Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Zwischenbericht vom 02.10.2023

Grosstechnischer Erdspeicher Flughafen Zürich in quartärer Rinne

Bericht zu Phase 1 geophysikalische Erkundung und Phase 2 Sondierbohrungen



Quelle: © Geo Explorers AG

Datum: 02.10.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfängerin:
Flughafen Zürich AG
Postfach
8058 Zürich-Flughafen

Planergemeinschaft IG Rinne:
SC+P Sieber Cassina + Partner AG, Zürich, auch Projektadresse
Geo Explorers, Liestal
E-Axiom, Bubendorf

Autor/in:
Andreas Ebert, Geo Explorers AG, andreas.ebert@geo-ex.ch
Eva Sutter, Geo Explorers AG, eva.sutter@geo-ex.ch

BFE-Projektbegleitung:
Men Wirz, Men.Wirz@bfe.admin.ch
Florence Begué, Florence.Begue@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502503-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Am Flughafen Zürich soll ein grosser Wärme- und Kälte-Aquiferspeicher in einer ca. 300 m tiefen quartären Rinne erstellt werden. Die Erkundungen mit Geophysik und Sondierbohrungen haben gezeigt, dass in den tiefen Bereichen der Rinne durchlässige Schichten vorliegen. Auf Grund der Rinnenform sowie des vermutlich hohen Alters und geringen Neubildung der tiefen Grundwässer wird erwartet, dass der Grundwasserfluss gering ist. Entsprechend gut eignen sich diese tiefen Schotterlagen für die Wärme- und Kältespeicherung, welche bisher nicht genutzt werden. Es gibt im Schweizer Mittelland mehrere solcher tiefen quartären Rinnen, die ein ähnliches Potential aufzeigen.

Diese tiefen Aquifere wurden bisher nicht systematisch erkundet und getestet. Am Flughafen Zürich wird im Rahmen eines Leuchtturm-Pilotprojekts, welches vom Bundesamt für Energie (BFE) gefördert wird, die Rinne mit verschiedenen und neuen geophysikalischen Methoden, sowie einem auf diese Tiefen angepassten Sondier- und Bohrkonzept untersucht und erschlossen. Bei erfolgreichem Nachweis soll ein Grossspeicher mit einem langjährigen Monitoring erstellt werden. Das Pilotprojekt soll die Entwicklung von grossen Wärme-Kälte-Speichern in diesen tiefen Grundwasserleitern vorantreiben.

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.

Mit Hilfe der Reflexionsseismik konnten die Erkundungsziele erreicht werden. 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. Die passive Seismik und ERT bestätigen und festigen die Messergebnisse der Reflexionsseismik. Es hat sich aber gezeigt, dass die Auflösungsgenauigkeit bzw. die Tiefenabdeckung der beiden alternativen Methoden jeweils zu gering war, um basierend auf diesen allein eine aussagekräftige Interpretation und Bohrzieldefinition vorzunehmen.

Da bisher keine Bohrung die tieferen Bereiche der Rinne erbohrt hat, der lithologische Aufbau der Rinne sowie deren genaue Tiefe unbekannt waren, wurde entschieden, mit drei einfachen und günstigen Sondierbohrungen zu starten. Diese hatten zum Ziel, aufgrund der geophysikalischen Untersuchung vermutete tiefliegende, durchlässige und wasserführende Schichten / Schotterlagen in der Rinne nachzuweisen. Zudem sollten diese Bohrungen notwendige geologische Daten für die Planung eines Testbrunnens liefern und helfen, den besten Standort zu wählen.

Im Juni und Juli 2023 wurden über das Flughafengelände verteilt, drei bis zu 346 m tiefe Sondierbohrungen entlang der quartären Rinne erstellt. Diese wurden destruktiv mit einer Ton-Polymer-Wasser-Spülung und einem Durchmesser von 152 mm gebohrt. Die Bohrungen haben unter mächtigen Stillwasserablagerungen / Seetonen je zwei Schotterlagen mit einer totalen Mächtigkeit von 42 bis 56 m an der Basis der Rinne erbohrt. In diesen erfolgten deutliche Spülverluste. Das Probenmaterial deutet auf sehr durchlässige Kiese hin. Die Basis der Rinnensedimente bzw. das Top der Molasse wurde im südlichen Rinnenbereich bei 105 m ü. M. und im Norden bei 153 m ü. M. angetroffen. Eine Vertiefung der Rinne nach Süden wurde auch aufgrund der Befunde der Seismik interpretiert. Die angebohrten Lithologiegrenzen und Rinnenbasis korrelieren gut mit der Reflexionsseismik.

Jede Bohrung wurde mit einem 2" Stahlrohr ausgebaut, welches im unteren Bereich über eine Länge von 6 m eingefräste Schlitze aufweist. Der Ringraum oberhalb der basalen Schotterlagen wurde bis zur Geländeoberkante mit einer Zementsuspension hinterfüllt. Einfache Auffüllversuche im 2"-Rohr zeigten

bei der südlichsten Bohrung, dass eine Wasserzugabe von ca. 206 l/min keinen nennenswerten Anstieg des tiefen Schotter-Grundwasserspiegels erzeugte. Abgeleitete hydraulische Durchlässigkeiten liegen bei 10^{-4} bis 10^{-5} m/s. Da die Bohrung nicht entsandet und der Filterkuchen nicht entfernt wurde, sowie nur eine kurze Filterstrecke mit wenigen Filterschlitzen eingebaut wurde, dürften die Durchlässigkeitsbeiwerte tatsächlich deutlich grösser / besser sein. Wird das geothermische Potential des vorgesehenen Testbrunnens mit den ermittelten Werten berechnet, so werden rund 4-8 Brunnen für die Einspeicherung von 14 GWh benötigt. Das angetroffene Potential übertrifft die vorweg gemachten Annahmen.

Die Sondierbohrungen haben den Nachweis erbracht, dass die erhofften, basalen durchlässigen Schichten mit einer grösseren Mächtigkeit als angenommen vorliegen. Ein Testbrunnen ist somit gerechtfertigt und bereits in Planung, resp. bereits ausgeschrieben.

Résumé

Un grand stockage de chaleur et de froid en aquifère est prévue de construire à l'aéroport de Zurich dans un chenal quaternaire d'environ 300 m de profondeur. Les explorations géophysiques et les forages de sondage ont prouvé la présence de couches perméables dans les zones profondes du chenal. En raison de la géométrie du chenal, de l'âge élevé et du faible renouvellement des eaux souterraines profondes, on suppose que le flux d'eau souterraine soit faible. En conséquence, les couches de cailloutis profondes se prêtent bien au stockage de chaleur et de froid, qui n'est pas encore exploité. En Suisse, il existe plusieurs chenaux quaternaires profonds de ce type, qui présentent un potentiel similaire.

Ces aquifères profonds n'ont pas encore été explorés et testés de manière systématique. A l'aéroport de Zurich, dans le cadre d'un projet pilote phare soutenu par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), le chenal est exploré à l'aide de différentes et nouvelles méthodes géophysiques. En outre, le chenal sera sondé et exploité avec un concept de sondage et de forage adapté à ces profondeurs. En cas de détection réussie, un grand stockage en aquifère sera mis en place avec un monitoring à long terme. Le projet pilote devrait permettre d'avancer le développement de grands stockages de chaleur et de froid dans ces aquifères profonds.

Les données sur le sous-sol manquent des informations sur la position, la géométrie et la profondeur. Dans une première phase la structure interne du chenal quaternaire a été explorée par des méthodes géophysiques. Les mesures ont été effectuées en septembre et octobre 2022. Trois méthodes ont été utilisées: la sismique réflexion, la sismique passive et l'ERT (Electric Resistivity Tomography). Dans le cadre de contributions d'encouragement de l'OFEN, il fallait également tester des méthodes moins compliquées et peu courantes. Par conséquence la sismique passive et l'ERT ont été intégrées au programme de mesure.

Les mesures de sismique réflexion ont été effectuées le long de cinq lignes à travers le site de l'aéroport. Ces lignes ont une longueur totale de 12,75 km. Pour la sismique passive, trois lignes NNE-SSE ont été choisies en travers du chenal quaternaire. Ces lignes ont une longueur totale de 5,38 km. L'aptitude de la méthode ERT pour explorer les chenaux profonds était à vérifier avec deux lignes ERT d'une longueur totale de 5,72 km.

Les objectifs d'exploration ont été atteints à l'aide de la sismique réflexion. La position, la profondeur et la géométrie du chenal ainsi que sa structure interne ont pu être bien définies. Sur cette base, les sites des forages de sondage ont été localisés. La profondeur maximale du chenal a été définie à environ 300 m. La sismique passive et l'ERT confirment et consolident les résultats de mesure de la sismique réflexion. Il s'est toutefois avéré que la précision de résolution et la profondeur de pénétration de ces méthodes alternatives sont trop faibles. Une interprétation détaillée et une définition du site de forage uniquement avec la sismique passive et l'ERT ne sont pas possibles.

Aucun forage n'a jusqu'à présent atteint le chenal le plus profond. Par conséquent, la lithologie et la profondeur du chenal étaient inconnues. C'est pourquoi on a commencé par trois forages de sondage

simples et peu coûteux. Ces forages devaient permettre de mettre en évidence les couches profondes, perméables et ainsi que les aquifères du chenal. De plus, ces forages devaient fournir les données géologiques nécessaires à la planification d'un puits d'essai et aider à choisir le meilleur site de puits.

En juin et juillet 2023, trois sondages de 346 m de profondeur ont été réalisés le long du chenal quaternaire, répartis sur le site de l'aéroport. Les forages ont été réalisés de manière destructive avec la boue de forage en argile-polymère-eau et un diamètre de perçage de 152 mm. Sous des argiles lacustres épaisses les sondages ont foré deux couches de gravier d'une épaisseur totale de 42 à 56 m à la base du chenal. Des pertes signifiantes de boue de forage ont eu lieu dans ces graviers. Les débris de forage indiquent des graviers très perméables. La base des sédiments du chenal, c'est-à-dire le sommet de la molasse, a été rencontrée à 105 m a.s.l. dans la partie sud du chenal et à 153 m a.s.l. dans la partie nord. Un approfondissement du chenal vers le sud a également été interprété sur la sismique. Les confins de la strate forée et la base du chenal sont en bonne corrélation avec la sismique réflexion.

Chaque forage a été équipé d'un tube d'acier de 2", qui présente des fentes fraisées dans une partie inférieure sur une longueur de 6 mètres. L'intervalle entre le haut du terrain et la base des argiles lacustres a été remblayée avec une suspension de ciment. De simples essais de remplissage avec un ajout d'eau d'environ 206 l/min n'ont conduit qu'à une faible augmentation du niveau d'eau dans le tube de 2" pour le forage le plus au sud. Les perméabilités hydrauliques déduites se situent entre 10^{-4} et 10^{-5} m/s. Étant donné que le forage n'a pas été dessablé, le gâteau de filtre n'a pas été retiré, et que seule une section courte de filtre avec quelques fentes de filtre a été installée, les coefficients de perméabilité seront en réalité nettement plus élevés / meilleurs. Si le potentiel géothermique d'un puits est calculé à l'aide des valeurs obtenues, environ 4 à 8 puits sont nécessaires pour stocker 14 GWh de l'énergie thermique. Le nombre de puits qui est requise pour le stockage thermique en aquifère à l'aéroport de Zurich est minoré comparativement à l'hypothèse précédemment.

Les forages de sondage ont apporté la preuve que les couches perméables basales espérées sont plus épaisses que prévu. Un puits d'essai est donc justifié et déjà en cours de planification ou d'appel d'offres.

Summary

At Zurich Airport a large-scale thermal repository within an approximately 300 m deep Quaternary channel is planned. With the aid of geophysical exploration and probing, it was demonstrated that the deeper parts of the channel contain hydraulically permeable layers. Due to the shape of the channel it is suspected that the groundwater at this depth may be of old age and hence the groundwater flow potentially is negligible. Therefore, those deep gravel layers are predestined for thermal heat and cold storage. Such thermal repositories have not been used in the past. In the Swiss midlands a vast number of such deep Quaternary channels exist, some of which show a similar potential for thermal energy storage.

The deep aquifers have not yet been systematically explored and tested for geothermal storage. At Zurich Airport, as part of a lighthouse pilot project funded by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE), the channel was investigated using a variety of traditional and untraditional geophysical exploration methods. Furthermore, a drilling and well development concept was adapted to the depths of interest. Should the further evidence from a test-well be point towards success, a large thermal aquifer repository with long-term monitoring capabilities will be constructed. The pilot project has the intention to advance the development of large-scale geothermal storage facilities in the deep aquifers.

Due to a lack of underground data, the location, shape and depth as well as the internal structure of the Quaternary channel were explored with geophysical methods in a first phase. Measurements were acquired in September and October 2022. Three methods were used: reflection seismics, passive seismics and ERT (electrical resistivity tomography). Passive seismics and ERT were included in the

measurement programme because non-traditional, less complex and hitherto uncommon methods were to be tested within the framework of subsidies from the SFOE.

The reflection seismic measurements were carried out along five lines across the airport area with a total length of 12.75 km. For passive seismics, three NNE-SSE lines were chosen across the Quaternary channel. These have had a total length of 5.38 km. Along two ERT lines with a total length of 5.72 km, the suitability of the ERT method was tested with regard to the exploration of deep Quaternary channels.

With the help of reflection seismics, the exploration objectives were achieved. The position, depth and geometry of the channel as well as its internal structure were well mapped and thus drilling targets for the subsequent exploratory wells could be defined. The maximum depth of the channel was defined at approx. 300 m. The passive seismics and ERT confirmed and consolidated the measurement results of the reflection seismics. However, it has been shown that the resolution accuracy or penetration depth of the two alternative methods were too low to make a meaningful interpretation and drilling target definition based on these alone.

As there is no borehole existing, which has drilled into the deeper parts of the channel so far, the lithological strata of the channel and the channel depth were unknown. Therefore, it was decided to start with three simple and inexpensive exploratory boreholes. The aim of these boreholes was to detect deep-lying, permeable and water-bearing gravel layers in the channel. In addition, these boreholes should provide necessary geological data for the planning of a test well and help to choose the best location.

In June and July 2023, three exploratory boreholes up to 346 m in depth were drilled along the Quaternary channel scattered across the airport site. A destructive drilling method with a clay-polymer-water mud and a diameter of 152 mm was used. Each borehole drilled into two gravel layers with a total thickness of 42 to 56 m at the base of the channel beneath thick stillwater deposits / lake clays. There were significant mud losses in these gravels. The drill cuttings indicate very permeable gravels. The base of the channel sediments or the top of the molasse was encountered at 105 m a.s.l. in the southern channel area and at 153 m a.s.l. to the north. A deepening of the channel to the south was also interpreted on the seismic data. The drilled lithology boundaries and channel base correlated well with the reflection seismic data and interpretation.

Each borehole was developed with a 2" steel pipe with milled slots in the lower section over a length of 6 m. The borehole interval from the top of the ground to the base of the stillwater deposits was cemented. Simple fill tests at the southernmost borehole showed that a water addition of approx. 206 l/min did not produce a significant rise in the water level in the 2" casing. Derived hydraulic permeability is approx. 10^{-4} to 10^{-5} m/s. Since the borehole was not de-sanded and the filter cake was not removed, in addition to only having a short filter section with few filter slots installed, it is expected that the permeability coefficients will be significantly greater / better in the test well. If the geothermal potential of the planned test well is calculated with the determined values after the exploratory phase of the project, about 4-8 wells are needed for the storage of 14 GWh of thermal energy. The number of wells required for this geothermal repository after the exploratory phase is potentially lower than was required from the initial estimates.

The exploratory boreholes have provided evidence that the presumed basal permeable layers are thicker than assumed. A test well is therefore justified and is already being planned and put out to tender.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 9
1.1 Ausgangslage und Hintergrund 9
1.2 Motivation des Projektes 10
1.3 Projektziele 12
2 Anlagenbeschrieb 13
3 Vorgehen und Methode 14
4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse 16
4.1 Geophysikalische Untersuchungen 17
4.1.1 Ziele der geophysikalischen Erkundung 17
4.1.2 Chronologie und Organisation der geophysikalischen Messungen 17
4.1.3 Messgebiet, Liniennetz 19
4.1.4 Methodik 21
4.1.4.1 Reflexionsseismik 21
4.1.4.2 Refraktionsseismik 23
4.1.4.3 Passive Seismik 24
4.1.4.4 Elektrische Resistivitäts Tomographie (ERT) 27
4.1.5 Ergebnisse und Interpretation geophysikalische Messungen 31
4.1.5.1 Geologische Übersicht 31
4.1.5.2 Geophysikalische Daten und deren Ergebnisse 32
4.1.5.3 Interpretation geophysikalische Daten / Geologisches Modell 35
4.1.6 Fazit für das Speicherpotential und folgende Erkundungsschritte 38
4.2 Sondierbohrungen 39
4.2.1 Ziele der Sondierbohrungen 39
4.2.2 Standorte 39
4.2.3 Chronologie und Projektorganisation 40
4.2.4 Allgemeine Angaben zu allen Sondierbohrungen 41
4.2.5 Sondierbohrung SE1 42
4.2.5.1 Bohrarbeiten und Bohrlochausbau 42
4.2.5.2 Geologie / Lithologie / Bohrlochlogging 44
4.2.5.3 Aussagen zur Wasserführung, Durchlässigkeiten und Potential 48
4.2.6 Sondierbohrung P1 49
4.2.6.1 Bohrarbeiten und Bohrlochausbau 49
4.2.6.2 Geologie / Lithologie / Bohrlochlogging 51
4.2.6.3 Aussagen zur Wasserführung, Durchlässigkeiten und Potential 55
4.2.7 Sondierbohrung E1 56
4.2.7.1 Bohrarbeiten und Bohrlochausbau 56
4.2.7.2 Geologie / Lithologie / Bohrlochlogging 58
4.2.7.3 Aussagen zur Wasserführung / Durchlässigkeiten und Potential 64
4.3 Testbrunnen 66
4.4 Konzepte und Erschliessung 66
4.5 Betrieb und Monitoring 66
5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse 67
5.1 Vergleich und Bewertung der verschiedenen geophysikalischen Methoden 67
5.2 Fazit Sondierbohrungen 72

6 Weiteres Vorgehen 74
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit 75
8 Kommunikation 75
9 Publikationen 75
10 Literaturverzeichnis 76
11 Anhang 77

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

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 dazugehörenden technischen Installationen und Anlagen. 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 bestehen z.B. im Dock E und Circle mit Energiepfählen zur Nutzung von Kälte und Wärme, sowie zwei grosse Kältezentralen mit Kompressionsmaschinen, Rückkühlern und Abwärmenutzung.

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 und von mächtigen Stillwasserablagerungen überlagert werden. Z.B. werden die wasserführenden Schotter in Seon bei Lenzburg seit 1988 in einer Tiefe von rund 300 m erfolgreich als Wärme- und Trinkwasserquelle genutzt. Dabei handelt es sich um ein ca. 7000 Jahre altes, sauerstofffreies und gering mineralisiertes Wasser.

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 ist die Datengrundlage sehr gering. Es ist 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 Bohrungen zielführend lokalisiert und erstellt werden. Nur so können die teuren Brunnen geplant und ausgeführt werden, ohne ein zu grosses finanzielles Risiko einzugehen. Diese erste Phase der geophysikalischen Erkundung erfolgte. Auf Basis der geophysikalischen Befunde wurden 3 Standorte entlang der Rinnenmitte für die Sondierbohrungen bestimmt.

Die Erkundung und Erschliessung der Flughafen-Rinne erfolgt in verschiedenen Phasen. Nach jedem Schritt wird auf Grund der Ergebnisse über ein "Exit" oder eine Weiterführung entschieden. Nach der ersten Phase der geophysikalischen Erkundung im Herbst 2022 folgte die zweite Phase mit den Sondierbohrungen im Sommer 2023. Nach dem erfolgreichen Nachweis von durchlässigen und mächtigen Schottern wird nun auf Basis von den Sondierbohrungen ein Testbrunnen geplant und durchgeführt. Zeigen die Fördertests und Analysen, dass der Brunnen ergiebig und eine Speicherung rentabel ist, wird der Aquifer mit weiteren Brunnen und Leitungen erschlossen und die Energiezentrale kann entsprechend angepasst werden.

