnischer saisonaler Speicher zur Wärme- und Kälteversorgung realisiert werden. Damit soll die Abwärme im Sommer gespeichert werden, um diese dann im Winter zu nutzen, anstatt diese über Rückkühler an die Umgebung abzugeben. Dafür bietet sich eine, unterhalb des Flughafens verlaufende, eiszeitliche Rinne an.

Im Schweizer Mittelland bildeten sich unter den grossen Eisschilden während der Eiszeiten tiefe Rinnen, welche mit Lockergestein aufgefüllt wurden. Einzelne Bohrungen zeigen, dass an der Basis von diesen Rinnen quartäre Schotterlagen erwartet werden können, welche durchlässig und wasserführend sind. Z. B. werden in Seon bei Lenzburg seit 1988 die wasserführenden Schotter in einer Tiefe von rund 300 m erfolgreich als Wärme- und Trinkwasserquelle genutzt. Dabei handelt es sich um ein ca. 7000 Jahre altes, sauerstoffreiches und gering mineralisiertes Wasser. Auch in Biel, Muri bei Bern und Münsingen konnten bis zu 50 m mächtige und wasserführende Schotter an der Basis der Rinnen nachgewiesen werden.

Gleichwohl sind die Rinnen kaum erforscht und es gibt nur sehr wenige Bohrungen, die die Rinnenbasis erreicht haben. Im Fall der Rinne unter dem Flughafengelände war zu Beginn die Datengrundlage sehr gering. Es war zwar das Vorhandensein der Rinne gesichert, aber vor Beginn der Erkundung war der Verlauf, die Tiefe, die Form und der interne Aufbau der Rinne gänzlich unbekannt. Entsprechend war es notwendig, die Rinne vorweg mit geophysikalischen Methoden zu erkunden, bevor teure Brunnen zielführend lokalisiert und erstellt werden konnten. Nur so konnten die teuren Brunnen geplant und ausgeführt werden, ohne ein zu grosses finanzielles Risiko einzugehen.

Die Erkundung und Erschliessung der Flughafen-Rinne erfolgten in verschiedenen Schritten (Abb. 1). Nach jedem Schritt wurde auf Grund der Ergebnisse über ein "Exit" oder eine Weiterführung entschieden. Nach der ersten Phase der geophysikalischen Erkundung im Herbst 2022 (Verlauf Rinne, Rinnengeometrie und Bohrziele konnten erfolgreich definiert werden) folgte im Sommer 2023 die zweite Phase mit 3 Sondierbohrungen entlang der Rinnenmitte, welche ebenfalls erfolgreich war (wasserführende Kiese wurden an der Basis erbohrt und ein Brunnen

konnte geplant werden). Das Vorgehen und die Ergebnisse wurden in separaten Berichten beschrieben. Basierend auf den Erkenntnissen wurde im Sommer 2024 ein erster Testbrunnen P6-1 erstellt und Pumptests mit verschiedenen Messungen durchgeführt. Da die ersten Erkenntnisse vom Brunnen P6-1 so zuversichtlich waren, dass der Brunnen ergiebig und eine Kälte-Wärmespeicherung möglich ist, wurde im Sommer 2025 ein weiterer Brunnen P18-1 erstellt, und mit Zirkulationstests getestet. Der vorliegende Bericht beschreibt die Phase 4: die Vorerkundungen für den zweiten Brunnenstandort, den Brunnenbau P18-1, dessen Brunnenentwicklung sowie die verschiedenen Pump- und Zirkulationstests und dazugehörigen Analysen und Messungen.



Abb. 1 Phasenweise Erkundung & Erschließung der quartären Rinne

3 Ziele des zweiten Testbrunnens P18-1

Mit dem Brunnen P18-1 (2. Testbrunnen) waren folgende Zielsetzungen verbunden:

- Testen durchlässiger / wasserführender Schotter am 2. Standort
- Quantitative Bewertung der Durchlässigkeit / Wasserführung / Zuflusszonen der Schotterlagen auf Basis von geophysikalischem Logging und Pumptests
- Zirkulationstests zwischen beiden Testbrunnen mit Markierversuchen
- Ermittlung Aquifereigenschaften (u.a. Speicherkoeffizient, Ausdehnung Aquifer, Brunneneffekte, Fließwiderstände, Heterogenität des Aquifers, hydraulischer Kurzschluss)
- Ermittlung Brunnenpotential (Leistung, Ergiebigkeit, Absenkung / Aufstau usw.)
- Ermittlung und Bewertung Wasserchemie (u.a. Verockerungsfähigkeit, elektr. Leitfähigkeit)
- Ermittlung Mikrofauna und Alter Grundwasser
- Grundwassersimulationen für Nutzungskonzepte und Definition weiterer Brunnenstandorte

4 Bohrstandorte

Die Bohrstandorte aller bisher erstellten Sondierbohrungen und Brunnen sind in Tabelle 1 und Abb. 2 ersichtlich.

Tabelle 1 Standortdaten der bisher erstellten Bohrungen (jüngste oben)

Bohr-ID	Koordinaten	GOK m.ü.M.	Ortsbezeichnung	Parzelle
P18-1 (2. Testbrunnen)	2685318.5 / 1256289.7	436.18	Warteraum P18, südlich von Fracht Ost	6022
V5	2684815.3 / 1256613.9	427.6	Vorfeld V5, Frachtstrasse-Tunnel zu Dock E	3139.14
Brunnen P6-1 (1. Testbrunnen)	2685149.5 / 1256437.7	429.6	nördlich Parkhaus P6, Zürich-Flughafen	3139.14
E1	2683904 / 1257615	420.96	Ecke Rietstrasse / Rütistrasse, NW von Dock E	4100
P1	2684575 / 1257070.5	426.53	Enteisungsplatz, DIP Charlie C1, SE von Dock E	3139.14
SE1	2685322 / 1256290	436.18*	Warteraum P18, südlich von Fracht Ost	6022

(*von 435.49 auf 436.18m u.T. gemäss neuen GPS-Messungen geändert)



Abb. 2 Bohrstandorte und Seismiklinien

Die Rinnenmitte ist gelb gestrichelt abgebildet und der basale Rinnenrand bis zum gemittelten Top der basalen Kiese und Moränenablagerungen ist mit transparentem Orange skizziert. Grundlage der Abgrenzungen sind die Seismik und Bohrungen.

5 Chronologie

Die wichtigsten Meilensteine sind in nachfolgender Tabelle 2 ersichtlich.

Tabelle 2 Chronologie Erkundung quartäre Rinne

Phase	Arbeitsschritt	Zeit
1	Geophysikalische Erkundung quartäre Rinne	2022
1	Planung / Vergabe	04.02. – 19.09.2022
1	Messungen Reflexionsseismik, ERT, passive Seismik	20.09. – 05.10.2022
1	Prozessierung, Interpretation, Schlussbericht	10.10. – 16.12.2022
2	Sondierbohrungen SE1, P1, E1	2023
2	Planung / Vergabe	16.12.2022 – 14.06.2023
2	Bohrarbeiten	15.06. – 25.07.2023
2	Auswertungen, Schlussbericht	26.07. - 01.09.2023
3	1. Testbrunnen P6-1	2024
3	Planung / Vergabe	01.07.2023 – 21.05.2024
3	Bohrarbeiten P6-1 inkl. Installationen / Demobilisation	22.05. - 04.10.2024

3	Brunnenentwicklung mit Hydropuls	07.10. - 06.11.2024
3	Kurzpumptest und Beprobung Mikrofauna und Bactosense	07. - 11.11.2024
3	Auswertungen, Schlussbericht	09. - 15.11.2024
3	Simulationen Machbarkeit	09.12.2024 – 09.01.2025
4	2. Testbrunnen P18-1 / Zirkulationstest	2025
4	Abtastbohrung V5 Bohrarbeiten	11.12.2024 – 04.02.2025
4	Reflexionsseismik Frachtbereich Messungen	14. – 15.04.2025
4	Planung Bohrung V5/P18 inkl. Änderung Standort	04.09.2024 – 22.04.2025
4	Bohrarbeiten inkl. Installation	22.04. – 21.07.2025
4	Brunnenentwicklung inkl. Installationen Filteranlage, Brücke...	25.07. – 18.09.2025
4	Pump- und erste Zirkulationstests *	19.09. – 07.11.2025
4	Auswertungen, Schlussbericht	01.10. – 27.11.2025
4	Simulationen Nutzungskonzept	01.10. – 27.11.2025

** weitere Zirkulationstests sind in Planung*

6 Beteiligte

In nachfolgender Tabelle sind die wichtigsten beteiligten Firmen und deren Aufgaben gelistet.

Tabelle 3 Beteiligte Firmen und Personen

Firma	Person	Aufgabe bzw. verantwortlich für
Bauherr und Auftraggeber		
Flughafen Zürich AG	Rolf Gisler	Bauherr, Auftraggeber, Leiter Stromversorgung
	Thomas Hossli	Projektleiter Bau
Gesamtprojektleitung		
IG Rinne	Thomas Schirmer (SC+P Sieber Cassina + Partner AG)	Gesamtprojektleiter Aquiferspeicher
	Andreas Ebert (Geo Explorers AG)	Projektleiter Testbrunnen / Pumptests, Planung, Protokollierung und Rapportierung, Bericht-Verfassung
	Tobias Frei (E-Axiom GmbH)	Projektleiter Planung Leitungsbau, Einbindung, Bewirtschaftung
Bohrfirma		
Blétry AG	Didier Blétry	Geschäftsleiter, Offerte, Abrechnung
	Luka Šešlak	Bauführer
	Daniele Savoldo	Brunnenentwicklung
Bohrstellengeologie		
Geo Explorers AG	Andreas Ebert, Eva Dörner	Bohrstellengeologie, Protokollierung, Begleitung geophy. Logging
	Christian Häring, Andreas Ebert, Marc Touzin	Begleitung Brunnenentwicklung, Pumptests, Monitoring, Sicherheitskonzept
Geophysikalische Bohrlochvermessung		
Terratec	Daniel Fischer und andere	Ausführung Bohrloch-Logging
Begleitende Analysen		
Afry Schweiz AG	Hansruedi Fisch	Auswertung Stufenpumpversuch
Uni Basel	Jannis Epting, Michel Walde	BactoSense
ITaxLab GmbH	Lucas Blattner	eDNA Makro- & Mikrofauna-Analyse
Hydroisotop		Altersdatierungen
Bachema		Chemische Wasserzusammensetzung
Numerische Simulation für Nutzungskonzept		
Geo Explorers AG	Adriaan Visser	Ausführung Simulationen mit Feflow

7 Vorerkundungen

7.1 Abtastbohrung

Während der Standortfindung für einen zweiten Testbrunnen erfolgten auf dem Vorfeld V5 bei Dock A Belagserneuerungsarbeiten (Abb. 3). Da dieser Bereich nahe bei der Rinnenmitte liegt und mit den damals laufenden Bauarbeiten eine Bohrung wenig Einfluss auf den Betrieb gehabt hätte und einfach hätte eingebunden werden können, wurde dieser Standort gewählt. Auf Basis der damals vorliegenden Untergrunddaten bestand die Möglichkeit, dass der Standort evtl. zu weit von der Rinnenmitte entfernt liegt und somit die Bohrung in den Rinnenrand bohren würde und somit die basalen Schotter evtl. gerade nicht erreichen würde. Um dies vorgängig abzuklären, wurde über den Jahreswechsel 2024/25 eine einfache Abtastbohrung am geplanten Standort erstellt (Abb. 3).



Abb. 3 Bohrstandort Vorfeld V5

Die Bauarbeiten auf dem Vorfeld sind links vom geplanten Brunnenstandort gut zu erkennen.

7.1.1 Bohrarbeiten

Die Bewilligung für eine Sondierbohrung wurde am 28.11.2024 vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft erteilt. Am 11.12.2024 wurde mit den Installationen für die Bohrarbeiten begonnen. Vom 13.12.2024 bis zum 14.01.2025 wurde teleskopiert, mit Durchmessern von 159 bis 133 mm gebohrt. Bis 196 m u.T. wurde mit einem Brunnenbohrgerät von Comacchio mit Luftspülung gebohrt. Ab dieser Tiefe musste auf eine Tonspülung umgestellt werden. Die restlichen Bohrmeter bis auf 274 m u.T. wurden deshalb mit der Prakla RB50 gebohrt. Da die Bohrung keine ausreichend mächtigen Kiese angetroffen hat, wurde die Bohrung verfüllt und rückgebaut. Vorgängig wurde noch ein geophysikalisches Logging durchgeführt.



Abb. 4 **Abtastbohrung V5**

7.1.2 Geologie

Erste Molasse-Sandsteine mit Glaukonit (typisch für die Obere Meeresmolasse) wurden ab 262 m u.T. im Probenmaterial erkannt. Das geophysikalische Logging bestätigt dies. Die Basis der quartären Rinne liegt somit bei 262 m u.T.

Unter den mächtigen Stillwasserablagerungen (Seetone) von 78 bis 192 m u.T. wurde eine Abfolge von Kiesen mit variierendem Anteil von Silt, Ton und Sand erbohrt. Meist handelt es sich dabei um Moränen, welche z.T. verschwemmt sind. Reine bzw. durchlässige Kiese wurden nur von 192-195 m u.T. und von 252-258 m u.T. erbohrt. Bei 192 m u.T. erfolgten starke Wasserzutritte. Darunter wurden im Vergleich zu den anderen Bohrungen deutlich geringer Spülverluste der Tonspülung detektiert. Das geophysikalische Logging (Kaliber und Gamma) bestätigt, dass zu wenig bzw. nur einzelne geringmächtige nicht bis kaum-bindige Kieslagen vorliegen.

7.1.3 Fazit

Wie vorgängig vermutet, hat sich bestätigt, dass der Bohrstandort zu weit von der Rinnenmitte entfernt liegt und somit zu seicht in den Rinnenrand gebohrt wurde. Folglich wurden die obersten basalen Kieslagen nur angebohrt. Die Mächtigkeit der Kieslage ist folglich zu gering für eine Nutzung. Zudem waren die Spülverluste in den Kiesen deutlich geringer als bei den vorgängigen Bohrungen, was zusätzlich für eine geringere Durchlässigkeit spricht. Auf Grund der Resultate wurde entschieden, den Bohrstandort aufzugeben und für den 2. Testbrunnen einen neuen Bohrstandort zu suchen.

7.2 Reflexionsseismik 2025

7.2.1 Grund / Ziele

Mit der ersten geophysikalischen Untersuchung im Jahr 2022 wurden die Linien für die Reflexionsseismik so gewählt, dass diese möglichst lang und gerade gelegt werden konnten, damit eine optimale Auflösung und ein weiträumiges Abbild von der ganzen quartären Rinne möglich wurde. Mit den erfolgten Bohrungen hatte sich nun gezeigt, dass im Süden nicht mit Sicherheit eine Aussage möglich war, auf welcher Seite der Rinnenmitte sich diese Bohrungen befinden. Zudem musste angenommen werden, dass die Rinne nach Süden umknickt oder sich allenfalls aufteilt wie dies im nördlichen Untersuchungsgebiet festgestellt worden war. Um einen weiteren Misserfolg zu verhindern (Bohren in den Rinnenrand), wurde beschlossen im südlichen Bereich des Flughafengeländes weitere reflexionsseismische Messungen durchzuführen.

Die Messungen sollten möglichst schnell erfolgen. Zudem mussten die Messungen wieder betriebs- und noisebedingt nachts in einem kurzem Zeitfenster erfolgen. Da die verfügbare Messfirma nur während 2 Messtagen vor Ostern 2025 ein freies Zeitfenster hatte, mussten die Messungen auf dieses Fenster hin optimiert werden. Zudem waren die Linienlängen auf Grund der Bebauung eingeschränkt.

Entsprechend war das Hauptziel wie folgt:

Aufzeigen, ob sich die bisherigen Bohrungen V5, P6-1 und SE-1 auf dem östlichen oder westlichen Rinnenrand befinden, also in welche Richtung die Rinne nach Süden umbiegt. Es wurde auf Grund der kurzen Linien nicht erwartet, dass ebenso gute seismische Profile wie in der ersten Messrunde möglich sein würden. Trotzdem wurde erhofft, wieder den internen Aufbau und die Rinnenränder so kartieren zu können, dass weitere Brunnen gut geplant werden können.

7.2.2 Ausführung

Die Methodik wurde im Abschlussbericht zu Phase 1 vom 28.02.2023 ausführlich beschrieben. Auch wurden die gleichen Messparameter und Processingschritte angewendet. Es wird entsprechend auf diesen Bericht sowie den Daten- und Messbericht von der Messfirma verwiesen. In nachfolgender Tabelle 4 sind die wichtigsten Quell- und Aufnahmeparameter gelistet. Der Verlauf der Messlinien ist in Abb. 5 ersichtlich.

Tabelle 4 Aquisitionsparameter

Messdauer	14. und 15.04.2025	Nachts
Messfirma	GEO2X	Projektleiter Lorenz Keller
Messlinien	FZHS 25-02 Fracht - Kloten	Länge: 1175 m
	FZHS 25-03 Flughafenstrasse	Länge: 730 m
	FZHS 25-04 auf Vorfeld	Länge: 1405 m
Geophone	SmartSolo, kabellos	Abstand 5 m, 5 Hz
Anregung	1x Minivib, 7.5 t	Abstand 10 m, 14-160 Hz, 36 s bzw. 2x24 s
Processing	Datum = 450 m ü.M.	Processingschritte siehe Messbericht von GEO2X vom Mai 2025

7.2.3 Interpretation

Abb. 6 zeigt die Interpretation der neuen und der nahe gelegenen Linien von 2022. Auf Grund der kürzeren Länge der neuen Linien von 2025 können diese nicht so eindeutig interpretiert werden wie die alten von 2022. Die Interpretation ist auf der Abb. 6 ersichtlich. Die prozessierten

Profile zeigen, dass die Reflektoren im Bereich der Bohrungen V5, P6-1 und P18-1 nach Osten einfallen, so dass berechtigt angenommen werden kann, dass sich die Rinnenmitte östlich von diesen Bohrungen befindet. Nach Osten liegt der Top Fels somit tiefer. Somit konnte die Hauptfragestellung geklärt werden, in welche Richtung weitere Bohrungen platziert werden müssten.

Die Basis der Rinne ist auf den neuen Linien schwierig zu definieren, da Reflektoren der Molasse schleifend von der Rinnenbasis diskordant geschnitten werden. Dank der Bohrungen kann diese aber eingegrenzt werden. Zudem helfen die horizontalen Reflektoren innerhalb der Rinne, den Rinnenbereich auszuscheiden. Die Bereiche mit schwachen oder fehlenden Reflektoren können mit den homogenen und mächtigen Stillwassersedimenten (Seetonen) korreliert werden.

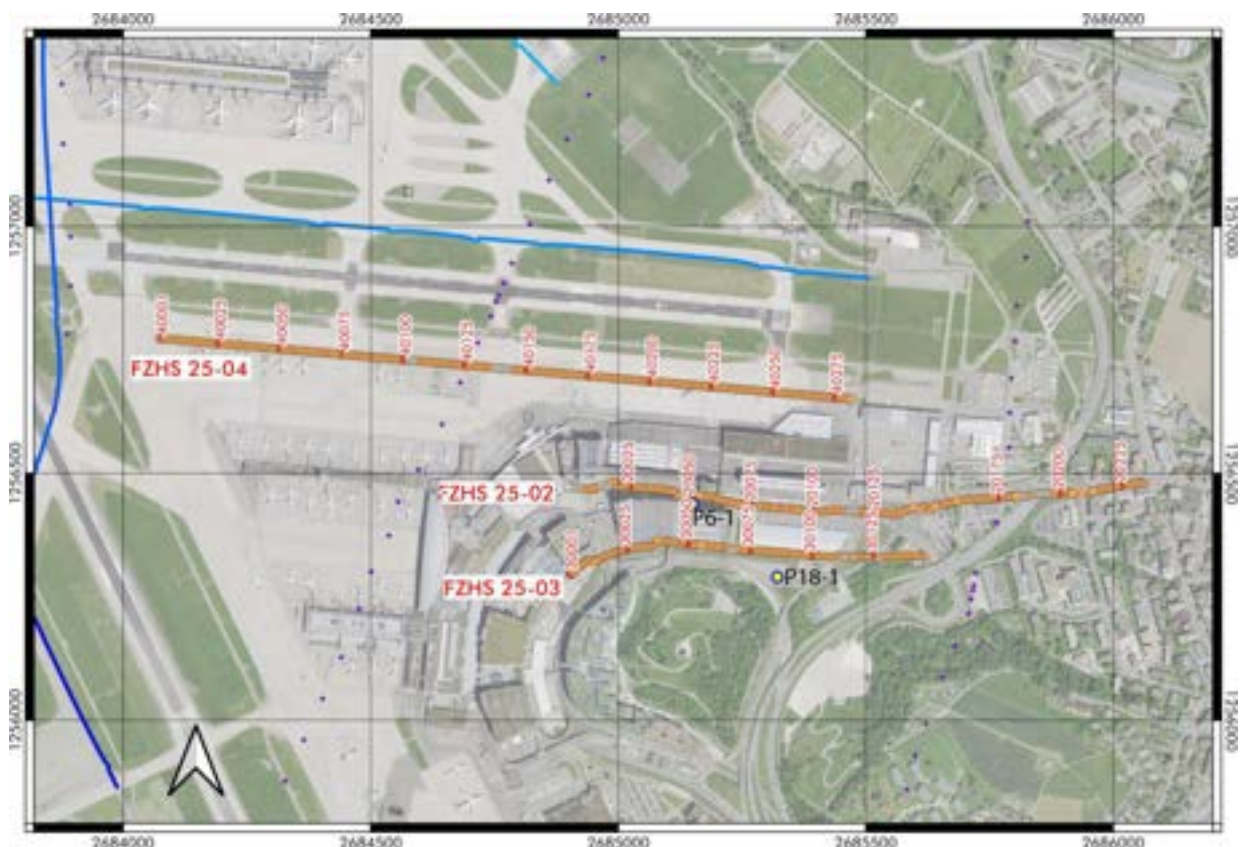


Abb. 5 Übersichtskarte der geophysikalischen Messungen

7.2.4 Fazit

Auch wenn die seismischen Profile auf Grund der kürzeren Länge nicht so eindeutig wie die der Kampagne von 2022 interpretiert werden können, konnte die wichtigste Fragestellung geklärt werden. Die Bohrungen V5, P6-1 und P18-1 liegen auf dem westlichen Rinnenrand. Die Rinnenmitte und -geometrie kann nun auch im Bereich der Frachtgebäude genauer definiert werden. Aber es gilt weiterhin, dass keine Aussage gemacht werden kann, wie die Schichtfolge unterhalb der Stillwassersedimente genau aufgebaut ist. Die verschiedenen Bohrungen haben gezeigt, dass zwar immer durchlässige Kiese innerhalb der basalen und reflektorreichen Lagen vorhanden waren, diese aber in ihrer Tiefenlage und Mächtigkeit variiert haben. Entsprechend ist unbedingt zu empfehlen, neue östliche Brunnenstandorte vorgängig mit Sondierbohrungen zu bewerten. Im Verhältnis zu den teuren und langwierigen Brunnen sind diese rasch und günstig zu erstellen.

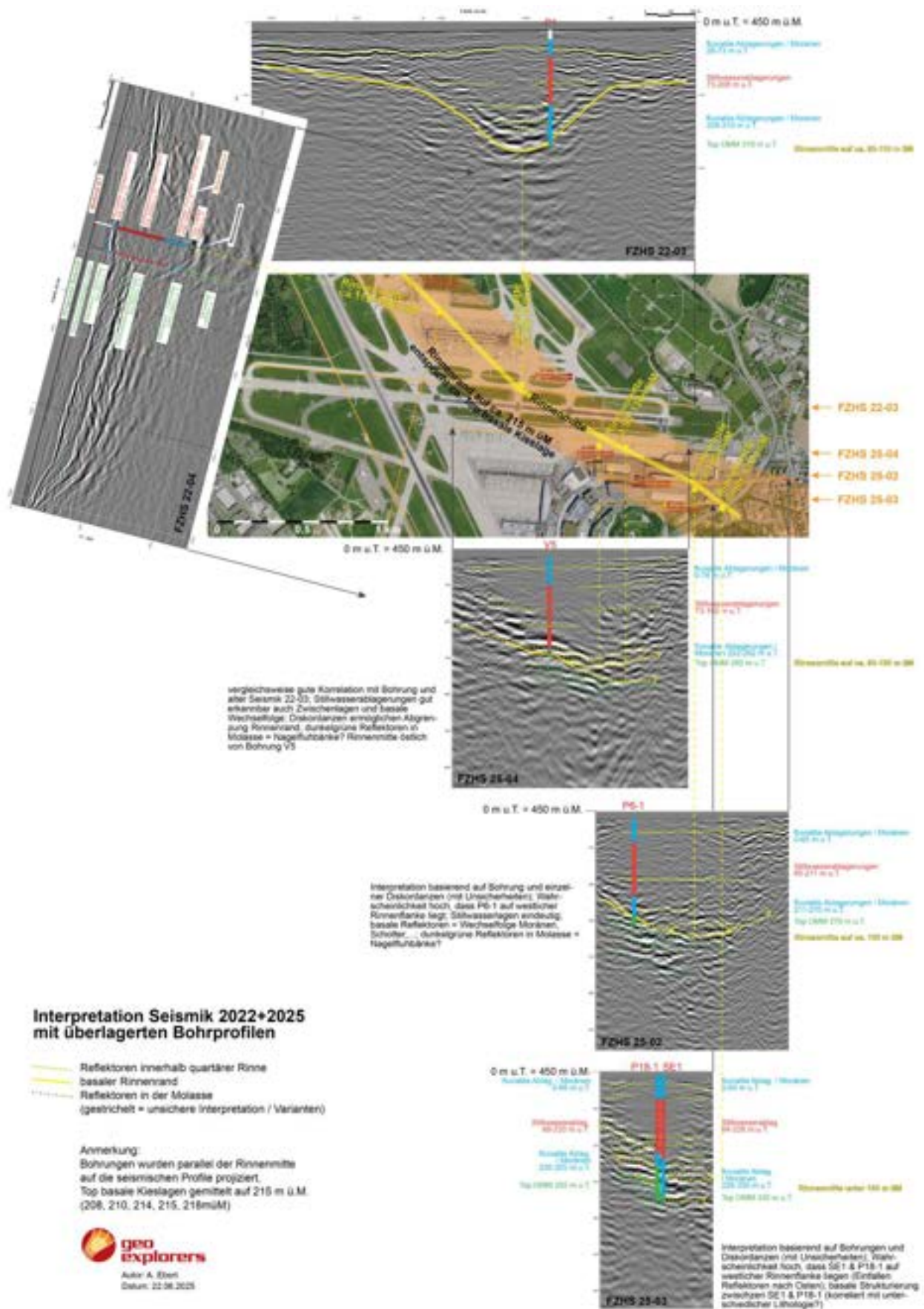


Abb. 6 Interpretation Seismik

8 Zweiter Testbrunnen P18-1

8.1 Einleitung

Nachdem die Abtastbohrung V5 nicht ausreichend durchlässige Kiese erbohrt hatte (siehe Kapitel 7.1) wurde ein Ausweichstandort gesucht. Die seismischen Messungen waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgt. Da nicht bis auf die Auswertung der Seismik gewartet werden konnte, wurde entschieden, neben der erfolgreichen Sondierbohrung SE1 zu bohren, da somit die Fündigkeitsrisiken als gering eingestuft werden konnten. Der Brunnen P18-1 befindet sich 3 - 4 m von der Sondierbohrung SE1 entfernt (Abb. 7). Bezüglich Standort und Chronologieübersicht wird auch auf die Kapitel 4 und 5 verwiesen.



Abb. 7 Bohrstandort P18

8.2 Bohrarbeiten

Die wichtigsten Meilensteine sind in Tabelle 5 ersichtlich. Die Vergabe der Bohrarbeiten erfolgte an die Bohrfirma Blétry AG. Die kantonale Bewilligung "Sondierbohrungen für grosstechnischen Energiespeicher Flughafen Zürich" (Referenz-Nr.: ID BD01705255 / GWV 2025-0087) wurde am 07.04.2025 vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft ausgestellt.

Der Brunnen P18-1 (2. Testbrunnen) wurde destruktiv erstellt. Von 0 – 36.4 m u. T. kam ein Seilbagger mit einem Greifer zum Einsatz (Abb. 8). Der Bohrdurchmesser der temporären Schutzverrohrung lag bei 880 mm. Bei 36.4 m u. T. wurde auf das Spülbohrgerät Prakla RB50 umgestellt (Abb. 8). Es wurde teleskopiert mit Bohrdurchmessern von 23" bis 11" und einer Ton-Polymer-Spülung bis 337 m u. T. gebohrt. Während den Bohrarbeiten wurden bei 229 m u. T. totale und nachfolgend bis 277 m u. T. weitere kontinuierliche Spülverluste festge-

stellt. Total beliefen sich die Spülverluste auf über 15 m³. Dies ist deutlich weniger als im vorgängigen Brunnen und kann evtl. mit einer dichteren Tonspülung und effektiverem Filterkuchen erklärt werden oder mit weniger durchlässigen Lagen. Wie sich aber nachträglich mit dem Logging und Pumpversuch gezeigt hat, müssen die geringeren Spülverluste nicht mit schlechteren Durchlässigkeiten erklärt werden.