Das Bundesamt für Energie unterstützt dieses Pilot- und Demonstrationsprojekt am Flughafen Zürich. Mit dem vorliegenden Pilotprojekt soll die Entwicklung von grossen, bisher einmaligen Grossspeichern in diesen tiefen Grundwasserleitern vorangetrieben werden. Die Projektziele werden nachfolgend beschrieben.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Pilot- und Demonstrationsprojekt richten sich im Wesentlichen an Planer, Geologen, Energieunternehmen und Behörden. Unter anderem soll es Planern und Geologen helfen, die Rinnen besser zu verstehen, diese zielführend und wirtschaftlich zu erkunden sowie die Anlagen mit tatsächlichen Daten planen und dimensionieren zu können. Mit dem Nachweis der Tauglichkeit für die thermische Nutzung der tiefen Grundwässer erhalten die Energieversorger oder Unternehmen, welche grossen Bedarf an Wärme u./o. Kälte haben, ein funktionierendes Beispiel, dass an vielen Stellen der Schweiz reproduziert werden könnte. Das thermische Speicherpotential in den tiefen, bisher ungenutzten Aquiferen in diesen Rinnen ist gross und wird schweizweit auf gesamthaft 1'000-10'000 GWh pro Speicherzyklus geschätzt. Zusammen mit der Tatsache, dass sich die Rinnen vergleichsweise rasch erkunden und einfach erschliessen lassen, können diese somit einen raschen Beitrag zur Energiewende beitragen. Neben den wirtschaftlichen und energetischen Aspekten bieten die gewonnenen Daten aus der Erkundung, Simulationen, Monitoring wichtige regulatorische Erkenntnisse zu den tiefen Aquiferen, z.B. inwiefern die 3 K-Regelung eingehalten oder diese evtl. auch angepasst werden könnte.

1.2 Motivation des Projektes

Wie im vorgängigen Kapitel geschrieben hat sich die Flughafen Zürich AG mit ihrer Energiestrategie eine sichere, wirtschaftliche und ökologische Energieversorgung des Flughafens Zürich zum Ziel gesetzt. Dazu gehört auch, dass die CO_2-Emissionen bis 2040 auf netto - Null gesenkt werden sollen. Zum Erreichen dieser Ziele soll u.a. zukünftig ein grosstechnischer saisonaler Speicher zur Wärme- und Kälteversorgung realisiert werden. Mögliche tiefe Aquifere in der unterhalb des Flughafens verlaufenden quartären Rinne sollen für die Wärme-Kälte-Speicherung genutzt werden.

Es handelt sich bei diesem Projekt hinsichtlich des Grundwasserleiters, der Nutzung aber auch der Speicher-Grössenordnung um ein bisher einmaliges Projekt in der Schweiz. Wie oben geschrieben, wurde zu Beginn des Projektes angenommen, dass an der Basis der rund 300 m tiefen quartären Rinne grundwasserführende Schotter vorliegen. Aber gänzlich unbekannt waren die Tiefe, die Geometrie und ob und in welchem Ausmass die vermuteten tiefen Schotter vorliegen, da bisher keine Bohrung die Rinnenbasis erreicht hat oder geophysikalische Messungen diese erkundet haben. Auf Grund der Tiefenlage der Aquifere gab es vor Projektbeginn kaum Erfahrung hinsichtlich einer zielgerichteten und wirtschaftlichen Erkundung und Erschliessung dieser tiefen Rinnenbereiche. Es war unklar, welche geophysikalischen Methoden am wirtschaftlichsten und aussagekräftigsten sind. Auch im Bereich der Bohrungen und Brunnenbau gibt es in der Schweiz nur wenige Bohrfirmen, welche dies überhaupt ausführen können. Entsprechend lagen vor Projektbeginn keine Erfahrungen in einer zielführenden und risikoarmen Erschliessung vor.

Entlang den bisher genutzten oberflächennahen Grundwasserleitern wie z.B. entlang der Aare und Limmat besteht schon heute ein Dichtestress hinsichtlich Trinkwasser, Wärmenutzung, Altlasten, Schutzzonen, Erdwärmesonden usw.. Die bisher ungenutzten tiefen Rinnenbereiche stellen ein grosses zusätzliches Nutzungspotential dar. Die Rinnen weisen im Gegensatz zu den oberflächennahen Grundwasserkörpern eine muldenartige Form auf und sind in der Regel von wenig wasserdurchlässigen Sedimenten überdeckt. Entsprechend kann von einem geringen Grundwasserfluss ausgegangen werden, was die thermischen Verluste gering halten würde. Somit wären diese Rinnen für Speicherung von Wärme / Kälte prädestiniert. Dies würde dem zunehmenden Energiespeicherbedarf eine neue Ressource mit grossen Volumina ermöglichen. Das Projekt soll dafür den Nachweis liefern.

Da im Schweizer Mittelland mehrere solche tiefen Lockergesteinsrinnen vorliegen (siehe Abb. 1), welche alle auf ähnliche Art und Weise während bzw. am Ende der Eiszeiten entstanden sind, ist eine Reproduzierbarkeit des Projektes gegeben. Nur alleine zwischen Sursee und Winterthur sind 6 Nord-Süd verlaufende Rinnen bekannt, welche zusammen eine Länge von über 180 km aufweisen. Dies

würde einer einmalig gespeicherten Energie von ca. 4000 GWh entsprechen (grobe Annahmen: Schotterlagen-Volumen 180 km*100 m*20 m, 20% Porosität, Temperaturspreizung 4°C). Die grosse Reproduzierbarkeit einer bisher kaum erkundeten und genutzten Quelle innerhalb einer und vieler weiterer ähnlichen quartären Rinnen macht das Projekt zu einem Pilot- und Leuchtturmprojekt im Bereich grosstechnischer Wärme- / Kältespeicher in den tiefen quartären Rinnen in der Schweiz.

Der Projektfokus wurde entsprechend darauf ausgelegt, wie die Lösungsansätze und Erkenntnisse auf weitere Rinnen in der Schweiz übertragen und angewendet werden können. Dies betrifft somit auch die Methodik der Exploration, die Erschliessung, die Bewirtschaftung und das Monitoring; wesentliche Gründe, warum das Projekt gefördert wird. Mit den gewonnenen Erkenntnissen soll eine Reproduzierbarkeit gewährleistet werden, die Wirtschaftlichkeit verbessert werden und zielgerechte Lösungsansätze von der Erkundung bis zur Erschliessung inkl. Monitoring aufgezeigt werden.



Abb. 1 Quartäre Rinnen in der NE-Schweiz in Grün (aus map.geo.admin.ch)

1.3 Projektziele

Die Projektziele sind i. W. geologischer, methodischer, bohrtechnischer und wirtschaftlicher Natur. Die Hauptziele sind:

- Nachweis, dass in den tiefen quartären Rinnen durchlässige Schotter vorliegen, welche für die Wärme-Kälte-Speicherung nutzbar sind.
- Entwicklung einer Methodik der Erkundung und Erschliessung dieser tiefen Aquifere, die eine rasche, zielführende, risikoarme und gleichwohl wirtschaftliche Erschliessung der Rinnen ermöglicht.
- Insbesondere sollen verschiedene geophysikalische Erkundungsmethoden angewendet und verglichen werden, mit dem Ziel, dass evtl. auf teure und aufwendige Methoden verzichtet werden kann.
- Mit einem langfristigen Monitoring während dem Betrieb sollen Grundlagen geschaffen werden, die es ermöglichen, die vorgängigen Annahmen zu verifizieren, das Langzeitverhalten von den tiefen Aquiferen wie z.B. Energieverluste im Speicherbetrieb zu verstehen und daraus Erkenntnisse zu gewinnen, welche in die zukünftige Planung und Dimensionierung von weiteren Projekten eingehen können.

Im Fördergesuch wurden die Ziele detailliert beschrieben. Nachfolgend werden diese zusammengefasst. Die grün geschriebenen Ziele konnten bis zum Zeitpunkt des vorliegenden Berichtes umgesetzt und bewertet werden. Die weiteren Punkte werden in den nächsten Projektphasen bearbeitet und evaluiert.

- Nachweis der basalen Schotter und Reproduzierbarkeit
  - Wie sind die quartären Rinnen allgemein aufgebaut (Tiefe, Geometrie, Schichtaufbau)?
  - Liegen die vermuteten durchlässigen und wasserführenden Schichten vor?
- Wirtschaftliches zielgerichtetes Vorgehen der Erkundung und Erschliessung
  - In welchem Mass lassen sich die Erfolgschancen mit dem vorgesehenen Explorationskonzept erhöhen bzw. die Fündigkeitsrisiken und Risikokapital minimieren?
  - Wie können die Rinnen einfach, wirtschaftlich aber doch möglichst detailliert geophysikalisch erkundet werden? Welche Methode biete sich dafür am besten an?
  - Was sind Vorteile und Grenzen der verschiedenen Untersuchungsmethoden (z.B. Auflösungsgenauigkeit, Tiefenabdeckung, Unterscheidung Lithologien und Wasserführung)?
  - Wie können die Lithologien, Durchlässigkeiten und Wasserführung mit ersten einfachen Bohrungen bewertet werden bzw. der Nachweis der Schotter erbracht werden, so dass das Risikokapital möglichst tief gehalten werden kann?
  - Wie können die tiefen Aquifere sinnvoll, bohrtechnisch, wirtschaftlich und risikoarm mit Brunnen erschlossen werden? Was sind Risiken und wie können diese minimiert werden?
- Energetisches Potential der Rinnen
  - Wie ergiebig sind die tiefen Aquifere (u.a. Mächtigkeit, Durchlässigkeit, Ergiebigkeit)?
  - Wie lassen sich diese hydrogeologisch charakterisieren (z.B. Alter, Chemismus, Temperatur)?
  - Wie gross sind Energieverluste durch möglicherweise fliessendes Grundwasser?
  - Wie gross ist das geothermische Potential eines Brunnens?
- Bewirtschaftung und Monitoring
  - Wie sieht eine optimale Bewirtschaftung der Rinne aus?

- Bestätigen sich vorweg gemachte Annahmen aus Simulationen und Konzepte mit dem tatsächlichen Betrieb?
- Wie unterscheiden sind die vorweg berechneten und tatsächlichen Energiekosten im Betrieb?
- Welches Monitoring ist notwendig, um den Betrieb überwachen und optimieren zu können?
- Wie nachteilig ist die rechtliche Einschränkung durch die 3 K-Regelung und wie kann die Bewirtschaftung entsprechend optimal umgesetzt werden?
- Wie gross sind eingespeicherte Energiemengen und Rückgewinnungsraten tatsächlich?
- Was ist das Langzeitverhalten des Speichers?
- Wie wird der Untergrund durch die Wärme-Kälte-Speicherung beeinflusst? Lässt sich die 3 K-Regelung mit neuen Monitoring-Daten anpassen?

2 Anlagenbeschrieb

Zum Stand dieses Berichtes steht die Anlage noch nicht im Fokus, da zuerst der Nachweis erbracht werden musste, ob durchlässige Schichten in den tiefen Rinnenbereichen vorliegen. Mit einem folgenden Testbrunnen werden diese nun getestet, ob sie für eine Wärme-Kälte-Speicherung wirtschaftlich nutzbar sind. Erst wenn dieser weitere Nachweis erbracht ist, macht es Sinn den Anlagenbau bzw. Anpassungen in der Energiezentrale im Bericht abzuhandeln.

3 Vorgehen und Methode

Das Projekt ist in verschiedene Phasen unterteilt (Abb. 2). Zum Stand des vorliegenden Projektes sind die Phasen 1 und 2 vollständig bearbeitet und ausgewertet.

Die Erkundung und Erschliessung der Flughafen-Rinne erfolgt in verschiedenen Schritten (Abb. 2). Nach jedem Schritt wird auf Grund der Ergebnisse über ein "Exit" oder eine Weiterführung entschieden. Nach der ersten Phase der geophysikalischen Erkundung im Herbst 2022 folgte nun im Sommer 2023 die zweite Phase mit den Sondierbohrungen, welche ebenfalls erfolgreich war. Entsprechend wird nun auf Basis von diesen Bohrungen ein Testbrunnen geplant und durchgeführt (Phase 3). Zeigen die Fördertests und Analysen, dass der Brunnen ergiebig und eine Speicherung rentabel ist, wird der Aquifer mit weiteren Brunnen und Leitungen erschlossen und die Wärmezentrale kann entsprechend angepasst werden (Phase 4).

Die Methodik der einzelnen Arbeitsschritte in den jeweiligen Phasen wird im Kapitel 4 beschrieben. In der nachfolgenden Tabelle 1 wird das beabsichtigte Vorgehen, welches im Fördergesuch beschrieben wurde, mit dem tatsächlich ausgeführten Arbeiten verglichen.

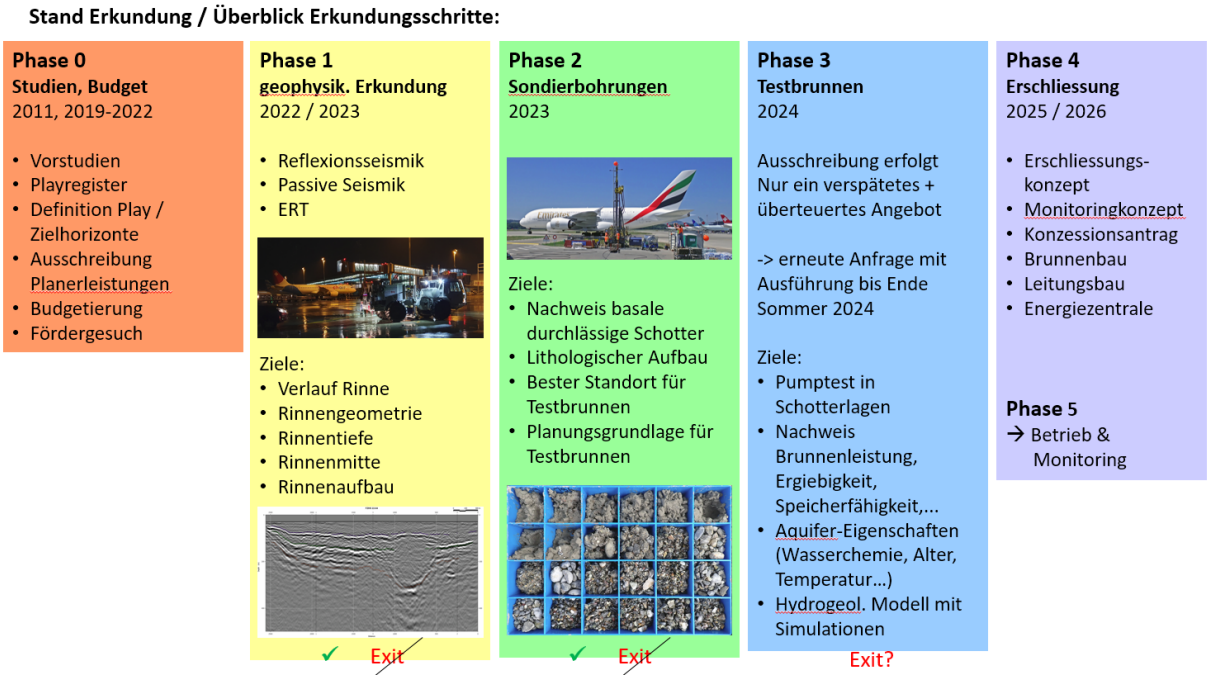


Abb. 2 Phasenweise Erkundung & Erschliessung der quartären Rinne unter dem Flughafen

Tabelle 1 Vergleich geplantes versus ausgeführtes Vorgehen

Vorgesehen im Fördergesuch	Tatsächlich ausgeführt	Abweichungen geplant vs. ausgeführt
Projektstart / Vorarbeiten 01.-09.2022 Meilensteine: Fördergesuch, Ausschreibung und Bewilligungen geophysikalische Erkundung	**Projektstart / Vorarbeiten 01.-09.2022** Meilensteine: Fördergesuch, Ausschreibung und Bewilligungen geophysikalische Erkundung	Im beabsichtigen Zeitfenster erfolgt. Meilensteine erfolgreich erreicht.
Phase 1		
Geophysikalische Erkundung 09.2022-02.2023 Meilensteine: Definition Rinnen-geometrie und Bohrziele	**Geophysikalische Erkundung 09.2022-02.2023** **Messungen 09+10.2023** Meilensteine: Definition Rinnengeometrie und Bohrziele	Im beabsichtigen Zeitfenster erfolgt. Berichtabgabe Ende 02.2023. Meilensteine erfolgreich erreicht.
Phase 2		
Sondierbohrungen 01.2023.-06.2023 Meilensteine: Nachweis basaler wasserführender Schotter, Grundlagen für Testbrunnen	**Sondierbohrungen 01.2023.-06.2023** **Bohrungen 06+07.2023** Meilensteine: Nachweis basaler wasserführender Schotter, Grundlagen für Testbrunnen	Leicht verspätet, da Bohrfirmen nicht früher verfügbar. Berichtabgabe Anfang 09.2023. Meilensteine erfolgreich erreicht.
Phase 3		
Testbrunnen und Fördertests 05.2023-10.2023 Meilensteine: Definition Brunnenleistung, Grundwasser-ergiebigkeit, Tauglichkeit hinsichtlich Temperaturen, Wasserchemie usw., hydrogeologisches Modell für Simulationen	**Testbrunnen und Fördertests 06.2023-??** Planung Testbrunnen und erste Ausschreibung erfolgt	Planung gemäss Zeitfenster begonnen, aber Verspätung der Bohrarbeiten, da Bohrfirmen erst Frühjahr 2024 verfügbar. Nur ein überteuertes + verspätetes Angebot → erneute Anfrage für Angebote mit späterem Ausführungstermin angefragt.
Phase 4		
Erschliessungs-, Bewirtschaftungs-, Monitoringkonzept, Konzessions-antrag 09.2023-02.2024 Meilensteine: Anzahl, Geometrie, Ausbau usw. der Brunnen + Leitungen definiert; Speicherpotential, Bewirtschaftung + Wirtschaftlichkeit definiert; Konzession	**Start nach Testbrunnen**	
Erschliessung, Leitungsbau, Energiezentrale, Monitoring 02.2024-07.2024 Meilensteine: Bau weiterer Brunnen, Leitungsbau, Anpassung Energie-zentrale, funktionierendes Monitoring		
Phase 5		
Betrieb und 5 Jahre Monitoring 07.2024-12.2029 Meilensteine: funktionierender Speicherbetrieb und Monitoring Abgabe Schlussbericht		

4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In den nachfolgenden Kapiteln werden für jede Phase die ausgeführten Arbeiten, Methodik, Chronologie, Daten, Ergebnisse und Interpretationen beschrieben:

- Kapitel 4.1 Phase 1 "Geophysikalische Untersuchungen" im Herbst 2022
- Kapitel 4.2 Phase 2 "Sondierbohrungen" im Sommer 2023
- Kapitel 4.3 Phase 3 "Testbrunnen" noch nicht ausgeführt
- Kapitel 4.4 Phase 4 "Konzepte und Erschliessung" noch nicht begonnen
- Kapitel 4.5 Phase 5 "Betrieb und Monitoring" noch nicht begonnen

4.1 Geophysikalische Untersuchungen

4.1.1 Ziele der geophysikalischen Erkundung

Das Vorhandensein der tiefen quartären Rinne ist unbestritten. Da vor Beginn der Erkundung keine tiefen Untergrunddaten (Bohrungen und geophysikalische Vermessungen) vorlagen, bestanden viele Unbekannte, die aber entscheidend für die Bohrplanung und die Erfolgsaussichten sind. Mit der geophysikalischen Erkundung sollten deshalb folgende Punkte definiert werden:

- Genauer Verlauf der Rinne
- Tiefe der Rinnenmitte
- Form der Rinne (verzweigt sich die Rinne, gibt es Inseln, mehrere Generationen)
- Interner Schichtaufbau

Auf Basis von diesen Daten wurden die Standorte der Sondierbohrungen definiert und es konnte eine Bohrplanung erfolgen.

Im Rahmen der Förderung vom BFE wurden mehrere geophysikalische Erkundungsmethoden verglichen. Deshalb kamen neben der gesetzten Reflexionsseismik zwei weitere geophysikalische Methoden zum Einsatz; die Passive Seismik und die Elektrische Resistivitäts Tomographie (ERT). Beide Methoden hatten dieselben Erkundungsziele wie die Reflexionsseismik. Die zwei alternativen Methoden sind nicht neu. Die Passive Seismik wird zur Zeit erst selten für kommerzielle Zwecke eingesetzt und die ERT wird typischerweise eher für die Erkundung von oberflächennahen Schichten verwendet (oberste 50-70 m Tiefe). Da beide Methoden deutlich günstiger sind und viel weniger Aufwand bedeuten (u.a. weniger Personal, weniger Equipment, einfacheres Permitting), wären sie eine gute Alternative zur üblichen und bewährten Reflexionsseismik. Ein weiteres Ziel war somit der Vergleich der drei Methoden: Reflexionsseismik, Passive Seismik und ERT.

4.1.2 Chronologie und Organisation der geophysikalischen Messungen

Bei der Organisation und Durchführung der geophysikalischen Untersuchungen waren mehrere Parteien involviert. Diese sind zusammen mit ihrer jeweiligen Funktion in Tabelle 2 aufgeführt. Die wichtigsten Meilensteine und deren jeweiligen Planungs- oder Ausführungszeitraum sind in Tabelle 3 ersichtlich.

Tabelle 2 Beteiligte Unternehmen an der geophysikalischen Untersuchung.

Unternehmen	**Funktion**
Flughafen Zürich AG	Auftraggeber, Unterstützung bei der Planung und Durchführung der Feldarbeiten
Geo Explorers AG	Planung, Design, Begleitung, Projektleitung & QC Messung, Interpretation, geologisches Modell
Sieber Cassina + Partner AG	Gesamtprojektleitung der Planergemeinschaft IG Rinne
GEO2X SA	Geophysikalische Messungen und Daten Prozessierung
Bundesamt für Energie	finanzielle Unterstützung Gesamtprojekt

Tabelle 3 Chronologie der geophysikalischen Untersuchungen.

Zeitraum	**Aktivität**
04.02.-08.06.2022	Vorstellung und Planung der geophysikalischen Untersuchungen
09.06.-04.08.2022	Ausschreibung und Vergabe der Messarbeiten
08.08.-19.09.2022	Permitting und Detailplanung Logistik Messungen
20.-23.09.2022	Vermessung der Anrege- / Aufnahmepunkte
22.-25.09.2022	Parametertests
25.09.-05.10.2022	Geophysikalische Messungen
10.10.-23.11.2022	Prozessieren der Messdaten und Abgabe Bericht Messarbeiten
24.11.-16.12.2022	Interpretation geophysikalischer Daten
22.12.2022	Präsentation der Ergebnisse

4.1.3 Messgebiet, Liniennetz

Im nachfolgenden Plan (Abb. 3) sind die verschiedenen Messlinien und Messpunkte ersichtlich. In Tabelle 4 bis Tabelle 6 sind die wichtigsten Parameter wie z.B. Anzahl Anrege- und Messpunkte für die verschiedenen Messlinien zusammengefasst. Sämtliche Messarbeiten wurden nachts zwischen ca. 21:00 und 6:30 Uhr durchgeführt. Die Linienauslage und Messarbeiten im geschützten Korridor der Pisten und der Pistenzufahrten (Controlled Protected Area) konnten erst nach Pistenfreigabe ab ca. 23:30 Uhr starten und mussten bis spätestens 5:15 Uhr abgeschlossen sein. Es wurden keine Personen-, Sach- oder Flurschäden durch die Messarbeiten verzeichnet.

Tabelle 4 Übersicht Reflexionsseismik

Zeitliche Reihen-folge	Bezeichnung	Länge (km)	Anzahl Vibropunkte	Anzahl Geophone	CDP Nummern	Messrichtung
5	FZHS 22-01	4.15	397	831	1 (N) – 1655 (S)	N nach S
4	FZHS 22-02	2.15	216	431	1 (SE) – 860 (NW)	NW nach SE
3	FZHS 22-03	2.62	251	525	1 (E) – 1048 (W)	W nach E
2	FZHS 22-04	2.62	257	525	1 (N) – 1022 (S)	N nach S
1	FZHS 22-05	1.21	119	242	1 (NE) – 471 (SW)	NE nach SW

Tabelle 5 Übersicht Passive Seismik

Zeitliche Reihen-folge	Bezeichnung	Länge (km)	Geophone	auswertbare Geophone	Messrichtung
2	FZHP 22-01	2.09	24	24	N nach S
3	FZHP 22-02	1.71	24	22	N nach S
1	FZHP 22-03	1.58	24	20	N nach S

Tabelle 6 Übersicht ERT

Zeitliche Reihen-folge	Bezeichnung	Länge (km)	Elektroden	Messpunkte	Messrichtung
2	FZHE 22-01	3.82	192	6653	N nach S
1	FZHE 22-02	1.90	96	2385	W nach E

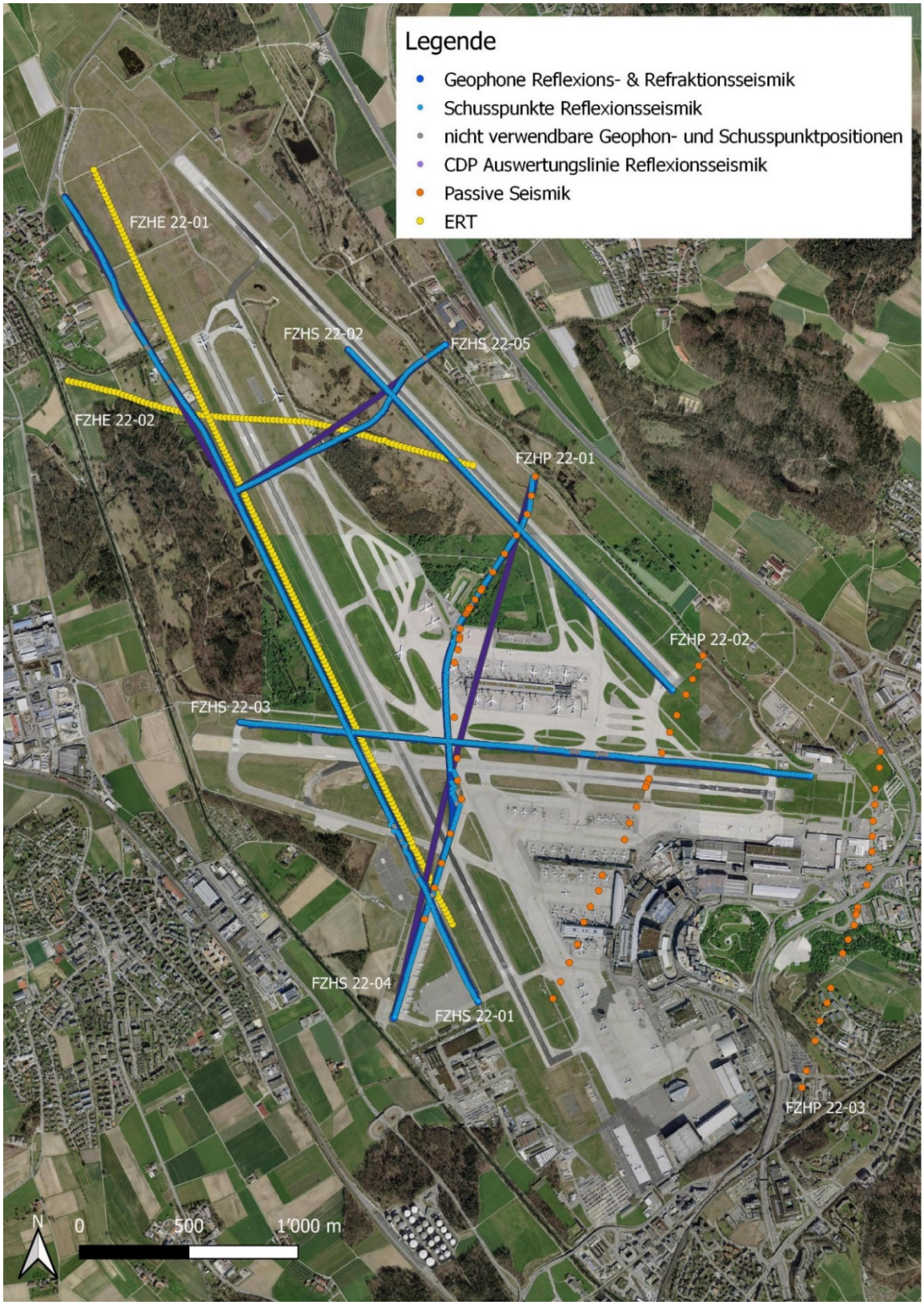


Abb. 3 Übersichtskarte der geophysikalischen Messungen am Flughafen Zürich

4.1.4 Methodik

4.1.4.1 Reflexionsseismik

Geologische Strukturen wie z.B. Schichtgrenzen, Falten und Brüche im tiefen Untergrund werden seit Jahrzehnten weltweit und erfolgreich mit Hilfe der Reflexionsseismik sichtbar gemacht. Dabei werden an der Oberfläche künstliche Schallwellen angeregt. Diese durchdringen den Untergrund in alle Richtungen und werden an Materialkontrasten (z.B. Schichtgrenzen) reflektiert. Die reflektierten Wellen werden an der Oberfläche mit Geophonen registriert. Mit Hilfe der gemessenen Laufzeit der Welle und einem Geschwindigkeitsmodell kann die Lage bzw. Tiefe des Reflexionspunktes ermittelt werden und schlussendlich ein Abbild vom Untergrund erstellt werden. Die Stärke der Reflexionsseismik ist das grosse Abbildungsvermögen von Strukturen im Untergrund bis in grosse Tiefen. Je nach Geometrie der Anregungs- und Aufnahmepunkte wird der Untergrund 2D (lineare Auslage) oder 3D (flächige Auslage) abgebildet. Die Reflexionsseismik kann aber keine direkten Aussagen zur Lithologie oder Wasserführung machen. Dies erfolgt generell mit Hilfe von Bohrungen, welche auf Basis der Seismik geplant werden.

Die seismischen Schallwellen wurden im vorliegenden Fall mit Hilfe eines 7.5 t Vibrotrucks erzeugt (Abb. 4). Der Abstand der Anregepunkte lag bei 10 m. Der Vibrotruck vibrierte mittig zwischen zwei benachbarten Geophonen und arbeitete sich so vorwärts. Die Anregung erfolgte mit einem Sweep (14-160 Hz) an 1240 Punkten.

Die reflektierten Wellen wurden mit kabellosen 5 Hz-Ein-Komponenten-Geophonen detektiert (Abb. 5). Im Fall vom Flughafen wurden die Geophone entlang der Messlinie in regelmässigen Abständen von 5 m ausgelegt. Die aktive Linienlänge betrug max. 2000 m mit 400 aktiven Kanälen. Die totale Anzahl Geophonstationen lag bei 2549. Geophondaten wurden mit dem Quellsignal korreliert und als SEG-Y Dateien ausgegeben. Auf Grund des Flugbetriebs konnte nur nachts in einem Fenster von ca. 23:00 bis 5:00 gemessen werden. Das geographische Bezugssystem war CH1903+LV95.

Insgesamt konnten über 97% der Quellpunkte angeregt, und 99.8% der Geophonstationen positioniert werden. Die Wetterbedingungen waren wechselhaft. Zum Teil hat es stark geregnet und gewindet. Es hat sich aber gezeigt, dass der Noise-Pegel während der Nachtmessungen tief war und somit gute Datensätze generiert werden konnten. Die Datenqualität kann als sehr gut bezeichnet werden. Die Ersteinsatzzeiten sind durchwegs gut erkennbar. Das Signal - zu - Noise Verhältnis ist sehr hoch. Nur selten ist ein geringes Rauschen auf Grund von parallellaufenden Bauarbeiten auf den Pisten erkennbar.

Um bestmögliche Daten bei schnellstmöglichem Messfortschritt generieren zu können, wurden die Quellparameter (z.B. Anzahl und Dauer der Sweeps, Frequenzspektrum) vorgängig getestet. Es konnte ein Quellsignal definiert werden, welches für die Erreichung der Ziele der Untersuchung am besten geeignet ist, bei gleichzeitiger Einhaltung des engen Messfensters pro Nacht.

Um zu einem geologischen Tiefenmodell zu gelangen, wurden die gemessenen Daten prozessiert. Diese dienen dazu, das Signal-zu-Noise Verhältnis zu verbessern (z.B. durch Frequenzfiltern oder Stapeln (stacking)), eine höhere Auflösung zu erzielen, gewollte Signal zu isolieren (z.B. Reflexionen von Oberflächen isolieren), ein realistisches Bild zu generieren (z.B. durch Konversion der Laufzeiten in Tiefe, Korrekturen von geneigten Schichten und Unebenheiten (Migration)), oder auch um Informationen über den Untergrund in Erfahrung zu bringen (z.B. Geschwindigkeiten extrahieren). Bis zur Tiefenumwandlung ist die y-Achse der Datenaufzeichnungen in der sogenannten Zweiwegzeit gegeben. Die folgenden Schritte wurden nacheinander auf die reflexionsseismischen Daten am Flughafen Zürich angewandt:

- Entfaltung Quellsignal durch minimum phase spiking deconvolution Filter
- Energieausgleich auf der Zeitachse mittels AGC Filter
- Unterdrückung der quellinduzierten Oberflächenwellen
- Feldstatische Korrekturen (elevation statics: Datum 450 m, Geschwindigkeit 2000 m/s)
- Offset-abhängige Laufzeitkorrektur «normal move out»
- Umsortierung auf gemeinsame Mittelpunkte und vertikale Stapelung (CMP stack)
- Unterdrückung seitlich einfallender Oberflächenwellen
- Bandpass Filter (12/28 Hz, 140/180 Hz)
- Zweidimensionale Fourier Transformation (f-k Filter)
- Spur Normalisierung
- Phase-Shift Migration in Zeit
- Laufzeit-Tiefen-Umwandlung

Die prozessierten Daten wurden dann wiederum im SEG-Y Format für die weitere Darstellung und Interpretation gespeichert. Auf allen fünf Profilen sind deutliche Reflektoren sichtbar, welche zwischen den Profilen in Tiefe, Amplitude und Position konsistent sind. Die finalen Daten wurden dann in eine gängige Interpretationssoftware geladen und ausgewertet.



Abb. 4 Vibrotruck im Einsatz am Flughafen Zürich



Abb. 5 Eingesetzte Messinstrumente (Geophone)

4.1.4.2 Refraktionsseismik

Generell werden die seismischen Wellen an den Schichtgrenzen immer reflektiert und wenn die Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe zunimmt, auch in Richtung Erdoberfläche refraktiert. Das heisst, dass ein Teil der seismischen Energie in die untere, schnellere Schicht abgegeben wird und dort schneller weiterläuft als in der oberen Schicht. An einem bestimmten Punkt «überholen» diese schnelleren refraktierten Wellen der unteren Schicht die reflektierten Wellen der oberen Schicht und erreichen somit die Geophone ab gewissen Distanzen von der Quelle zuerst. Aus den detektierten Ersteinsätzen der refraktierten Welle können die Tiefen der Schichtgrenzen und Wellengeschwindigkeiten der Schichten berechnet werden.

Dazu wurden die Rohdaten aller Schusspunkte in einem ersten Schritt gefiltert. Danach wurden diese Ersteinsätze an jeder Geophon Spur und für jeden Schusspunkt gepickt. Damit erhält man einen (X,Y)-Datensatz dieser Ersteinsätze für jede Spur an jedem Schusspunkt und somit Informationen über den Verlauf der Steigungsänderungen und damit Wellengeschwindigkeiten entlang eines seismischen Profils (Abb. 6).

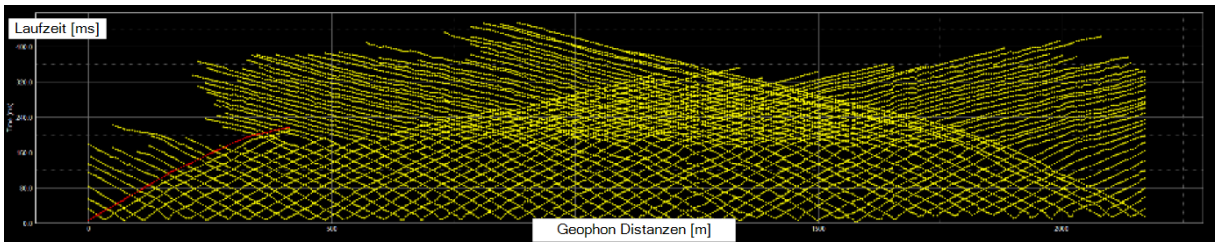


Abb. 6 Ersteinsatzkurven Refraktionsseismik

Gepickte Ersteinsätze an jeder Geophon Spur und für jeden Schusspunkt entlang eines seismischen Profils (gelbe Punkte / Linien). Man kann erkennen, dass sich die Steigungen der Geraden auf Grund der Änderung der Wellengeschwindigkeit jeweils ab bestimmten Distanzen ändern.

Mittels geophysikalischer Inversion wird nun mit den theoretischen Ersteinsätzen und den gepickten Daten ein Modell der vertikalen und horizontalen Verteilung der seismischen Wellengeschwindigkeiten im Untergrund entlang eines Profils berechnet und mit den Messungen verglichen. Dies wird wiederholt, bis ein Modell mit möglichst genau passenden theoretischen Ersteinsatzdaten gefunden wird (iterativer Prozess, Abb. 7). Ist ein plausibles Modell der Geschwindigkeitsverteilung gefunden, kann dieses geologisch interpretiert werden. Grundsätzlich eignet sich die Refraktion insbesondere für die Detektion der Grenze zwischen Lockergestein und Top Fels, da refraktierte Wellen nur an Schichtgrenzen mit erheblichen Geschwindigkeitsunterschieden emittiert werden.

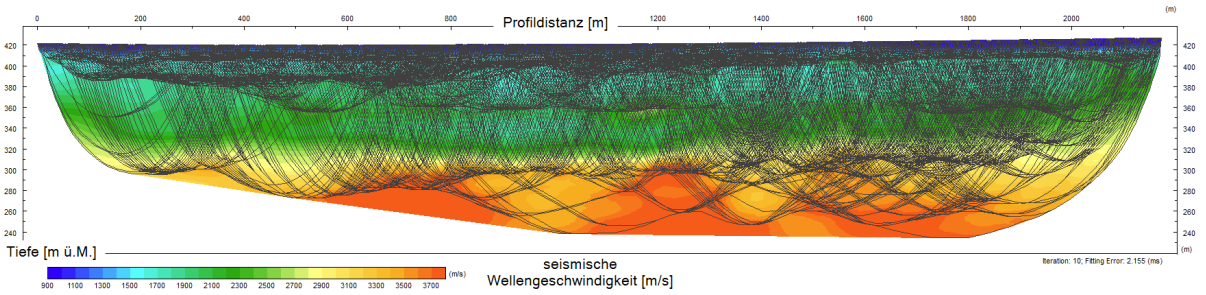


Abb. 7 Refraktionsseismisches Modell

Die Farben entsprechen der Wellengeschwindigkeit (blau = langsamer, rot = schneller). Überlagert sind die berechneten Laufzeitkurven (schwarze Linien), welche dann die theoretischen Ersteinsätze bestimmen. Passen die gemessenen und theoretischen Ersteinsätze zusammen, dann stellt das Modell auf dem die berechneten Laufzeitkurven beruhen, eine der möglichen Geschwindigkeitsverteilungen im Untergrund dar.

Die Auswertung der Refraktionsseismik erfolgte auf den Daten der Reflexionsseismik. Hierzu wurde nominell jeder vierte Anregungspunkt der Reflexionsseismik für die Auswertung verwendet. Für die refraktionsseismische Auswertung wurden die Ersteinsätze an den gewählten Anregungspunkten jeweils für jedes Geophon markiert (gepickt). Die Ersteinsätze waren in allen Datensätzen gut abgebildet. Jedoch bereitete vor allem bei Strecken, auf welchen die Geophone auf Asphalt oder Beton positioniert werden mussten, die Steigung der Ersteinsätze Probleme (negativ), da die harte Oberfläche das Refraktionsprinzip von steigender Geschwindigkeit mit der Tiefe verletzt. Dies kann zu Fehlern in der Bestimmung der korrekten Tiefe aller tieferliegenden Schichten führen.