Details zu den Bohrarbeiten finden sich in nachfolgender Tabelle 5 und Abb. 9.



Abb. 8 Seilbagger und Prakla RB50 im Einsatz

Tabelle 5 Zusammenfassung bohrtechnische Details vom Brunnen P18-1

Bohrgerät	Seilbagger Liebherr HS8050 (von 0-36.4 m u.T.) Spülbohrgerät Prakla RB50 (von 36.4-337 m u.T.)
GOK = Bezugsfläche	436.18 m ü. M. (Bereich abgetragener Kieswall)
Bohrtiefe	337 m u. T.
Bohrsysteme	0 – 36.4 m u. T.: Seilbagger RohrAD Ø=880 mm 36.4 - 337 m u. T.: PraklaRB50 max. Bohr-Ø=584 mm, min. Bohr-Ø=279 mm
Bohrspülung	0 – 36.4 m u. T.: trocken mit Greifer 36.4 - 337 m u. T.: mit Ton-Polymerspülung

Brunnen P18-1 (Testbrunnen 2)

Abb. 9 Bohrarbeiten und Bohrlochausbau

8.3 Bohrlochausbau

Das Bohrloch wurde zu einem Filterbrunnen ausgebaut (Abb. 9). Im Bereich der Bohrstrecke mit dem Seilbagger wurde ein Stahl-Standrohr von 0 bis 36,4 m u. T. eingebaut. Von 0 bis 85,7 m u. T. wurde für den Einsatz der Grosspumpe ein 16\" Edelstahlvollrohr eingebaut (Abb. 10). Die Filterstrecke wurde mit einem stehenden Schlitzbrückenfilter von 208,4 bis 336,5 m u. T. ausgebaut (Abb. 10). Dazwischen wurde als Übergangsstück ein mit Zement hinterfüllter 12\" Edelstahlliner eingebaut (Abb. 10).

In der benachbarten Sondierbohrung SE1 wurden zwischen 320 bis 330 m u. T. sehr durchlässige Kiese mit totalen Spülverlusten angebohrt. Diese wurden in der P18-1 nicht beobachtet. Trotzdem wurde in diesem Bereich ein Filterrohr eingebaut, um zu testen, ob diese Zone allenfalls gleichwohl an die in der SE1 erbohrten Kiese angeschlossen ist.



Abb. 10 Bohrlochausbau

Links: 16" Edelstrahlrohr, Mitte: 12" Edelstahlrohr mit Zementschuh, Rechts: 6" Schlitzbrückenfilter mit Steckmuffe

8.4 Geologie

Ähnlich wie in den bisherigen Bohrungen wurde eine mächtige Abfolge von überwiegend siltigen Tonen (Stillwassersedimente) von 68 bis 220 m u.T. erbohrt (Abb. 11). Darunter wurde von 220 bis 255 m u.T. eine Wechselfolge von glaziofluvialen Kiesen und Moränen (häufig verschwemmt/umgelagert) mit variierendem Anteil von Sand, Silt und Ton erbohrt. Der Anteil von sauberen bis wenig siltig-tonigen Kiesen liegt bei rund 15 m. Die Abb. 12 gibt einen Eindruck von den erbohrten Kiesen. Mit dem erstmaligen Anbohren der sehr durchlässigen Kieslagen wurden bei 229 m u. T. erneut totale Spülverluste verzeichnet.



Abb. 11 Stillwassersedimente von 96-144 m u. T.



Abb. 12 Gewaschenes Probenmaterial von 219-243 m u. T.

Feinanteil ausgewaschen; kiesdominierte Lagen von 228 bis 241 m u. T.

Der Fels der Oberen Meeresmolasse mit homogenen Sandsteinen mit Glaukonit wurde auf 255 m u. T. und somit deutlich untiefer als in der benachbarten ca. 3-5 m entfernten Sondierbohrung SE1 auf 330 m u. T. angetroffen. Zudem wurden die in der SE1 erbohrten kiesigen Lagen mit starken Spülverlusten von 320 bis 330 m u. T. nicht beobachtet. Verschiedene Erklärungsmöglichkeiten bestehen: (a) Durch das destruktive Bohrverfahren wurden die Sandsteine in der SE1 komplett zerbohrt und fälschlicherweise in der dicken Tonspülung als Lockergestein klassifiziert. Umgekehrt wurde neben Sand viel toniger Silt und gerundeter bis kantengerundeter Kies erbohrt, was typischen moränenartigen oder Stillwasserablagerungen und somit nicht den homogenen OMM-Sandsteinen entspricht. Im Fall das es sich um OMM handelt, müssten die basalen Kiese in der SE1 als zerbohrte Nagelfluh gedeutet werden. Allerdings wurden diese im P18-1 nicht ansatzweise angetroffen, ebenso auch keine Indizien von Durchlässigkeiten in diesem Bereich. (b) Auf der Seismik kann man im Bereich der beiden Bohrungen SE1 und P18-1 eine strukturelle Inhomogenität deuten. Somit könnte man die lithologischen Unterschiede auch strukturell erklären. In der quartären Rinne südlich von Bern werden von der Universität Bern tiefe und enge Canyons vermutet. Evtl. wurde hier genau in einen solchen Randbereich eines Canyons gebohrt. Alternativ wäre auch möglich, dass in den Randbereich von verschiedenen Generationen von Rinnenablagerungen und -erosion gebohrt wurde.

Für Details zur Lithologie und Stratigraphie wird auf das nachfolgende Bohrprofil in Abb. 13 verwiesen.

8.5 Geophysikalisches Bohrlochlogging

Das Bohrloch-Logging wurde von der Firma terratec Geophysical Services GmbH & Co. KG aus Heitersheim ausgeführt. Folgende Messungen kamen zum Einsatz: 4-Arm-Kaliber, Azimut, Inklination, natürliche Gammastrahlung, Spinnerlog, Temperatur und Leitfähigkeit (Abb. 14; Details siehe Tabelle 6). Auf Grund der Erfahrungen in den Sondierbohrungen wurde auf den Dual Induction Log verzichtet. Da im offenen Bohrloch im Lockergestein gemessen wurde, sollten möglichst wenige Befahrungen erfolgen, um das Risiko des Verlustes von Sonden zu reduzieren. Der Spinnerlog und Logs zu Temperatur und Salinität erfolgten nach der Brunnenentwicklung. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse ist in Tabelle 6 und in Abb. 15 gegeben. Die Logs werden in Abb. 15 abgebildet und erlauben somit einen Vergleich.

Ziele der Messungen waren:

- Unterscheidung lithologischer Schichten und Definition deren Grenzen (u.a. Kieslagen und Top OMM)
- Mögliche Aussagen zu Gesteinsdurchlässigkeiten
- Erkennen von Temperatur- & Leitfähigkeitsanomalien hinsichtlich Wasserzu- und -abflüssen
- Quantifizierung von Zuflüssen im Pumpbetrieb
- Aussagen zu Zustand Bohrloch hinsichtlich Ausbau

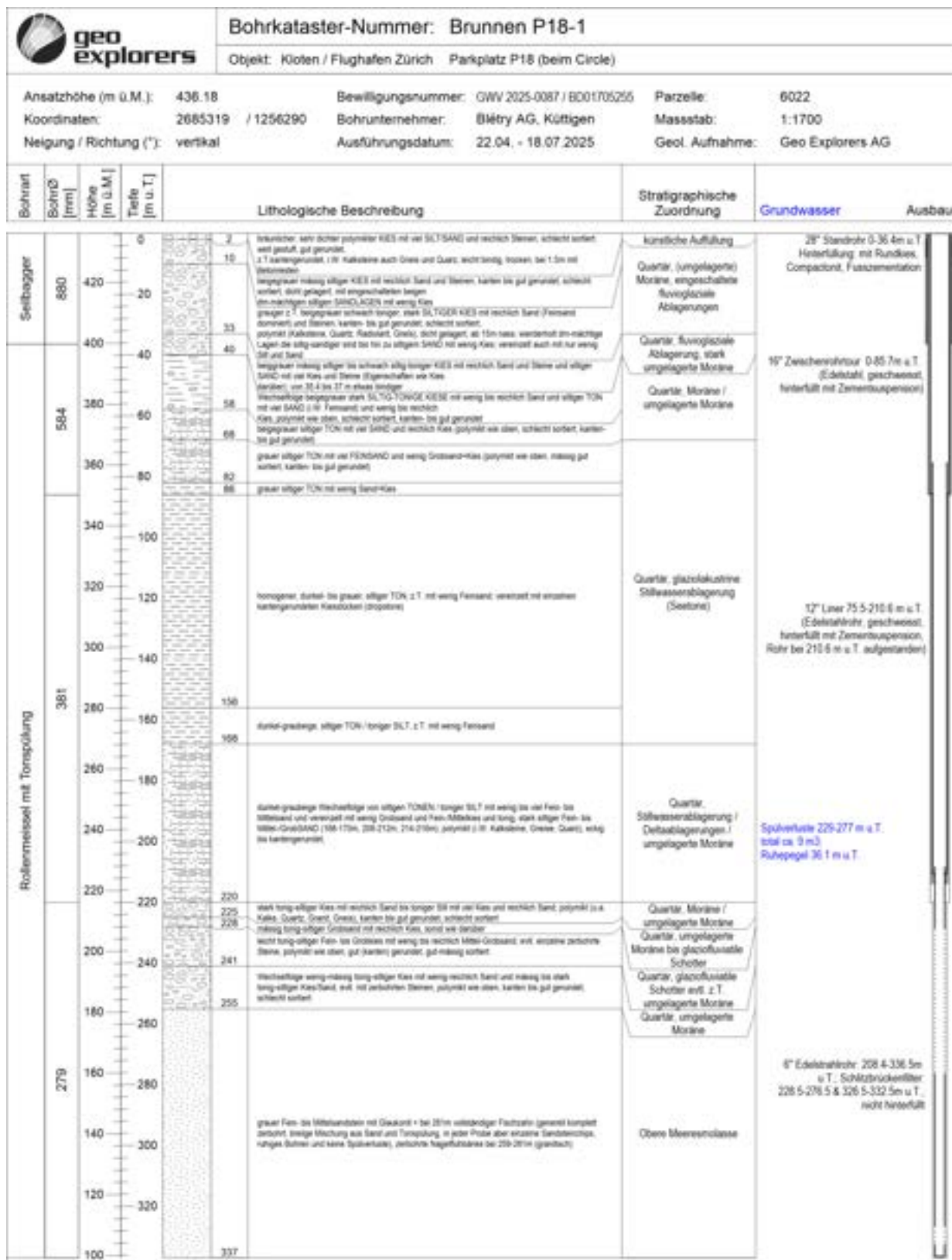


Abb. 13 Bohrprofil P18-1

Tabelle 6 Logging in der Bohrung P18-1

Messdatum	18.07.2025	19.09.2025
Bohrlochintervall	210.6 - 334 m u.T im offenen Bohrloch (Bohrdurchmesser 11")	222 – 282 m u.T. im 6" Edelstahlrohr (Filterbereich: 228.5-276.5 m u.T.)
Logs	eine Befahrung mit 4-Arm Kaliber, natürlicher Gamma (Inklination)	Erste Befahrung in Ruhe: natürlicher Gamma, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Spinnerlog Zweite Befahrung mit konstanter Pumprate: natürlicher Gamma, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Spinnerlog
Anmerkungen	Direkt vor dem Logging erfolgte ein Round-/Wiper-trip und der Ausbau des Gestänges. Das Logging erfolgte in der Ton-Spülung.	Das Logging erfolgte nach der Brunnenentwicklung im sauberen Grundwasser.
Resultate	• Auf Endtiefe ist das Bohrloch mit ca. 4° in Richtung 107° geneigt. • Die Gamma-Messungen zeigen schwache Variationen des natürlichen Gammawertes. Dieser wird durch den Filterkuchen und die Spülverluste der Tonspülung verfälscht. Gleichwohl sind Korrelationen mit tonigen Lagen und der OMM möglich (Abb. 15). • Der Kaliber zeigt deutliche Ausbrüche / Auswaschungen mit einem Durchmesser von bis knapp 700 mm. Bedeutende kaliberhaltige Lagen sind: ca. 211-220 m, ca. 229-231 m, ca. 233-236 m u. T. (Abb. 15). Diese korrelieren mit Sand- und Kieslagen. • Das Top der OMM kann mit Hilfe des Loggings bestätigt werden.	• Der Gamma zeigt in den kiesigen Lagen deutlich tiefere Werte als zuvor der Gamma im offenen Bohrloch, was für eine erfolgreiche Entfernung des Filterkuchens spricht (Abb. 15). • Anomalien in der Temperatur, Leitfähigkeit, Zu- und Abflüssen korrelieren mit der Lithologie, Spülverlusten, Gamma und Kaliber (Abb. 15). Mit der geringen Pumprate wurden Hauptzuflüsse nur im oberen Bereich der Filterstrecke aktiviert. • Es konnten im Lockergestein mehrere durchlässigere Zonen ausgeschieden werden: ca. 229-231 m, 233.5-238 m, 246-249 m und 252-255 m u.T.. Total summieren sich die Zonen mit relevanten Wasserzu-/abflüssen bzw. Durchlässigkeiten im Minimum auf ca. 12-15 m • Durchlässige Kieslagen korrelieren nicht zwischen P6-1 und P18-1 und deuten auf eine inhomogene Wechselfolge unterhalb der Stillwasserablagerungen hin.



Abb. 14 Logging im Brunnen P18-1

Links: Kaliber und Gamma. Rechts: Spinnerlog

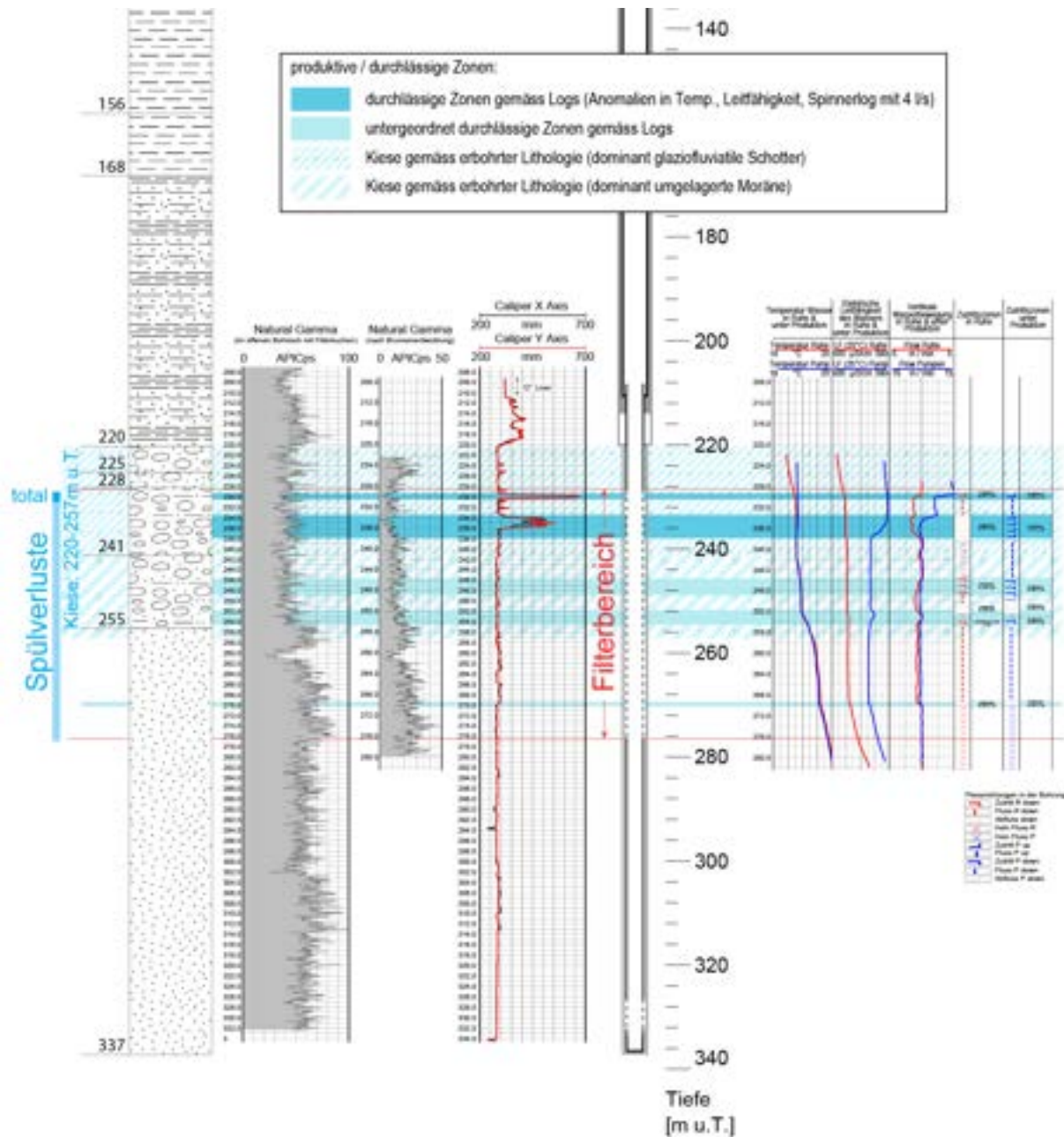


Abb. 15 Logging in P18-1

Durchlässige Zonen (Kieslagen) sind hellblau hinterlegt.

8.7 Brunnenentwicklung

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen vom Brunnen P6-1 wurden Anpassungen bei der Brunnenentwicklung vorgenommen. U.a. kam eine Kläranlage zum Einsatz (Abb. 17), da sich gezeigt hatte, dass das geförderte Grundwasser in den Aquifer zurückgegeben werden muss, weil die Erneuerung/Erholung des tiefen Grundwassers sehr langsam verläuft. Mit der Rückgabe des Wassers konnte der Grundwasserspiegel stabil gehalten werden. Der anfängliche Ruhepegel wurde nach Abstellen der Pumpe im P6-1 und P18-1 jedes Mal praktisch unmittelbar bzw. innerhalb weniger Minuten wieder erreicht (Abb. 18). Dies steht im Gegensatz zur Brunnenentwicklung im P6-1 im Herbst 2024, als sich während dem Entsanden der Wasserspiegel im Aquifer bzw. in den umliegenden Bohrungen P6-1, SE1 und P1 flächig um über einen Meter abgesenkt hatte und die Erholung rund einen Monat gedauert hatte. Mit der Kläranlage konnte stets ein klares und silt-/sandfreies Wasser zurück in den Aquifer gegeben werden (Abb. 20).



Abb. 17 Kläranlage hinter dem Bohrergerät

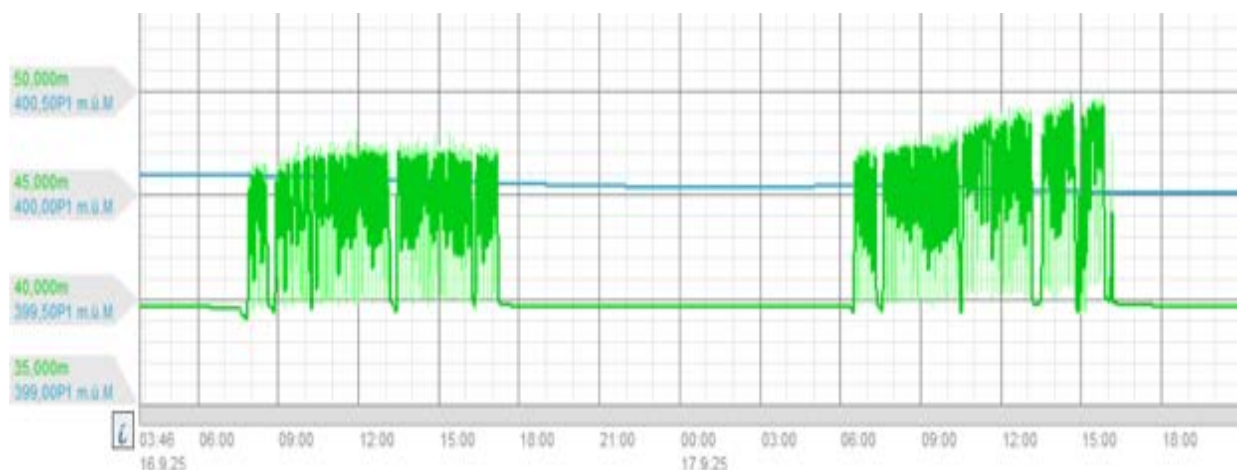


Abb. 18 Pegeländerung während Brunnenentwicklung

Grün: Dargestellt ist die Wasserbedeckung über dem Sensor im P18-1. Gut erkennbar ist, dass während dem Pumpen und Hydropulsen im P6-1, der Wasserspiegel im P18-1 reagiert bzw. steigt. Sobald die Pumpe abgestellt wird, erholt sich der Pegel unmittelbar. Blau: Pegel in der Sondierbohrung P1; dieser zeigt keine Änderungen.

Da die Tramgleise und Strassen mit den Wasserleitungen gequert mussten, wurde eine grosse temporäre Überführung benötigt (Abb. 19). Zusätzlich musste über diese ein Stromkabel verlegt werden, da die Stromversorgung auf dem Parkplatz P18 nicht ausreichend war. Die Überführung hatte eine Länge von fast 40 m und eine Höhe von ca. 13 m. Die Leitungen wurden entlang dem Parkplatz P18 zur Überführung und nach dieser um das Parkhaus P6 verlegt. Die gesamte Leitungslänge betrug rund 320 m zwischen Brunnen P6-1 und P18-1.



Abb. 19 Überführung

Die ca. 40 m lange und 13 m hohe Brücke querte die Tram und Strasse. Über die grosse Brücke wurden die Wasserleitungen und Stromkabel geführt, über die kleine nur Stromkabel.

Die **Brunnenentwicklung** bzw. Entfernung des Filterkuchens und die Entsandung erfolgte mit einer Manschettenkolbenpumpe und integriertem Hydropuls. Es wurde stufenweise die ganze Filterstrecke entwickelt. Zu Beginn und während des Pulsens wurde sehr trübes und siltig/feinsandiges Wasser gefördert, welches nach dem Pulsen rasch klar wurde. Der Brunnen P18-1 wurde vom 27.08. bis zum 05.09.2025 entsandet. Da der Brunnen P6-1 im 2024 noch nicht vollständig entsandet war, wurde dieser nochmals vom 10.09. bis zum 17.09.2025 entsandet. Bei beiden Brunnen wurde das geförderte Wasser lückenlos der Kläranlage zugeführt, in dieser geklärt und in den jeweilig anderen Brunnen P6-1 bzw. P18-1 wieder zurückgeben.

Bei den nachfolgenden Pumpversuchen war das geförderte Wasser mit Pumpraten unter 2'000 l/min klar und nahezu frei von Silt und Sand. Während dem Zirkulationstest vom P18-1 zum P6-1 wurden bei Pumpraten > 3'000 l/min aber kontinuierlich wenig Silt und Sand gefördert und in den Rückgabebrunnen P6-1 injiziert. Durch den kontinuierlichen Partikeleintrag in den Brunnen P6-1 nahm dessen Rückgabeleistung nach 4 Tagen leicht ab bzw. stieg der Druck leicht an. Deshalb wurde nach Erreichen des Tracer-Peaks der Zirkulationstest beendet und

beschlossen, beide Brunnen nochmals zu entsanden. Dies erfolgte Ende Oktober bis Anfang Dezember 2025.



Abb. 20 Kläranlage im Betrieb

Links: geklärtes Wasser, mittig: trübes Wasser, welches direkt aus dem Brunnen P18-1 während der Brunnenentwicklung zugeführt wird, rechts: klares Wasser bei 1'100 l/min nach erfolgtem Entsanden

8.8 Fazit Brunnenbau und Brunnenentwicklung

Es konnten erfolgreich 2 funktionierende Brunnen erstellt werden. Beide haben unterhalb den Stillwassersedimenten im unteren Bereich der eiszeitlichen Rinne durchlässige und ergiebig wasserführende Grundwässer erschlossen.

Beide Brunnen konnten nach technischen Anpassungen entwickelt werden, ohne den Aquifer nachteilig zu beeinflussen. Da das gepumpte und gereinigte Wasser zurückgegeben wurde, blieb der Grundwasserspiegel konstant. Allerdings mussten die Kläranlage noch an die Trübung und die hohen Schüttungsraten angepasst werden. Es hat sich gezeigt, dass die Brunnenentwicklung aufwendiger ist, aber für die Zirkulationsversuche mit hohen Pumpraten zwingend ist, damit die Rückgabeburten nicht unnötig durch noch geringfügig partikelführendes Wasser aufgesandet werden. Für weitere Brunnen sind weitere Optimierungen beim Bohrkonzept vorgesehen, um die Partikelfracht zu reduzieren und die Brunnenentwicklung zu vereinfachen. Im Betrieb ist ein Partikelfilter mit grossem Absetzbecken vorgesehen.

Die Vorerkundung mit Geophysik und Sondierbohrungen war zwingend. U.a. erbohrte eine Abtastbohrung nur den Rinnenrand und erreichte somit die anvisierten Kieslagen gerade nicht.

Auch zeigen die verschiedenen Seismikprofile und Bohrungen in die Rinne, dass zwar im tiefen Rinnenbereich überall Kieslagen vorliegen, aber dass diese zwischen den Bohrungen nicht korreliert werden können und somit von Bohrung zu Bohrung in Tiefe, Mächtigkeit und Ausführung variieren. Dies ist hinsichtlich einer Prognose zwar unbefriedigend, aber die Simulationen, Pumpversuche und Markierversuche haben gezeigt, dass dies vorteilhaft ist, da somit das aktivierte Gesteinsvolumen vergrößert wird und den hydraulischen / thermischen Kurzschlüssen entgegen wirkt.

9 Pumpversuche

9.1 Ziele

In den Brunnen wurden zahlreiche Messungen und Pumpversuche durchgeführt mit folgenden Zielen:

- Durchführen von Pumpversuchen in beiden Brunnen, um die hydraulischen Parameter des Grundwasserleiters wie z. B. Transmissivität, Speicherkoeffizient, Reichweite, Leakage sowie Brunneneffekte / Skineffekt und Brunnenleistung zu ermitteln.
- Durchführen von Spinnerlogs, um Zuflusszonen in den Schottern zu ermitteln
- Durchführen von zwei Zirkulationstest beidseitig, um die maximale Pumpleistung, Aquiferergiebigkeit, sowie die Absenkung, resp. den Aufstau zu testen.
- Durchführen eines Markierversuchs, um die dominante Fliesszeit, sowie die Rückgewinnungsrate zu messen (Aussagen u.a. zu Reservoirvolumen, hydraulischer Kurzschluss)
- Ermittlung und Bewertung von chemischen und physikalischen Wassereigenschaften zur Eignung als technisches Wasser (u.a. Versinterung- und Verockerungsfähigkeit, Sauerstoffkonzentration, Temperatur, Alter usw.)
- Ermittlung der Mikrofauna, um deren mögliche Beeinflussung zu beurteilen.

Die Erkenntnisse aus diesen Messungen flossen als Inputparameter in das numerische Modell ein, welches wiederum für das Nutzungskonzept und die Definition weiterer Brunnenstandorte benötigt wird.

9.2 Chronologie / Vorgehen / Methodik

In nachfolgender Tabelle 7 wird die Chronologie der Pumpversuche und deren wichtigste Daten tabellarisch zusammengefasst. Ein Zirkulationspumpversuch mit 4'000 l/min war zum Zeitpunkt des Berichtsschreibens noch nicht beendet.

Tabelle 7 Chronologie Pump- und Zirkulationstests

PB = Pumpbrunnen; BB = Beobachtungsbrunnen; ■ = Ruhepegel / unverändert; ▲ = Wasserpegel steigend; ▼ = Wasserpegel sinkend; Es wird jeweils die Pumprate, die Dauer der Pumpstufe, die Menge des in der Pumpstufe geförderten Grundwassers sowie die Höhe des Wasserpegels am Ende der jeweiligen Pumpstufe angegeben.

Arbeitsschritt	Vorgehen	Zeit
Übersicht Pumpversuche (zusätzlich wurden diverse weitere kurzfristige Pumpversuche zu Testzwecken durchgeführt)	1. Stufenpumpversuch mit ca. 300/600 l/min in P18-1 _{PB}	22.-24.09.25
	2. Zirkulationspumpversuch von P18-1 _{PB} zu P6-1 _{RB} mit 2'200 l/min	03.-13.10.2025
	3. Zirkulationspumpversuch von P18-1 _{PB} zu P6-1 _{RB} mit 3'200 l/min & kurzfristig bis 4'000 l/min	15.-20.10.2025
	4. Zirkulationspumpversuch von P6-1 _{PB} zu P18-1 _{RB} mit ca. 4'500 l/min & kurzfristig bis 4'800 l/min	07.11.2025
	5. Stufenpumpversuch mit ca. 300/600 l/min in P6-1 _{PB}	10.-12.11.2025
	Zirkulationspumpversuch von P6-1 _{PB} zu P18-1 _{RB} mit ca. 4'500 l/min	Geplant Ende Nov. Anfang Dez. 2025
Ruhepegel vor Pump-tests	Ruhepegel ■ vor Pumpen in P18-1 _{PB} ■: 35.94 m u.T. 400.24 m ü.M. P6-1 _{BB} ■: 29.50 m u.T. 400.10 m ü.M. P1 _{BB} ■: 26.39 m u.T. 400.14 m ü.M.	19./22.09.2025
1. Stufenpumpversuch in P18-1_{PB} Ableitung in Kanalisation	320 l/min für 27.3 h, total 527 m ³ P18-1 _{PB} ▼: 37.77 m u.T. 398.52 m ü.M. P6-1 _{BB} ▼: 30.81 m u.T. 398.79 m ü.M. P1 _{BB} ▼: 26.68 m u.T. 399.85 m ü.M.	22.09.25 09:36 bis 23.09.25 12:54
	600 l/min für 17.75 h, total 640 m ³ P18-1 _{PB} ▼: 39.83 m u.T. 396.35 m ü.M. P6-1 _{BB} ▼: 32.02 m u.T. 397.58 m ü.M. P1 _{BB} ▼: 27.08 m u.T. 399.45 m ü.M.	23.09.25, 12:54 bis 24.09.25, 06:39
	670 l/min für 7.32 h, total 295 m ³ P18-1 _{PB} ▼: 40.53 m u.T. 395.65 m ü.M. P6-1 _{BB} ▼: 32.45 m u.T. 397.15 m ü.M. P1 _{BB} ▼: 27.26 m u.T. 399.27 m ü.M. Höhere Pumprate aufgrund der Pumpenleistung nicht realisierbar.	24.09.25, 06:39 bis 24.09.25, 13:58
	Maximale Pegeländerung pro Pumpstufe: [l/min] [Δm P18-1] [Δm P6-1] [Δm P1] 322 -1.8 -1.3 -0.3 601 -3.9 -2.5 -0.7 672 -4.6 -3.0 -0.9 Distanz zum PB [m]: 0.0 225 1'078	Gegen Ende Pumpstufen
2. Zirkulationspumpversuch von P18-1_{PB} zu P6-1_{RB} Rückgabe in P6-1	2'200 l/min (Variation zwischen 2'160 und 2'280 l/min) für 10 Tage = ~32'000 m ³ P18-1 _{PB} ▲: 42.83 m u.T. 393.35 m ü.M. P6-1 _{BB} ▲: 10.41 m u.T. 419.19 m ü.M. P1 _{BB} ▲: 26.32 m u.T. 400.21 m ü.M.	03.10.25, 14:29 bis 13.10.25, 15:27

	Maximale Pegeländerung am Ende: [l/min] [Δm P18-1] [Δm P6-1] [Δm P1] 2'200 -6.9 +19.1 +0.1	
Markier-/ Tracerversuch von P6-1_{RB} zu P18-1_{PB}	Impfung Tracer: 07.10.25 11:25 Tracer: 200 g Uranin Eingabeort: in P6-1 _{RB} Pumprate: 2'200 l/min Ankunftszeit in P18-1: 10.10.25, 07:55 Peakzeit in P18-1: 13.10.25, 15:27 Max. Konzentration: 0.9 ppb	Messphase von 07.10. – 21.10.2025
3. Zirkulationspumpversuch von P18-1_{PB} zu P6-1_{RB} Rückgabe in P6-1	3'150 l/min (Variation zwischen 3'000 und 3'300 l/min, kurzfristig für 30 min bis 4'000 l/min) für 4.5 Tage = ~320'000 m ³ P18-1 _{PB} ▲: 47.33 m u.T. 388.85 m ü.M. P6-1 _{BB} ▲: 2.16 bar P1 _{BB} ▲: 26.05 m u.T. 400.48 m ü.M. Maximale Pegeländerung am Ende: [l/min] [Δm P18-1] [Δm P6-1] [Δm P1] 3'000 -11.4 +0.4 Am Ende von kurzfristig 4'000 l/min: P18-1 _{PB} ▼: 54.66 m u.T. 381.52 m ü.M. P6-1 _{BB} ▲: 2.97 bar	15.10.25, 17:32 bis 20.10.25, 08:35 (Unterbruch & Erhöhung auf 4'000 l/min: 16.10.25, 11:35-16:04; Unterbruch: 17.10.25, 11:48-12:18)
4. Zirkulationspumpversuch von P6-1_{PB} zu P18-1_{RB} Rückgabe in P18-1 via Absetzbecken	4'500 l/min (Variation zwischen 4'300 und 4'600 l/min) total gesamte Pump-phase ~265 m ³ P18-1 _{PB} ▲: 7.19 m u.T. 428.99 m ü.M. P6-1 _{BB} ▲: 56.13 m u.T. 373.47 m ü.M. P1 _{BB} ▲: 26.4 m u.T. 400.13 m ü.M. Maximale Pegeländerung am Ende: [l/min] [Δm P18-1] [Δm P6-1] [Δm P1] 4'500 +28.8 -26.6 0 Am Ende von kurzfristig 4'800 l/min: P18-1 _{PB} ▲: Überlauf P6-1 _{BB} : 59.6 m u.T. 370 m ü.M.	07.11.25, 14:15-15:17 (2'300 l/min: 14:15-14:21; 3'300 l/min: 14:21-14:25; 4'500 l/min: 14:25-15:05; 4'600 l/min: 15:05-15:09; 4'800 l/min: 15:09-15:17)
5. Stufenpumpversuch in P6-1_{PB} Ableitung in Kanalisation	350 l/min für 24 h, total 500 m ³ P18-1 _{PB} ▼: 37.32 m u.T. 398.87 m ü.M. P6-1 _{PB} ▼: 31.28 m u.T. 398.32 m ü.M. P1 _{BB} ▼: 26.67 m u.T. 399.86 m ü.M. 600 l/min für 24 h, total 866 m ³ P18-1 _{PB} ▼: 38.63 m u.T. 397.55 m ü.M. P6-1 _{PB} ▼: 33.22 m u.T. 396.38 m ü.M. P1 _{BB} ▼: 27.25 m u.T. 399.28 m ü.M. Maximale Pegeländerung am Ende: [l/min] [Δm P18-1] [Δm P6-1] [Δm P1] 350 -1.3 -1.8 0.2 600 -2.6 -3.8 0.8	10.11.25, 14:46 bis 11.11.25, 14:53 11.11.25, 14:53 bis 12.11.25, 14:56

E1 ist nicht an den Zielaquifer angeschlossen, zeigt für diese Untersuchungen irrelevante Resultate und wird aus diesem Grund nicht aufgeführt.

9.3 Pumpversuch in P18-1 ohne Rückgabe

Im Brunnen P18-1 wurde ab dem 22. September 2025 über 52 Stunden ein Stufenpumpversuch durchgeführt. Um die Parameter verlässlich zu ermitteln, wurde das geförderte Wasser nicht in den Grundwasserleiter zur Aufrechterhaltung der Grundwasserbilanz zurückgefördert, sondern über die Kanalisation entsorgt. Wie bereits die frühere Grundwasserförderung bei der Entsandung im Brunnen P6-1 gezeigt hatte, sinkt aufgrund der geringen Neubildungsrate der Grundwasserspiegel kontinuierlich ab, weshalb in diesem System die Erhaltung der Grundwasserbilanz eine hohe Priorität hat.

Es wurde deshalb entschieden die Dauer des Pumpversuches mit 2 Tagen kurz zu halten und die Pumpstufen so gering wie nötig zu halten. Das Ziel war dabei nicht die Brunnenleistung zu testen, sondern die hydraulischen Grundwasserparameter zu ermitteln. Es wurde wie nachfolgend in der Tabelle 8 angegeben gepumpt.

Tabelle 8 Übersicht über die Pumpstufen in P18-1

Pumprate [l/min]	Zeitdauer [h]	Max. Absenkung in P18-1 [m]	Volumen [m ³]
322	27.3	1.83	512
601	17.8	3.89	640
672	7.3	4.59	296
Wiederanstieg	Ca. 120		

Neben der Pegelmessung im Pumpbrunnen P18-1 wurden auch die Pegel im Brunnen P6-1 in rund 225 m Entfernung, sowie auch in der Sondierbohrung P1 neben dem Dock Midfield in rund 1'000 m Entfernung überwacht. Diese sind in der Abb. 21 ebenfalls dargestellt. Sobald aus dem Förderbrunnen P18-1 Wasser gepumpt wurde (blaue Kurve), sinkt der Grundwasserspiegel unmittelbar. Im Brunnen P6-1 (braune Kurve) in 225 m Entfernung reagiert der Grundwasserspiegel bereits nach 42 Sekunden und sinkt ebenfalls. Die Beobachtungsbohrung P1 in rund 1 km Entfernung reagiert nach etwa 1-2 h ebenfalls. Die Wasserspiegel aller Bohrungen sinken während des Pumpversuch kontinuierlich, weil nur begrenzt Grundwasser in die Rinne nachfließt. Nach Abstellen der Pumpe am 24. September um 13:00 steigt der Wasserspiegel in den beiden Brunnen P18-1 und P6-1 sofort wieder an. In der Beobachtungsbohrung steigt der Wasserspiegel zeitverzögert erst rund 15 Stunden später wieder an.

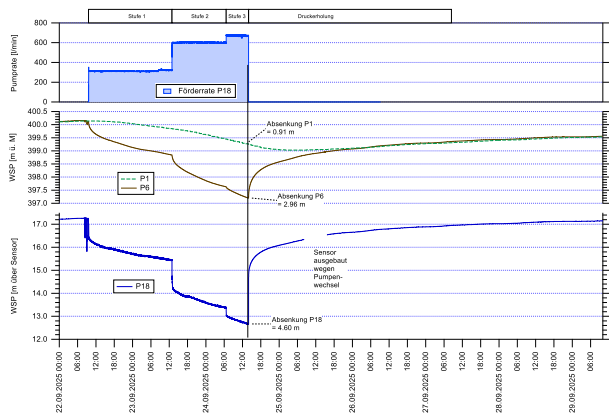


Abb. 21 Absenkung während Stufenpumpversuch und Wiederanstieg in P18-1

Wasserspiegel in den Brunnen P18-1 (blaue), P6-1 (braune) und P1 (grüne Kurve)

Die Auswertung der Pumpversuche wurde von Hans-Rudolf Fisch von AFRY Schweiz AG durchgeführt. Es wurde von folgenden vereinfachten Modellvorstellungen ausgegangen:

- Die Rinnenränder werden als No-Flow-Boundaries betrachtet. Entlang der Rinnenachse ist die Ausdehnung unbegrenzt.
- Die Mächtigkeit der leitenden Schichten beträgt 30m.
- Der Aquifer ist homogen, d.h. die vertikale und horizontale Durchlässigkeit ist gleich.
- Der Aquifer wird vereinfacht mit einem rechteckigen Querschnitt angenommen.

Die Auswertungen erfolgten mit dem Auswertetool AQTESOLV. Als Auswertemodell wurde ein begrenzter Aquifer mit parallel verlaufenden *no-flow* Begrenzungen verwendet. Die Auswerteverfahren nach Hantush-Jacob (leaky Aquifer) für P18-1, P6-1 und P1 und Dougherty-Badu für den Pumpbrunnen P18, wobei der *wellbore storage* und der Skin berücksichtigt wurden, lieferten die besten Fits (Abb. 22).

Die Resultate der Typenkurve sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Auswertung nach Dougherty-Badu hat für den Pumpbrunnen P18-1 für die Absenkung eine gute Übereinstimmung erzielt, nicht aber für den Wiederanstieg. Bei den Brunnen P6-1 und P1 hat die Auswertung nach Hantush-Jacob akzeptable bis gute Ergebnisse erzielt. Generell zeigen die Resultate keine einheitliche Werte für die Transmissivität («Gesamt-Durchlässigkeit») und sind tendenziell für die beiden Brunnen P18-1 und P6-1 eher zu hoch und gibt die angetroffene Geologie in den Bohrungen nur bedingt wieder. Die Transmissivität im Brunnen P1 liegt im zu erwartenden Bereich.

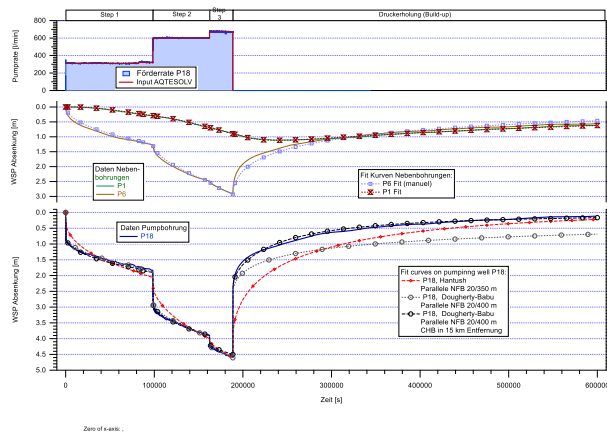


Abb. 22 Auswertung und Typkurven Stufenpumpversuch in P18-1
nach Hantush-Jacob und Dougherty-Badu

Tabelle 9 Ergebnisse der Stufenpumpversuche im P18-1

Bestimmung der Transmissivität («T») und des Speicherkoeffizients («S») in den Brunnen P18-1, P6-1 und P1

Brunnen/ Bohrung	Testanalyse	No-flow boundary" Koordinaten				Resultate		Fit Qualität
		X [m ent- lang Rinne nach N]	X [m ent- lang Rinne nach S]	Y [m zum Rinnen- rand W]	Y [m zum Rinnen- rand O]	T [m²/s]	S [-]	
P18	Dougherty-B. mit Skin	-∞	+∞	20	-400	9.3E-02	4.4E-05	Absenkung: gut, Erholung: schlecht
P18	Dougherty-B. CHB@15 km mit Skin	-∞	+∞	20	-400	9.2E-02	4.1E-05	gut
P18	Hantush- Jacob	-∞	+∞	20	-350	2.6E-02	6.0E-05	schlecht
P6	Hantush- Jacob	-∞	+∞	50	-300	1.0E-01	4.0E-04	mittel
P1	Hantush- Jacob	-∞	+∞	50	-300	4.1E-03	7.3E-04	gut

9.4 Pumpversuch in P6-1 ohne Rückgabe

Im Brunnen P6-1 wurde vom 10.11.25 14:50 bis zum 12.11.25 14:50 ebenfalls ein Stufenpumpversuch durchgeführt (Tabelle 10, Abb. 23). Dieser ist vergleichbar zu dem im P18-1. Auch in diesem wurde das geförderte Wasser nicht in den Grundwasserleiter zurückgegeben. Ähnlich wie im P18-1 sank der Grundwasserspiegel kontinuierlich ab.

Es wurden bzgl. Absenkungen im Pumpbrunnen und Verhalten der anderen Monitoringbohrungen sehr ähnliche Beobachtungen gemacht wie im Fall P18-1. Die Schlussfolgerungen aus dem vorgängigen Kapitel gelten auch für den Pumpversuch im P6-1.

Wie im Brunnen P18-1 wurden mehrere Auswerteverfahren getestet, wobei beim Brunnen P6-1, wie auch beim P1 die Auswertung nach Hantush-Jacob eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Werten und den berechneten Kurven brachte (Abb. 24).

Tabelle 10 Übersicht über die Pumpstufen in P6-1

Pumprate [l/min]	Zeitdauer [h]	Max. Absenkung in P6-1 [m]	Volumen [m ³]
320-350	24	1.8	Ca. 500
600	24	3.7	Ca. 860
Wiederanstieg	Ca. 46		

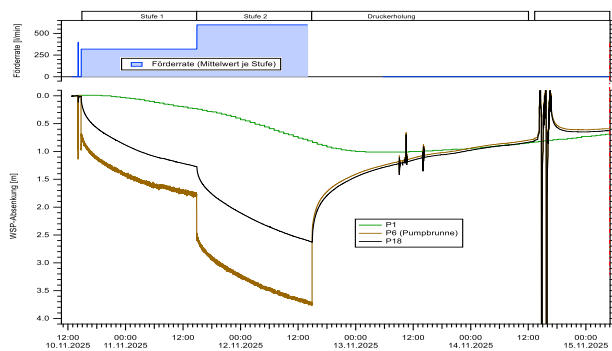


Abb. 23 Absenkung während Stufenpumpversuch und Wiederanstieg in P6-1

Wasserspiegel in den Brunnen P18-1 (blaue), P6-1 (braune) und P1 (grüne Kurve)

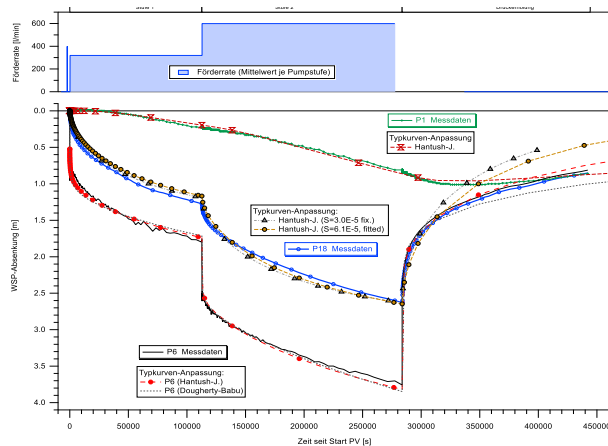


Abb. 24 Auswertung und Typkurven Stufenpumpversuch in P6-1

Die Resultate des Pumpversuchs zur Bestimmung der Transmissivität («T») und Speicherkoeffizienten («S») sind in der Tabelle 11 zusammengefasst.

Die Auswertung im Pumpbrunnen P6-1, wie auch im P1 zeigen konsistente und zuverlässige Daten im zu erwartenden Durchlässigkeitsbereich. Die Durchlässigkeit ist hoch, wie es von sandigen Kiesen zu erwarten ist. Der Brunnen P18-1 fittet auch beim Pumpversuch im Brunnen P6-1 nur bedingt. Auch bei diesem Pumpversuch zeigt der Brunnen sehr hohe Werte für die Transmissivität, welche mit der Geologie nur bedingt übereinstimmen. Die Werte liegen ca. Faktor 10 über jenen von P6-1 und P1. Je näher bei der Auswertung die No-Flow-Grenze, d.h. der Rinnenrand zur Bohrung gerückt wird (bis 20m) desto tiefer werden die Transmissivitätswerte.

Tabelle 11 Ergebnisse der Stufenpumpversuche im P6-1

Bestimmung der Transmissivität («T») und des Speicherkoeffizienten («S») in den Brunnen P18-1, P6-1 und P1

Brunnen/ Bohrung	Test- analyse	No-flow boundary" Koordinaten				Resultate		Fit Qualität
		X [m ent- lang Rinne nach N]	X [m ent- lang Rinne nach S]	Y [m zum Rinnen- rand W]	Y [m zum Rinnen- rand O]	T [m ² /s]	S [-]	
P18	Hantush- Jacob	-∞	+∞	50	-300	1.2E-01	3.0E-05	Absenkung: mittel, Erho- lung: schlecht

P18	Hantush-Jacob	$-\infty$	$+\infty$	50	-300	6.6E-02	6.1E-05	mittel
P6	Hantush-Jacob	$-\infty$	$+\infty$	50	-300	7.7E-03	4.0E-05	Gut
P1	Hantush-Jacob	$-\infty$	$+\infty$	50	-300	6.2E-03	1.9E-03	mittel / gut

Die Resultate im Brunnen P18-1 zeigen im Gegensatz zu P6-1 und P1 bei beiden Pumpversuchen einen weniger guten Fit, insbesondere beim Wiederanstieg. Bei der Auswertung wurde bei den Modellannahme von einem homogenen Aquifer ausgegangen, was in der Rinne aber nicht vorliegt. Deshalb wird vermutet, dass kleinräumige lokale Heterogenitäten die Bestimmung der Aquifereigenschaften im Brunnen P18-1 erschweren. Die ermittelten Transmissivitäten stimmen deshalb mit den realen Messungen aus den Pumpversuchen nicht so gut überein.

9.5 Kurz-Stufenpumpversuch im P6-1 mit hohen Pumpraten

Am 07.11.2025 erfolgte vorgängig im Rahmen eines kurzen Zirkulationstests (siehe Kapitel 9.7) ein kurzer Stufenpumpversuch im P6-1 ohne, dass in dieser Zeit gefördertes Wasser in den Aquifer zurückgegeben wurde. Die Pumpstufen lagen bei 2'300 l/min, 3'300 l/min und 4'500 l/min (siehe Abb. 25).

Die Pumpstufendauer variierte zwischen 75 und 330 Sekunden. Die Absenkdaten entsprechen folglich auch nicht vollständig stabilisierten Testphasen. Um eine verlässlichere Absenkcharakteristik zu ermitteln, wären längere Pumpstufen notwendig. Die in Abb. 26 dargestellte Brunnen-Absenkcharakteristik gilt für sehr kurze Pumphasen nach Hantush-Bierschenk für eine Zeitdauer von jeweils 200 s. Die Absenkcharakteristik bzw. die Brunnenleistung von P6-1 spiegelt ähnliche Werte wie in Abb. 37 wider, was darauf schliessen lässt, dass eine Förderrate von ca. 5'000 l/min bei einer Absenkung des Wasserspiegels von ca. 30 m möglich ist.

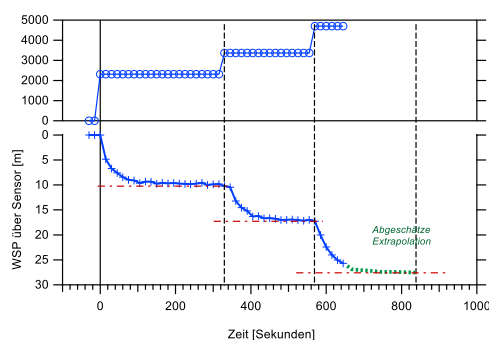


Abb. 25 Absenkung in P6-1 während Kurzumpversuch mit hohen Pumpraten

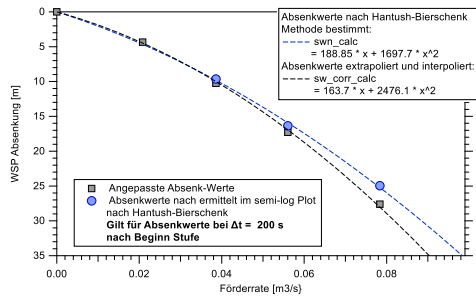


Abb. 26 Absenkcharakteristik im P6-1

9.6 Zirkulationstest P18-1 → P6-1

9.6.1 Pumpen mit 2'200 l/min

Um die Betriebsbedingungen zu simulieren und auch die Zeitdauer von hydraulischen Kurzschlüssen zu ermitteln, wurden Zirkulationstests zwischen P18-1 und P6-1 durchgeführt, indem im Brunnen P18-1 gefördert wurde und im Brunnen P6-1 das Grundwasser wieder verpresst wurde. Dabei wurden die beiden Brunnen durch eine PE-Leitung und einer Überführung miteinander verbunden (Abb. 27).



Abb. 27 Leitungsführung zwischen den Brunnen

Zusätzliche Überbrückung der Glatthalbahn. Die kleinere Überführung dient nur für das Stromkabel für die Unterwasserpumpe.

Vom 03. bis zum 20. Oktober wurden zwei mehrtägige Zirkulationstests mit einer kontinuierlichen Pumprate von 2'200 l/min, resp. 3'200 l/min und kurzfristig bis 4'000 l/min durchgeführt. Die Abb. 28 zeigt, dass sich bei einer Pumprate von 2'200 l/min bei den Förder- (grün) und Rückgabeböhrungen (violett) der Gleichgewichtszustand relativ rasch nach ca. 80 min einstellt und auf diesem Niveau verharrt. Umliegende Böhrungen wie die Sondierböhrung P1 (blau) zeigen keine Veränderung durch die Zirkulation. Der geringe Anstieg von P1 ist der Wiederanstieg bzw. die Erholung des vorangehenden Pumpversuchs in der P18-1. Gegenüber dem Ruhepegel wurde eine konstante Absenkung im Förderbrunnen von 6.4 m gemessen und einen Aufstau im Rückgabeböhrungen von 19 m (Abb. 28). Beide Pegel haben sich nach dem Abschalten des Brunnens innerhalb von rund 10 Minuten erholt.

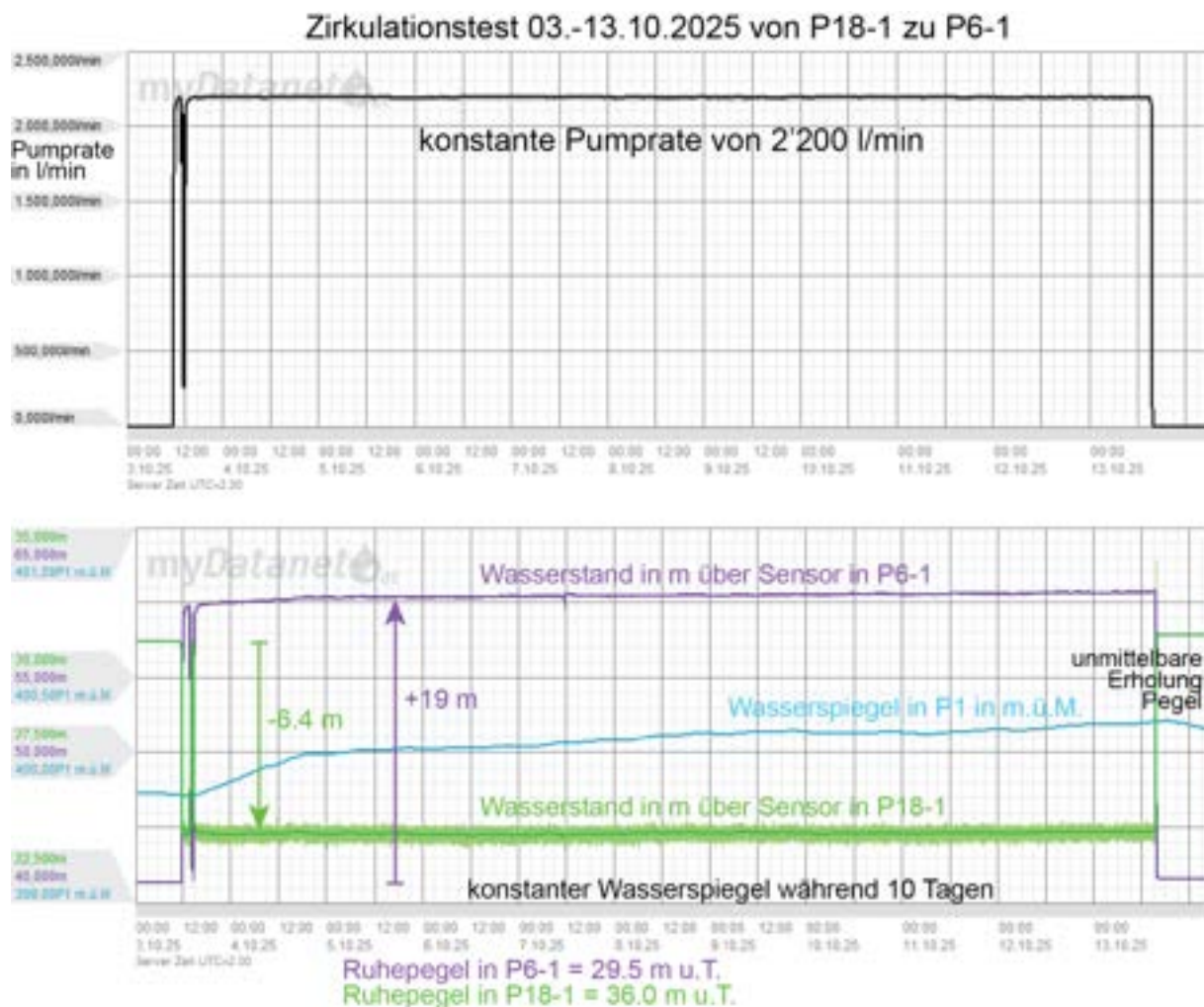


Abb. 28 Zirkulationstest von P18-1 nach P6-1 mit 2'200 l/min während 10 Tagen

Die Eckdaten des 1. Zirkulationstest sind wie folgt:

Parameter	Wert
Start	3.10.2025; 14:29
Ende	13.10.2025; 15:27
Förderrate	Gemittelt 2'200 l/min

Absenkung Förderbrunnen P18-1	6.4 m
Aufstau Rückgabeburrunen P6-1	19 m
Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustands	Ca. 80 min

9.6.2 Pumpen mit 3'200 l/min

Nach dem ersten Zirkulationstest wurde entschieden, die Leitung zwischen den Brunnen als Druckleitung auszubilden, in dem ein druckdichter Deckel auf den Rückgabeburrunen P6-1 geschweisst wurde. Danach wurde der zweite Zirkulationstest ausgeführt. Damit konnte mit einer höheren Pumprate produziert werden. Die Leistungsgrenze des Förderbrunnens bezüglich Brunnenleistung und Grundwasserergiebigkeit wurde nicht erreicht, weil die Leitung im Dauerbetrieb nicht mit über 2 bar belastet werden sollte. Zudem hatte sich gezeigt, dass mit kontinuierlichem Pumpbetrieb der Druck in der Leitung stieg. Dies ist damit begründet, dass aus dem Brunnen P18-1 nicht sandfrei produziert wurde und die Feinfracht die Schluckkapazität des Rückgabeburrunens P6-1 zunehmend verschlechterte. Diese hat sich im langsam steigenden Verpressdruck bemerkbar gemacht. Deshalb wurde der Zirkulationstest vorzeitig abgebrochen.