Die gepickten Ersteinsätze aller gewählten Anregungspunkte wurden dann tomographisch invertiert. Dabei wurden die verschiedenen Inversionsparameter variiert, um eine möglichst genaue Anpassung der berechneten Ersteinsätze an die tatsächlich gepickten Ersteinsätze zu erzielen. Der Fehler der Inversion lag für die fünf Modelle zwischen 2.2 und 4.5 ms (Unterschied in der Ankunftszeit der Wellen im berechneten Modell zu der tatsächlich gemessenen Ankunftszeit der Wellensignale in den Daten). Fehler unter 5 ms werden grundsätzlich als gute Annäherung angesehen.

4.1.4.3 Passive Seismik

Die Passive Seismik nutzt die tief frequenten Oberflächenwellen natürlichen Ursprungs (z.B. durch Mikro-Seismizität, Wellenschlag in Seen, windbedingte Erschütterungen von Baumwurzeln). Mit sehr sensiblen Geophonen werden hier die Amplituden und Ankunftszeiten der passiv erzeugten Vibrationen gemessen (Abb. 8). Diese werden entweder räumlich oder entlang von Linien angeordnet. Ausgewertet werden die Dispersion der Kurve (Frequenzspektrum in Relation zur Wellengeschwindigkeit) und das

Verhältnis von horizontalen und vertikalen Signalen, welche wiederum erlauben, die Scherwellengeschwindigkeit und Tiefe des Lockergesteins am Messpunkt abzuschätzen. Vereinfacht erläutert, wird die Eigenschwingung des Lockergesteinskörpers analysiert.



Abb. 8 Aufgestellte Geophone für eine passive Seismik

Für die Auswertung werden die Daten über eine Fourier Transformation in ihr Frequenzspektrum zerlegt und durch Addition der beiden horizontalen Komponenten und nachfolgender Division durch die vertikale Komponente das H/V Spektrum (Verhältnis horizontale zu vertikale Signal) pro Frequenz berechnet. In Gegenden mit klaren geologischen Grenzen gibt der grösste Peak in der Regel den stärksten geologischen Kontrast wieder, also dort wo sich im Untergrund die Wellengeschwindigkeit stark ändert (meist der Übergang von Lockergestein zu Fels).

Um die Tiefe für den H/V-Frequenz-Peak zu bestimmen, muss der Datensatz noch via Dispersionskurven ausgewertet werden. Das Ziel ist es, die Scherwellengeschwindigkeitsverteilung des Untergrunds am Standort zu bestimmen. Hier wurde dafür die «extended spatial autocorrelation» (ESAC) Methode verwendet. Dabei werden innerhalb einer Geophon Anordnung aus jedem möglichen Geophon-Paar für alle drei Komponenten separat das Phasengeschwindigkeitsspektren berechnet (s. Abb. 9). Darauf können dann jeweils die Dispersionskurven gepickt werden.

Mittels geophysikalischer Inversion wurden eine Vielzahl möglicher Dispersionskurven basierend auf einem Scherwellengeschwindigkeitsmodell berechnet und mit den Dispersionskurven der Phasengeschwindigkeitsspektren verglichen. Das Scherwellengeschwindigkeitsmodell mit der am besten passenden Dispersionskurve stellt dann eine plausible Möglichkeit der Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund dar. Analog zu anderen seismischen Methoden haben unterschiedliche Gesteine verschiedene Scherwellengeschwindigkeiten. Dies erlaubt auf Basis des berechneten Modells die Felstiefe zu ermitteln, dort wo langsame Lockergesteinsschichten auf schnelle Felsgesteine stossen. Es gilt auch hier zu beachten, dass die Modelle aus einer Inversion stammen. Das bedeutet, dass es eine Vielzahl anderer Modelle gibt, welche die Daten gleich gut erklären können und geologisch sinnvoll abgeglichen werden müssen. Es gilt zu beachten, dass die passive Seismik

selber nur 1D Modelle liefert (= Geschwindigkeit an einem Punkt vs. Tiefe). 2D Sektionen werden durch horizontale Interpolation zwischen den einzelnen Messstandorten generiert.

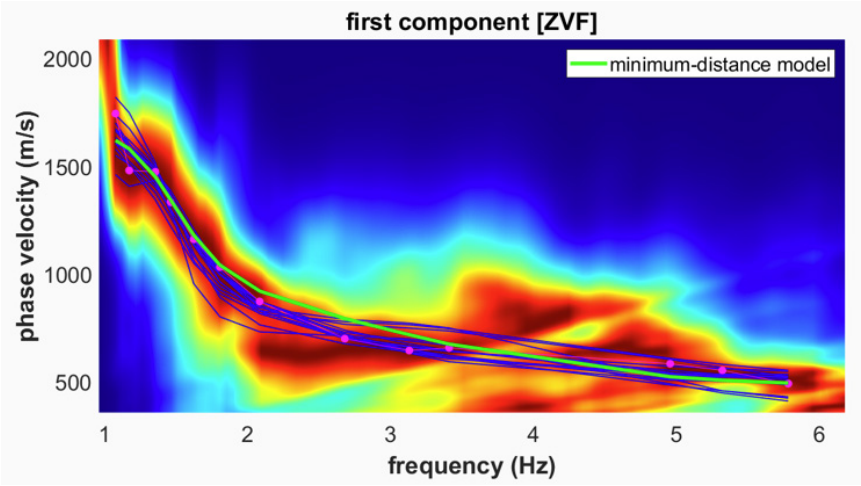


Abb. 9 Phasengeschwindigkeitsspektrum

Das Spektrum wurde aus der vertikalen Komponente eines Geophons in der ESAC Auswertung (farbiger Hintergrund) berechnet. Darüber sind die gepickte (pinke Kurve und Punkte) und die modellierten Dispersionskurven (blaue und grüne Kurven) dargestellt.

Im Vorfeld (August 2021) der geophysikalischen Messungen am Flughafen Zürich wurden entlang der Rütistrasse (nördlich Dock E, entlang der Messlinie FZHP 22-01) mit sechs Geophonen Testmessungen gemacht. Die 3-Komponentengeophone wurden in ca. logarithmischen Abständen voneinander platziert. Die grösste Distanz betrug 140 m. Daten wurden für knapp zwei Stunden mit einer Abtastrate von 1 ms aufgezeichnet. In den H/V Spektren der gemessenen Daten war jeweils ein klarer Peak erkennbar. Dieser lag bei allen Stationen, ausser bei Station 6 (1.2 Hz), bei ca. 0.95 Hz. Dem klaren Peak Maximum wurde die Fundamentalfrequenz zugeordnet, was einem starken seismischen Impedanz Kontrast entspricht. Dies ist vermutlich der Übergang zwischen Lockergestein und Fels. Unter Annahme der Durchschnittsgeschwindigkeit des Lockergesteins wurden so Tiefen bis ca. 260 m zum Übergang Fels abgeschätzt. Ein stetiger Anstieg des Felsüberganges vom Dock E zur östlichen Seite der Rütistrasse war ebenfalls erkennbar. Die Resultate der Testmessung schienen plausibel und die gewählten Parameter lieferten robuste Daten. Daher wurden diese Parameter auch weiter in den Hauptmessungen verwendet.

Es wurden an 24 Standorten jeweils 1 Geophon (SmartSolo BD3C-5, 5-s Eigenfrequenz, kabellose Seismographen, drei Komponenten) entlang von drei NNE-SSW-Linien positioniert. Die Sensoren wurden grösstenteils auf harter Unterlage und mit Eimern vor Wind geschützt aufgestellt. Die Vertikalität der Geophone wurde mittels Libelle justiert und sichergestellt. Der Abstand variierte abhängig von der Oberflächensituation. Die aktiven Linienlängen betrugen 2087 m (Linie 1), 1712 m (Linie 2), 1578 m (Linie 3). Die Aufzeichnung der natürlichen Vibrationen (auch: ambientes Hintergrundrauschen) an den Geophonstationen dauerte jeweils über zwei Stunden. Davon war über eine Stunde synchronisierte Aufnahmezeit zwischen allen aktiven Geophonen. Die Abtastrate lag bei 1 ms (Nyquist = 500 Hz). Von 72 platzierten Geophonen konnten von 6 Geophonen keine brauchbaren Signale auf Grund zu grossem Noise verwertet werden. Die Messungen wurden zudem in den am wenigsten windigen Nächten durchgeführt. Die horizontale Ausrichtung der Geophone war wie folgt:

- Geophon "Nord" = entlang der Messlinie (inline)

- Geophon "Ost" = orthogonal zur Messlinie (crossline)

Jeweils nach der Messung der Felddaten wurde die Qualität der Rohdaten überprüft. Die Datenqualität wurde generell als gut eingestuft, mit relativ geringem Anteil an transienten Störsignalen auf den Linien FZHP 22-01 und FZHP 22-02. Zwei Geophone auf Linie FZHP 22-02 (203 und 205) konnten auf Grund von Störsignalen nicht ausgewertet werden. Die Messdaten in der urbaner gelegenen Messlinie FZHP 22-03 wiesen erwartungsgemäss ein deutlich höheres Mass an Störsignalen auf. Auf dieser Linie konnten auf Grund starker Störsignale vier Geophone nicht für die Auswertung hinzugezogen werden (303-305 und 318).

Die Rohdaten wurden zuerst von transienten Störsignalen und Ausreisserdaten (>250 % des RMS Wertes) befreit. Danach wurden die Frequenzspektren der verschiedenen Komponenten und die spektralen Verhältniskurven (H/V) berechnet und geglättet. Aus der H/V Frequenzanalyse wurde die Fundamentalfrequenz bestimmt und mittels SESAME Kriterien auf deren Verlässlichkeit geprüft. Mit den zeitsynchronisierten Daten jeder Messlinie wurde dann eine Geschwindigkeitsanalyse gemäss dem ESAC Verfahren durchgeführt. Dies diente der Berechnung der vertikalen Scherwellen-geschwindigkeitsfunktion ungefähr am Mittelpunkt der jeweiligen Linie, welche benötigt wurde, um aus den H/V Fundamentalfrequenzen eine Aussage über die Felstiefe machen zu können.

4.1.4.4 Elektrische Resistivitäts Tomographie (ERT)

Das Prinzip einer ERT Messung basiert auf dem Ohm’schen Gesetz und verwendet Gleichstrom als Quelle um die Resistivität (spezifischer elektrischer Widerstand) der Erdschichten zu messen. Verschiedene geologische Materialien weisen unterschiedliche elektrische Widerstände auf. So sind Tone zum Beispiel besser leitend als trockene Kiesablagerungen. Wird im Untergrund zwischen zwei Elektroden ein elektrisches Feld erzeugt, dann variiert die elektrische Spannung abhängig vom elektrischen Widerstand der jeweiligen Schicht. Diese Spannung wird anhand zweier weiterer Elektroden an verschiedenen Punkten entlang eines Profils gemessen. Werden die Elektrodenabstände vergrössert, so dringt das elektrische Feld in tiefere Schichten vor und die Widerstände dieser tieferen Schichten haben sukzessive einen grösseren Einfluss auf das Messergebnis. Damit, und durch horizontales Verschieben der Messanordnung, kann entlang einer Profil Line mit vielen Elektroden die Variation des Widerstandes im Untergrund mit der Tiefe gemessen und ein 2D Profil erstellt werden. Das Prinzip einer ERT Messung ist in Abb. 10 ersichtlich. Abb. 11 zeigt die Messeinrichtung im Feld.

Die Qualität der Messungen hängt von der Messwiederholung an einem Punkt ab, der Pulsdauer des injizierten Stroms (0.25-2 Sekunden), der injizierten Stromstärke sowie des Kontaktwiderstands zwischen Elektroden und Untergrund (sollte <500-1000 Ω sein; Verbesserung z.B. mittels Salzwasserlösung). Dies ist ähnlich wie bei der Reflexionsseimsmik, bei welcher z.B. das Vibrogewicht, die Anzahl und Länge der Sweeps sowie die Ankopplung entscheidend für eine gute Datenqualität sind.

Um den tatsächlichen Widerstand des untersuchten Untergrundes zu bestimmen, müssen die Rohdaten mittels geophysikalischer Inversion modelliert werden. Mittels Berechnung von theoretischen Daten basierend auf einem angenommenen geologischen Untergrundmodell wird verglichen, wie gut diese berechneten Daten zu den gemessen passen. Das Untergrundmodell wird sukzessive angepasst und der Vorgang wiederholt bis eine mathematisch zufriedenstellende Übereinstimmung der Daten gegeben ist. Es gilt auch hier zu beachten, dass die Güte des Modellfehlers (RMS Fehler) nicht zwingend ein Mass der Güte der Übereinstimmung des Modells mit der Realität darstellt.

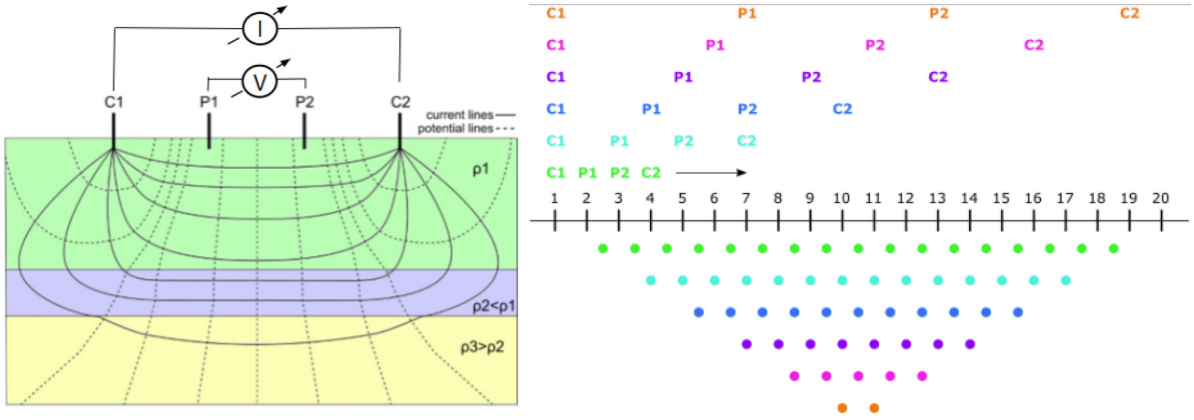


Abb. 10 Funktionsprinzip ERT

Links: Prinzip einer ERT Messung mit Strom-Injektion Elektroden (C1 und C2) und Spannungsmessung Elektroden (P1 und P2). Die Stromlinien werden vom Widerstand (ρ1 bis ρ3) der verschiedenen Schichten im Untergrund beeinflusst, was zu Unterschieden in der gemessenen Spannung führt. Rechts: Prinzip einer 2D Profilmessung. Eine Vergrösserung des Elektrodenabstandes führt dazu, dass der injizierte Strom tiefere Schichten erreicht. Durch Verschieben der Messanordnung entlang einer Profil Linie kann so ein 2D Profil erstellt werden.



Abb. 11 ERT-Messungen auf dem Flughafengelände

Es wurden zwei Linien mit einem Widerstandsmessgerät Syscal Pro 96 Switch (12V Batterie) mit der Schlumberger Messgeometrie gemessen. Die beiden ERT Profile wurden mit jeweils 96 aktiven Elektroden (Stahlspiesse / Kupferplatten) mit Abständen von 20 m gemessen. Da die Profile jedoch länger als die aktive mögliche Messlänge von 1900 m waren, wurde in Schritten von 24 Elektroden mit einer rollenden Auslage (roll-along) gemessen. Profil FZHE 22-01 wurde so mit einer Basisauslage und insgesamt vier roll-alongs auf die rund 3800 m gebracht. Beim Profil FZHE 22-02 ging bereits bei der Basisauslage einige Zeit durch fehlerhafte Verbindungsstücke und Verbessern von hohen Übergangswiderständen verloren. Dies führte dazu, dass die zusätzliche rollende Auslage zwar ausgelegt werden konnte, aber die zur Verfügung stehende Zeit nicht mehr ausreichte, den östlichsten Teil der Linie zu messen. Daher ist dieses Profil kürzer als geplant (1.9 km anstatt geplante 2.36 km). Somit konnten total 9038 von 10105 geplanten Messpunkten vermessen werden. Der Abstand der Strominjektionspunkte lag bei min. 60 m. Die Injektionsdauer lag bei 250 ms mit Injektionswiederholungen von 3 bis 5. Die Vorgaben zu Stapelungen und Injektionsdauer waren höher, konnten aber auf Grund der kurzen Messzeitfenster nicht eingehalten werden.

Im Vorfeld wurde getestet, ob eine Ankopplung der Kupferplatten-Elektroden mittels salzwassergetränkten Schwamm auf Beton- und Asphaltoberflächen möglich ist. Dazu wurden kurze Profile mit Elektroden auf den verschiedenen Oberflächen aufgestellt und die Übergangswiderstände gemessen. Die Daten zeigten, dass Messungen mit Elektroden auf Betonoberflächen trotz hoher Übergangswiderstände möglich sein sollten, solche mit Elektroden auf Asphaltoberflächen jedoch nicht. Diese Erkenntnis wurde bei der Linienplanung berücksichtigt, sodass lediglich zwei Elektrodenpositionen auf Grund von Asphaltbedeckung ausgelassen werden mussten.

Ausreisserdatenpunkte auf Grund der Stapelungsfehler, des Injektionsstroms und des gemessenen Widerstandes wurden aus den Datensets gelöscht. Danach wurden die Daten visuell auf weitere Ausreisserdaten überprüft und nicht plausible Datenpunkte ebenfalls gelöscht. Dies führte dazu, dass bei der Linie FZHE 22-01 12.5 % und bei der Linie FZHE 22-02 26.5 % der Datenpunkte entfernt wurden. Auf beiden Linien wurden weniger als 1/3 der Daten gelöscht, was grundsätzlich akzeptabel ist. Die editierten Daten wurden dann invertiert, das heisst modellierte Daten basierend auf einem Untergrundmodell wurden schrittweise an die gemessenen Daten angeglichen. Die beste Übereinstimmung wurde bei einem Fehler von 6.1 % für beide Datensets gefunden und diese wurde nach jeweils vier Wiederholungen der Modellierung erreicht. Unter Betracht der grossen Anzahl an gelöschten Daten ist dieser Fehler zwar akzeptabel, jedoch ist die Fehlerabschätzung rein mathematischer Natur. Dies bedeutet, dass der Inversionsfehler nur eine Aussage über die Güte der Datenangleichung macht, nicht aber über die Plausibilität des geophysikalischen Modelles.

Die Datenqualität der ERT Messungen war gemäss Kriterien zur erlaubten Standardabweichung der Stapelungen sowie Ausreisser-Daten auf Grund ungewöhnlich hoher oder tiefer Widerstände bei beiden Profilen eher mässig. Dies zeigt sich in der hohen Prozentzahl direkt gelöschter Messpunkte. Geringe Variationen sind zwar in beiden Datensätzen erkennbar, der Grossteil der Rohdaten weist jedoch nur einen geringen elektrischen Widerstand bis in grössere Tiefen auf (Abb. 12).

Die Umgebungsbedingungen mit den vielen Leitungen im nahen Untergrund und den zu querenden breiten und dicken Beton- / Asphaltflächen auf dem Flughafengelände waren lokal nicht ideal für die Messungen (z.B. Gefahr der elektromagnetischen Ankopplung, lokal um die Betonflächen erhöhte Widerstände). Diese können zu einer reduzierten Qualität der ERT Daten in den untieferen Schichten führen. Allerdings erklären sie nicht die relativ homogenen, eher tiefen Widerstände (ca. 20-60 Ωm) über die gesamte Profiltiefe, welche in beiden Datensätzen sichtbar sind. Diese sind eher ungewöhnlich für den vermuteten geologischen Schichtaufbau. Zudem waren die Übergangswiderstände der Elektroden trotz der Zugabe von Salzwasser im Durchschnitt eher hoch (gemittelt 1600 Ω, auf versiegelten Flächen bis zu 3000 Ω anstatt ca. 500-1000 Ω). Dadurch kann weniger Strom in den

Untergrund übertragen werden, was gerade bei den antizipierten grossen Eindringtiefen problematisch werden kann.

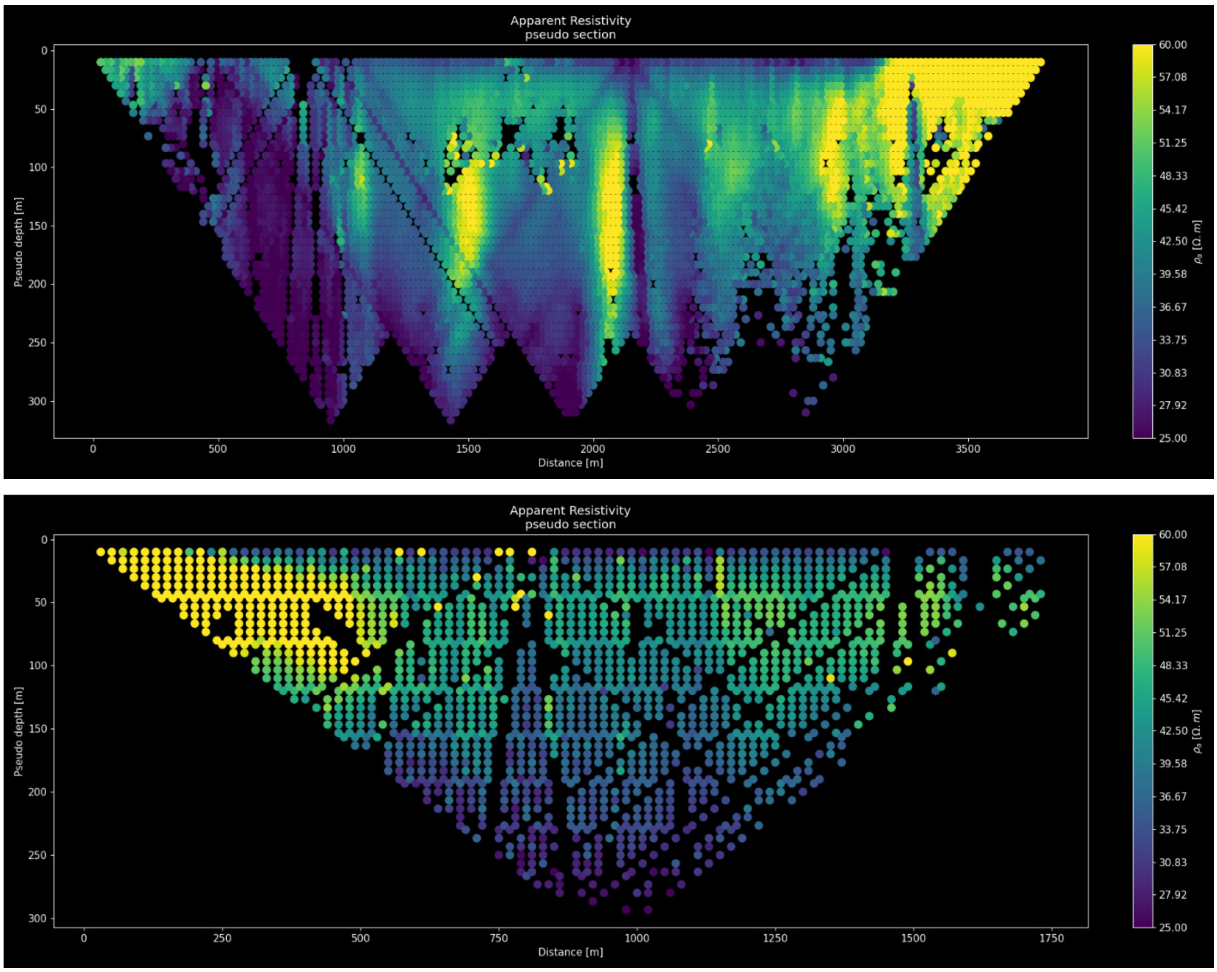


Abb. 12 ERT Rohdaten

Oben sind die ERT Rohdaten der Linie FZHE 22-01 (Süden ist links) und unten die der Linie FZHE 22-02 (Westen ist links) gezeigt. Der scheinbare Widerstand ist in Farben dargestellt (Skala von 25-60 Ωm). Lücken rühren von den gelöschten Daten her (fehlerhafte Datenpunkte). Streifige und schlierige Muster in den Rohdaten oben weisen auf Instrument-, Elektrodenfehler oder Noise Quellen hin.

Publizierte Beispiele für tiefe ERT Untersuchungen mit handelsüblichen Messgeräten gibt es zurzeit nur wenige. Grund dafür sind unter anderem die benötigten langen Kabelauslagen. Lange Kabelauslagen mit grossen Elektrodendistanzen, wie dies hier der Fall war, können zu ungewollten induktiven Kupplungseffekten führen (z.B. zwischen dem Kabel und dem Untergrund oder den Injektions- und Voltmesskabeln). Leckströme können dann die Folge sein, was tendenziell zu einer Absenkung der gemessenen Widerstände führt. Die Problematik ist verstärkt bei Messungen in leitfähigem Untergrund (z.B. in wasserführender oder toniger Geologie, wie sie unter dem Flughafen vorliegt). Darüber hinaus war die verwendete Pulsdauer der Strominjektion sehr kurz (0.25 s). Gerade in mächtigen Tonschichten dauert es in der Regel eine längere Zeit bis sich Gleichgewichtsspannungen etablieren können. Eine zu kurze Pulsdauer kann also dazu führen, dass dadurch fehlerhafte Potentialdifferenzen gemessen

werden. Eine Verlängerung der Pulsdauer war auf Grund des kurzen Messfensters bei gleichzeitig langer Messlinie nicht möglich.

Vermutlich ist vor allem Profil FZHE 22-01 von einer Kombination oben genannter Probleme betroffen (u.a. grössere Beeinflussung durch elektromagnetischen Noise). Profil FZHE 22-02 verlief weitgehend abseits des dichtesten Netzes von Untergrundkabeln. Zwar wurde ein höherer Prozentsatz der Rohdaten gemäss Qualitätskriterien gelöscht, die vorhandenen Rohdaten zeigen aber generell eine bessere Datenqualität (z.B. keine streifigen Muster).

4.1.5 Ergebnisse und Interpretation geophysikalische Messungen

4.1.5.1 Geologische Übersicht

Das Vorhandensein der tiefen quartären Rinne im Bereich des Flughafens war schon vor der Exploration bekannt (Abb. 13). Die Rinne entstand während der Eiszeiten. Unter dem Eis sammelte sich das Schmelzwasser zu Flüssen. Auf Grund der mehreren Hundert Meter mächtigen Eisschilde stand das Schmelzwasser unter hohem Druck und hatte somit ein hohes erosives Potential. So konnten sich die tiefen subglazialen Tunneltäler unter dem Eis bilden. Diese haben sich entsprechend der Abflussrichtung ca. in N-S Richtung ausgebildet. An der Stirn der Gletscher im Norden konnten die Flüsse frei austreten und erodierten sich weniger tief in den Untergrund ein. Entsprechend haben die Rinnen eine Art Muldencharakter.

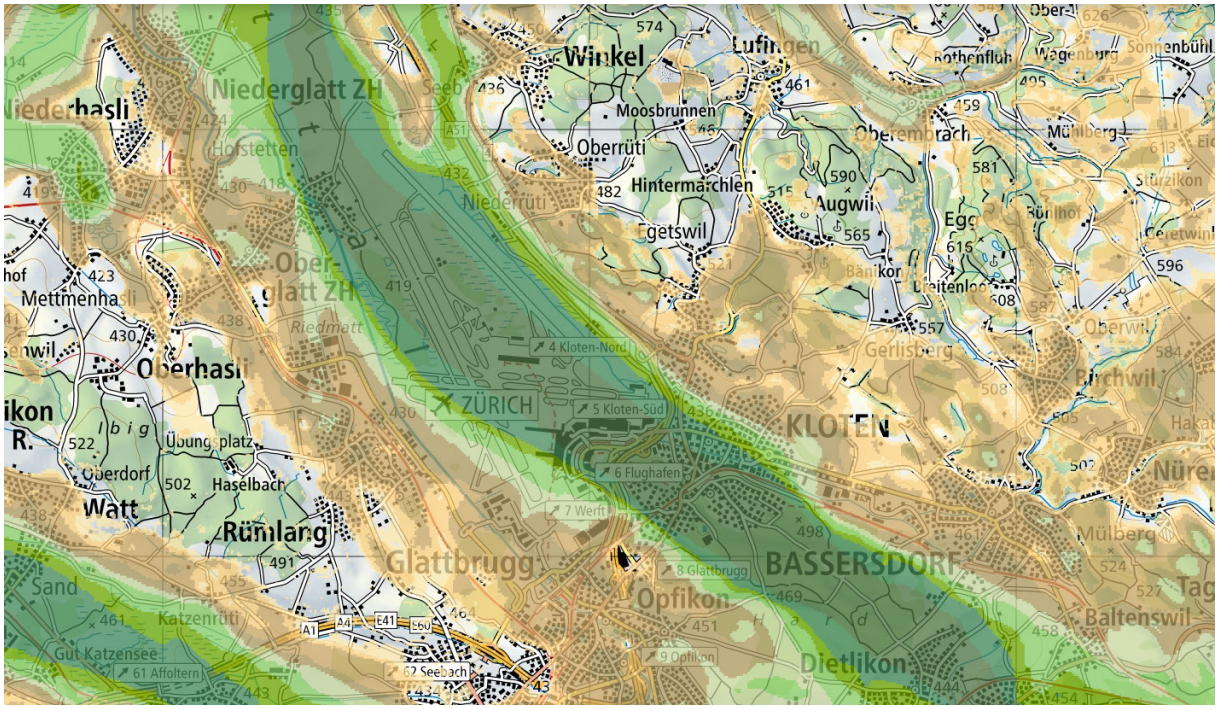


Abb. 13 Quartäre Lockergesteinsrinne unter dem Flughafen Areal (Quelle: map.geo.admin.ch)

Vereinzelte tiefere Bohrungen in den verschiedenen Rinnen im Mittelland zeigen einen ähnlichen lithologischen Aufbau. Unter oberflächennahen groben Lockergesteinen (häufig fluviatile Schotter) folgen mächtige Stillwasserablagerungen. Letztere wurden während der Verlandungsphase abgelagert,

als sich nach dem Rückzug der Gletscher die tiefen Rinnen zu Schmelzwasserseen verwandelten. An der Basis der Rinnen findet man die Ablagerungsrelikte aus der hochenergetischen Phase, als sich die Schmelzwasserflüsse unter dem Eis in den Untergrund einschnitten (fluvioglaziale Schotter). Oft verzahnen oder wechseln sich die Schotter mit Moränen-Ablagerungen ab. Die wenigen existierenden Bohrungen in der Schweiz, welche bis in die tiefen Rinnenbereiche vorstossen, zeigen, dass die Schotter wasserführend und durchlässig sind.

4.1.5.2 Geophysikalische Daten und deren Ergebnisse

In Abb. 14 und Abb. 15 werden exemplarisch zwei interpretierte Beispielprofile der Reflexionsseismik quer durch die quartäre Rinne am Flughafen gezeigt. Die Y-Achse zeigt die Tiefe in m an. Der Referenzpunkt in vertikaler Richtung ("Datum") liegt bei 450 m ü.M.. Die Auffüllgeschwindigkeit wurde mit 2000 m/s gerechnet. Die Polarität der Amplituden hat die Konvention schwarz = positive Reflexion bzw. Kompression (SEG Standard).

Interpretiert wurden drei Horizonte, die sich gut verfolgen lassen. Die rote Linie entspricht dem tiefsten sichtbaren Reflektor auf allen seismischen Profilen. Dieser ist generell auf ca. 200 m Tiefe zu sehen, und taucht, vor allem auf den Ost-West Querprofilen an bestimmten Stellen muldenförmig in grössere Tiefen von bis zu ca. 300 m ab. Der grüne, mitteltiefe Reflektor kann auf ca. 100-150 m Tiefe auf allen Profilen beobachtet werden. Oberhalb des roten, tiefen, muldenförmigen Reflektors ist er jedoch nicht verfolgbar. Der untiefste, violette Reflektor ist auf allen Profilen durchgehend und gut sichtbar. Er befindet sich im Tiefenbereich von ca. 50-100 m. Nicht überall liessen sich die Reflektoren nahtlos verfolgen. Entsprechend wurden sie in solchen Bereichen interpoliert. Die Interpretation erfolgte auf der Basis, dass die Reflektoren auf sich kreuzenden Linien konsistent sind. Die Rinnengeometrie wurde auf der Grundlage der Reflexionsseismik interpretiert.

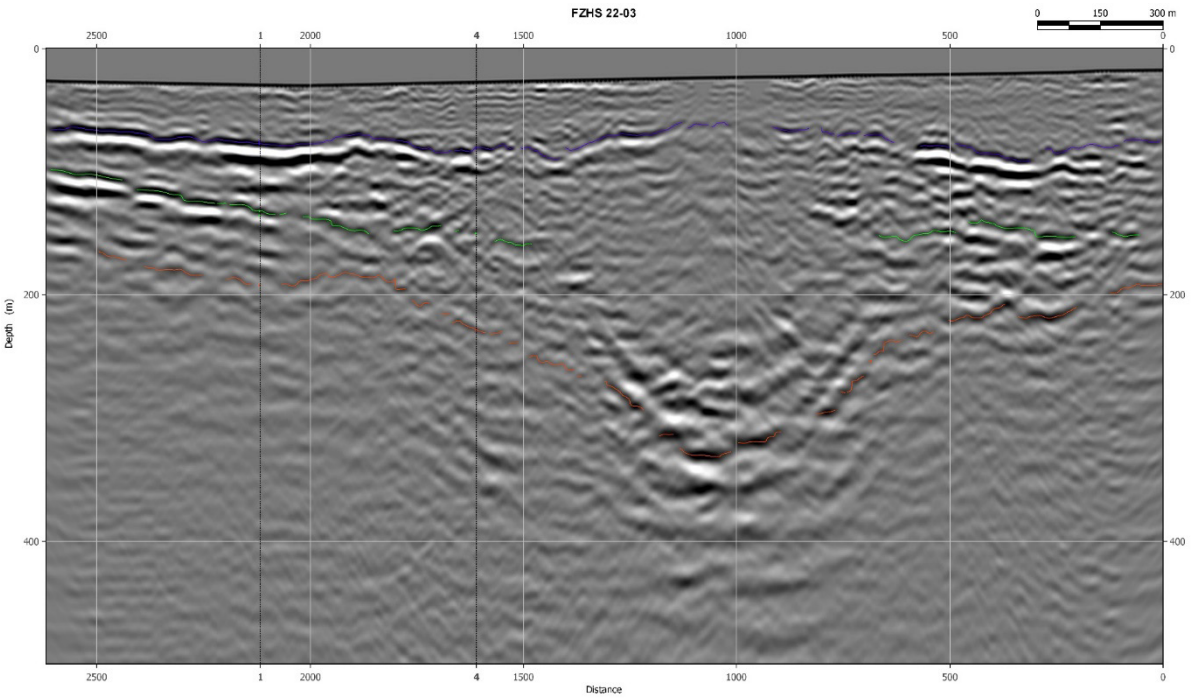


Abb. 14 Reflexionsseismisches Profil FZHS 22-03 in Tiefe

Gefilterte & poststack Tiefenmigration des NMO Stacks. X & Y-Achse in m; Von links = W nach rechts = E.

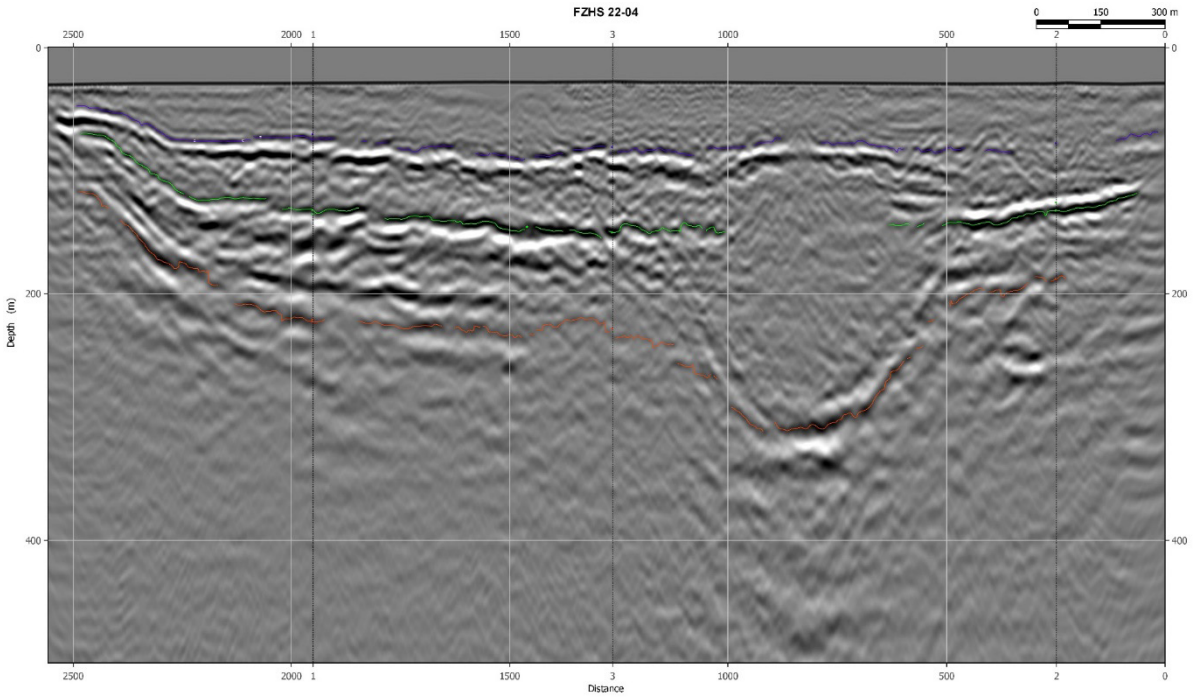


Abb. 15 Reflexionsseismisches Profil FZHS 22-04 in Tiefe

Gefilterte & poststack Tiefenmigration des NMO Stacks. X & Y-Achse in m; Von links = SSW nach rechts = NNE.

Die Refraktionsseismik und Passive Seismik zeigen eine gewisse Übereinstimmung mit der Reflexionsseismik. Auf Abb. 16 und Abb. 17 wurden die Daten der Refraktionsseismik bzw. passiven Seismik der Reflexionsseismik der Linie FZHS 22-04 überlagert. Sie zeigen ein ähnliches Untergrundabbild in der Geschwindigkeitsverteilung, wie es in der Reflexionsseismik dargestellt ist. Allerdings ist die horizontale und vertikale Auflösung der Refraktions- und der Passiven Seismik um einiges geringer als die der Reflexionsseismik. Gleichwohl erlauben die Reflexionsseismik und Passive Seismik eine grobe Abbildung der Rinnengeometrie sowie auf Basis der Wellengeschwindigkeiten eine Abschätzung, welche lithologischen Schichtpakete erwartet werden können. Auf den Abbildungen zeigen die Wellengeschwindigkeiten, dass unter langsamen Schichten (blau-grün-Töne stehen für tonige Lagen) ein Paket mit schnelleren Lagen folgt (gelb-orange-Töne), welches Moränen oder Schotter-Lagen entsprechen würde. Ein Bohrziel oder eine Bohrlochplanung hätte aber nur alleine mit der Refraktions- bzw. passiven Seismik nicht definiert werden können.