Die Eckdaten des 2. Zirkulationstest sind wie folgt:

Parameter	Wert
Start	15.10.2025; 16:57
Ende	20.10.2015; 8:35
Förderrate	Gemittelt 3'200 l/min
Absenkung Förderbrunnen P18-1	11-12 m
Aufstau Rückgabeburrunen P6-1	Druckleitung, Druck in der Leitung bis 2.2 bar im Dauerbetrieb

In der folgenden Grafik Abb. 29 ist in Grün der Wasserspiegel über dem Pegelsensor dargestellt, welcher bei Start des zweiten Zirkulationstests bei 31 m lag und im kontinuierlichen Betrieb ab 17.10.2025 12:00 bei einer Pumprate von über 3'000 l/min bei 19 m. Die Absenkung beträgt somit zu Beginn 12 m im Förderbrunnen P18-1. Auf Grund der kontinuierlich zugeführten Silt-Sand-Facht aus dem P18-1 wurde der Brunnen P6-1 sukzessive aufgesandet. Dies äussert sich in einem leichten und stetigen Druckanstieg in der P6-1 (rote Kurve), einer leicht abnehmenden Pumprate und folglich auch geringeren Absenkung im P18-1. Tatsächlich wurde die Auflandung bei 250 m u.T. abgetastet. Die Beobachtungsbohrung P1 in einer Entfernung von 1 km zeigt einen leicht steigenden Grundwasserspiegel von etwa 40 cm. Das ist vermutlich die Auswirkung des Aufstaus in der Rückgabeborhrung P6-1.

Bei einem kurzen Pumpversuch von 3'700 bis 4'000 l/min (Abb. 30) hat sich die Absenkung auch rasch bei rund 18.2 m eingependelt und anschliessend wieder unmittelbar erholt. Der Überdruck lag in der P6-1 kurzfristig bei rund 3 bar. Dabei sei berücksichtigt, dass dieser Wert durch die hohe Überführung erhöht ist.

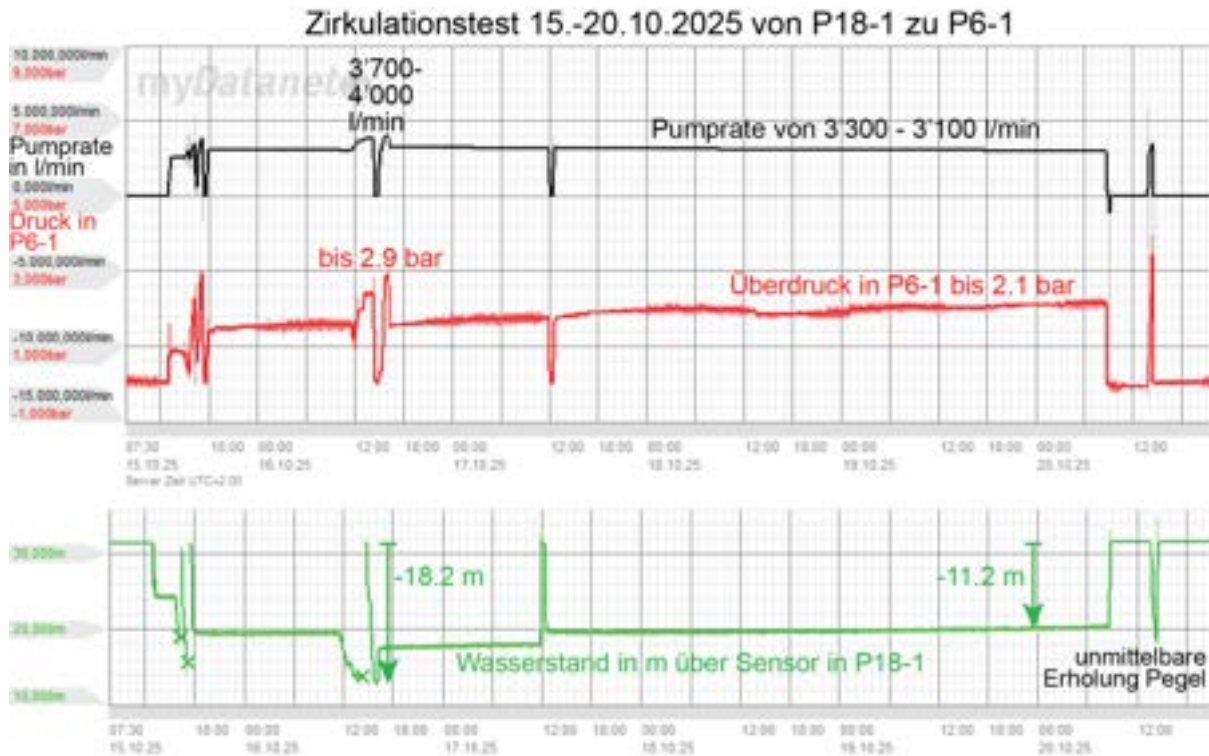


Abb. 29 Zirkulationstest von P18-1 nach P6-1 mit 3'200 l/min während 4.5 Tagen

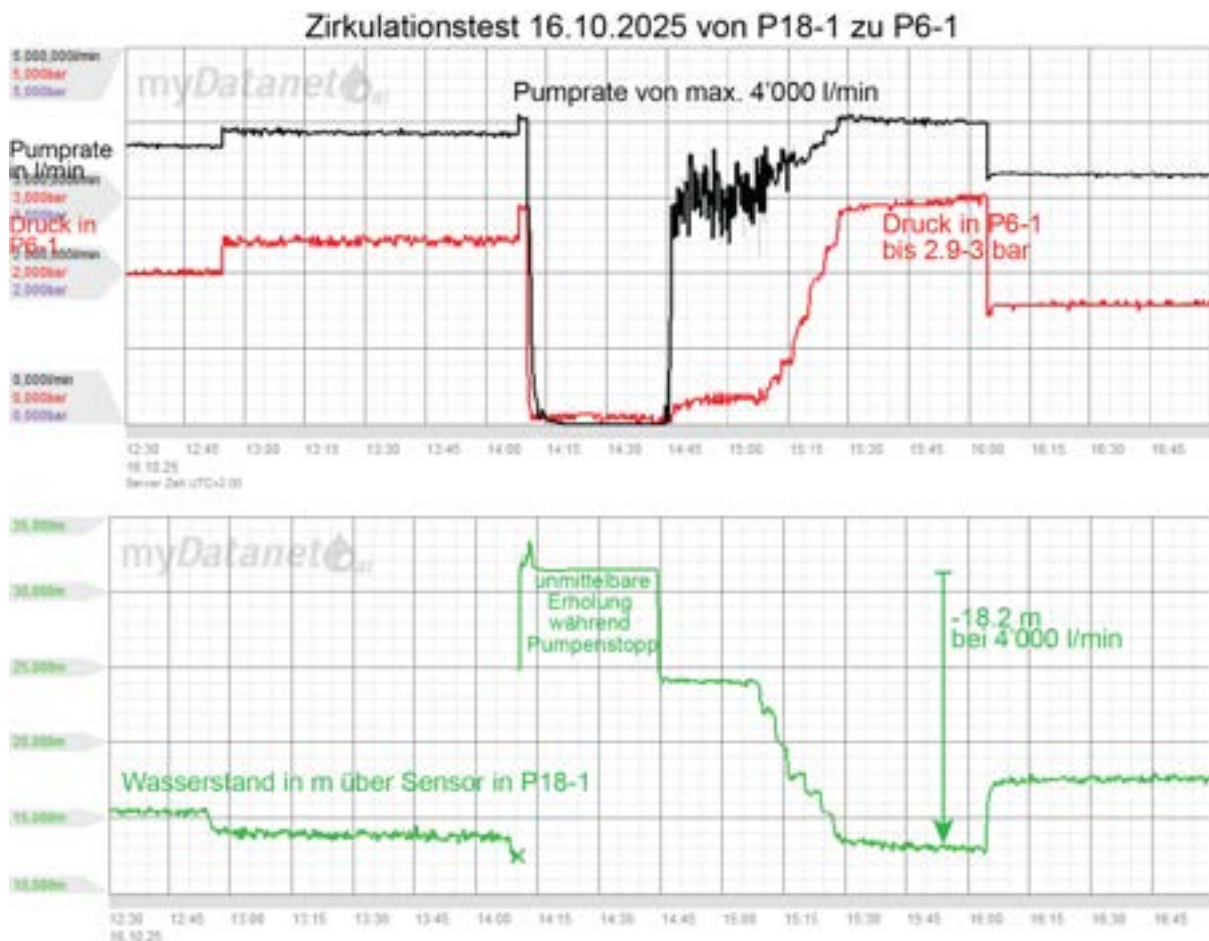


Abb. 30 Zirkulationstest von P18-1 nach P6-1 mit kurzfristig max. 4'000 l/min

9.6.3 Tracertest

Während des ersten Zirkulationstests wurde zwischen den Bohrungen ein Tracertest durchgeführt. Dabei wurde in die Rückgabeborung ein Markierstoff eingebracht (Abb. 31, Abb. 32), um die Fliess- und Aufenthaltszeiten im Grundwasserkörper im Pumpbetrieb zu ermitteln. Beim Förderbrunnen wurde der Markierstoff mit Messgeräten (Fluorometern) automatisch detektiert.

Tabelle 12 Tracertests im Okt. 2025

Parameter	Wert
Eingabe Markierstoff	07.10.2025 11:25
Ende	13.10.2025 15:27
Förderrate	2185 l/min
Markierstofftyp	Uranin
Markierstoffmenge	200 g
Eingabestelle	Rückgabeborungen P6-1
Messstelle	Förderbrunnen P18-1
Ankunftszeit nach Eingabe	10.10.2025 7:55 / 68.5 h nach Impfung
Dominante Fliesszeit (Peakzeit)	Ca 13.10.2025 15:27/ ca. 148 h nach Impfung
Maximal gemessene Konzentration	0.91 ppb
Dominante Fliessgeschwindigkeit	ca. 2 m / h
Rückgewinnungsrate	6-9%



Abb. 31 Anmischen von 200g Uranin



Abb. 32 Einbringen des Markierstoffs in die P6-1

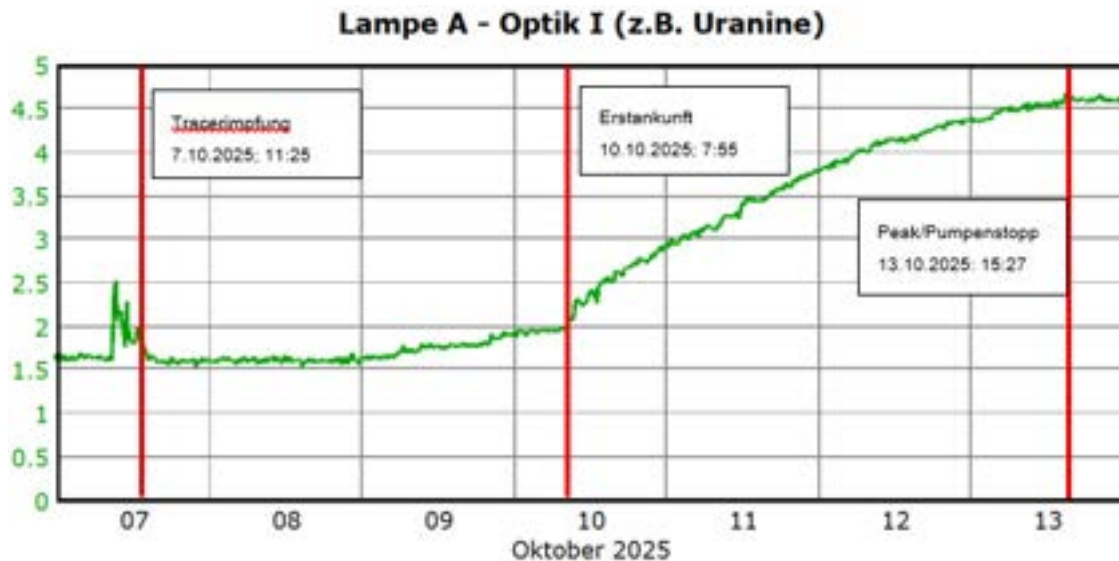


Abb. 33 Messkurve Fluorometer 1614 beim Förderbrunnen P18-1 in Millivolt (mV)

Die Messkurve Abb. 33 zeigt nach knapp 3 Tagen einen markanten Anstieg des Markierstoffs. Der Ersteinsatz ist sehr deutlich. Der geringe Anstieg, der bereits ab dem 9. Oktober beobachtet wurde, ist vermutlich auf eine zunehmende Trübung im Messgerät zurückzuführen. Die Kurve flacht dann ab und hätte vermutlich wenige Stunden nach dem Abstellen der Pumpe am 13. Oktober den Peak erreicht. Obwohl die Konzentration des Markierstoffes mit unter 1 ppb im sehr geringen Bereich ist (Abb. 35), ist die Durchgangskurve des Markierstoffes eindeutig. Dies bestätigt auch die gesamte gemessene Tracerkurve in Abb. 34, trotz der Pumpenunterbrüche und danach höheren Pumpraten, welche erneut den Tracer mobilisiert hat.

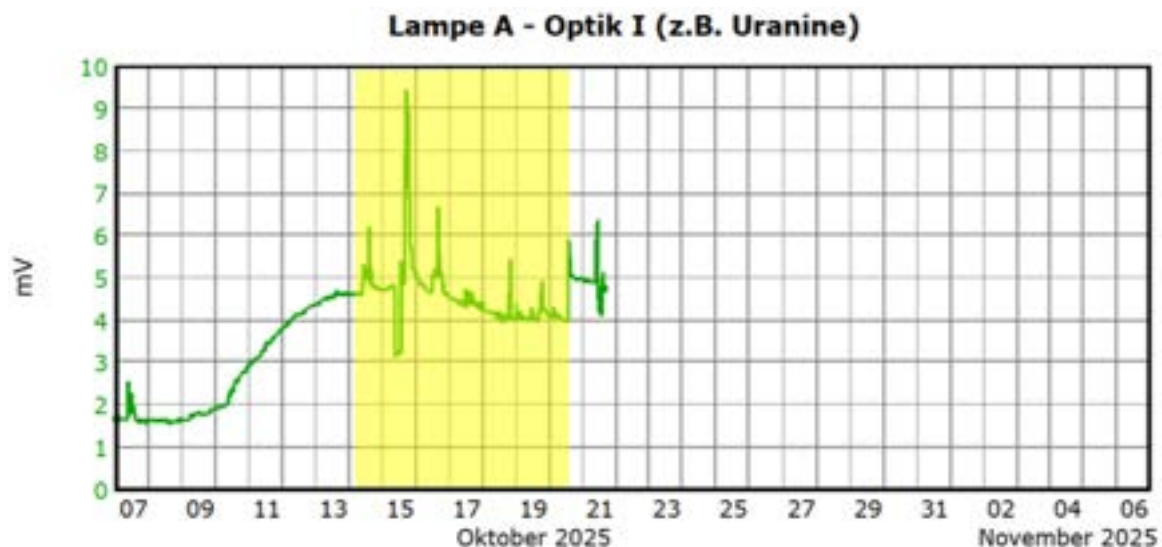


Abb. 34 Gesamte gemessene Tracerkurve

Der erste Zirkulationstest bis am 13. Oktober zeigt die ansteigende Tracerkurve bis zum Peak. Ab dem 13. Oktober kam es zu einem Pumpenunterbruch und wurde der zweite Zirkulationstest mit variierenden und höheren Pumpraten durchgeführt (gelb markiert), welche die Kurve verfälschen, aber klar ein Abklingen der Tracerkurve zeigt.

Aus der gemessenen Konzentration und der bekannten Förderrate kann die Rückgewinnungsrate berechnet werden. Weil der Pumpversuch kurz vor dem Erreichen des Peaks unterbrochen werden musste, kann nur zuverlässig die Rückgewinnungsrate von der Ankunft des Tracers bis zum Peak bestimmt werden. Von der Ankunft des Tracers bis zum Peak dauerte es rund 80 h. Der Integralwert bis zum Peak beträgt 158'000 ppb s (Konzentration x Zeit). Bei einer Förderrate von 2'200 l/min ergibt dies eine Rückgewinnung bis zum Peak von ca. 5.8 g Uranin. Bei der Abklingkurve wird angenommen (Abb. 34), dass etwa die gleiche bis doppelte Menge am Tracer nochmals rückgewonnen würde. Somit würden rund 12-18 g Uranin zurückgewonnen, was ausgehend von 200 g einer Rückgewinnungsrate von rund 6-9 % entsprechen würde.

Eine Rückgewinnung beim Markerversuch von unter 10% ist gering, obwohl durch den Pump- und Verpressbetrieb mit dem Druckgefälle eine direkte Fliessverbindung geschaffen wurde. Die verschiedenen Kieslagen auf unterschiedlichen Tiefen zeigen, dass es sich um einen sehr heterogenen Grundwasserleiter handelt, in dem nur ein kleiner Teil des Durchflusses die beiden Bohrungen direkt hydraulisch verbindet. Die hydraulische Verbindung ist somit trotz der unmittelbaren Druckreaktion schwach und/oder hat eine hohe Dispersion («Vermischung»). In beiden Fällen ist das für die thermische Nutzung vorteilhaft, da dies auf ein grosses hydraulisch erschliessbares Untergrundvolumen hinweist.

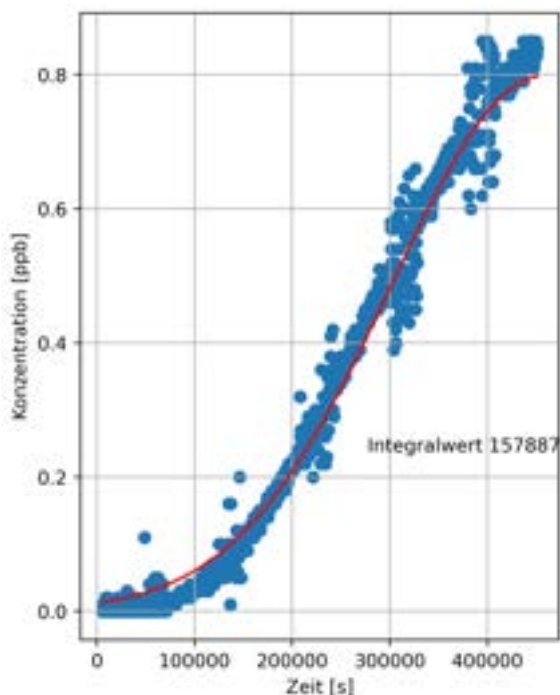


Abb. 35 Durchgangskurve des Tracers geglättet in Konzentration (ppb) über die Zeit.

Fazit:

Die dominante Fliesszeit lag bei rund 6 Tagen. Die dominante Fliesszeit liegt somit bei ca. 2 m/h. Die Rückgewinnung von 6-9% ist gering, obwohl durch den Pump- und Verpressbetrieb eine direkte Fliessverbindung geschaffen wurde. Dies ist vorteilhaft für die thermische Nutzung, da dies auf ein grosses hydraulisch erschliessbares Untergrundvolumen hinweist und gegen einen raschen und direkten hydraulischen / thermischen Kurzschluss. Dies kann mit dem sehr heterogenen Aufbau des Untergrundes erklärt werden und wird durch die geologischen Erkenntnisse bestätigt, welche gezeigt haben, dass keine durchgängigen Kieslagen vorliegen.

9.7 Zirkulationstest P6-1 → P18-1

Auf Grund der Aufsandung des Brunnens P6-1 durch den Zirkulationsbetrieb von P18-1 in den P6-1 wurde der P6-1 vom 22.10. bis zum 06.11.25 nochmals entsandet. Aus Zeitgründen wurde ein kurzer Zirkulationstest mit hohen Pumpraten vom P6-1 zum P18-1 zwischengeschaltet. Um zu verhindern, dass zu viel Silt und Sand in die P18-1 eingebracht wird, erfolgte der Pumpstest nur während einer Stunde.

Am 07.11.2025 wurde dieser Zirkulationstest ausgeführt. Im Brunnen P6-1 wurde gefördert und im Brunnen P18-1 zurückgegeben. Ein quasi-stationärer Zustand wurde nach 40 min Pumpen mit einer Pumprate von ca. 4'500 l/min erreicht. Der Grundwasserspiegel im Förderbrunnen lag im Gleichgewicht, resp. war sogar aufgrund der Zirkulation leicht steigend. In der Rückgabebohrung hatte sich der Aufstau noch nicht vollständig eingependelt. Gegen Ende des Zirkulationstests wurde die Pumprate bis auf 4'800 l/min gesteigert (Abb. 36). Die Förderkapazität im Förderbrunnen P6-1 war dabei nahezu ausgereizt, da die Absenkung bereits 30 m betrug (violette Kurve Abb. 36) und die maximal mögliche Absenkung bei ca. 35 m gelegen hätte. Die Schluckkapazität im Rückgabebrunnen war mit dieser Pumprate jedoch überschritten, worauf der Zirkulationstest beendet wurde (grüne Kurve Abb. 36). Es konnte aber der Nachweis erbracht werden, dass im Brunnen P6-1 eine Förderrate von nahezu 5'000 l/min möglich ist und sich der Gleichgewichtszustand innert Minuten auf der Förderseite einstellt.

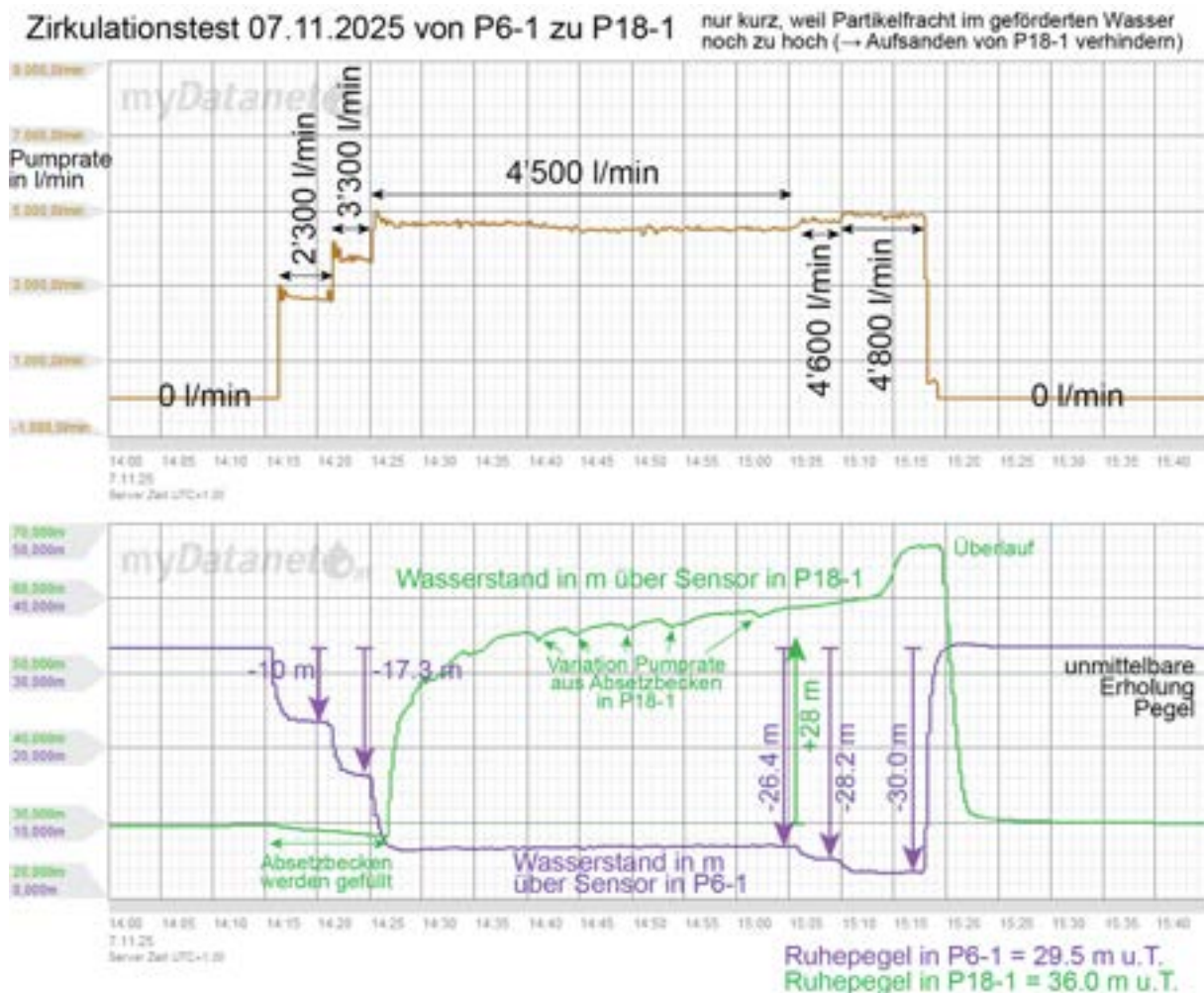


Abb. 36 Zirkulationstest von P6-1 zu P18-1 mit ca. 4'500-4'800 l/min

Oben: Digitale Durchflussmessung während des Zirkulationstest. Während ca. 40 min wurden ca. 4'500-4'600 l/min gefördert. Gegen Ende des Zirkulationstests wurde die Förderrate bis auf 4'800 l/min gesteigert.

Unten: Pegelmessungen im Förderbrunnen P6-1 (violett) und dem Rückgabebrunnen P18-1 (grün). Bei 4'500 l/min wurde das Gleichgewicht nahezu erreicht. Bei 4'800 l/min hat der Rückgabebrunnen seine Schluckkapazität überschritten.

Die Eckdaten des 3. Zirkulationstest sind wie folgt:

Parameter	Wert
Start	7.11.2025; 14:16
Ende	7.11.2025; 15:18
Förderrate	Bis 4'800 l/min
Absenkung Förderbrunnen P6-1	30.0 m
Aufstau Rückgabebrunnen P18-1	37.4 m (bei 4'800 l/min überlaufen)
Gleichgewichtszustand	Quasi-Gleichgewicht bei 4'500 l/min während 40 min

9.8 Brunnenergiebigkeit

Nachfolgende Abb. 37 zeigt grafisch die Abhängigkeit der Absenkung von der Pumprate. Daraus kann die maximale Brunnenleistung abgeschätzt werden, also bei welcher max. Pumprate der Wasserspiegel so weit sinkt, bis die Pumpe trocken läuft.

Die Abb. 37 zeigt deutlich die Verbesserung der Leistung des P6-1 von 2024 (gelbe Dreiecke) zu 2025 (rote Kreise) durch die nochmalige Entsandung mit der neuen Methodik der Brunnenentwicklung. Beide Brunnen können 5'000 l/min leisten. Die Langfristigkeit dieser Pumprate wird derzeit noch mit einem weiteren mehrtägigen Zirkulationstest besonders hinsichtlich der Partikelführung und Einhaltung der 3K-Regelung getestet (zum Zeitpunkt des Berichtsschreibens noch nicht erfolgt).

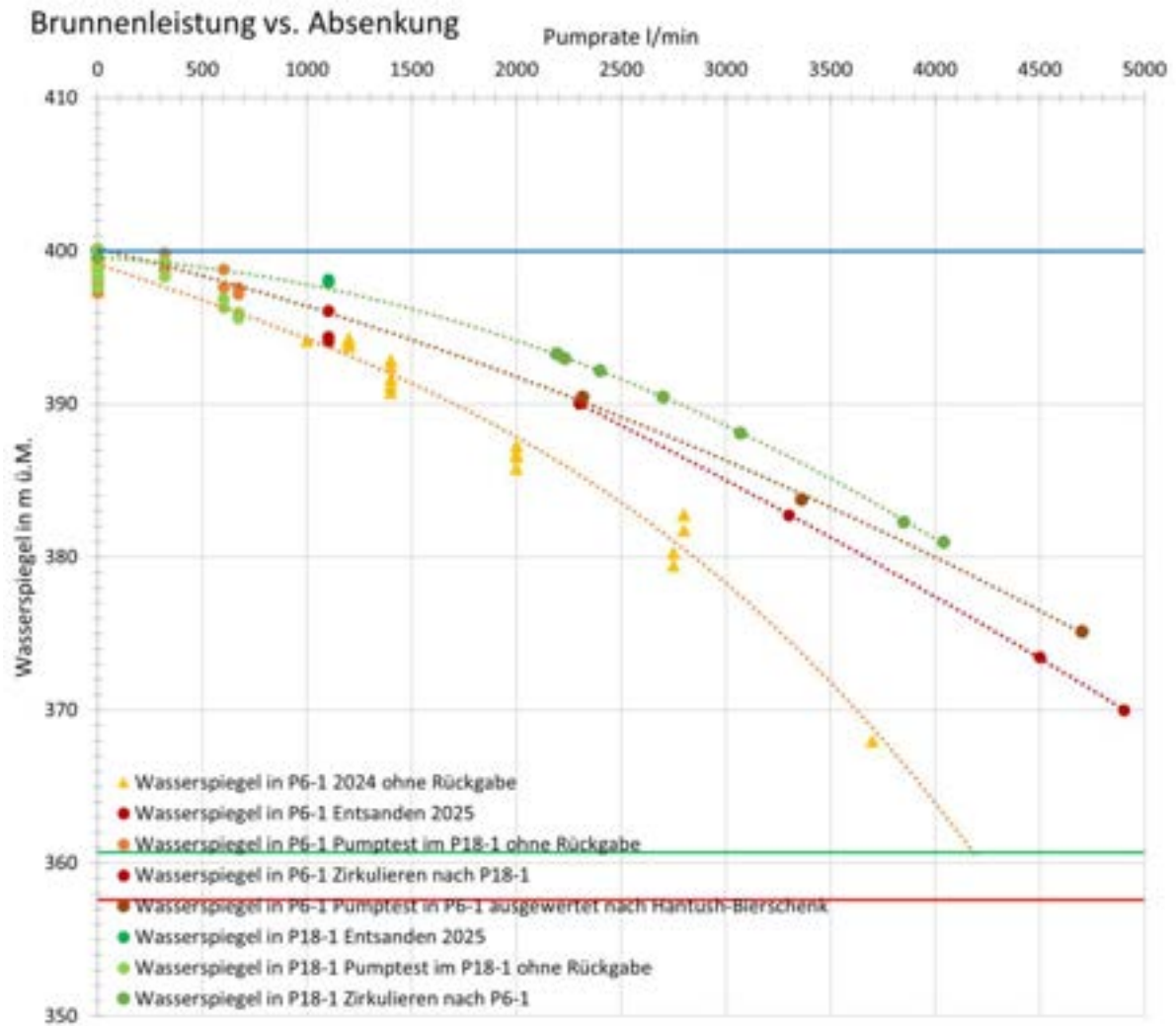


Abb. 37 Brunnenleistung von P6-1 und P18-1

10 Aquifereigenschaften

Die Aquifereigenschaften wurden mittels Pumpversuchen und diversen Wasserbeprobungen zur Bestimmung der physikalischen und chemischen Eigenschaften, der Mikrofauna und Altersdatierung ermittelt. Bis auf die Altersdatierung, die erst im Frühling 2026 vorliegen dürfte, liegen die Ergebnisse vor.