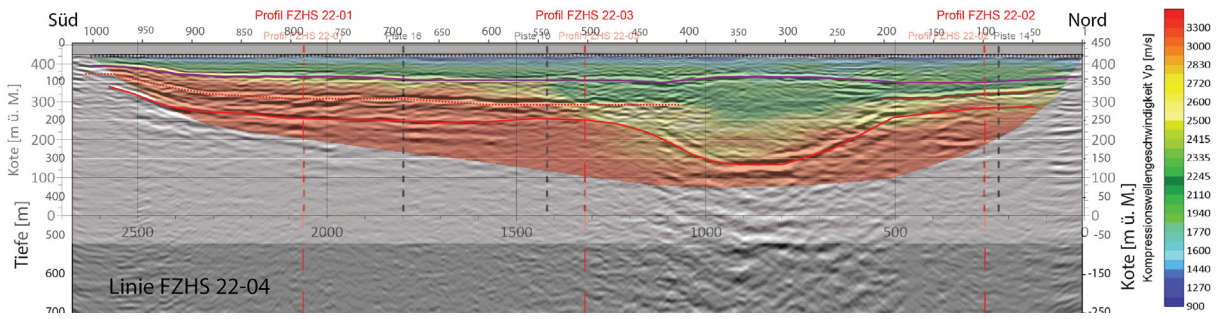


Abb. 16 Reflexionsseismisches Profil FZHS 22-04 überlagert mit der Refraktionsseismik

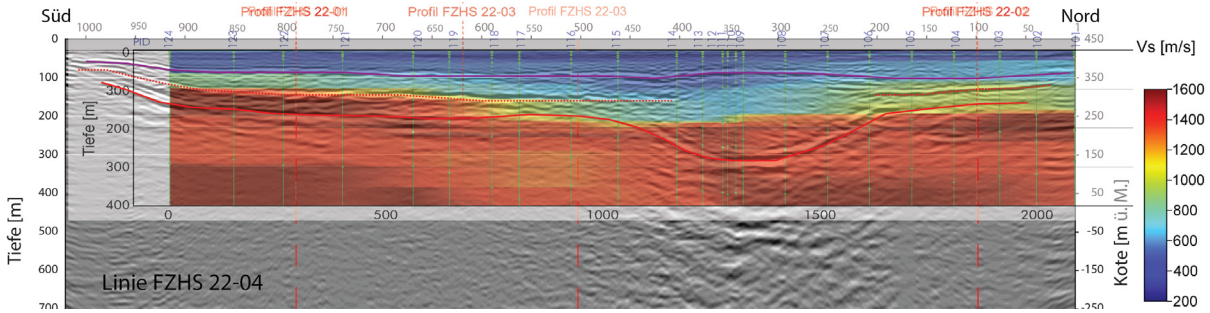


Abb. 17 Reflexionsseismisches Profil FZHS 22-04 überlagert mit Passiver Seismik Linie FZHP 22-01

Das ERT-Modell der Linie FZHE 22-01 ist stark durch Störsignale beeinflusst (siehe Abb. 12). Dies äussert sich z.B. in einem schlieren-artigen und vertikalen Muster von spezifischen Widerständen, die grundsätzlich sehr tief sind und eine geringe Variation aufweisen, welche mit der Untergrundgeologie überhaupt nicht übereinstimmen können (horizontale Lagerung). Deshalb wurde diese Messlinie nicht weiterverwendet. Die Daten der ERT-Linie FZHE 22-02 wurden durch Geo Explorers AG erneut invertiert, um eine Modellsensitivitätsabschätzung rechnen zu können. Diese ist erforderlich, um Bereiche mit wenig Abhängigkeit der Rohdaten ausscheiden zu können, um Falschinterpretationen zu vermeiden. Das neue Inversionsmodell ist in Abb. 18 dargestellt. Die weiss schattierten Bereiche sind die oben erwähnten, insensitiven Bereiche des Modells und sollten nicht interpretiert werden.

Die Spannweite des spezifischen Widerstandes ist auf der Linie FZHE 22-02 generell gering. Dennoch können drei Bereiche unterschiedlicher Werte ausgemacht werden. Im Westen finden sich die höchsten Widerstände schon in geringen Tiefen (ca. 25-50 m). Diese reichen bis ca. 350 m Profildistanz und können dem Fels zugeordnet werden. Folgend an diese höheren Widerstände ist ein scheinbares Band mittlerer Widerstände, welches sich bis in den Osten des Profils zwischen Tiefen von ca. 40m bis 100 m zieht. Dieses korreliert mit dem Reflektorband auf der Reflexionsseismik in diesen Tiefen. Über und unter diesem Band finden sich die tiefsten Widerstände des Modells, welche wahrscheinlich die tonigen Lagen mit tiefen Widerständen widerspiegeln. Die erreichbare Tiefe des Modells variiert stark und beträgt max. 200 m an der tiefsten Stelle (Übergang zu weiss schattierten Bereichen). Die Basis der Rinne konnte somit nicht abgebildet werden.

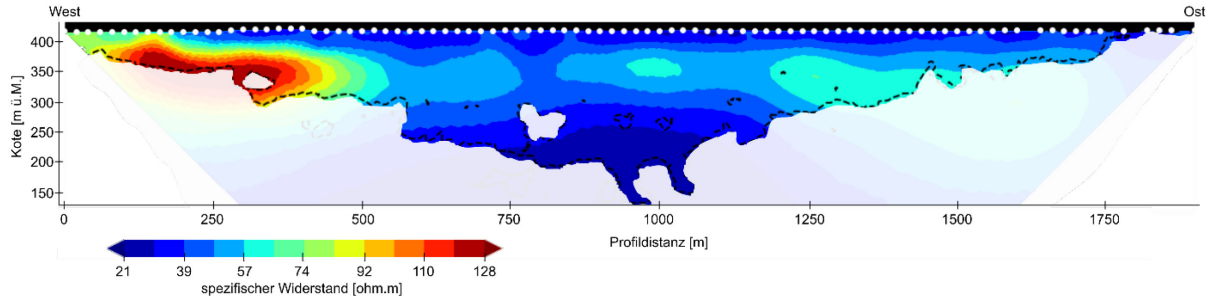


Abb. 18 Inversionsmodell des ERT Profils FZHE 22-02.

Die weiss schattierten Bereiche befinden sich unterhalb der akzeptablen Modellsensitivität. Interpretationen in diesen Modellbereichen sollten nicht oder nur vorsichtig gemacht werden.

4.1.5.3 Interpretation geophysikalische Daten / Geologisches Modell

Nachfolgend wird die geologische Interpretation der geophysikalischen Daten in einem 3D-Modell dargestellt. Die wichtigsten Erkenntnisse werden davon ausgehend beschrieben. Die Interpretation erfolgte primär auf der Reflexionsseismik (Abb. 19), da diese die beste Auflösung und Tiefenabdeckung aller angewandten Methoden aufwies. Drei Haupt-Reflektoren wurden von oben nach unten definiert, welche es erlauben, die Rinnengeometrie und deren Aufbau zu definieren (vgl. Abb. 21):

- Letzteiszeitliche Schotter- oder Moränenablagerungen innerhalb der spätglazialen Seeablagerungen (violetter, grösstenteils durchgehender Reflektor in ca. 50-100 m Tiefe).
- Top einer mächtigen Schicht aus Moränenablagerungen und / oder fluvioglazialen Ablagerungen einer älteren Vergletscherung unter Stillwasserablagerungen (grüner Reflektor in ca. 100-150 m Tiefe, unterbrochen oberhalb der muldenförmigen, tieferen Reflektoren oberhalb vom Top Fels).
- Top Molassefels (OSM bzw. OMM; roter Reflektor mit variierender Tiefe von ca. 200-300 m, in der Rinnenmitte muldenförmig vertieft).

Die Modelle der Refraktionsseismik, der Passiven Seismik und der ERT dienten zur Bestätigung und Verfeinerung der Interpretation basierend auf der Reflexionsseismik. Exemplarisch zeigen dies Abb. 16 bis Abb. 18. In Abb. 20 kann anhand des refraktionsseismischen Modelles der Linien FZHS 22-01, FZHS 22-03 und FZHS 22-04 ebenfalls gezeigt werden, dass im östlichen Bereich des Flughafens die langsamen Schichten (blau-grüne Bereiche) der Rinnenfüllung bis in grössere Tiefen vorhanden sind und eine klare Grenze zum Fels der Molasse (Übergang von gelber zu roter Farbe) besteht. Auch liegen unter den Stillwasserablagerungen (grünliche Farbtöne) etwas schnellere Schichten (gelblich-orange) vor. Letztere deuten auf Moränen- bzw. Schotterlagen an der Basis und in der Mitte der Rinne hin, welche auf dem dichteren und daher schnelleren Molassefels (rote Färbung) aufliegen.

Auf dem ERT-Profil in Abb. 18 ist zumindest in den untiefen Bereichen ebenfalls eine Korrelation von verschiedenen Lithologien, wie z.B. Top Fels im Westen oder obere Moränenablagerungen innerhalb der Stillwasserablagerungen möglich. Tiefere Rinnenbereiche, die Rinnenränder sowie der Übergang zu Top Fels in der Rinnenmitte konnten aber, wie oben beschrieben, nicht abgebildet werden. Grundsätzlich sind die Daten der nicht-reflexionsseismischen Methoden zu wenig aufgelöst, als dass darauf allein eine Interpretation der Rinnenform oder -tiefe möglich wäre.

Abb. 21 zeigt die interpretierten reflexionsseismischen Querprofile in einer 3D-Darstellung. Die Rinne ist auf allen Querlinien deutlich erkennbar (roter Reflektor). Im nordöstlichen Messgebiet scheint sich noch eine weitere, weniger tiefe Rinne ausgebildet zu haben. Die Seismik zeigt das Vorhandensein von zwei architektonischen Rinnenelementen. In eine rund 150-200 m tiefe und ca. 2.5 km breite Rinne, die sich über das ganze Flughafengelände ausbreitet, hat sich eine schmälere und ca. 300 m tiefe Rinne eingeschnitten. Letztere hat Schichten der breiten Rinne ausgeräumt (grün markierter Reflektor = vermutlich Moränenmaterial oder Schotter). Der untiefste, violett markierte Reflektor, wahrscheinlich eine Moränen-/Schotterlage innerhalb der Stillwasserablagerungen aus Silt und Ton ist überall durchgängig vorhanden.

Die wichtigsten Erkenntnisse der Auswertung sind:

- Die vorgängig vermutete, allgemeine Rinnenlage wurde weitestgehend bestätigt (Abb. 22).
- Die Rinne ist ca. 30-50 % tiefer als publiziert und scheint gegen Süden des Untersuchungsgebietes leicht tiefer zu sein als im Norden.
- Die Rinne ist breiter und am Rand tiefer als vorweg angenommen.
- Innerhalb dieser flachen Rinne hat sich eine tiefere Rinne eingeschnitten.
- Im Norden scheint sich die Rinne in zwei Rinnen aufzuteilen.
- Die Messdaten deuten auf eine Wechselfolge von Stillwasserablagerungen und Schotter- bzw. Moränenlagen hin.
- Eine Definition von Bohrstandorten ist möglich.

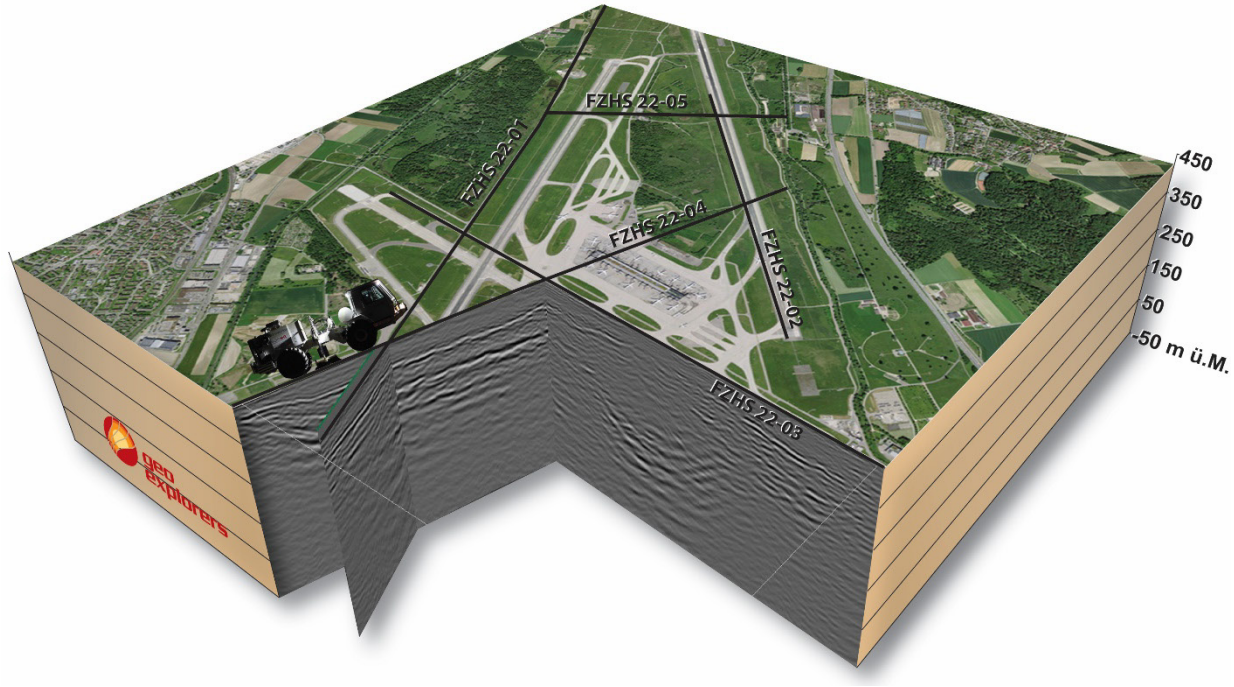


Abb. 19 3D-Modell mit Reflexionsseismik

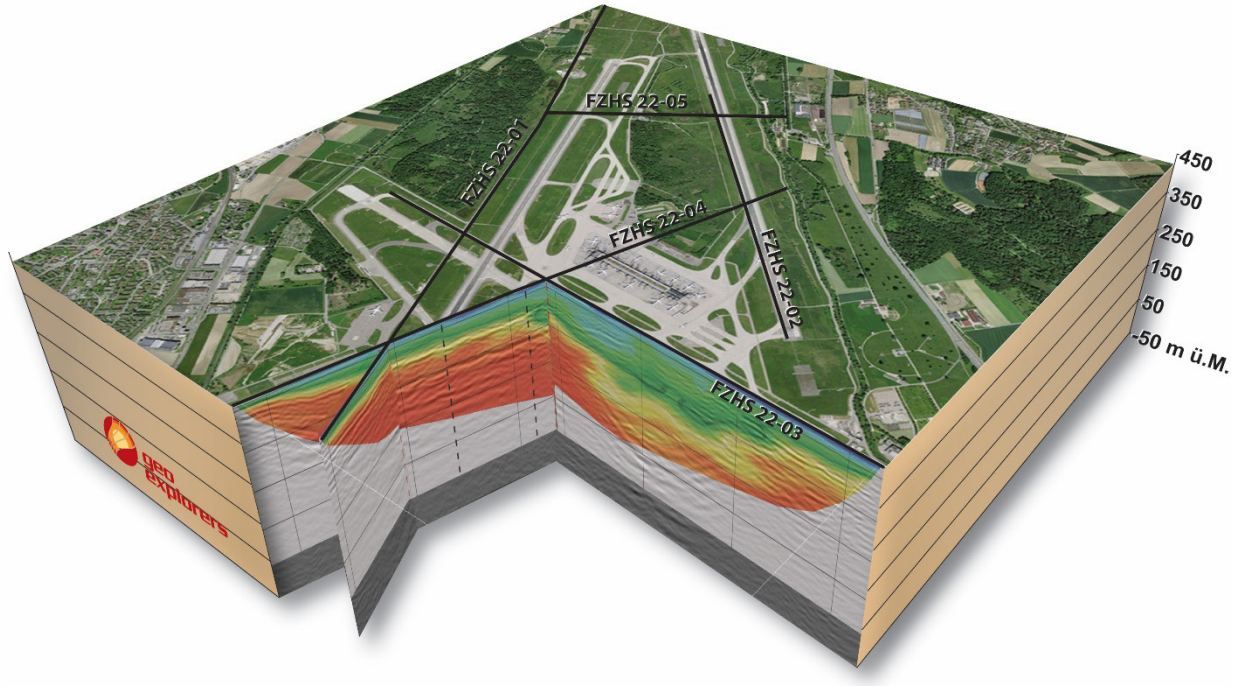


Abb. 20 3D-Modell mit überlagerter Refraktionsseismik

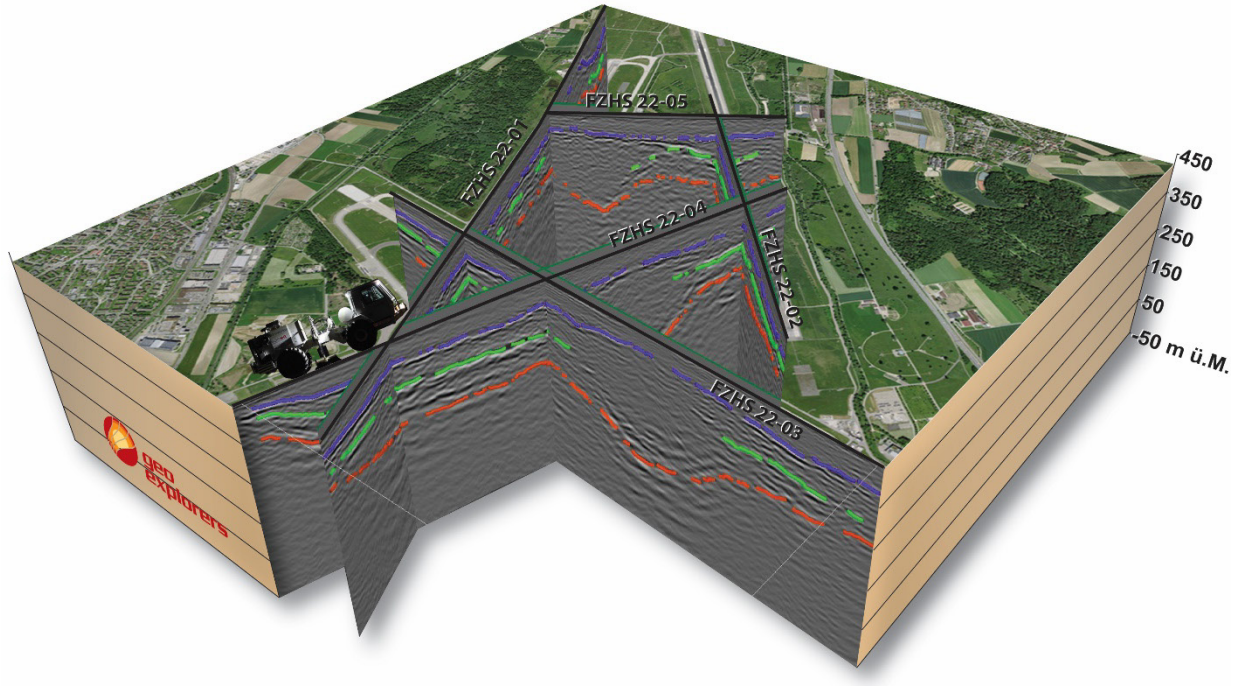


Abb. 21 3D-Modell mit Interpretation

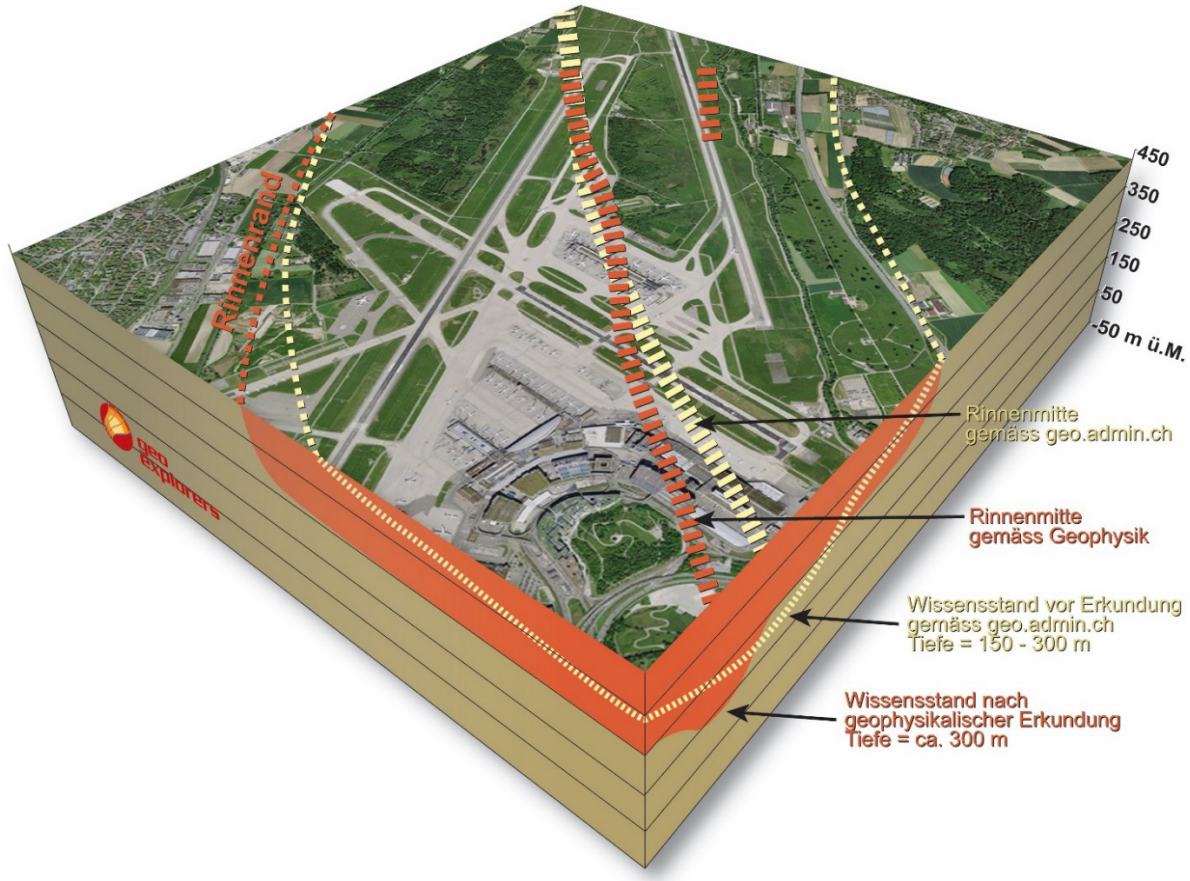


Abb. 22 Vergleich Wissensstand Rinnenverlauf vor & nach der Erkundung

Die Rinnenform, -lage, -tiefe und die interpretierte tiefste Rinnenmitte sind in Abb. 22 grafisch in Rot dargestellt. Zudem ist auf dieser Abbildung zum Vergleich der Wissensstand vor der geophysikalischen Untersuchung überlagert (gelb gestrichelt).

4.1.6 Fazit für das Speicherpotential und folgende Erkundungsschritte

Mit Hilfe der Reflexionsseismik konnten die Erkundungsziele erreicht werden. Die Lage, Tiefe und Geometrie der Rinne sowie deren interner Aufbau konnten gut abgebildet werden. Mit den nachfolgenden Sondierbohrungen konnten die Aussagen zur Rinnentiefe und dessen Aufbau bestätigt werden. Die passive Seismik und ERT ergänzen und festigen die Messergebnisse der Reflexionsseismik. Es hat sich aber gezeigt, dass die Auflösungsgenauigkeit bzw. die Tiefenabdeckung der beiden alternativen Methoden jeweils zu gering war, um basierend auf diesen allein eine aussagekräftige Interpretation und Bohrzieldefinition vorzunehmen. Bzgl. Nutzen und Vergleich der verschiedenen geophysikalischen Messmethoden wird auf Kapitel 5.1 verwiesen.

Mit der geophysikalischen Erkundung konnte das vorweg erwartete Potential der Rinne bestätigt werden bzw. dieses sogar leicht höht werden. Mit den neuen Erkenntnissen aus der Geophysik konnte von folgenden Untergrundparametern ausgegangen werden: nutzbare Rinnenbreite 200 m, Schotter-Mächtigkeit 20-50 m, Rinnentiefe 300 m. Entsprechend werden für eine einzuspeichernde Energiemenge von 14 GWh 4 bis 8 Brunnen benötigt.

Mit Hilfe der geophysikalischen Messungen wurden Bohrziele und Standorte für die folgenden Sondierbohrungen bestimmt. Entlang der Rinne wurden 3 Standorte für die Sondierbohrungen definiert. Mit diesen sollten die Lithologien erkundet werden. Es sollte der Nachweis erbracht werden, ob und wie mächtige Schotterlagen vorliegen, welche potentiell durchlässig und wasserführend sind. Zudem sollte mit Hilfe dieser Sondierbohrungen der beste Standort für einen Testbrunnen definiert werden und dessen Durchführung und Ausbau zielführend geplant werden. Die Sondierbohrungen werden im Kapitel 4.2 beschrieben.

4.2 Sondierbohrungen

4.2.1 Ziele der Sondierbohrungen

Mit Hilfe der geophysikalischen Erkundungen im Herbst 2022 konnte der bisher unbekannte Rinnenverlauf und die Rinnengeometrie abgebildet werden. Da bis dahin keine Bohrung die tieferen Bereiche der Rinne erbohrt hat, der lithologische Aufbau der Rinne sowie deren genaue Tiefe unbekannt waren, wurde entschieden, mit drei einfachen und günstigen Sondierbohrungen zu starten. Damit konnte das Risikokapital im Vergleich zu einem teuren Testbrunnen bei Nichterfolg minimiert werden und konnte ein Testbrunnen überhaupt geplant und korrekt ausgeschrieben werden.

Mit den Sondierbohrungen an verschiedenen Stellen entlang der Rinne waren folgende Zielsetzungen verbunden:

- Nachweis wasserführender Schotter insbesondere an der Basis der Rinne
- Bewertung der Schotterlage hinsichtlich lithologischer Zusammensetzung, Mächtigkeit und Durchlässigkeit sowie Variation dieser Parameter entlang der Rinne
- Definition lithologischer Aufbau der Rinne von GOK bis Basis als Grundlage für die Planung des Testbrunnens
- Qualitative Bewertung der Durchlässigkeit / Wasserführung der Schotterlagen auf Basis von Spülverlusten, geophysikalischem Logging, Bohrproben und einfachen Auffüllversuchen
- Definition bester Standort für einen Testbrunnen
- Bereitstellung von Planungsgrundlagen für den Testbrunnen
- Wie genau können die Interpretationen aus der geophysikalischen Untersuchung bestätigt werden?
- Definition eines Sondierverfahrens, welches günstig und tauglich ist.

4.2.2 Standorte

Es wurden drei Sondierbohrungen ausgeführt. Die Bohrstandorte liegen landseitig östlich des Circle und luftseitig beidseitig des Dock E (Abb. 23).

Bohr-ID	Koordinaten	GOK Höhe über Meer	Ortsbezeichnung	Parzellen-Nr.
SE1	2'685’322 / 1'256’290	435.49	Warteraum P18, südlich von Fracht Ost	6022
P1	2'684’575 / 1’257’070.5	426.53	Enteisungsplatz, DIP Charlie C1, SE von Dock E	3139.14
E1	2'683’904 / 1'257’615	420.96	Ecke Rietstrasse / Rütistrasse, NW von Dock E	4100

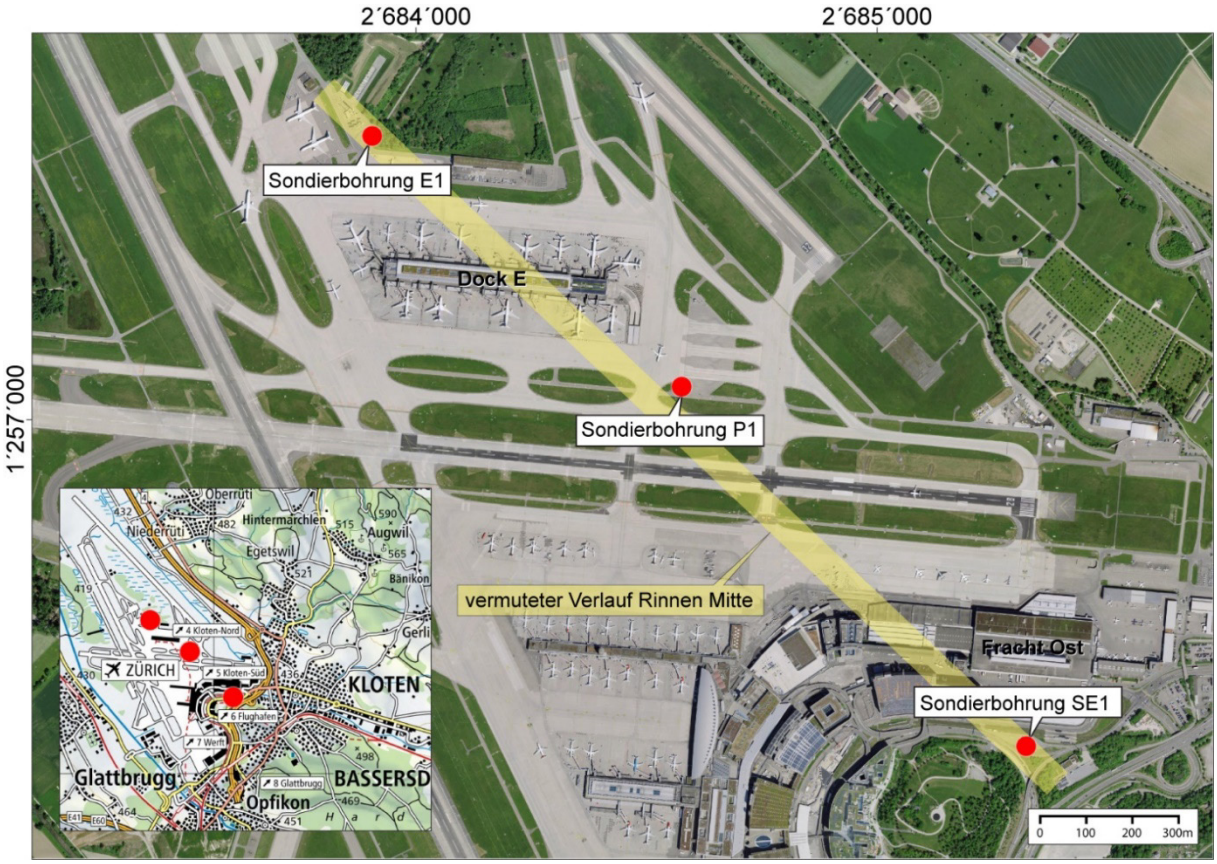


Abb. 23 Bohrstandorte

4.2.3 Chronologie und Projektorganisation

Die wichtigsten Meilensteine werden nachfolgend gelistet (Tabelle 7). Die Vergabe der Bohrarbeiten an die Bohrfirma erfolgte am 07.02.2023. Die kantonale Bewilligung "Sondierbohrungen für grosstechnischen Energiespeicher Flughafen Zürich" wurde am 10.02.2023 vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft ausgestellt. Die Abnahme erfolgte jeweils nach Bohrende ohne Feststellung von Schäden.

Tabelle 7 Chronologie Sondierbohrungen

Bohr-ID	Start Installation	Bohrstart	Logging	Auffüllversuche	Bohrende
SE1	15.06.2023	19.06.2023	23.06.2023	28.06.2023	28.06.2023
P1	28.06.2023	30.06.2023	06.07.2023	11.07.2023	11.07.2023
E1	12.07.2023	12.07.2023	19.07.2023	24.07.2023	25.07.2023

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

Tabelle 8 Beteiligte Firmen und Personen

Firma	Aufgabe bzw. verantwortlich für
Flughafen Zürich AG	Bauherr, Auftraggeber
IG Rinne (Sieber Cassina + Partner AG + Geo Explorers AG + EAXIOM)	Gesamtprojektleitung / Planergemeinschaft Aquiferspeicher
Geo Explorers AG	Projektleitung + Planung Sondierbohrungen, Protokollierung + Rapportierung, Bohrstellengeologie, Begleitung Logging, Auffüllversuche, Bericht
Blétry AG	Bohrfirma
Terratec	Ausführung geophysikalisches Bohrloch-Logging

4.2.4 Allgemeine Angaben zu allen Sondierbohrungen

Die Sondierbohrungen erfolgte mit dem vollhydraulischen Drehbohrgerät DSB 2/10 von Nordmeyer SMAG. Die Bohrungen wurden destruktiv erstellt. Bis max. 76 m u. T wurde im Lufthebeverfahren eine temporäre Schutzverrohrung mit einem Aussendurchmesser von 178 mm gesetzt. Anschliessend wurde bis in das Top vom Molassefels in max. 346 m u. T. gebohrt. Als Spülung kam eine Wasser-Bentonit-Polymer-Spülung zum Einsatz, wobei es in den Schotterlagen zu Spülverlusten kam. Vor dem Einbau der Stahlverrohrung erfolgte ein geophysikalisches Logging. Anschliessend erfolgte ein wiper trip, um das Bohrloch vor dem Einbau der Stahlverrohrung zu "putzen". Es wurde eine 2" Stahlverrohrung bis auf Endtiefe eingebaut. Im Bereich der basalen Schotter wurde eine aufgeschlitzte 6 m lange Rohrstange als einfaches Filterrohr eingebaut, um eine einfache Zugänglichkeit zu den Schottern zu ermöglichen. Dies erlaubt z.B. einfache Auffüllversuche, Markierversuche oder Messungen des Grundwassers. Nach dem Einbau wurde das Innenrohr mit wenigen m^3 Wasser gespült. Es erfolgte aber keine Beseitigung des Filterkuchens oder Entsandung. Um die tiefen Schotterlagen bei der Hinterfüllung zu schützen, wurde an der Basis der mächtigen Stillwasserablagerungen ein ca. 20 m langer Gewebeschlauchpacker eingebaut. Mit einer Stufenzementation wurde der Gewebeschlauchpacker, die Strecke bis zur temporären Schutzverrohrung und abschliessend bis zu Tage schrittweise hinterfüllt. Die Dichte und Menge der Hinterfüllung wurde digital und mit einer Spülungswaage überwacht. In den beiliegenden Bohrprofilen sind die Details beschrieben. Nachfolgend werden für jede Sondierbohrung separat der Bohrlochausbau, die Geologie und das Potential der Schotter beschrieben.

Das Bohrloch-Logging wurde von der Firma terratec geophysical services GmbH & Co. KG aus Heitersheim ausgeführt. Um die Risiken eines Verlustes der Sonden im Lockergestein zu minimieren, wurden nur zwei Befahrungen (Temperatur-Leitfähigkeit und Natural Gamma-Dual-Induction-Log) durchgeführt. Folgende Messungen kamen zum Einsatz: Temperatur und Leitfähigkeit sowie natürliche Gammastrahlung und Gebirgsleitfähigkeit (DIL = Dual induction Log). Der DIL sollte zusätzlich helfen den Tongehalt im Gestein (tiefe Eindringtiefe) von der Tonspülung bzw. Filterkuchen (geringe Eindringtiefe) zu unterscheiden. Auf Grund der nicht immer eindeutigen Aussagekraft der Gamma- und DIL-Messungen in der ersten Bohrung, bedingt durch die grossen Mengen von tief eingespülter Tonspülung in die Schotter, war geplant bei den folgenden Bohrungen eine Messung mit einer BMR-Sonde (borehole magnetic resonance) einzusetzen. Da diese aber auf der schweren Bohrlochspülung "aufschwamm" und auf Grund der magnetischen Anziehungskraft der Messsonde an der oberen

Schutzverrohrung haften blieb und nicht in den Untergrund eingebracht werden konnte, musste auf diese Messung verzichtet werden. Um die Befahrbarkeit mittels BMR-Sonde und als Sicherheitsvorkehrung, dass die Sonde nicht verhakt oder stecken bleibt, wurde vor der Befahrung mit der BMR-Sonde ein Kaliber-Log durchgeführt.

Die Ziele der geophysikalischen Bohrloch-Messungen waren:

- Unterscheidung lithologischer Schichten und Definition deren Grenzen
- Mögliche Aussagen zu Gesteinsdurchlässigkeiten
- Erkennen von Temperatur- bzw. Leitfähigkeitsanomalien hinsichtlich Wasserzu- und -abflüssen

4.2.5 Sondierbohrung SE1

4.2.5.1 Bohrarbeiten und Bohrlochausbau

In Tabelle 9 werden die Bohrtechnik und Bohrlochausbau zusammengefasst.

Tabelle 9 Zusammenfassung bohrtechnische Details Bohrung SE1

Bohrgerät	Nordmeyer SMAG DSB 2/10 (Abb. 24)
Ausführungsdatum	15. – 28.06.2023
GOK = Bezugsfläche	435.49 m ü. M. (=Parkplatzbelag)
Bohrtiefe	346 m u. T.
Bohrsysteme / Bohrkronen	0 - 45.4 m u. T.: temporäre Schutzverrohung AD 178 mm 45.4 - 346 m u. T. destruktiv mit PDC ∅152 mm
Bohrspülung	• 0 - 45.4 m u. T. Lufthebeverfahren • 45.4 – 346 m u. T. Wasser-Ton-Polymer-Spülung • deutliche Spülverluste von ca. 12 m^3 in den Schotterlagen
Bohrlochausbau	• Schacht AD 21.5cm, bodenbündig einzementiert • 0 - 341.5 m u. T. Stahlrohr AD 58 mm ID 52 mm, 6 m Rohre mit Muffen verschraubt (Abb. 25) einzementiert, geschlitzt 317.5 - 323.5 m u. T. • hinterfüllt in 3 Stufen; 1.Stufe Schlauchpacker 194 -215.5 m u. T., 2.Stufe 194.0 - ca. 42 m u. T, 3.Stufe ca. 42 - 0 m u. T. • 194 - 215.5 m u. T. Schlauchpacker (Abb. 25), ca. 42-0 m u. T. Strumpf
Hinterfüllbaustoff	Kümix von Küchler, total ca. 3’000 Liter



Abb. 24 Bohrplatz mit Bohrgerät und Spülungsmulden der Bohrung SE1



Abb. 25 Ausbau Bohrung SE1

Eingebaute 2"Stahlverrohrung (links), geschlitzt von 317.5 bis 323.5 m u. T. (mittig), Einbau Gewebeschlauchpacker von 194 bis 215.5 m u. T. (rechts)

4.2.5.2 Geologie / Lithologie / Bohrlochlogging

Auf Basis von der Reflexionsseismik wurde die Rinnentiefe zwischen 300-350 m erwartet. Die Seismik deutet im oberen und mittleren Bereich auf eine homogene lithologische Serie (Seetone) und an der Basis auf eine Wechselfolge von verschiedenen Lithologien wie Moränen, Stillwasserablagerungen und Schotterlagen hin (Abb. 26). Das nächstgelegene seismische Profil ist allerdings ca. 1 km entfernt; gemessen entlang der Rinnenmitte. Im Grossen und Ganzen wurde die erwartete Geologie angetroffen. Die Rinnentiefe war mit 330 m u. T. leicht tiefer als auf dem seismischen Profil. Es war aber zu erwarten, da die Rinnenbasis nach Süden tiefer wird.

Unter oberflächennahen Schotterlagen wurden mächtige Stillwasserablagerungen bzw. Seetone angetroffen. Darunter folgte eine Abfolge von Schottern, umgelagertes Moränenmaterial und feinkörnigen Lagen. Die gesuchten basalen Schotterlagen sind vorhanden (siehe nachfolgende Tabelle und Abb. 27). Bzgl. deren Durchlässigkeit und Wasserführung wird auf das Kapitel 4.2.5.3 verwiesen.