10.1 Physikalische Parameter

Aquifer-Temperatur

Die Temperaturprofilmessungen (SE1, P1, E1) zeigen in der produktiven Zone zwischen 200 und 300 m entlang der Rinne unterhalb des Flughafens nachfolgende Temperaturen (Tabelle 13). Das Temperaturlogging wurde 2023 von terratec geophysical services GmbH & Co. KG ausgeführt. Die Temperaturprofilmessungen inkl. der Messungen in den Brunnen sind in Abb. 38 abgebildet.

Tabelle 13 Ungestörte Bohrlochtemperaturen in der produktiven Zone

Bohrung	Temp. in 200m Tiefe [°C]	Temp. in 300m Tiefe [°C]
P1	21.7	22.0
E1	22.4	22.5
SE1	21.6	22.1

Alle Temperaturmessungen, welche in den Sondierbohrungen erfolgten, zeigen in der Tiefenlage von 200 bis 300 m eine ungestörte Untergrundtemperatur zwischen 21.6 °C und 22.5 °C. Es ist nicht auszuschliessen, dass das Temperaturprofil durch die Bohrarbeiten noch etwas gestört war. Die Kieslagen zeigen einen geringen geothermischen Gradienten. Dies ist vermutlich auf den konvektiven Wärmetransport innerhalb des tiefen Lockergesteinsgrundwasserleiter zurückzuführen.

Beim Pumpversuch zwischen P6-1 und P18-1 wurden diese Temperaturen nicht ganz erreicht, sondern eine Temperatur von 19.4 °C gemessen. Dabei handelt es sich vermutlich aufgrund der zahlreichen Tests und Rückverpressungen um eine leicht gestörte Grundwassertemperatur. Die max. Tagestemperatur lag während der Tests und Pumpversuche jeweils unterhalb von 20 °C (Abb. 39), sodass sich das geförderte Grundwasser in den Leitungen aber auch in der Kläranlage abkühlte und mit der Rückversickerung auch zu einer Abkühlung des Aquifers führte. Zudem wurde die Temperatur an der Oberfläche gemessen, mit einem Temperaturverlust in der Steigleitung an die Umgebung.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Aquifertemperatur bei wenig über 20 °C liegt, im tieferen Rinnenbereich wahrscheinlich etwas höher.

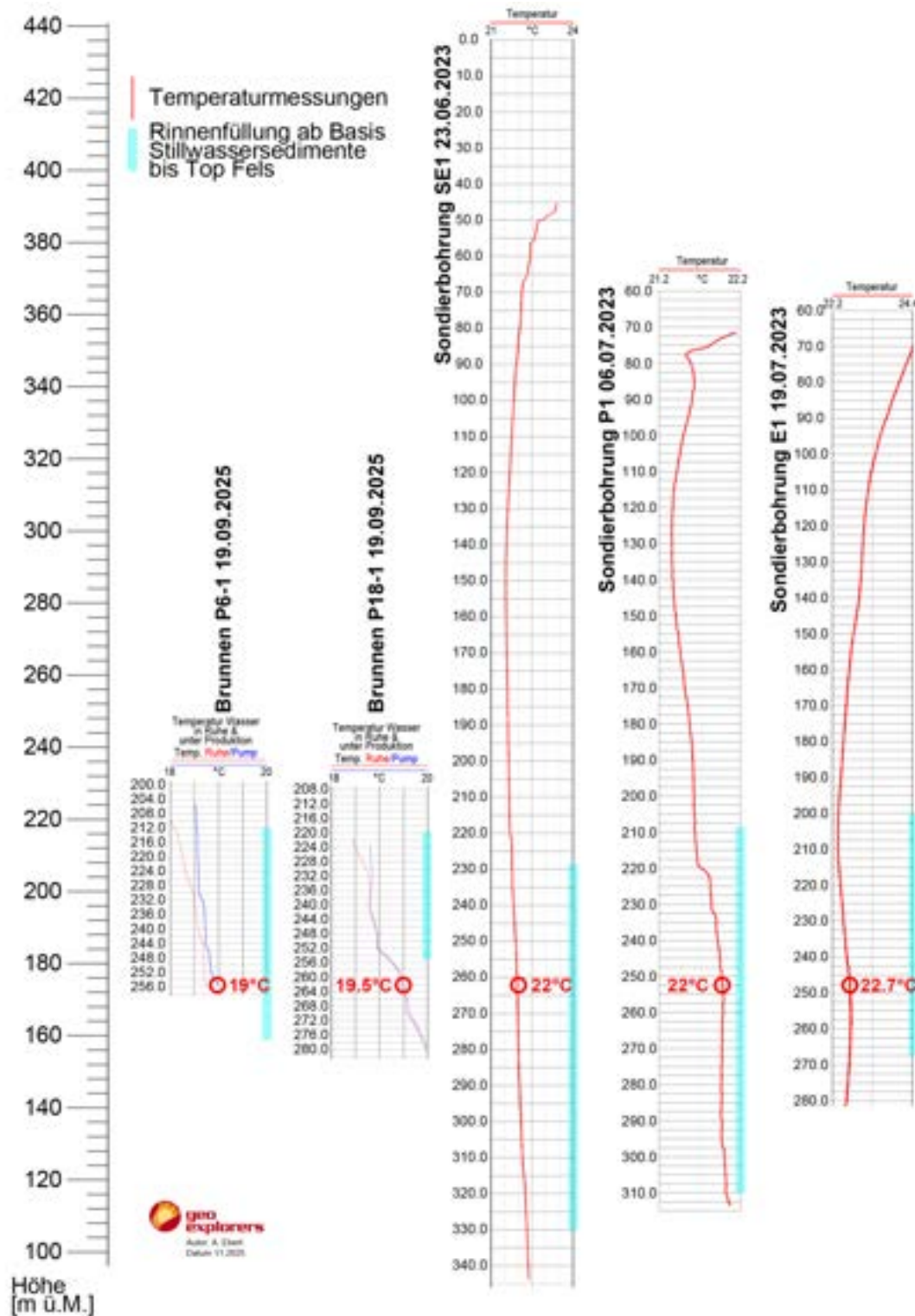


Abb. 38 Aquifertemperaturen

Dargestellt sind die gemessenen Temperaturen während dem geophysikalischen Logging, im Fall der Sondierbohrungen im offenen Bohrloch nach den Bohrarbeiten und im Fall der beiden Brunnen in der Filterstrecke nach der Brunnenentwicklung.

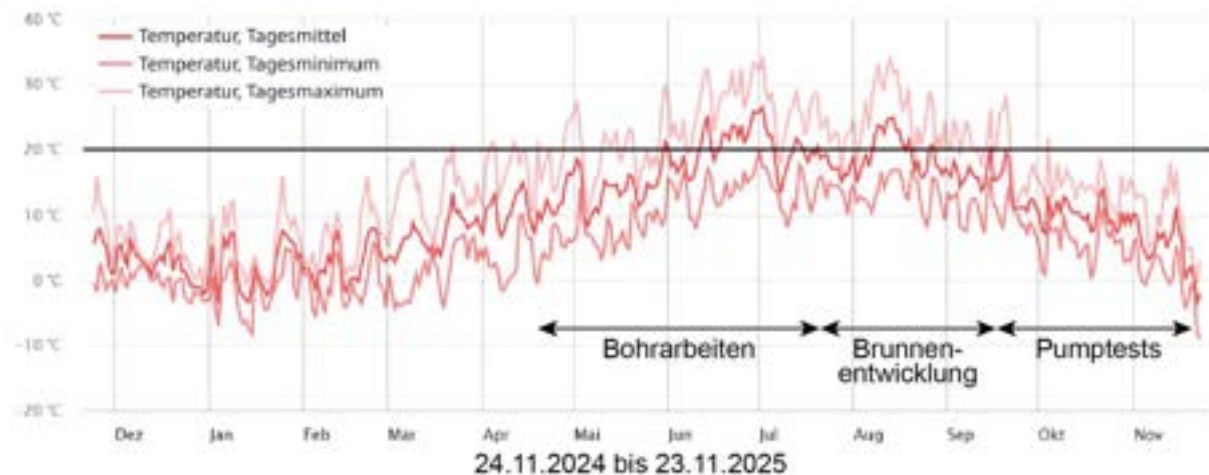


Abb. 39 Lufttemperaturen Station Kloten (Quelle: meteoschweiz)

Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit Handloggern sowie im Labor gemessen und bewegt sich zwischen 454 und 470 mikroS/cm. Das ist für einen Grundwasserleiter ein eher tiefer-mittlerer Wert, welcher bedeutet, dass es sich eher um eine tiefe-mittlere Gesamtmineralisation handelt. Die geringe bis mittlere Gesamtmineralisation ist ebenfalls ein guter Indikator, dass Ausfällungen eher nicht zu erwarten sind.

pH

Der pH Wert wurde im Labor gemessen und ist mit 8.83 für ein Grundwasser im eher hohen pH Bereich, was auf die Herkunft eines alten Tiefenwassers hindeutet.

Trübung / Farbe / Geruch

Das Wasser zeigt nach dem Entsanden im Pumpbetrieb bis ca. 2'000 l/min weder eine Trübung noch eine Farbe. Es ist klar, sowie geruchsneutral.

10.2 Geochemie

Es handelt sich um ein Natrium-Karbonat-Sulfat-Wasser. Der hohe Karbonatanteil wurde indirekt über die Härtegrade bestimmt. Kalzium ist nur geringfügig vorhanden.

Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die niedrige Sauerstoffkonzentration, welche zu reduzierenden Bedingungen führt. Dennoch sind gelöste reduzierte Eisen- und Manganionen, welche unter Sauerstoffzufuhr potentiell ausfallen könnten, in der Laboranalyse nicht nachweisbar.

Ammonium ist klar nachweisbar. In Oberflächengewässern weist dies meist auf anthropogenen Ursprung (Düngung) hin, in Tiefenwässern hingegen kann sich Ammonium durch Mineralisierung organischer Substanz bilden. Die geringe Sauerstoffkonzentration verhindert die weitere Oxidation zu Nitrit und Nitrat, welche beide nicht nachgewiesen wurden. Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) ist nur in geringer Konzentration von 0.31 mg/l vorhanden.

Natrium-Karbonat-Wässer zeichnen sich durch hohe pH-Werte, lange Verweilzeiten und niedrige Erdalkalien (Kalzium und Magnesium) aus. Sie entstehen durch Kationentausch von Natrium gegen Kalzium in tonreichen Schichten, z.B. in den vorliegenden Moränenlagen.

10.3 Hydraulisches Gefälle

Grundsätzlich ist der Rhein der Vorfluter und ein geringes Gefälle sollte sich Richtung Nordwesten einstellen. Zwischen der Sondierbohrung SE1 und P1 in einer Entfernung von 1.08 km lag die Differenz der Pegel ab Januar 2025 im Zentimeterbereich (Abb. 40). Mal hatte die SE1 ein um mehrere Zentimeter höherer Druckspiegel, mal die P1. Die Druckdifferenzen belaufen sich nahezu im Fehlerbereich der Messgeräte, so dass schlussgefolgert werden muss, dass zwischen SE1 und P1 kein Druckgefälle besteht, wenn das Drucksystem in der tiefen Rinne ungestört ist.

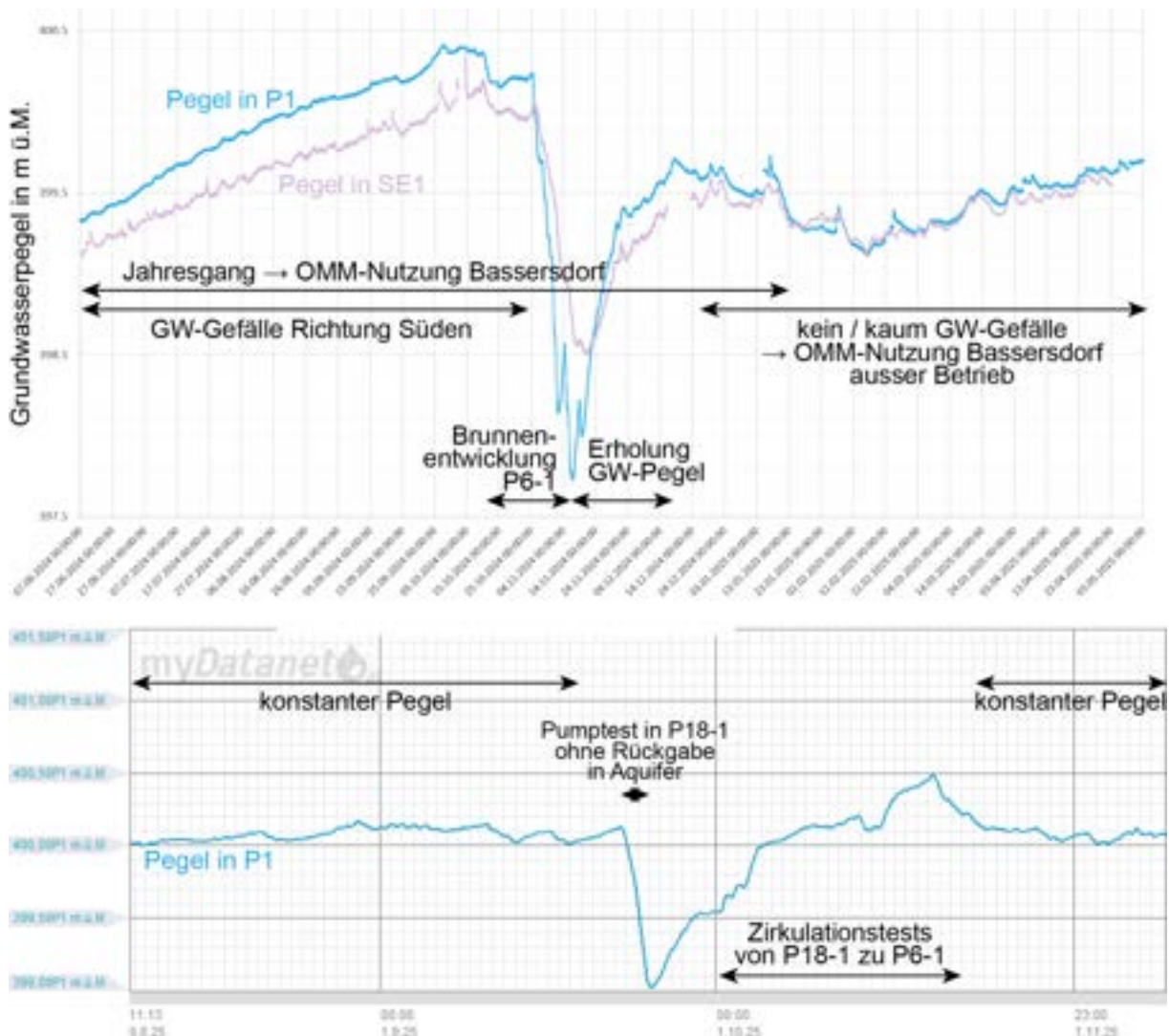


Abb. 40 Pegelmessungen in den Sondierbohrungen SE1 und P1

Bis im Oktober 2024 konnte jedoch zwischen P1 und SE1 ein eindeutiges Fliessgefälle Richtung SE mit einem Gefälle von bis zu 30 cm gemessen werden, werden – was entgegen sämtlichen Erwartungen stand. Nachdem dieses Gefälle nur bis Ende 2024 nachgewiesen werden konnte und in Erfahrung gebracht wurde, dass die thermische Grundwassernutzung von Bassersdorf aus der Oberen Meeresmolasse (OMM, Grundwasserbrunnen, Singlette) seit Beginn 2025 saniert wird und nicht in Betrieb steht, ergibt sich die offensichtliche Schlussfolgerung, dass jene Grundwassernutzung das tiefe Lockergesteinsgrundwasser beeinflusst. Die geothermische Nutzung Bassersdorf ist zwar rund 4 km vom südlichsten Brunnen P18-1 entfernt, trotzdem ist bekannt, dass sich die Nutzungen aus der OMM in Kloten (heute stillgelegt) und Bassersdorf gegenseitig hydraulisch beeinflusst haben. Die OMM steht zudem im direkten hydraulischen Kontakt mit den Lockergesteinen in der Rinne, das bedeutet, dass sich Druckänderungen in der OMM auch auf die Lockergesteinsrinne auswirken.

Der starke Druckabfall Ende Oktober / Anfang November 2024 in beiden Bohrungen ist auf die Brunnenentwicklung im Brunnen P6-1 zurückzuführen, bei welcher rund 5'800 m³ aus dem Aquifer entnommen wurde und dadurch der Grundwasserspiegel im basalen Aquifer grossflächig abgesenkt wurde.

10.4 Mikrofauna

An den gepumpten Wässern aus der P6-1 sowie P18-1 erfolgten nach der Brunnenentwicklung durchflusszytometrische Messungen mit dem vollautomatischen BactoSense (Durchfluss-Zyto-meter, Flow Cytometer, Abb. 41). Damit können Mikroorganismen im Wasser bzw. deren Gesamtzellzahl pro ml quantifiziert werden. Zudem wurden Wasserproben für molekularbiologische Untersuchungen (DNA-Analysen) entnommen. Bis zur Abgabe des vorliegenden Berichtes lagen noch keine Daten vor.

Für die Analysen wurde gefördert Wasser aus der Hauptleitung mit einem geringen Durchfluss durch einen 30 µm-Filter in das BactoSense Messgerät abgeleitet.



Abb. 41 BactoSense im Einsatz bei der P18-1

Der BactoSense wurde zweimal vor Ort installiert und einmal wurden genommene Proben im Labor der Uni Basel mit dem BactoSense ausgewertet.

Die ersten Messungen am 08.11.2024 nach der ersten Brunnenentwicklung im P6-1 haben keine brauchbaren Ergebnisse geliefert. Aufgrund zu hoher Partikelführung während des Pumpversuches wurden die Schwebstoffe vom BactoSense aufgrund ihrer hohen Lichtstreuung als Artefakte erkannt und die Analysen verfälscht. Zudem konnten aufgrund der kurzen Pumpphasen nur wenige Proben entnommen werden. Diese Messwerte gelten daher als unzuverlässig und wurden verworfen.

Nach der Brunnenentwicklung vom P18-1 wurden in einem ersten Schritt am 5.09.2025 zwei Testproben entnommen und anschliessend sofort im Labor der Universität Basel analysiert. Folgende Werte wurden ermittelt: Probe 1: Gesamtzellzahl TCC (Total Cell Count) = 37'020 [1/ml], davon HNA-Anteil = 64.48 % und Probe 2: TCC = 15'550 [1/ml], davon HNA-Anteil = 70.48 % (High-Nucleic-Acid-(HNA)-Mikroben = eher grosse und gut detektierbare Bakterien).

Vom 02. bis 08.10.2025 erfolgte die 3. Messung mit dem BactoSense. Dafür wurde vom geförderten Wasser in der P18-1 während eines Zirkulationspumptests mit Pumpraten von 2'200 l/min kontinuierlich wenig Wasser gemäss Abb. 41 abgeleitet und in 30 Minuten-Intervallen analysiert. Die Messwerte sind auf Abb. 43 abgebildet. Parallel wurden der Durchfluss und die Trübung in der Pumpleitung gemessen, um Ausreisser zu identifizieren und mit der Zelldynamik zu interpretieren.

Zu Beginn vom 06.10.25 erreichte die Trübung die geringsten Werte. Entsprechend sind die Werte der Gesamtzellzahl (TCC) von rund 40'000 Zellen pro ml in diesem Zeitfenster am wenigsten beeinflusst. Der HNA-Anteil liegt in diesem Zeitfenster bei rund 85%. Die Werte korrelieren mit Trink- und Grundwasser (Abb. 42). Der mehrheitliche Anteil von grossen Zellen könnte entweder auf grosse und gut vernetzte Poren hinweisen oder auf Eintrag von Mikroben und Nährstoffen während den Bohr-, Spül- und Pumpvorgängen.

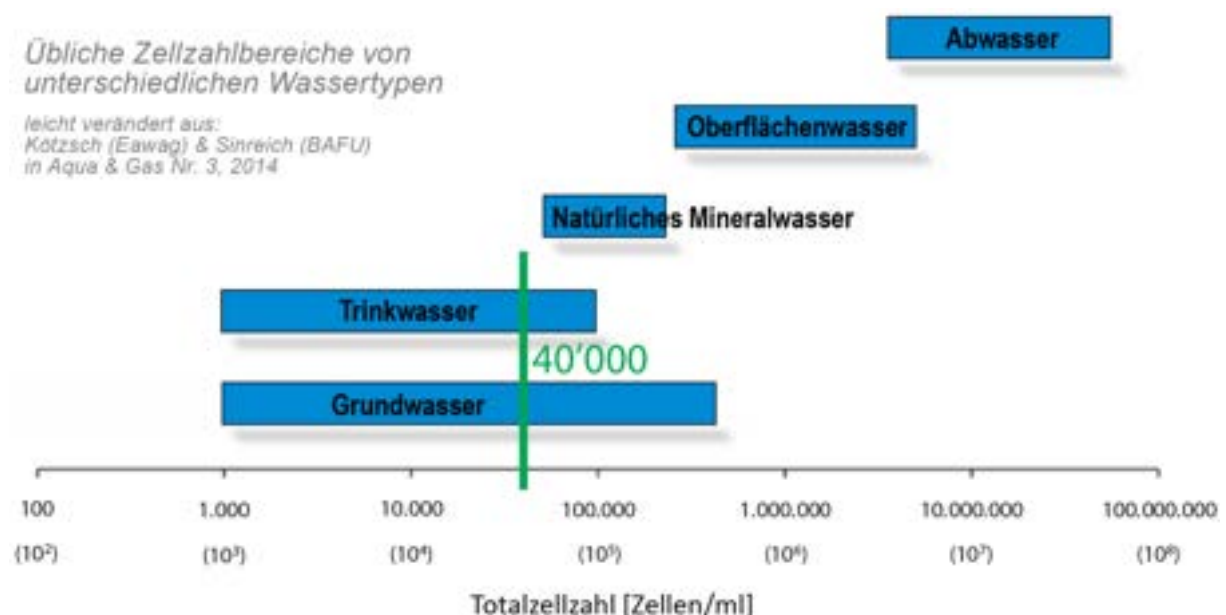


Abb. 42 Zellzahlen in verschiedenen Wassertypen

In Grün die gemessene Zellzahl vom 06.10.2025.

Grundsätzlich zeigen die Messungen eine Streuung und einen Tagesgang. Wiederkehrend wurden Peaks von 50'000 bis 250'000 Zellen/ml analysiert, welche auf die Tageszeiten zwischen 12 und 18 Uhr (dominant 15 Uhr) fallen (Abb. 43). Mögliche Einflüsse könnten Änderungen im

Pumpbetrieb, externe Einflüsse (z. B. eingeleitetes kontaminiertes Wasser) oder die Witterung (z. B. Sonneneinstrahlung auf die Messeinrichtung) sein. Externe Einflüsse und geänderte Pumpparameter können ausgeschlossen werden. Letztere wurden lückenlos und digital überwacht und zeigten keine Änderungen. Externe Einflüsse bzw. Fremdeintrag in den Aquifer waren direkt in das Bohrloch oder über Kurzschlüsse hinter der Verrohrung nicht möglich. Die Witterung kann nicht ausgeschlossen werden. Es liegen nur Tagesdaten zur Witterung vor. Die beiden grössten Peaks am 04. und 07.10.25 korrelieren mit den höchsten Tagestemperaturen (04.+07.10.) bzw. meisten Sonnenstunden (07.10.).

Ab dem Morgen vom 07.10.25 wurde die Wasserzufuhr zum BactoSense abgestellt, da ein Tracer eingegeben wurde und die Messungen stark beeinträchtigt hätte. Danach stieg die Zellzahl stark an. Evtl. handelt sich es dabei um Mikrobewachstum im verbleibenden Wasser in der Leitung und Messeinheit bei gleichzeitig vorteilhafter Witterung (s.o.).

Eine bestehende Kontamination innerhalb der Installation ist aufgrund eines neuen Filters sowie der mit Alkohol gereinigten Leitungen und Druckregler zwar unwahrscheinlich, kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Grundsätzlich ist durchwegs noch eine Trübung vorhanden, welche variiert. Manche Trübungsspitzen können mit höheren Zellzahlen korreliert werden, aber manch andere nicht.

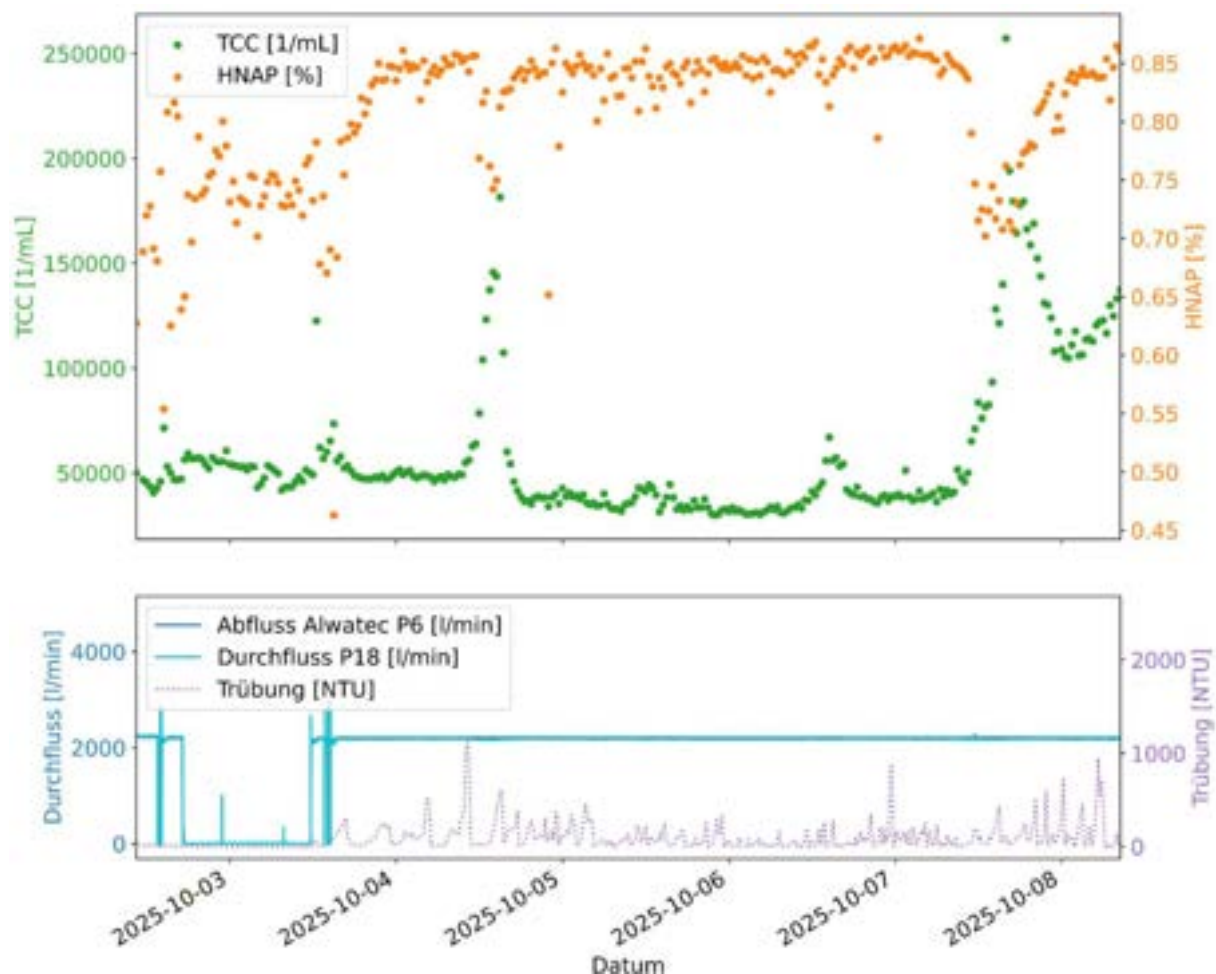


Abb. 43 Zeitlich aufgelöste Messresultate mit dem BactoSense

Dargestellt sind totale Zellzahlen (TCC), grosse/gut markierbare Zellen (HNA), sowie Zeitreihen des Durchflusses und der Trübung in der Pumpleitung der 3. Messkampagne.

Fazit:

Gemäss den BactoSense Analysen sind Zellen von Mikroben / Bakterien im Wasser vorhanden. Die am wenigsten durch die Trübung beeinflussten Werte liegen bei ca. 40'000 Zellen pro ml, welche mit typischen Werten von Grundwasser korrelieren. Wie die Messungen gezeigt haben, werden die Messungen durch die Trübung beeinflusst. Zudem wird ein Tagesgang beobachtet. Wie sehr die Zellzahlen durch die Trübung, äussere Einflüsse wie Witterung oder eine bestehende Verunreinigung im Gerät oder durch die Bohrarbeiten beeinflusst sind, kann nicht abschliessend beurteilt werden. Es ist bekannt, dass eine Mikrofauna die Bewirtschaftung durch z.B. mikrobielle Korrosion oder Biofilme negativ beeinflussen kann. Allerdings wurden Edelstahlrohre hoher Qualität eingebaut und zum anderen zeigen Kamerabefahrung im tiefen Brunnen in Seon, dass auch nach über 20 Jahren Nutzung in gleichem Grundwasser keine Anzeichen von Korrosion oder Biofilmen bestehen. Ob durch die Nutzung allfällige lebensfeindliche Bedingungen für die allfällige Mikrofauna entstehen, wurde von der Universität Basel nicht bewertet und kann nur durch weitere Untersuchungen während der Nutzung geklärt werden. Es wird auf die derzeit laufenden Bewertungen hinsichtlich der Anpassungen der 3K-Regelung im Rahmen der Motion Jauslin verwiesen.

Anmerkung: Im Vergleich zu den bekannten oberflächennahen Grundwässern handelt es sich um einen sehr tiefen Aquifer mit viel höheren Grundwassertemperaturen von 20°C und mehr, welcher andere Bedingungen hinsichtlich Fließverhalten, chemischer Zusammensetzung (siehe oben) usw. aufweist.

Es wurden deshalb auch Wasserproben für molekularbiologische Untersuchungen (DNA-Analysen) entnommen. Mit diesen Untersuchungen sollen auch Hinweise auf grössere Organismen wie Arthropoden erfasst werden. Bis zur Abgabe des vorliegenden Berichtes waren die Analysen noch nicht abgeschlossen. Ob und welche möglichen Organismen vorliegen und ob diese allfällig verletzlich sind, kann zum Zeitpunkt des Berichtschreibens nicht beantwortet werden.

10.5 Beeinflussung weitere GW-Nutzer

In diesem Kapitel wird die Beeinflussung von weiteren Grundwassernutzern behandelt. In der Lockergesteinsrinne im tiefen Stockwerk gibt es aktuell keine Nutzer. Die Beeinflussung von weiteren Grundwassernutzern wäre in zwei weiteren Grundwassersystemen möglich:

1. Beeinflussung von Grundwassernutzern welche die oberflächennahen Lockergesteinsschöten nutzen (u.a. die Flughafen Zürich AG selbst)
2. Beeinflussung von Felsgrundwassernutzern aus der Oberen Meeresmolasse.

Das tiefe Grundwasserstockwerk wird als relativ geschlossenes System verstanden, in welchem alte Wässer mit einer geringen Neubildung vorliegen. Die Entsandung des Brunnen P6-1 und die Pumpversuche haben gezeigt, dass mit dem Fördern von Grundwasser der Wasserspiegel kontinuierlich und grossflächig gesenkt wird. Der Wiederanstieg nach dem Entsanden, resp. nach dem Ende der Pumpversuche dauerte mehrere Wochen.

Oberflächennahes Lockergesteinsgrundwasser

Entsprechend dem erbohrten geologischen Aufbau, trennt eine ca. 200 m mächtige vorwiegend siltige Tonlage das oberflächennahe Lockergestein von den Kieslagen auf der Rinnenbasis. Dieser mächtige Stauer wirkt als Barriere zwischen den Grundwasserstockwerken. Um dies

nachzuweisen, wurde in zwei Piezometern im oberen oberflächennahen Grundwasserstockwerk Pegelsonden eingebaut, welche während den hydraulischen Versuchen in den Brunnen P18-1 und P6-1 aktiv waren. Diese beiden Piezometer P124 und P125 liegen in unmittelbare Nähe zu den beiden Brunnen P18-1 und P6-1 (Abb. 44).

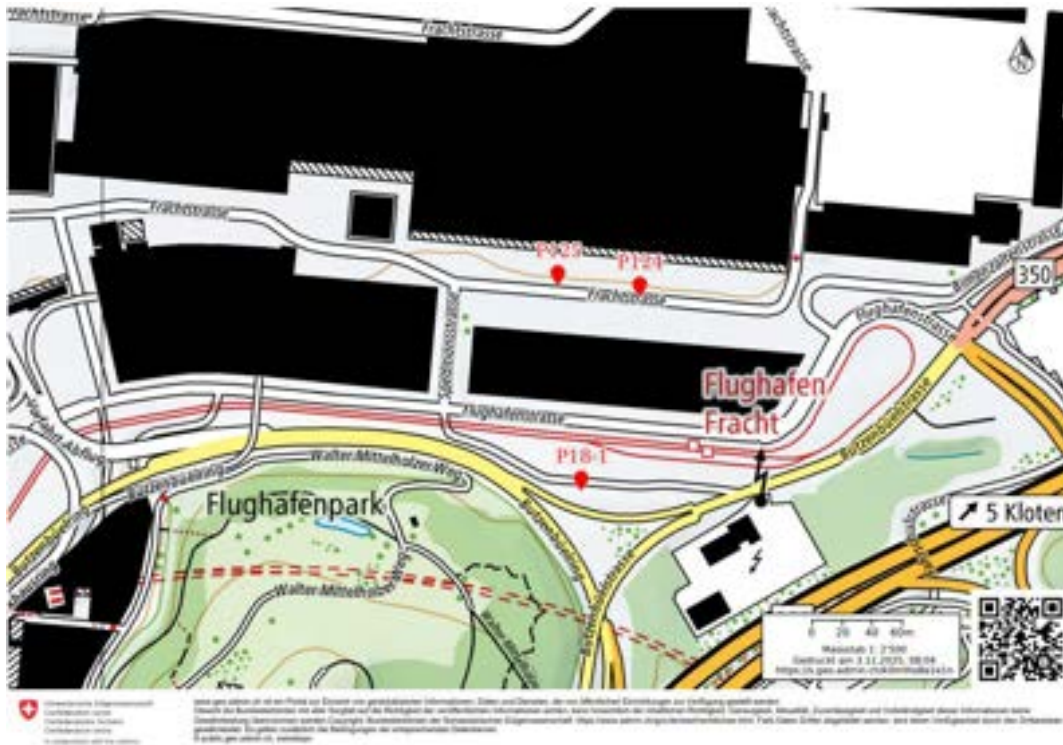


Abb. 44 Standorte der beiden Pegelsonden und des Pumpbrunnens P18-1

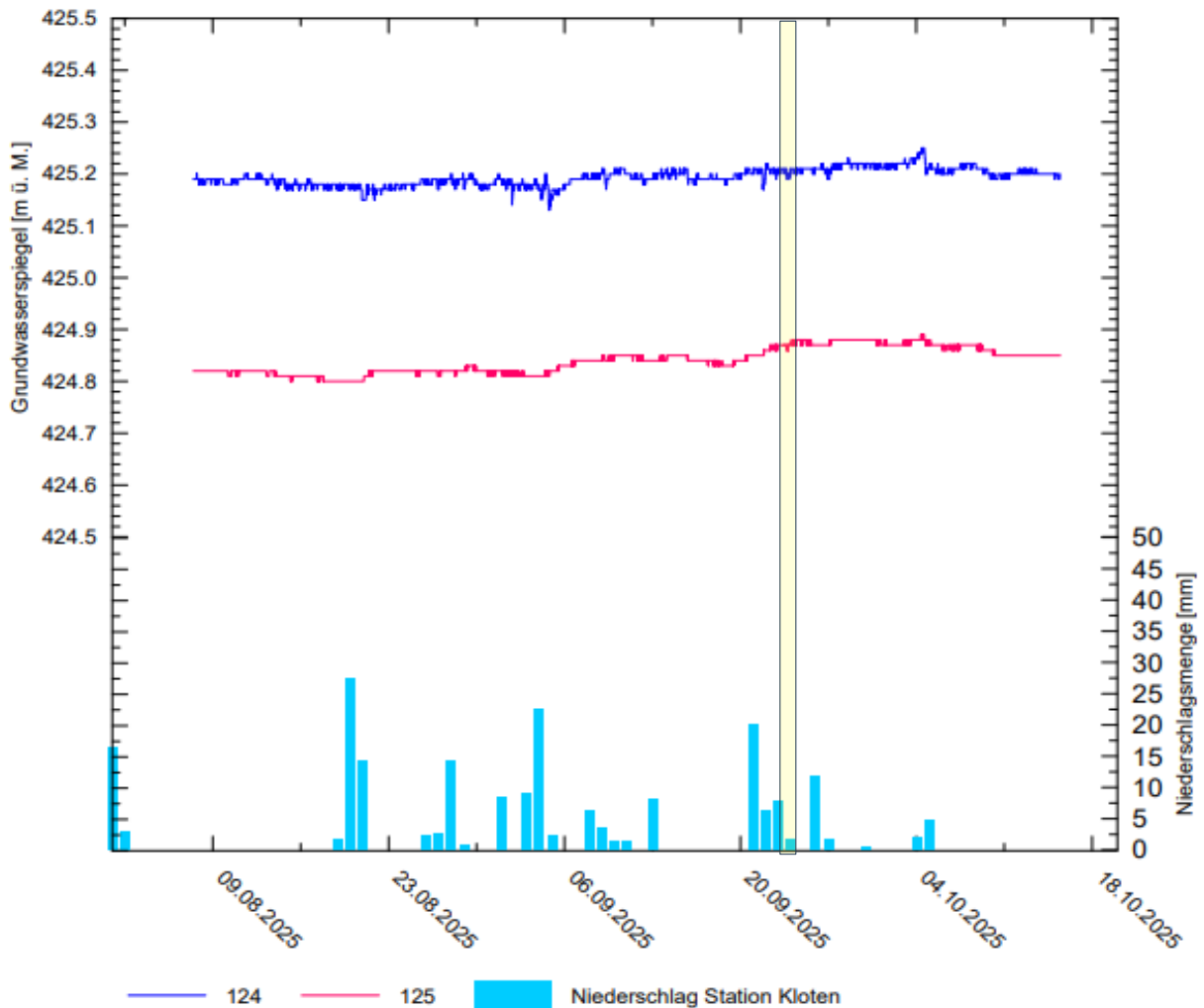


Abb. 45 Pegel in umliegenden oberflächennahen Piezobohrungen

Dargestellt sind die Wasserstände im oberflächennahen Grundwasserleiter. Während des 52 stündigen Pumpversuchs in P18-1 (gelber Balken) war im oberflächennahen Grundwasserleiter keine Druckreaktion erkennbar.

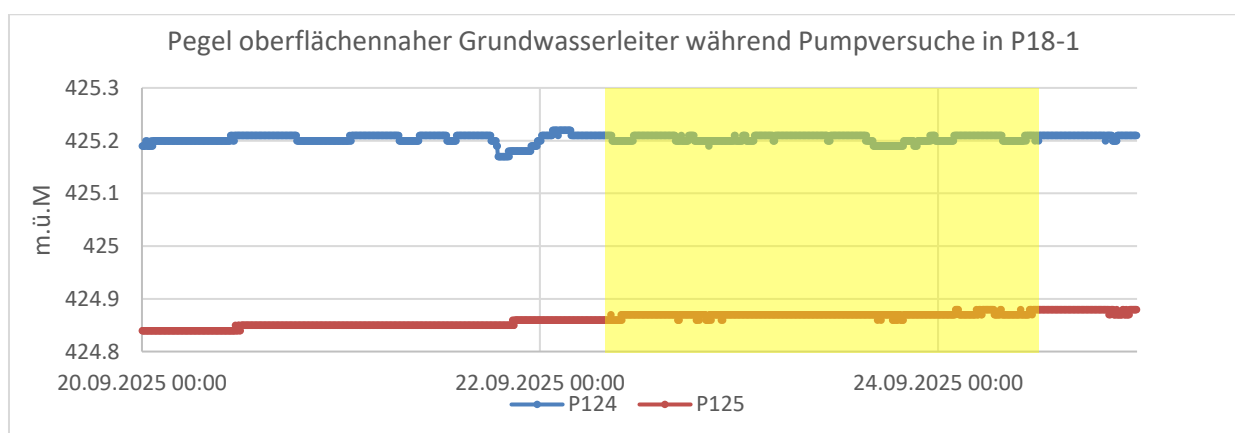


Abb. 46 Ausschnitt aus Abb. 45

In den Piezobohrungen P124 und P125 ist während des Pumpversuchs in P18-1 keine Druckreaktion erkennbar. Die gelbe Fläche markiert den Zeitraum des Pumpversuchs.

Obere Meeresmolasse (OMM)

Die Kiese auf der Rinnenbasis sind hydraulisch mit der OMM in Kontakt. Somit kann eine Druckreaktion auf der Rinnenbasis grundsätzlich auch in Nutzungen erkennbar sein, welche Grundwässer aus der OMM thermisch nutzen. In der Nähe des Flughafens bestehen zwei Bohrungen, welche die OMM nutzen, resp. genutzt haben. Dies sind die Bohrungen in Kloten und Bassersdorf. Die Bohrung in Kloten ist heute ausser Betrieb. Sie wurde vor Ort aufgesucht, aber nicht mehr aufgefunden.

Die Bohrung Bassersdorf ist im Moment ausser Betrieb (Pumpe ausgebaut) und wird demnächst wieder in Betrieb genommen. Die Anfrage ob temporär eine Pegelsonde eingebaut werden darf, wurde nicht gewährt. Wie in Kapitel 10.3 aufgezeigt, führt der Pumpbetrieb in Bassersdorf zu einer Umkehr des hydraulischen Gefälles in Richtung Bassersdorf. Die hydraulische Verbindung ist entsprechend belegt. Im Gegensatz zur Nutzung in Bassersdorf bleibt beim Flughafen Zürich die Grundwasserbilanz erhalten. Daher führt dies zu keiner hydraulischen Beeinträchtigung der Bohrung Bassersdorf. Auch thermisch kann die Bohrung in einer Entfernung von rund 5 km nicht beeinflusst werden. Die numerische Simulation über 10 Jahre zeigt, dass die thermischen Fahren auch im Betrieb von Bassersdorf kaum abfliessen, weil das hydraulische Gefälle gering bleibt. Die thermischen Fahren liegen im Bereich von 200-300 m um die Bohrungen und nicht im Kilometerbereich.

10.6 Trinkwasserpotential

Das Grundwasser aus der tiefen Rinne wäre abgesehen von der geringen Sauerstoffkonzentration und der zu hohen Temperaturen aus physikalischer und chemischer Sicht als Trinkwasser geeignet. Allerdings ist die Grundwasserneubildungsrate, wie die nachstehenden Ausführungen zeigen, für eine Nutzung zu Trinkwasserzwecken viel zu tief, als dass die tiefe Rinne zu Trinkwasserzwecken genutzt werden kann.

Beim Entsandern des Brunnens P6-1 2024 wurden rund 5800 m³ Grundwasser dem System der tiefen Rinne entzogen und oberflächlich abgeleitet. Weil sich dabei der Grundwasserleiter grossflächig um durchschnittlich 2 m abgesenkt hatte (Bis zu 2.4 m in der 800 m entfernten Sondierbohrung P1), wurde das weitere Entsanden abgebrochen und zuerst der zweite Brunnen P18-1 erstellt. Erst anschliessend konnte jeweils ein Brunnen entsandet und das anfallende Grundwasser nach Klärung dem Grundwasserleiter über den zweiten Brunnen wieder zurückgeführt werden. Damit konnte die Grundwasserbilanz vollständig aufrecht erhalten werden.

Anhand des Wiederanstiegs des Grundwasserspiegels nach dem Entsanden des P6-1 konnte die Grundwasserneubildungsrate quantifiziert werden. Der Druckspiegel des Aquifers hat sich innerhalb von einem Monat um durchschnittlich 70 % erholt, was einer Wassermenge von rund 4'000 m³ (70 % von 5'800 m³) entspricht. Folglich flossen der tiefen Rinne bei dem durch das Entsanden entstandenen Druckgefälle nur etwa 100-150 m³/Tag zu.

Damit ergibt sich auch die Erkenntnis, dass die tiefe Rinne langfristig und nachhaltig nur genutzt werden kann, wenn die Grundwasserbilanz ausgeglichen bleibt.

10.7 Fazit

Die tiefe Rinne ist als thermischer saisonaler Speicher nutzbar. Die Zirkulation zwischen zwei Brunnen hat gezeigt, dass eine hohe Förderrate von bis zu 5'000 l/min möglich ist. Realistisch ist im Dauerbetrieb mit einer Reserve eine Förderrate von 4'000 l/min. Die Aufenthaltszeit und somit das angeschlossene Reservoir ist für die Speicherung sehr gross, wie der durchgeführte Markierversuch gezeigt hat.

Die Pumpversuche haben die benötigten Werte für die Brunnenleistung und Aquiferparameter erbracht. Es konnte gezeigt werden, dass im Brunnen P6-1 eine Brunnenleistung von bis 4'800 l/min möglich ist. Bei der Bestimmung der Aquifer-Parameter konnte eine relativ gute Übereinstimmung in P1 und P6-1 erreicht werden. Insbesondere der Pumpversuch im Brunnen P6-1 zeigte einen guten zuverlässigen Fit in P6-1 und P1. Die Bohrung P1 zeigte bei beiden Pumpversuchen (in P18-1 und P6-1) zuverlässige und fast gleiche Resultate. Da sich diese Bohrung in rund 1 km zu den anderen beiden Brunnen befindet, werden dessen Resultate als durchschnittliche Werte für den Aquifer verwendet, weil über diese Distanz kleinräumige lokale Heterogenitäten wegfallen.

Das Wasser eignet sich aus physikalischer und chemischer Sicht für die thermische Nutzung. Aus chemischer Sicht ist es sehr vorteilhaft, dass Kalziumionen nur in sehr geringer Konzentration vorliegen, sowie gelöste Mangan- und Eisenionen überhaupt nicht nachweisbar sind. Das Potential für Ausfällungen ist somit gering. Da das Grundwasser nahezu sauerstofffrei ist, wird empfohlen das Brunnen- und Leitungssystem in einem geschlossenen Kreislauf zu betreiben, um Oxidationen durch Luftsauerstoff zu vermeiden.

Um das Tiefengrundwasser zu nutzen, ist eine Erhaltung der Grundwasserbilanz zwingend, wie Pumpversuche gezeigt haben. Die Neubildungsrate ist mit 100-150 m³/Tag gering.

Eine Beeinträchtigung oder Beeinflussung von anderen Grundwassernutzern im oberflächennahen Lockergestein oder thermischen Nutzungen in der OMM können aufgrund des geringen hydraulischen Gefälles, der Distanz zu den Nutzungen (im Falle der OMM) und der Erhaltung der Grundwasserbilanz ausgeschlossen werden.

11 Simulationen

11.1 Modellaufbau: Eckwerte und Randbedingungen

Das Modellgebiet ist ein 800 m × 600 m Rechteck ausgerichtet nach Nordwest mit einem Azimut von 300° (Abb. 47). Das Modell erstreckt sich auf den Koten von 151 bis 218.5 m ü.M. Alle relevanten Schichten, die die effektiv angebohrte Geologie der beiden Brunnen P6 und P18 abbilden, sind hinzugefügt. Die Schichten sind jeweils horizontal und flach. Der Querschnitt des Gitternetzes weist senkrecht zur Rinnenachse jeweils den gleichen Aufbau auf und ist symmetrisch (Abb. 47). Da sich in den Brunnen P6 und P18 unterschiedliche Schichten durchlässig zeigten (siehe Spinnerlog), ist die Verteilung der durchlässigen Schichten, bzw. deren Durchlässigkeitsbeiwerte in den Brunnen P6 und P18 unterschiedlich (Abb. 48, Abb. 49).

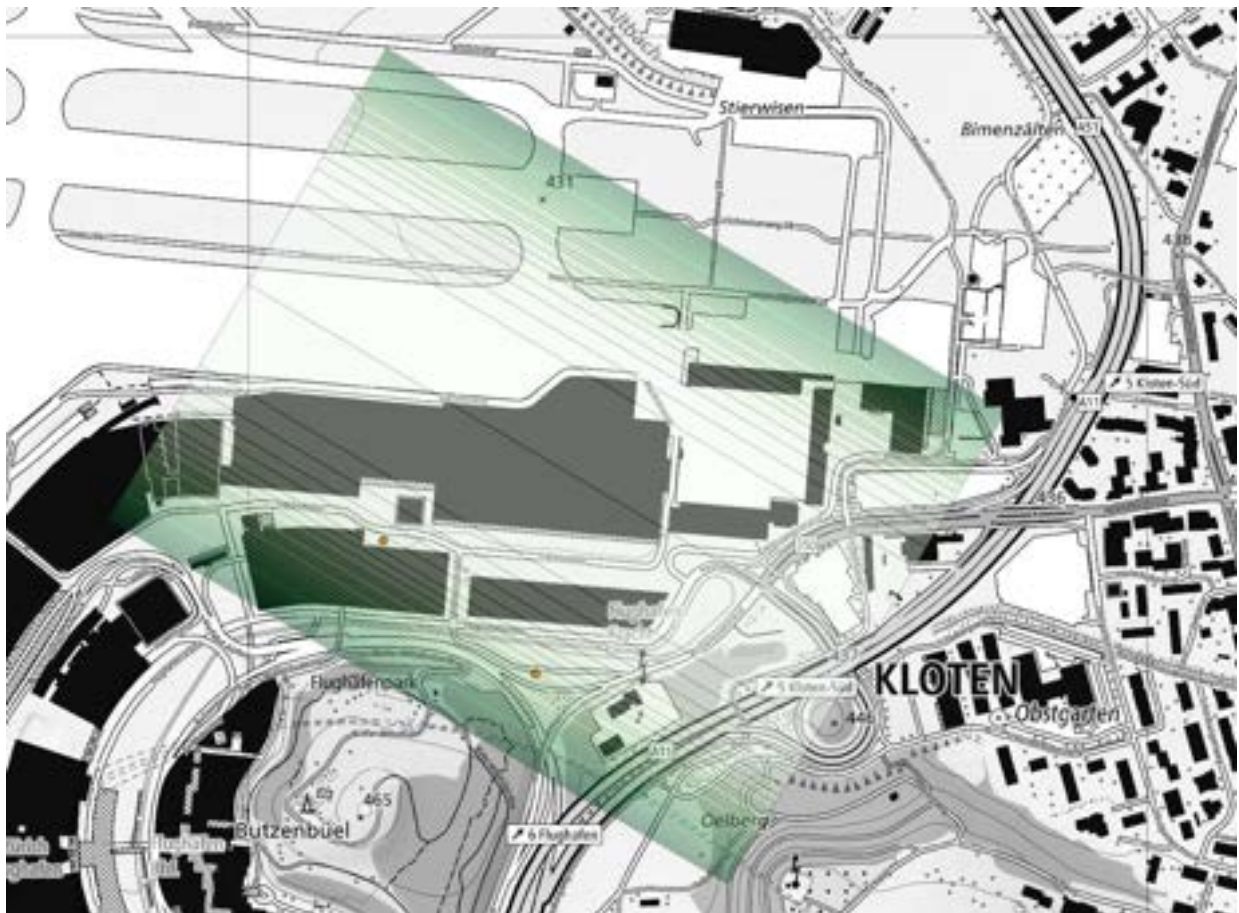


Abb. 47 Modellausschnitt in Flugperspektive. Farbe entspricht der Felsoberkante

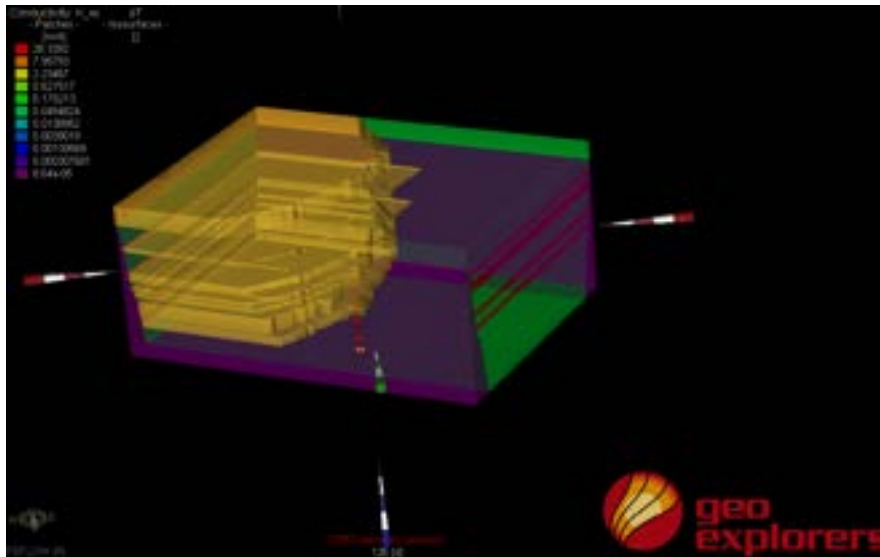


Abb. 48 In Gelb durchlässige Schichten um den P6-1

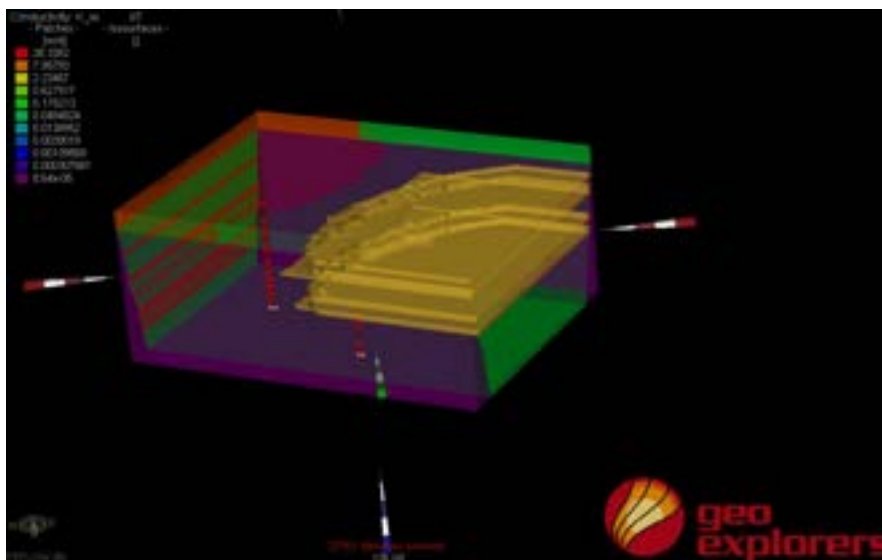


Abb. 49 In Gelb durchlässige Schichten um den P18-1

Die durchschnittliche Transmissivität im Aquifer aus der Auswertung mittels Hantush-Jacob (leaky aquifer) hat für den Brunnen P1 $4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ergeben und für den Speicherkoeffizient 7.3×10^{-4} . Aufgrund der unterschiedlichen Mächtigkeiten der durchlässigen Zonen in P6-1 und P18-1 variieren entsprechend die k-Werte (gekennzeichnet mit * in Tabelle 14). In Schicht 14 wurde eine Verbindung zwischen den durchlässigen Schichten der beiden Brunnen in das Modell integriert, um eine durchgehende Verbindung zwischen den beiden Brunnen zu gewährleisten. Die weiteren Schichten, welche in keiner der beiden Brunnen durchlässig sind, wurden als Aquitard, bez. stark siltiger Sand ins Modell übernommen. Ausserhalb der Rinne befindet sich die Obere Meeresmolasse (OMM). Eine 10m mächtige Verwitterungsschicht trennt die Rinne von der OMM. Die physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen geologischen Schichten sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14 Gesteinsparameter in den unterschiedlichen geologischen Einheiten

Einheit	Geologie	Porosität [-]	k [m/s]	Speicher- koeffizient [1/m]	Wärmeka- pazität [MJ/m³K]	Wärmeleit- fähigkeit [W/mK]
Aquitard 2	stark siltiger Sand	0.15	1.0×10^{-6}	1.3×10^{-6}	2.0	1.8
Aquifer P6	Sandiger Kies	0.18	*	*	2.3	1.7
Aquifer P18	Sandiger Kies	0.18	*	*	2.3	1.7
Verwitterte OMM	Sand-/Tonstein Wechsel	0.1	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-6}	2.1	2.5
OMM	Sand-/Tonstein Wechsel	0.1	1.0×10^{-9}	1.3×10^{-6}	2.1	2.7

Es wird vermutet, dass das anfänglich in den ersten Sondierbohrungen gemessene hydraulische Gefälle durch den Pumpbetrieb in der OMM-Bohrung in Bassersdorf verursacht wurde. Nach Ausbau der Pumpe in Bassersdorf war zwischen den unterschiedlichen Brunnen auf dem Flughafengelände praktisch kein hydraulisches Gefälle mehr messbar. Der Ausgangspegel im Modell wurde daher bei 400 m ü.M.; in der Rinne seitlich (SO und NW) fixiert ohne hydraulisches Gefälle. Die Ausgangstemperatur beträgt im ganzen Modell 20 °C und wurde an sämtlichen Modellrändern fixiert.

Im Endausbau benötigt der Flughafen einen saisonalen Speicher, welcher fähig ist eine Energiemenge von 25.7 GWh/a ein- und auszulagern. Die aktuelle Planung ist darauf ausgelegt, dass dafür 4 Dubletten, d.h. insgesamt 8 Brunnen reichen. Die durchgeführten Grundwasser-Simulationen decken mit den beiden erstellten Brunnen eine Energiemenge von rund 6.4 GWh ab, welche jährlich ein- und ausgelagert werden kann. Dies entspricht einem Viertel der im Endausbau benötigten Energiemenge.

Das Lastprofil wurde von E-Axiom GmbH als Stundenwerte aus den vom Flughafen Zürich erhaltenen Daten für das Jahr 2023 zur Verfügung gestellt (Abb. 50). Es handelt sich hierbei um die benötigten Pumpraten bei einer variierenden Temperaturspreizung zwischen 10 und 13 K um die Energiemenge von 6.4 GWh pro Saison für den Kühl- und Heizbetrieb zu erreichen. Die Förderrate wurde auf Wochen gemittelt, wobei Heiz- und Kühlbedarf energetisch verrechnet wurden. Die Temperaturspreizung ändert je nach Jahreszeit. Im Heizbetrieb wird aus dem warmen Brunnen in den kalten Brunnen gepumpt und im Kühlbetrieb umgekehrt.

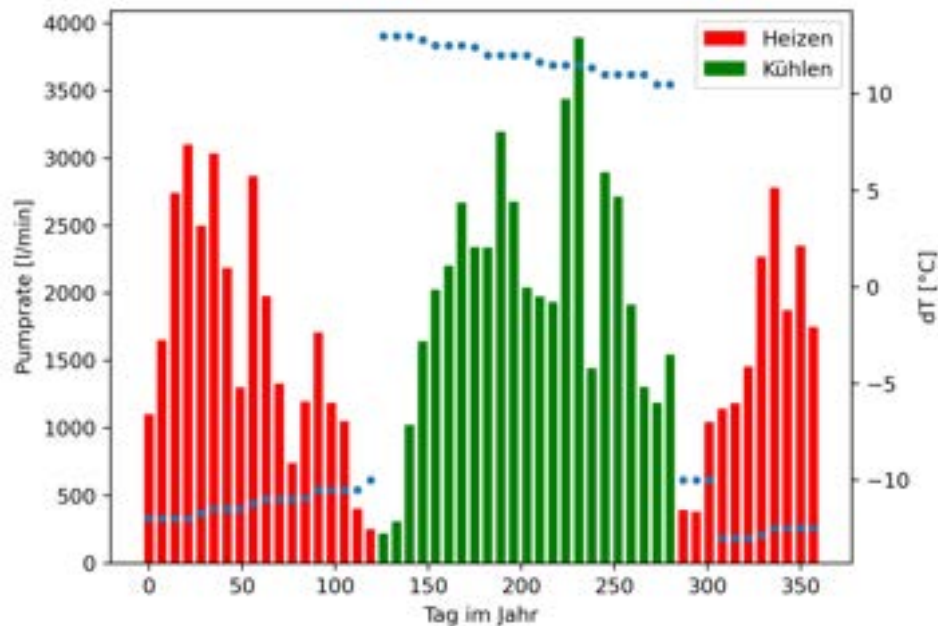


Abb. 50 Für die Simulation verwendetes Lastprofil für eine Dublette

Das Lastprofil für eine Dublette entspricht einem Viertel der Endausbauenergie (Quelle: E-Axiom). Die blauen Punkte beschreiben die Temperaturspreizung auf der rechten Achse, die Balken die Pumprate im Heizbetrieb (rot) und Kühlbetrieb (grün).

11.2 Szenarien

Um die Sensitivität und somit die Bandbreite der numerischen Simulation zu testen, wurden eine Vielzahl an Simulationen durchgeführt und dabei die Bandbreite von mehreren Parametern getestet. Es hat sich gezeigt, dass primär die Mächtigkeit der durchlässigen Zonen den grössten Einfluss auf die Modellresultate hat. Abgebildet werden nachfolgend nur drei Szenarien, wobei auf die unterschiedliche Mächtigkeit der durchlässigen Schichten als dominanter Parameter fokussiert wurde. Die weiteren getesteten Parameter werden im Kapitel 11.4 diskutiert.

1. Best-case, in welchem der gesamte untere kiesige Teil der Rinne als durchlässig betrachtet wurde, d.h. eine durchlässige Lage von 54 m.
2. Worst-case: Reduzierte Schichtmächtigkeit auf die durchlässigsten Schichten gemäss Spinnerlog (P6-1: 30 m; P18-1: 11.5 m)
3. Plausibler Fall: Plausible Schichtmächtigkeit aufgrund geologischem Befund und geophysikalischer Logs (P6-1: 46 m; P18-1: 34 m)

Im ersten Modelljahr wird der Kühlbetrieb mit 75 % der Kühlenergiemenge bezogen auf ein ¼ des Endausbaus gestartet, um das Grundwasser initial nicht zu stark zu erwärmen, danach unter Volllast. Dargestellt werden die Simulationsergebnisse im 10. Betriebsjahr. Der Brunnen P6-1 wird dabei als warmer Brunnen genutzt und der P18-1 als kalter Brunnen, das bedeutet, dass anfangs jeder Saison die Fliessrichtung im System umgedreht wird. Der Förderbrunnen wird zum Rückgabebrunnen und umgekehrt.

11.3 Resultate

Bei den Resultaten sind vor allen die Parameter Transmissivität und thermische Ausbreitung von Bedeutung. Mit der Prüfung der Transmissivität soll sichergestellt werden, dass die simulierte Absenkung in den Pumpbrunnen mit der in der Realität, während der Pumpversuche gemessenen Absenkungen übereinstimmt. Damit kann das Modell plausibilisiert werden. Anhand der thermischen Ausbreitung soll aufgezeigt werden, ob während einer Saison ein thermischer Kurzschluss vorliegt und ob die 3K-Regel eingehalten werden kann.

Transmissivität

Die in der Bohrung P1 mittels Pumpversuchen bestimmte Transmissivität passt mit den in der Simulationen berechneten Absenkungen gut überein. Gemäss der gemessenen Brunnenleistung in P6-1 und P18-1 (Abb. 47) wird bei einer Förderrate von 3'200 l/min (Maximum im Heizbetrieb) eine Absenkung, resp. Aufstau von 16-18 m erwartet, bei 3'900 l/min (Maximum Kühlbetrieb) rund 19-21 m. Dies stimmt mit den simulierten Wochenwerten in der Abb. 51 überein.

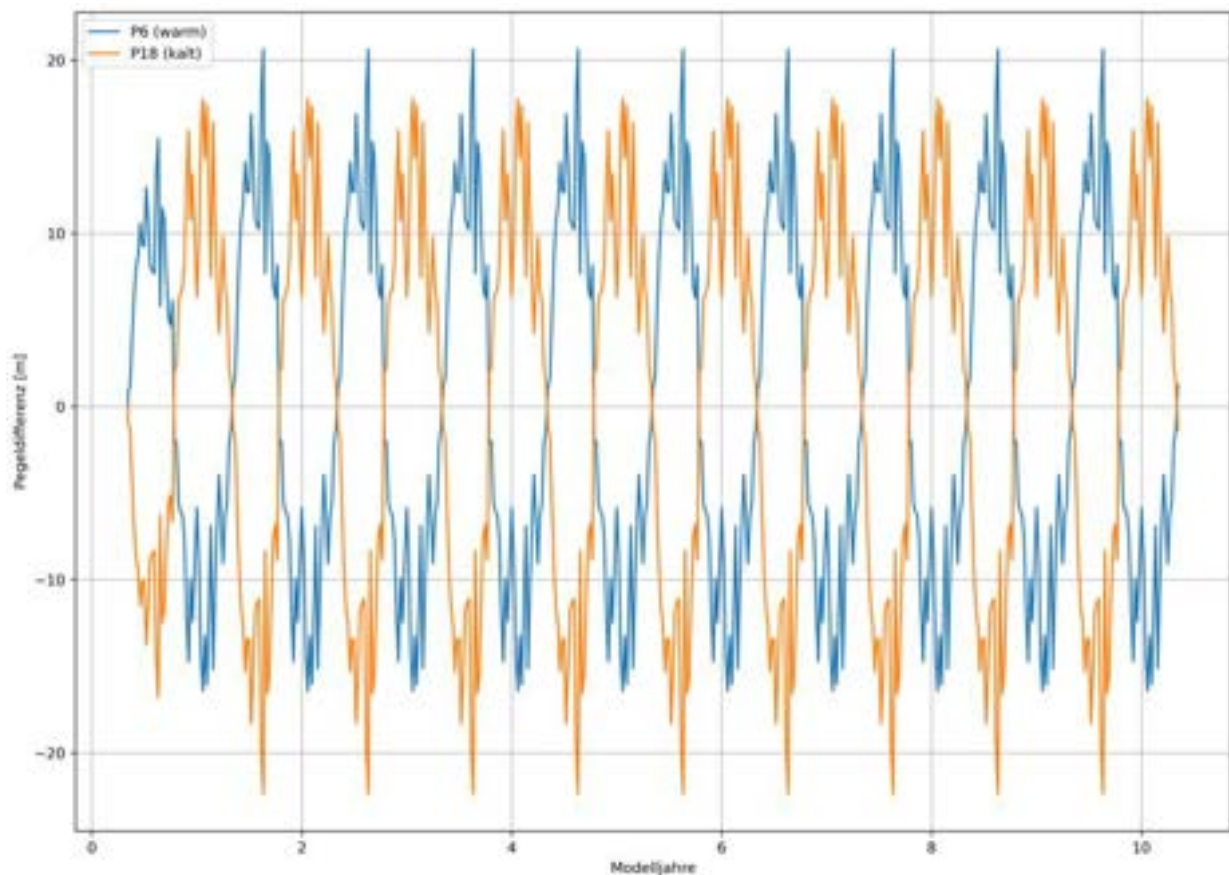


Abb. 51 Grundwasserabsenkung und -aufstau in Brunnen P6-1 und P18-1
im Heiz- und Kühlbetrieb während 10 Jahren

Thermische Ausbreitung

Die Ausbreitung der thermischen Fahnen ist in der Abb. 52 ersichtlich. Aufgrund des nicht vorhandenen hydraulischen Gefälles breiten sich die thermischen Fahnen radial um die Brunnen aus, aufgrund der Zirkulation mit einer gewissen Fliesstendenz zum anderen Brunnen hin. Ein signifikanter thermischer Kurzschluss ist gemäss Simulation nicht vorhanden und entspricht den Erkenntnissen aus dem Tracertest. Die Brunnen der Dublette haben einen Abstand von rund 200 m zueinander. Mittig in je 100 m Abstand zu den Brunnen wurde ein fiktiver Beobachtungsbrunnen simuliert. In diesem wird im Aquifer auf verschiedenen Tiefenlagen die modellierte Temperatur gemessen. Diese Temperaturkurven sind für die verschiedenen Modelle in Abb. 53, Abb. 54 und Abb. 55 dargestellt.

Die thermischen Verluste der saisonalen Speicherung sind beim Aufladungsprozess gering, weil kaum ein hydraulisches Gefälle vorliegt. Um die Brunnen bilden sich konzentrische Wärme-, resp. Kälteinseln, welche kaum abströmen.

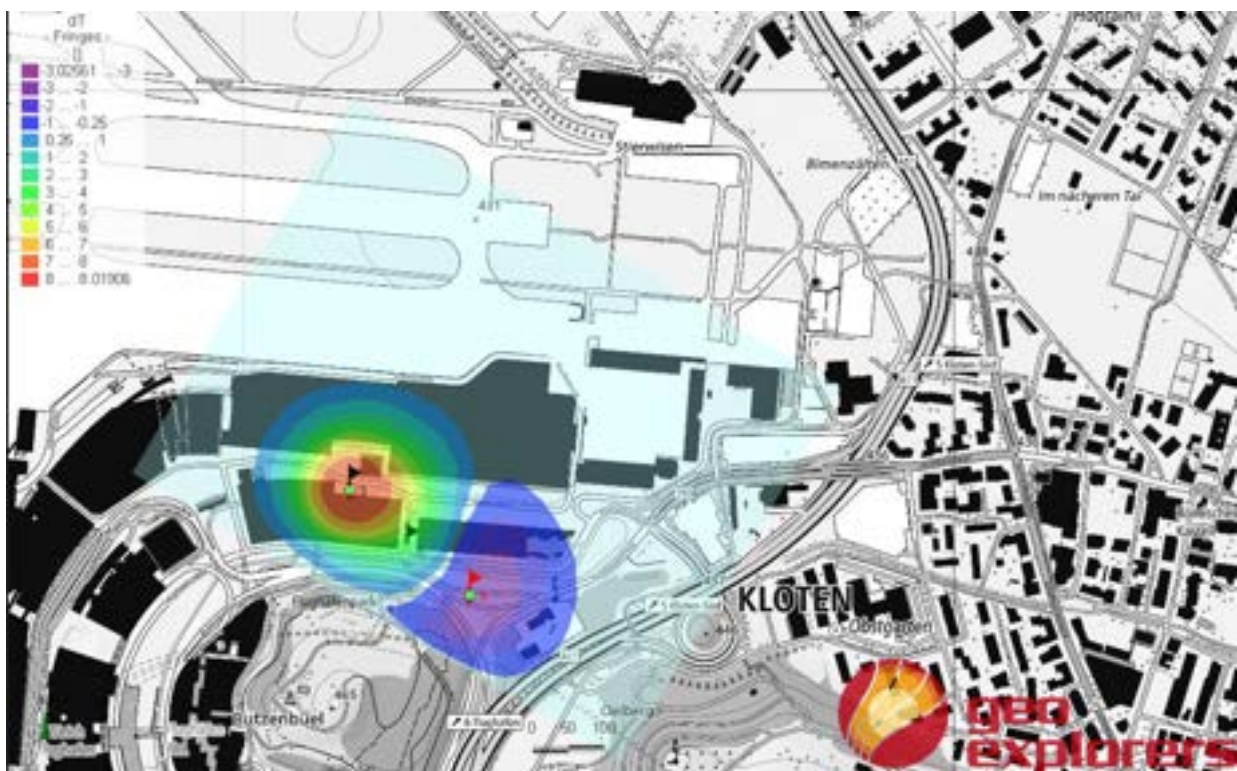


Abb. 52 Maximale Ausdehnung der Wärmefahne

Ausdehnung am Ende der Kühlperiode für den plausiblen Fall. Ein thermischer Kurzschluss findet nicht statt. Die Beobachtungsbohrung (graue Fahne) in der Mitte zwischen den beiden Brunnen (rote Fahne = P18-1, schwarze Fahne = P6-1) in jeweils 100 m Abstand zu diesen Brunnen hält die 3K-Regel ein.

In Abb. 53 sind die Abweichungen der Aquifertemperatur von der Ursprungstemperatur (ca. 20°C) im Kühl- und Heizbetrieb während 10 Jahren in den beiden genutzten Brunnen P6-1 (blaue Kurve) und P18-1 (orange Kurve) dargestellt, sowie in einer fiktiven Beobachtungsbohrung (rote und schwarze Kurve) in 100 m Entfernung zu den beiden Brunnen. Die Beobachtungsbohrung ist entscheidend, um die Einhaltung der 3K-Regel zu beurteilen. Die Beobachtungsbohrung selbst hat rund 40 fiktive Temperatursensoren auf unterschiedlichen Tiefenstockwerken. Diese sind als schwarze Kurven dargestellt. Der Mittelwert über alle diese schwarzen

Kurven wird in der roten Kurve dargestellt. Die Temperaturvariation in den verschiedenen Schichten in 100 m Entfernung für die 3 Modelle ist zudem in Abb. 56 abgebildet.

Die Aquifertemperaturen um die beiden genutzten Brunnen P6-1 und P18-1 zeigen, dass sie sich nach rund 8 Jahren eingependelt haben. Die thermischen Verluste sind ab diesem Zeitpunkt gering, aber auch das Gesteinsvolumen hat bezüglich der Temperatur ein neues Gleichgewicht erreicht. Ein stabiles Gleichgewicht kann somit erreicht werden. Gleiches gilt auch in 100 m Entfernung. Während zu Beginn des Betriebs aufgrund der Pufferwirkung des Gesteins, sowie aufgrund der thermischen Verluste nach aussen hin die Amplitude zwischen Heiz- und Kühlbetrieb noch gering ist, wird sie mit den Betriebsjahren kontinuierlich grösser und erreicht ebenfalls nach rund 8 Jahren den Gleichgewichtszustand. In diesem Temperaturverlauf wird der Best-Case abgebildet, die 3K-Regel kann im Heiz- und Kühlbetrieb immer eingehalten werden.

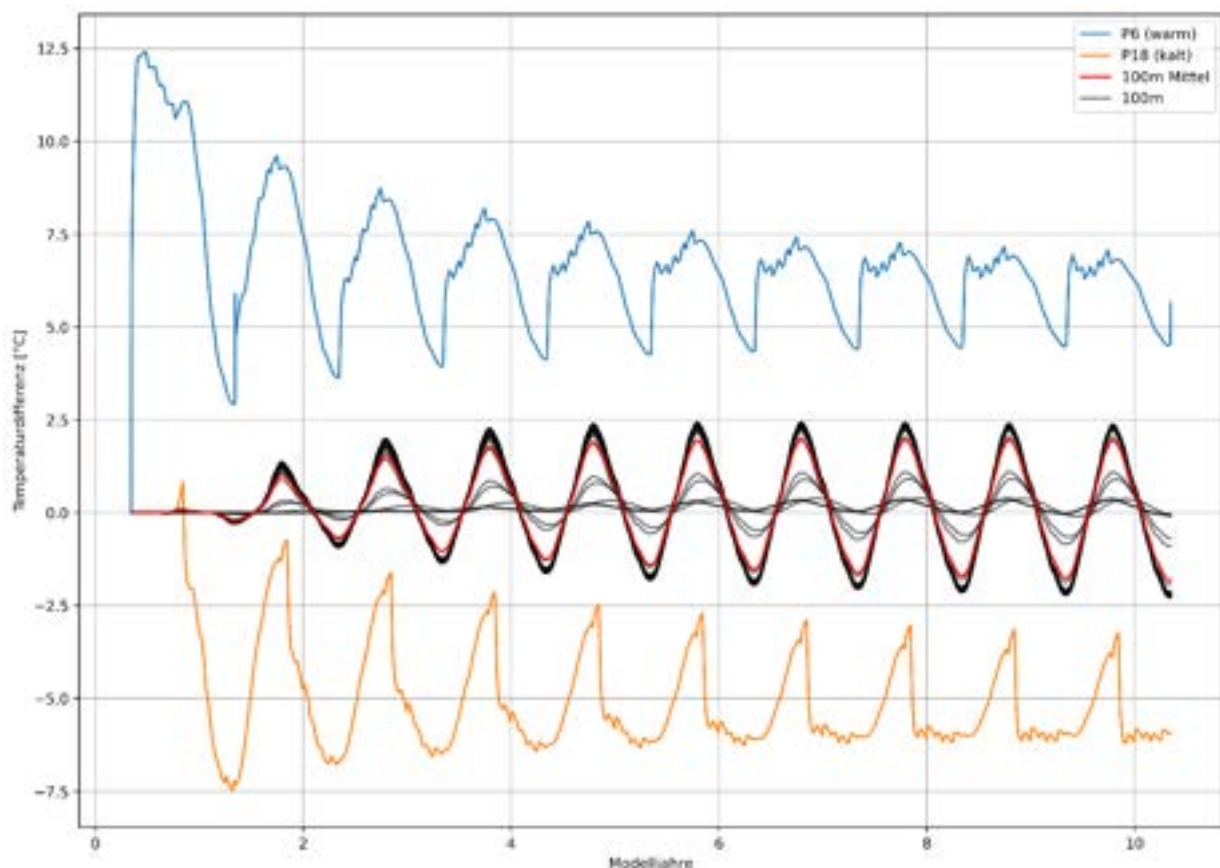


Abb. 53 Aquifertemperaturen im Best-Case während den ersten 10 Betriebsjahren

Die Entwicklung der Aquifertemperaturen, falls die kiesigen Lagen nur auf einer geringen Mächtigkeit durchlässig sind, wird im Worst-Case-Szenario aufgezeigt (Abb. 54). Das Gleichgewicht wird ebenfalls nach rund 8 Jahren erreicht und auch ein thermischer Kurzschluss findet nicht statt. Die 3K-Regel wird im Mittel über den kiesigen Teil der Rinne eingehalten, jedoch für einzelne gut durchlässige Lagen gilt dies nicht. Diese einzelnen Lagen erreichen im Maximum 4.6 K Abweichung von der Ausgangstemperatur und halten somit die derzeit gültige gesetzliche Vorgabe nicht ganz ein.

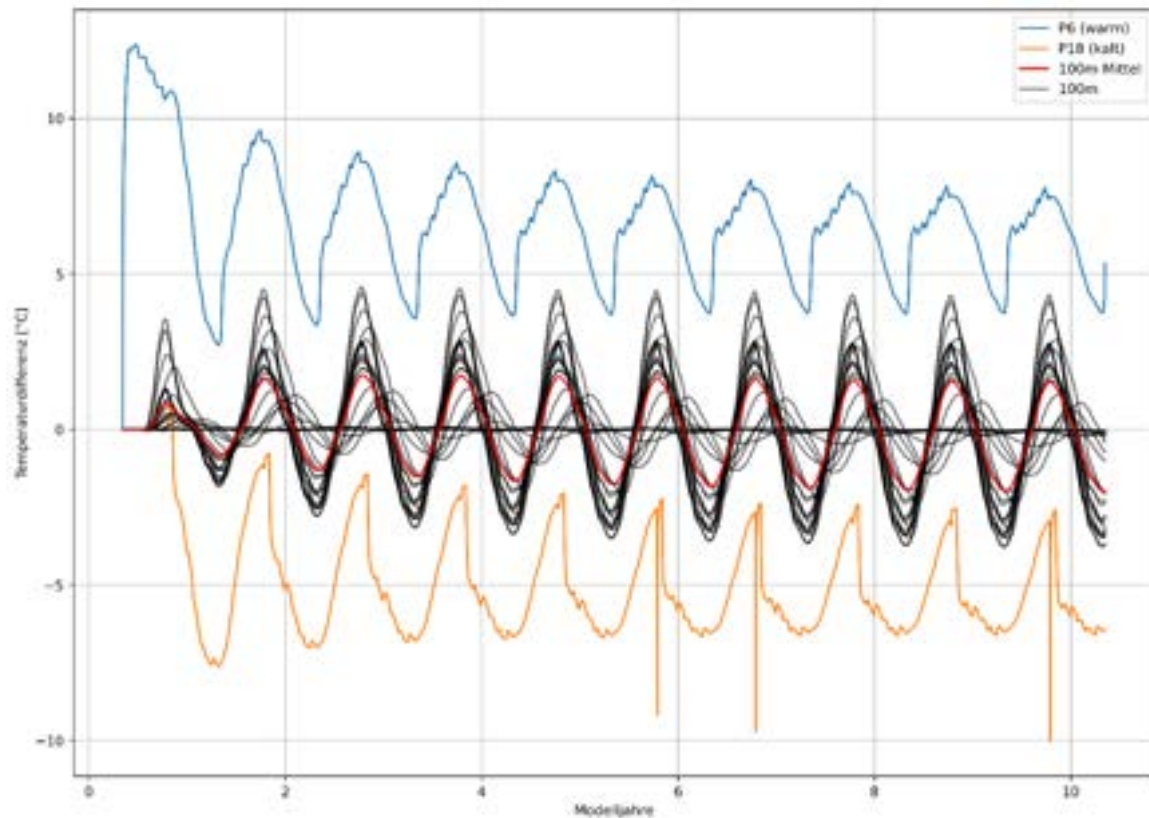


Abb. 54 Aquifertemperaturen im Worst-Case während den ersten 10 Betriebsjahren

Die Aquifertemperaturentwicklung im plausiblen Fall (Abb. 55) zeigt, wie die vorhergehenden Simulationen einen Gleichgewichtszustand ab ca. 8 Jahren und auch keinen saisonalen thermischen Kurzschluss. Die 3K-Regel kann nahezu von allen Schichten eingehalten werden. Im Kühlbetrieb kann sie in allen durchlässigen Schichten eingehalten werden, im Heizbetrieb, wenn der Aquifer abgekühlt wird, gibt es einzelne Lagen, welche die 3K geringfügig und kurzfristig um maximal 0.4 K unterschreiten. Im Mittel wird die 3K-Regel aber deutlich eingehalten. Siehe dazu auch Kapitel 11.4.

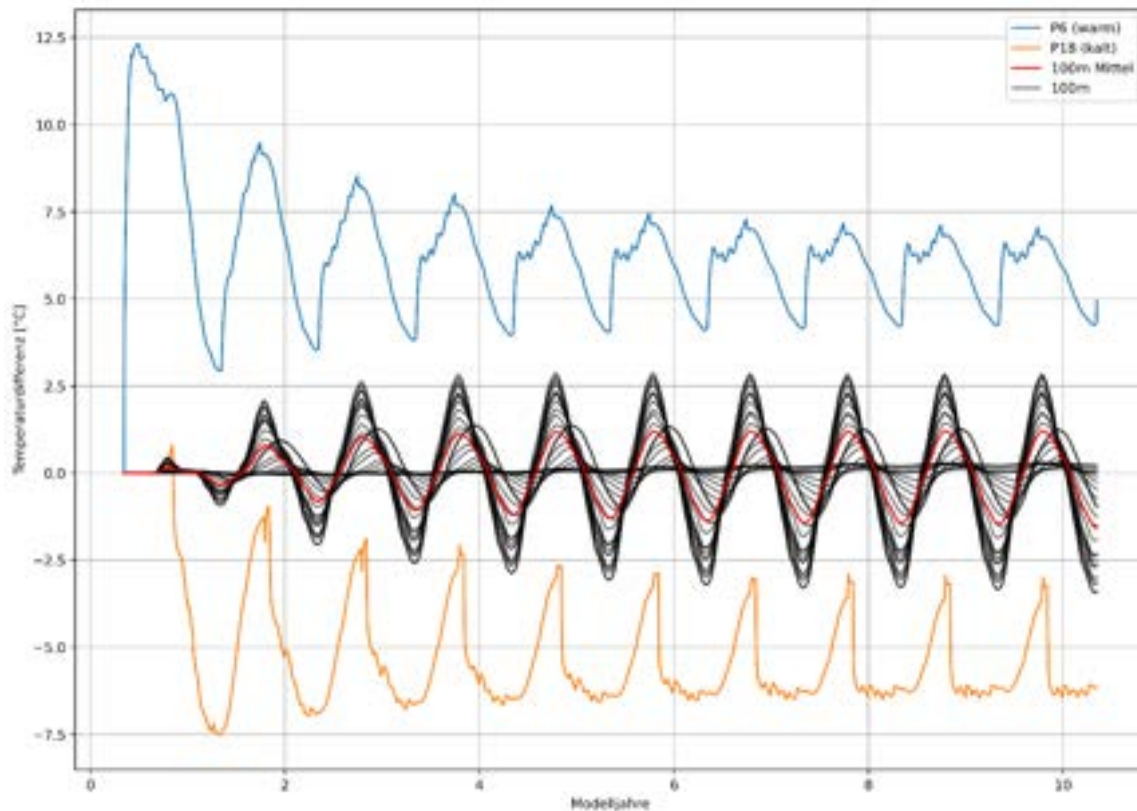


Abb. 55 Aquifertemperaturen plausibler Fall während den ersten 10 Betriebsjahren

Die wichtigsten Resultate der Simulationen bezüglich Absenkung und Entwicklung der Aquifertemperatur sind in der Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15 Zusammenfassung der wichtigsten Resultate

		Modell		
		Best	plausibel	Worst
Max. Aufstau [m]	In P6-1	20.1	20.6	27.1
	In P18-1	15.7	17.8	17.9
Max. Absenkung [m]	In P6-1	16.1	14.4	21.6
	In P18-1	19.8	22.4	22.5
max dT [°C] in 100m Entfernung	gemittelt	2	1.2	1.8
min dT [°C] in 100m Entfernung	gemittelt	-1.8	-1.5	-2
max dT [°C] in 100m Entfernung	abs. max.	2.4	2.9	4.6
min dT [°C] in 100m Entfernung	abs. min.	-2.3	-3.4	-3.78

11.4 Diskussion

Es wurde eine Vielzahl von Simulationen durchgeführt, um die Sensibilität verschiedenster Parameter zu testen. Die wichtigsten Parameter bei einem Grundwassermodell sind dabei das hydraulische Gefälle, die Transmissivität, die Porosität und die Pumprate, resp. die Temperaturspreizung und die Mächtigkeit der durchlässigen Schichten.

Das **hydraulische Gefälle** ist äusserst gering. Ohne Pumpbetrieb in Bassersdorf ist es praktisch Null, während des Pumpbetriebs in Bassersdorf sehr gering. Deshalb gibt es in beiden Fällen nur Wärme- und Kälteinseln und keine thermischen Fahnen.

Unterschiedliche **Transmissivitäten** hatten einen gewissen Einfluss, aber nur einen geringen. Eine Verdoppelung oder eine Halbierung hatte einen relativ geringen Effekt auf die thermische Ausbreitung. Es wurde schliesslich die Transmissivität von $4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ verwendet, welche beim Pumpversuch in der P1 berechnet wurde und als durchschnittliche Transmissivität im heterogenen Grundwasserleiter verstanden wird. Diese Transmissivität bildet auch die effektiv gemessene Absenkung in den Pumpbrunnen am besten ab.

Die effektive **Porosität** hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ausbreitung der thermischen Fahnen, weil auch das Gestein als Wärmepuffer dient und nicht nur das Grundwasser.

Die **Temperaturspreizung** am Brunnenkopf wurde bei einigen Simulationen um zusätzlich 4 K erhöht, was die Pumprate reduzierte. Der Energieeintrag, resp. -entzug blieb hingegen derselbe. Die Annahme, dass eine höhere Temperaturspreizung die Wärme-, resp. die Kälteinseln um die Brunnen konzentrierte halten, wurde nicht bestätigt. Auf die Aquifertemperaturen in 100 m Entfernung hatte eine Änderung der Temperaturspreizung nur einen geringen Einfluss.

Die Mächtigkeit der **durchlässigen Schichten** hatte den grössten Einfluss, weshalb in den vorhergehenden Kapiteln die Bandbreite dieses Parameters aufgezeigt wurde. Die Energie wird entweder auf ein kleines oder grosses Volumen verteilt / eingespeichert und entsprechend hat dies einen Einfluss auf die Temperaturänderung in diesen und angrenzenden Schichten. Gleichzeitig ist dies der Parameter, welcher auf Grund der Inhomogenität der basalen Rinnenfüllung am schwierigsten zu bestimmen bzw. im Modell abzubilden ist.

Die gesetzlichen Vorgaben können eingehalten werden, wobei es aufgrund der Aquiferheterogenität eine gewisse Modellungenauigkeit gibt. Aus diesem Grund wurden Best- und Worst-case-Simulationen durchgeführt, welche zwar die Modellgenauigkeit nicht verbessern, aber abschätzen lassen, in welcher Bandbreite sich die Aquifertemperaturen während der Nutzung bewegen (siehe Tabelle 15 und Abb. 56). Im **Best-Case Modell** kann die **3K-Regel im Heizbetrieb und im Kühlbetrieb sicher eingehalten** werden. Im **Worstcase-Modell** wird **in einzelnen durchlässigen Schichten die 3K-Regel geringfügig nur temporär am Ende der jeweiligen Saison überschritten**, wohlgedenkt für die dem Modell zu Grunde gelegte Bewirtschaftung, welche aber im Betrieb jederzeit so eingestellt werden kann, dass in jedem Fall die 3K-Regel eingehalten werden kann. **Im Durchschnitt wird die 3 K über den Aquifer allerdings ebenfalls klar eingehalten.** Die geringen Variationen der gemittelten Temperatur zwischen best und worst-case in Tabelle 15 können darauf zurück geführt werden, dass über alle Schichten hinweg, also kühle wie warme Schichten gemittelt wird. Die Wahrheit liegt dazwischen, weshalb mit dem **plausiblen Szenario** eine weitere Simulation durchgeführt wurde. **Diese hält die 3 K über den gesamten Aquifer ebenfalls ein.** Es werden im Kühlbetrieb keine Schichten über 3 K erwärmt. Im Heizbetrieb werden wenige Schichten etwas mehr als die 3K kurzfristig und geringfügig um max. 0.4 K überschritten (siehe Tabelle 15 und Abb. 56). Aufgrund der Heterogenität im Aquifer, welche nur bedingt im Modell abgebildet werden kann, liegt dieser Wert innerhalb der Modellgenauigkeit, da nicht klar ist, ob die durchlässigen Schichten um die Bohrungen überhaupt eine Reichweite von 100 m haben und nicht dazwischen eine hydraulische Barriere liegt. Die angetroffenen lithologischen Variationen zwischen allen Bohrungen bestätigen, dass nicht

davon auszugehen ist, dass wie im Modell abgebildet, sehr durchlässige Schichten so weit reichen, sondern immer Reste bzw. Inseln von durchlässigen Kiesen vorliegen (= Reste von amalgamierten und anastomisierenden ursprünglichen Rinnenfüllungen, welche immer wieder teilweise erodiert wurden), wie dies auch mit dem Tracertest bestätigt wurde. Entsprechend kann daraus geschlossen werden, dass die geringe Überschreitung in wenigen Schichten in der Realität nicht vorkommen wird.

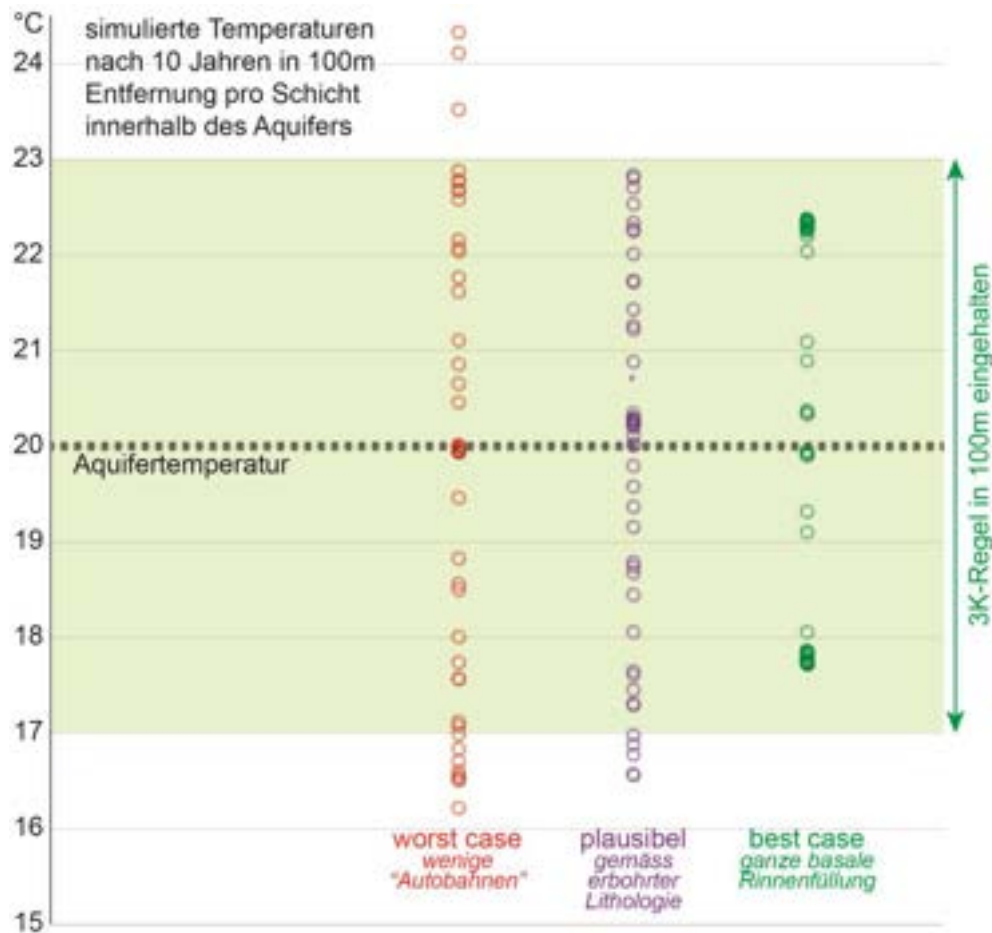


Abb. 56 Temperaturspreizung im Aquifer zwischen P6-1 und P18-1

11.5 Fazit

Die betrieblichen Rahmenbedingungen können gemäss Simulation gut eingehalten werden. Die erstellte Dublette kann ca. $\frac{1}{4}$ des Endausbaubedarfs von 25.7 GWh/a abdecken und es sind im Betrieb keine thermischen Kurzschlüsse zu erwarten. Die Brunnenleistung wird nicht vollständig ausgereizt, d.h. es besteht noch eine Reserve bei der zulässigen Grundwasserabsenkung/Aufstau in den Brunnen, welche künftig vermutlich beim Zubau von weiteren Dubletten auch benötigt wird.

Die 3K-Regel wird im Mittel über die gesamte Aquifermächtigkeit in jeder Simulation eingehalten. Einzelne Aquifer-Lagen können je nach Szenario zu einer geringen kurzfristigen Überschreitung führen.

12 Nutzungskonzept Dublette

12.1 Potential

Die Simulationen umfassen bisher eine Dublette. Die Energie, welche aus dieser Dublette entzogen wird, entspricht einem Viertel der Endausbauenergie von 25.7 GWh/a, d.h. also rund 6.4 GWh/a. Um diese Energiemenge zu erreichen, muss im Sommerbetrieb in der Kühlphase im Maximum mit 3'900 l/min gefördert werden und im Winter im Heizbetrieb eine Woche mit maximal 3'200 l/min. Bei diesen Förderraten wird die getestete max. Brunnenleistung (bis 5'000 l/min siehe Abb. 37) noch nicht ausgeschöpft, eine Reserve ist dabei noch vorhanden. Diese Reserve wird je nach Distanz der weiteren Dubletten auch benötigt. Um dies detailliert zu beurteilen, fehlen Stand heute die effektiv weiteren Brunnenstandorte. Grundsätzlich kann die Endausbauenergie mit 4 Dubletten, über insgesamt 8 Brunnen, ein- und ausgelagert werden. Wie nah zueinander die Dubletten erstellt werden können, ist zu modellieren, wird aber auch die Betriebserfahrung der bereits erstellen Dublette zeigen. Grundsätzlich liegt unterhalb des Flughafengeländes ein riesiges Aquifervolumen und Speicherpotential vor, welches den Bedarf bei Weitem übersteigt. Die Simulation zeigt, dass sich eine Dublette, welche im Aquifer einen thermischen Einflussbereich von rund 400 x 200 m (Abb. 52) hat, unterhalb des Flughafengeländes x-fach duplizieren lässt, vorausgesetzt die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse sind ähnlich wie bei der vorliegenden Dublette.

12.2 Energiemodellierung für ATES-Wärmespeicher und Betriebskonzept

Die vorliegenden Berechnungen zeigen die energetische Entwicklung des ATES-Wärmespeichers (Aquifer Thermal Energy Storage) in der Rinne unter dem Flughafen Zürich über drei Projektphasen: **Phase 1**, **Phase 2** und **Endausbau**. Ziel ist die saisonale Speicherung von Abwärme der Gebäudekühlung im Grundwasser, damit diese in der Heizperiode als Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt werden kann. Dies damit die Wärme- und Kälteproduktion nachhaltig auf eine dekarbonisierte Lösung umgebaut werden kann.

Systemprinzip und Betriebsweise (*angegebenen Werte in Erarbeitung, deshalb mit Variationsbreite*)

Das ATES-System nutzt zwei Grundwasserbrunnen: ein **kaltes Reservoir** (Einlagerung bei ca. 11-13 °C) und ein **warmes Reservoir** (Einlagerung bei ca. 28-30 °C). Die Betriebsweise folgt einem saisonalen Muster: **Heizen** in den Wintermonaten (Januar–April, November–Dezember) und **Kühlen** im Sommer (Mai–Oktober). Die Temperaturdifferenz zwischen Entnahme und Rückgabe beträgt modellhaft zwischen 13.5-16 K. Diese Betriebsparameter können im Betrieb jederzeit angepasst werden. Ziel muss sein, die Temperaturspreizung unter Einhaltung der regulatorischen Vorschriften möglichst gross zu halten und dabei den Entnahmevolumenstrom variabel zu betreiben.

- **Winter (Heizbetrieb):**
Wärme wird aus dem warmen Brunnenfeld entnommen (Temperatur ca. 25.5 bis 28.0 °C) und über Wärmepumpen für die Gebäudeheizung genutzt. Das abgekühlte Wasser wird in das kalte Brunnenfeld zurückgeführt (ca. 11-13 °C).
- **Sommer (Kühlbetrieb):**
Kälte wird aus dem kalten Brunnenfeld entnommen (Temperatur ca. 12.0-14.5 °C) und entweder direkt als Freecooling-Nutzung oder als Wärmesenke der Kältemaschine zur Gebäudekühlung eingesetzt. Die erwärmte Rückgabe erfolgt mit 28-30 °C ins warme Brunnenfeld.

Die der Simulation zugrundeliegenden Rohdaten wurden von der Bauherrschaft zur Verfügung. Die Daten wurden auf einen 6h-Mittelwert geglättet. Dies unter der Annahme, dass die in der «Zentralen Mitte» installierten Wärme- und Kältespeicher kurzzeitige Leistungsspitzen und die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb in der Übergangszeit abdecken können.

Die Wärmepumpen und Kältemaschinen werden in der neuen «Zentralen Mitte» installiert. Dieses Bauprojekt wurde 2025 gestartet und läuft zeitparallel zur Erkundungsphase der Rinne und ist nicht Teil dieses Berichtes.

Die Modellierung der Energieflüsse lassen sich wie folgt zusammenfassen (*angegebenen Werte in Erarbeitung*):

	Phase 1	Phase 2	Endausbau
Heizbetrieb – max. Leistung	5.2 MW	8.0 MW	14.4 MW
Heizbetrieb – Jahresenergie	8.8 GWh	14.3 GWh	25.3 GWh
Heizbetrieb – Wasserbedarf	~0.63 Mio. m³/a	~1.03 Mio. m³/a	~1.83 Mio. m³/a
Kühlbetrieb – max. Leistung	7.5 MW	8.8 MW	17.0 MW
Kühlbetrieb – Jahresenergie	11.4 GWh	13.1 GWh	25.3 GWh
Kühlbetrieb – Wasserbedarf	~0.81 Mio. m³/a	~0.92 Mio. m³/a	~1.78 Mio. m³/a
Kühlbetrieb – max. Volumenstrom jeweils im August	9'300 l/min	11'000 l/min	21'300 l/min

Die Ausbauphasen richten sich nach dem folgenden Entwicklungsplan des Flughafens:



Für die Bewirtschaftung des saisonalen Wärmespeichers sind folgende technische Komponenten vorgesehen:

- Für die Ausbauphasen 1 und 2 werden insgesamt 6 Brunnen benötigt. Die Anordnung (Cluster- oder Dublettenlösung) wird nachfolgend mit der Standortfindung bestimmt. Möglich wäre, dass ein Cluster von Bohrungen zur Speicherung der Abwärme eingesetzt wird und das gegenüberliegende Cluster zur Einspeicherung des mit der Wärmepumpe gekühlten Wassers dient. Die Brunnen verfügen jeweils über eine Tauchpumpe und die für die bidirektionale Bewirtschaftung notwendigen Absperrarmaturen.
- Die Filteranlagen mit Absetzbecken für das mit Sand verunreinigte Wasser befinden sich in der «Zentralen Mitte» (Abb. 57).
- Die Verbindungsleitungen zwischen den Brunnen und der Zentrale werden als Druckleitung (mindestens PN10) ausgeführt. Als Werkstoff kommt entweder ein niederlegierter rostfreier Stahl (z.B. 1.4301) oder Kunststoff (z.B. HD-PE) zum Einsatz.
- Zur Messung der eingespeicherten Wärmeenergie und späteren Nachjustierung des hydrogeologischen Modells muss mindestens für jedes Brunnenfeld eine Wärmemengenmessung eingebaut werden. Idealerweise wird jeder Brunnen einzeln mit einer bidirektionalen Durchflussmessung überwacht.

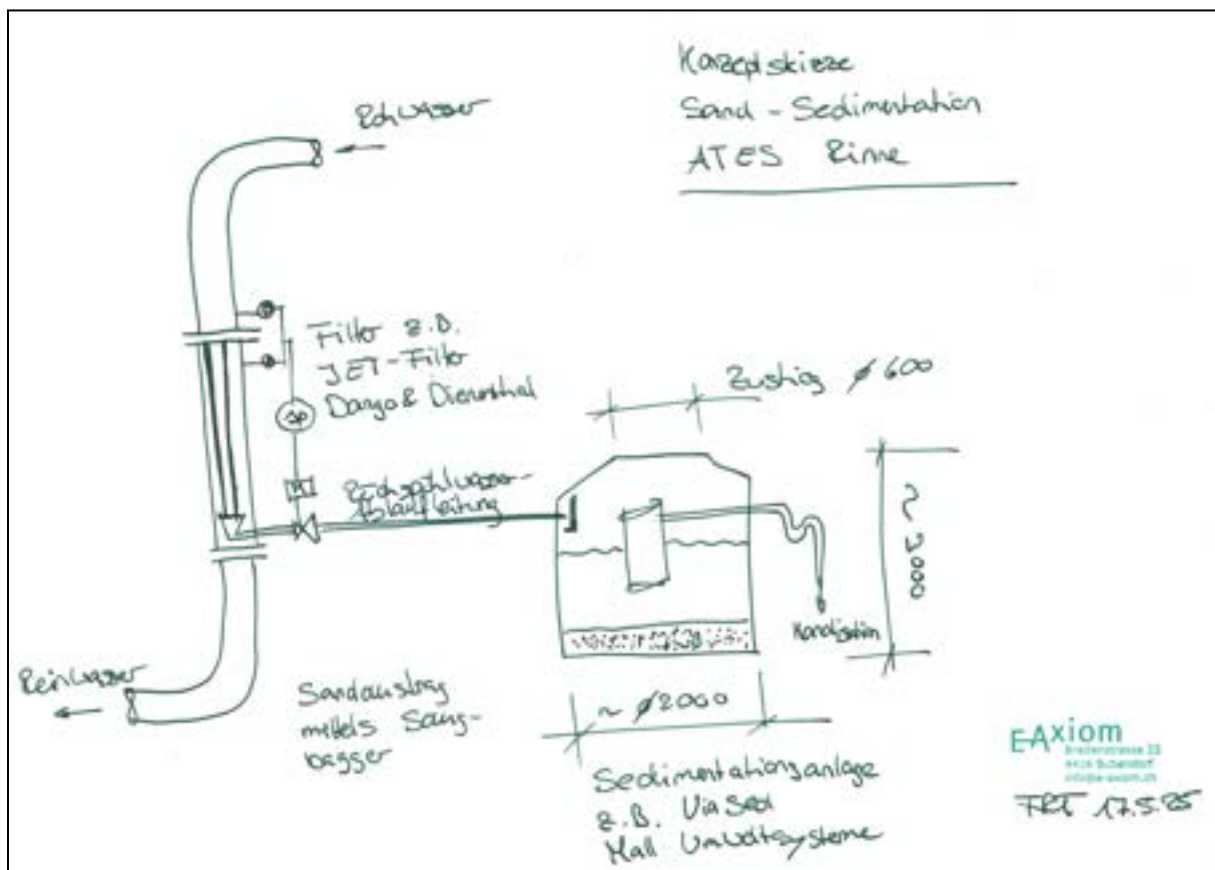


Abb. 57 Konzeptskizze Filteranlage

13 Nutzungskonzept Clusterlösung und Monitoring

13.1 Brunnenstandorte

Derzeit werden iterativ mit Simulationen weitere Bohrstandorte für die nächsten Brunnen gesucht und evaluiert. In einem ersten Schritt sollen total 6 Brunnen (inklusive der bestehenden Dublette) erstellt werden. Damit kann die Ausbauphase 2 bedient werden. Zwar hätte es auf dem Flughafen Areal reichlich freie Flächen, aber diese sind häufig durch Nutzungen (Stellflächen für Flugzeuge, Frachtabfertigung, notwendige Parkplätze usw.) eingeschränkt. Des Weiteren bestehen Einschränkungen, wie z.B. die Masthöhe der Bohranlage. Da die Bohranlage mehrere Monate steht, handelt es sich nicht nur um eine kurzfristige Baustelle. Auf der Karte in Abb. 58 sind die derzeit vorgesehenen Brunnenstandorte abgebildet. Die zusätzlichen liegen in bzw. näher in der Rinnenmitte als die bestehende Dublette. Mit den ersten Simulationen konnte gezeigt werden, dass es minimale Abstände zwischen den Brunnen braucht. Diese werden mit der vorgesehenen Anordnung eingehalten.

Derzeit laufen die Simulationen, welche Bewirtschaftung am geeignetsten ist. Dies können z.B. 3 Dubletten oder 2 Cluster mit je 3 warmen und kalten Brunnen sein (Bsp. Abb. 59). Die ersten Ergebnisse zeigen, dass mit den 6 Brunnen die 3K-Regel eingehalten werden kann und dass die vorgesehene Energie der Phase 2 eingespeichert bzw. entnommen werden kann.



Abb. 58 Vorgesehene weitere Brunnenstandorte

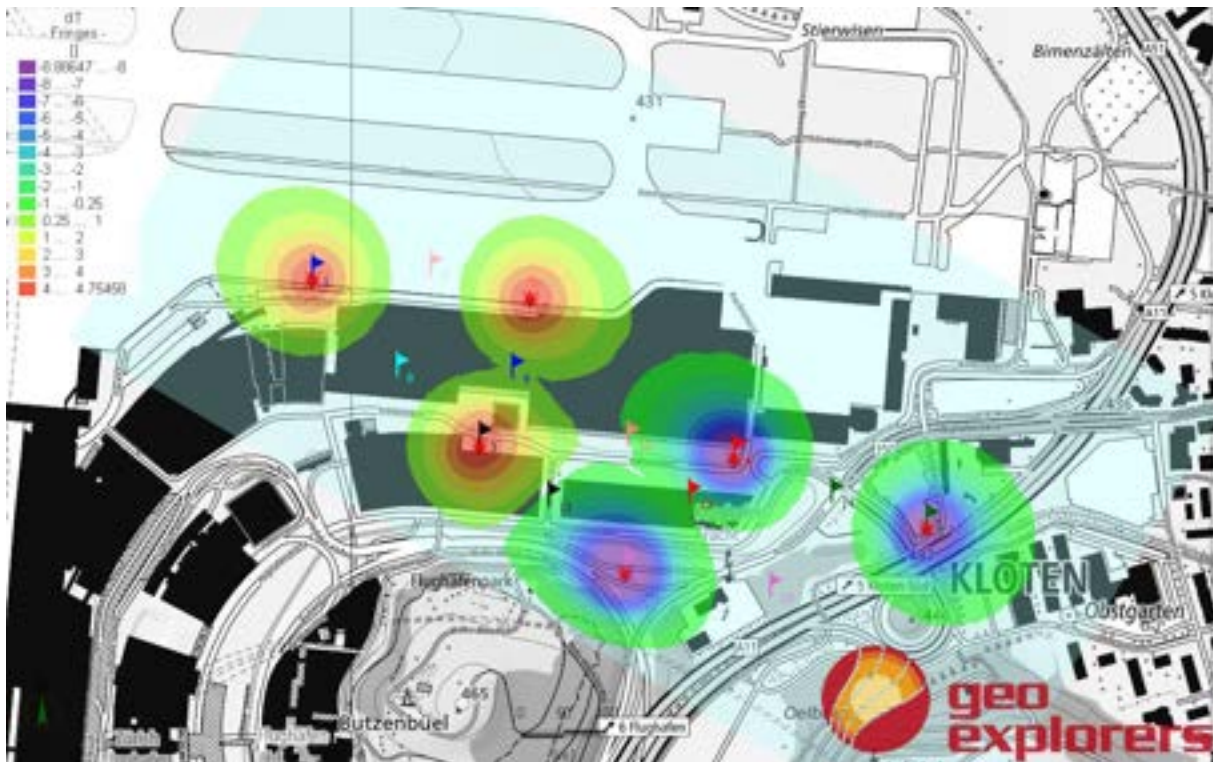


Abb. 59 Erste Simulationsergebnisse mit warmen und kalten Brunnen

13.2 Monitoringkonzept

Ziel des Monitorings ist die kontinuierliche Erfassung, Dokumentation und Bewertung der Auswirkungen der saisonalen Wärmespeicherung und -nutzung auf das Grundwasser. Das Konzept stellt sicher, dass:

- die Temperaturentwicklung im Einflussbereich nachvollziehbar ist,
- Volumen- und Energieströme korrekt gemessen und bilanziert werden,
- Wasserqualitätsparameter überwacht werden,
- definierte Schwellenwerte eingehalten und bei Abweichungen Massnahmen aktiviert werden.
- Zudem ist unter jeder Entnahmepumpe eine kombinierte Druck- und Temperaturmessung installiert, die einerseits der Pumpenüberwachung und -sicherung dient und gleichzeitig den Zustand des ATEs-Speichers überwacht.

Folgendes Monitoring in den Brunnen ist vorgesehen:

- a) Monitoring von Pegel, Druck, Durchfluss und Temperatur in den Förder- und Rückgabeburinnen (Überwachung der Aquiferparameter hinsichtlich einer optimierten Nutzung; Erkennen einer Übernutzung; Nutzung der Daten zur automatischen Steuerung angepasst an die Bewirtschaftung und Reaktion des Aquifers; Quantifizierung Wärmeentzug und -eintrag aus jedem Brunnen und Vergleich mit Grundwasserdaten; Verhinderung, dass der tiefe Aquifer quantitativ und qualitativ beeinträchtigt wird)
- b) Monitoring von Pegel, Druck und Temperatur in den bestehenden und evtl. zusätzlichen Monitoringbohrungen (P1 und SE1; Verhinderung, dass der tiefe Aquifer im Nah- wie auch

Fernbereich quantitativ und qualitativ beeinträchtigt wird; Überwachung und Erkennen allfälliger Kälte- und Wärmefahren bzw. Einhaltung der 3K-Regel; Überwachung, dass Grundwasserbilanz erhalten bleibt)

- c) Monitoring der Pegel in bestehenden Fassungen im oberflächennahen Grundwasserleiter (besteht schon; Erkennen und Verhindern, dass andere Grundwasserleiter durch die Nutzung beeinträchtigt werden)
- d) Regelmässige Analyse der Wasserzusammensetzung (Überwachung und Aufrechterhaltung der Wasserqualität; Verhinderung einer Veränderung der Grundwasserchemie, -zusammensetzung; Erkennen von Änderungen, die z.B. zu einer Verockerung führen würden)
- e) Regelmässige Zustandsüberprüfung der Brunnen (rechtzeitiges Erkennen einer Alterung, Korrosion oder Verockerung der Brunnenrohre, sowie Aufsandung)
- f) Analysen der Mikrofauna im Betrieb (Erkennen ob Änderungen im Aquifer zu einer Veränderung der Mikrofauna führen)
- g) Quantifizierung der Partikelführung (Optimierung der Filteranlage; Bewertung der Abrasion in den Rohren; Erkennen von Veränderungen)
- h) Übliches Monitoring in der Energiezentrale

Zu a): Dazu wird jeder Grundwasserbrunnen mit zwei Durchflussmessungen in der Entnahme- und der Rückgabelleitung sowie mit je einem Temperatursensor und Drucksensor bzw. Pegelsonde ausgerüstet. So ist die Überwachung jedes Brunnens sichergestellt und es kann überwacht werden, welche Energiemenge in welchen Brunnen eingetragen resp. entnommen wurde und wie darauf der Aquifer reagiert.

- Zwei Temperatur- und Drucksensoren mit Anbindung ans Rechenwerk
- Volumenstrommessung mit Anbindung ans Rechenwerk
- Rechenwerk zur Berechnung der Energiemenge

Die Datenaggregation erfolgt im Leitsystem der Energiezentrale Mitte. Es wird eine Datenaufzeichnung mit einer 15min-Auflösung, einer automatischen Datenplausibilisierung und ein monatliches Energiereporting empfohlen. Diese Monitoringberichte werden mit dem Simulationsmodell abgeglichen und so kann sichergestellt werden, dass eine Abweichung frühzeitig erkannt und entsprechende Massnahmen ergriffen werden können.

Zu b): Weiterführung der Messungen mit digitalen Loggern und Pegel- und Temperatursensoren mit Datenübertragung

Zu c): Weiterführung der Pegel-Messungen in oberflächennahen Fassungen im Umkreis der Brunnen und Korrelation mit Daten vom tiefen Aquifer

Zu d): Regelmässige Analyse der Wasserchemie (u.a. pH, Leitfähigkeit, Sauerstoff, Härte, Kationen wie Ca, Mg, Anionen wie Cl und weitere Elemente und Verbindungen wie Fe, Mn); pH und Leitfähigkeit kann auch kontinuierlich gemessen und überwacht werden. Da zwischen dem Grundwasserkreis und der Wärmepumpen/Kältemaschinen ein Zwischenkreis dazwischengeschaltet ist, kann die Kontamination des Grundwassers mit dem Kältemittel Ammoniak ausgeschlossen werden. Ein allfälliger Ammoniakverlust wird zuerst mit dem Abfall der Maschinenleistung und später im Zwischenkreis erkannt.

- Zu e): Wiederkehrende Kamerabefahrungen nach Bedarf, um den Brunnenzustand zu überprüfen.
- Zu f): Einzelne Wiederholungsmessungen mit dem BactoSense, evtl. noch Vereinzelte DNA-Analysen
- Zu g): In der Energiezentrale wird ein Partikelfilter installiert. Der Filterrückstand wird in einer Mulde gesammelt. Dessen Volumen und die Zusammensetzung kann dokumentiert werden und mit Pumpraten bzw. Durchflussraten korreliert werden.