Von oben nach unten wurden grob folgende Einheiten erbohrt (für Details wird auf das beiliegende geologische Bohrprofil und die Probentafel im Anhang verwiesen):

Tabelle 10 Lithostratigraphische Abfolge in der Bohrung SE1

Top m u. T.	**Basis m u. T.**	**Stratigraphie**	**Lithologie, dominierend**
0	2	Künstliche Auffüllung	Verlehmter Kies mit Sand
2	42	Hochterrassenschotter	z.T. siltig/toniger Kies mit reichlich Sand, polymikt, gerundet
42	64	Moräne evtl. umgelagert	stark tonig-siltiger Kies mit reichlich bis viel Sand, polymikt, kantengerundet, weit gestuft
64	172	Glaziolakustrine Stillwasserablagerungen	graue bis beigegraue siltige Tone (einzelne dropstones)
172	228	Sillwasser-, Deltaablagerungen, umgelagerte Moräne	beigegraue siltige Tone mit wenig bis reichlich Sand & Feinkies, polymikt, kanten- bis gerundet
228	260	Glaziofluviatile Schotter	leicht siltig/toniger Kies mit reichlich bis viel Sand, polymikt, gerundet, Spülverluste
260	320	Sillwasser-, Deltaablager-ungen, umgelagerte Moräne	grauer toniger Silt mit viel Feinsand & wenig bis reichlich Mittel-Grobsand & Feinkies
320	330	Glaziofluviatile Schotter	Kies mit wenig bis reichlich Sand, polymikt, gut gerundet, eng gestuft, Spülverluste
330	346	Molasse USM	Grauer Fein-Mittelquarzsandstein mit Glaukonit

Eine Zusammenfassung der geophysikalischen Logs und deren Resultate ist in Tabelle 11 und Abb. 28 gegeben. Die Logs finden sich in Abb. 29.

Tabelle 11 Logging in der Bohrung SE1

Messdatum	23.06.2023
Bohrlochintervall	45.40 - 344 m u.T
Logs	1. Befahrung: Temperatur und Fluidleitfähigkeit (Salinität) 2. Befahrung: Natürlicher Gamma, DIL (Gebirgsleitfähigkeit)
Anmerkungen	Direkt vor dem Logging erfolgte ein wiper trip (Putzen des Bohrlochs). Das Logging erfolgte in der Ton-Polymer-Spülung.
Resultate	Die Messungen zeigen von ca. 225-260 m u. T. die geringsten Gammawerte, sowie die typische DIL-Variationen, die für Ton-arme bzw. wasserführende Schichten sprechen. Geringe Anomalien in der Temperatur und Saliniät unterstützen dies. In den basalen Schotterlagen von ca. 320-330 m u.T. wurden keine relevanten Anomalien erkannt. Dies liegt evtl. daran, dass in diese Schotter viel Tonspülung abgeflossen ist (Spülverluste) und somit ein dicker Filterkuchen aufgebaut wurde. Dies hat das Formationswasser verdrängt, so dass eine Unterscheidung der Schichtgrenzen evtl. nicht möglich war. Temperaturmessungen von Geo Explorers AG vor dem Auffüllversuch am 28.06.2023 haben auf Bohrsohle eine Temperatur von ca. 23°C gezeigt. Auch wenn die Hinterfüllung erst oberhalb von 215.5 m u. T. ansetzt und somit der basale und nicht-hinterfüllte Bereich kaum durch die Hydratationswärme beeinflusst ist, wird die gemessene basale Temperatur auf Grund der vorgängigen Arbeiten im Bohrloch nicht ganz die Ruhetemperatur widerspiegeln.

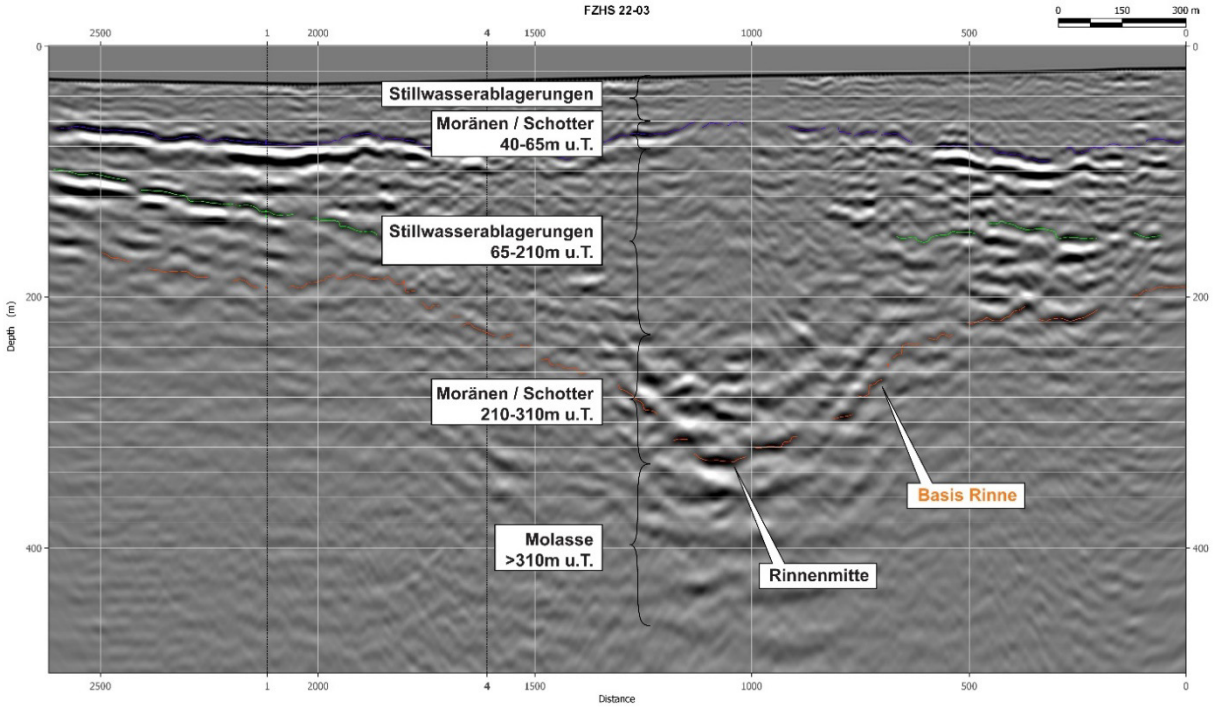


Abb. 26 Lithologische Prognose auf Basis Seismik

W-E-Linie FZHS 22-03 entlang der Piste 10-28. Die Bohrung SE1 liegt ca. 1 km von der Messlinie entfernt; gemessen entlang der Rinnenmitte. Die Rinne vertieft sich von der Messlinie zur Bohrung SE1. Deshalb wurden die tiefen Schichtgrenzen und Rinnenbasis ca. 20 m tiefer angebohrt.

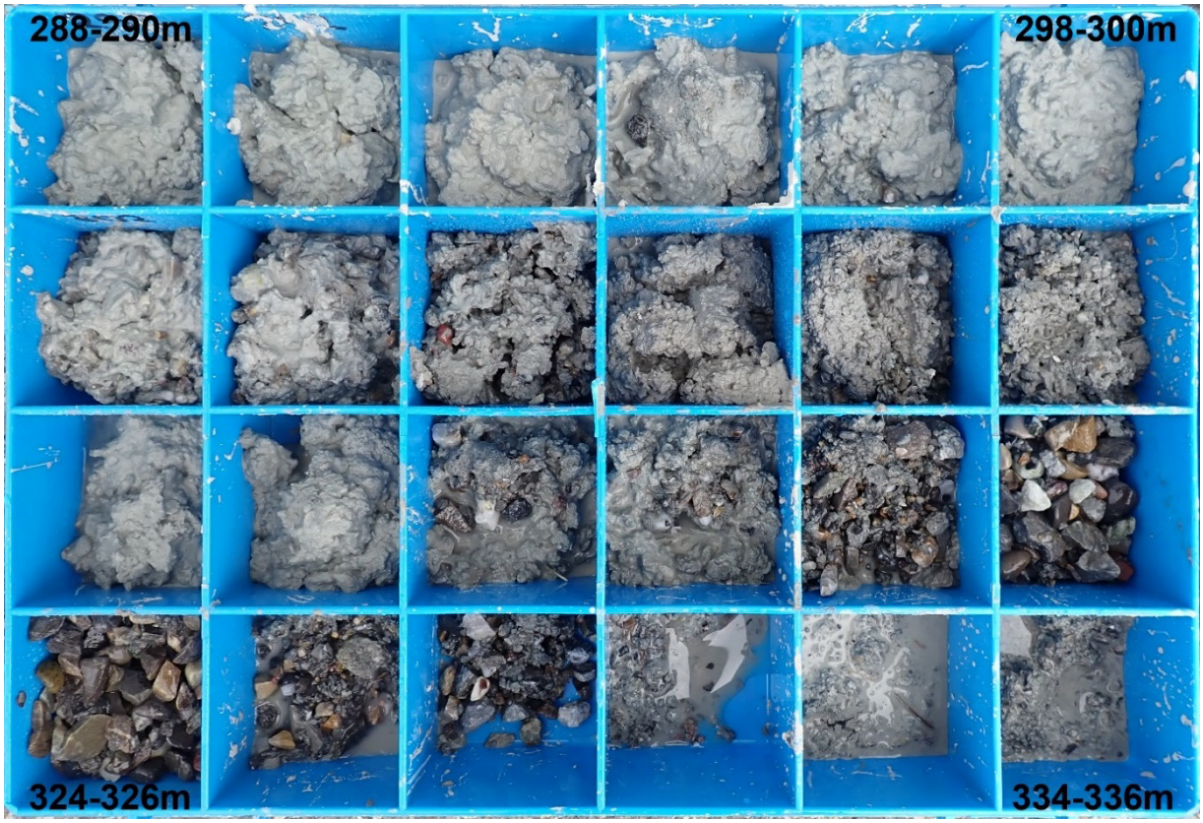


Abb. 27 Beispiel einer Schotterlage (320-330 m u. T.) an der Basis der quartären Rinne in der Bohrung SE1



Abb. 28 Links: Logging von Temperatur-Salinität, rechts: Gamma-DIL, Bohrung SE1

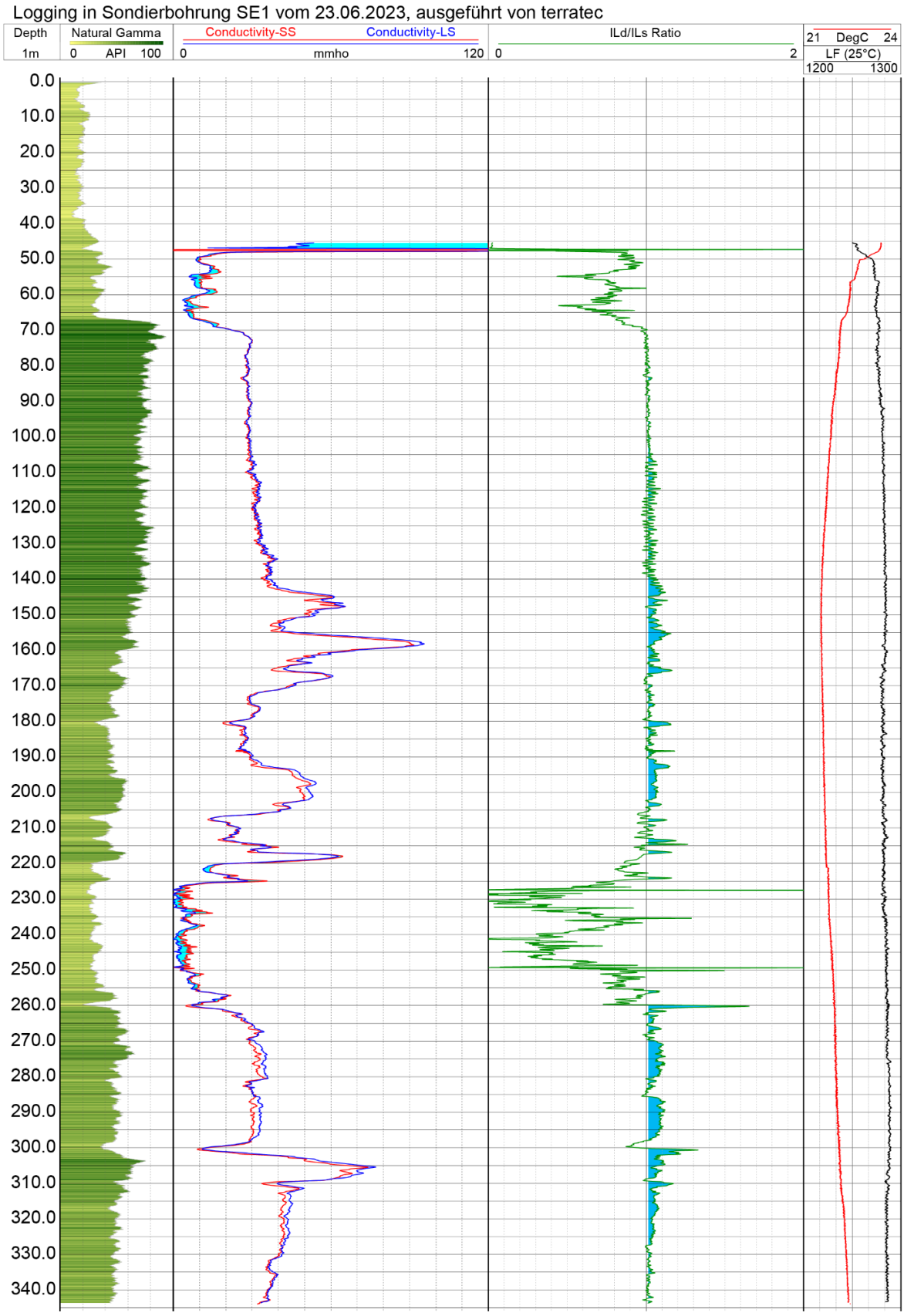


Abb. 29 Logging-Kurven gemessen in Sondierbohrung SE1

4.2.5.3 Aussagen zur Wasserführung, Durchlässigkeiten und Potential

Auffüllversuch: Nach dem Einbau des 2"-Rohres und erfolgter Hinterfüllung wurde am 28.06.2023 ein einfacher Auffüllversuch durchgeführt. Vor der Zugabe von Wasser wurde im 2"-Rohr ein Grundwasserspiegel von 35.5 m u. T. gemessen. Dabei sei beachtet, dass das Bohrloch nicht entsandet wurde, dass der Filterkuchen nicht entfernt wurde und sich restliche schwere Bohrspülung im Bohrloch befand. Ab Hydrant wurde während 41 Minuten ca. 6'450 Liter Frischwasser direkt in das 2"-Rohr Wasser eingespült (max. 206 Liter/Minute) eingespült. Es hätten theoretisch mehr Liter/Minute eingegeben werden können, ohne dass das Bohrloch überlaufen wäre. Auf Grund von starker Luftblasenbildung bzw. Entgasung konnte der Grundwasserspiegel mit dem Lichtlot nicht genau gemessen werden (Aufstau <5 m). Es zeigte sich aber, dass das zugegebene Wasser ohne merklichen Aufstau abgeflossen ist. Das Wasser konnte nur über den geschlitzten Rohrbereich von 317.5-323.5 m u. T. in den offenen Ringraum von 215.5 m u. T. bis 346 m u. T. eintreten. Ob das gesamte Wasser in die basale Schotterlage von 320-330 m u. T. oder auch in die Schotter von 228-260 m u. T. abgeflossen ist, kann nicht beantwortet werden. Temperaturmessungen 30 Minuten nach dem Auffüllversuch zeigen keine eindeutigen Indizien.

Durchlässigkeits-Abschätzungen: Auf Basis des Auffüllversuches können nachfolgende Grundwasserparameter abgeschätzt werden. Dabei sei beachtet: Beim Testbrunnen wurden nur die untersten 6 Meter geschlitzt, d.h. nur im Bereich des unteren 16m mächtigen Grundwasserstockwerks. Vermutlich wurde nur das untere Stockwerk hydraulisch durch den Auffüllversuch erfasst. Der Aufstau war nicht genau messbar, der Aufstau war gemäss Lichtlotmessung sicher nicht mehr als 5 m. Für die Berechnungen werden deshalb 1 m und 5 m Aufstau angenommen. Die resultierenden Werte müssen auf Grund der fehlenden Brunnenentwicklung und kurzen Filterstrecke mit nur wenigen Schlitzen als Minimalwerte betrachtet werden. Bei 206 l/min und einem Aufstau von 1 m resultiert ein hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert k_f in der unteren Schotterlage von $2x10^{-4}$ m/s. Bei 206 l/min und einem Aufstau von 5 m resultiert ein hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert k_f in der unteren Schotterlage von $4.5x10^{-5}$ m/s.

Spülverluste / Lithologie: Während den Bohrarbeiten wurden ab ca. 226 m u. T. deutliche und kontinuierliche Spülverluste festgestellt. Während dem Bohrvortrieb beliefen sich diese auf ca. 12'000 Liter; wobei sich kontinuierlich ein Filterkuchen aufgebaut hat, welcher den Abfluss minimierte. Wie oben im Kapitel Geologie festgehalten, wurden von 228 bis 260 m u. T. und von 320 bis 330 m u. T. relativ saubere, gut gerundete Schotter mit wenig bis viel Sand erbohrt. Besonders in diesen erfolgten die Spülverluste.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auf Basis der angebohrten Lithologien (reine Schotter), der deutlichen Spülverluste während dem Bohren, der Interpretationen der geophysikalischen Logs und dem gut abfliessenden Wasser während dem Auffüllversuch (trotz fehlender Entsandung & Entfernung Filterkuchen und geringen Filterstrecke) zwei sehr durchlässige Schotterlagen im Bereich von 228 bis 260 m u. T. mit einer totalen Mächtigkeit von ca. 42 m vorliegen.

Basierend auf den Erkenntnissen und Abschätzungen zur Durchlässigkeit kann ein mögliches Potential eines Brunnens abgeschätzt werden. Im Betrieb mit einer möglichen Absenkung von bis zu 30 m resultiert aus der unteren Schotterlage ein Potential von mind. 4000 l/min (bei 1 m Aufstau) bzw. mind. 1000 l/min (bei 5 m Aufstau) aus einer Bohrung. Durch die Brunnenentwicklung (Entsanden & Entfernen Filterkuchen), richtigem Brunnenausbau (grösserer Durchmesser, optimaler Filter) und durch das Anschliessen der 30 m mächtigen oberen Schotterlage muss das Grundwasserpotential noch deutlich (d.h. Faktoren) höher liegen als mit dem Auffüllversuch gezeigt.

Kennzahlen zu Durchlässigkeiten, Wasserführung, Grundwasserchemie, -parametern usw. werden mit einem nachfolgenden Testbrunnen erhoben. Die Sondierbohrungen dienten dem lithologischen Nachweis der Schotterlagen sowie zur Planung des Testbrunnens (bester Standort, Absetztiefen usw.). Sie wurden mit dem 2"-Rohr ausgebaut, um mit den Auffüllversuchen qualitative Aussagen zu möglichen Durchlässigkeiten machen zu können, um sie als Piezometer-Messstellen verwenden zu können und um in diese Markierstoffe nach Erstellung des Testbrunnens für die Bestimmung von Fliesswegen eingeben zu können.

4.2.6 Sondierbohrung P1

4.2.6.1 Bohrarbeiten und Bohrlochausbau

In Tabelle 12 werden die Bohrtechnik und Bohrlochausbau zusammengefasst.

Tabelle 12 Zusammenfassung bohrtechnische Details Bohrung P1

Bohrgerät	Nordmeyer SMAG DSB 2/10 (Abb. 30)
Ausführungsdatum	26.06. – 11.07.2023
GOK = Bezugsfläche	426.53m ü. M. (= angrenzende Wiese an Vereisungsplatz)
Bohrtiefe	320 m u. T.
Bohrsysteme / Bohrkronen	0 - 73 m u. T.: temporäre Schutzverrohung AD 178 mm 73 - 320 m u. T. destruktiv mit PDC ∅152 mm
Bohrspülung	• 0 - 73 m u. T. Lufthebeverfahren • 73 – 320 m u. T. Wasser-Ton-Polymer-Spülung • deutliche Spülverluste von >20 m^3 in den Schotterlagen ab 210 m u. T.
Bohrlochausbau	• Schacht AD 32.5cm, bodenbündig einzementiert • 0 - 317 m u. T. Stahlrohr AD 58 mm ID 52 mm, 6 m Rohre mit Muffen verschraubt (Abb. 31) einzementiert, geschlitzt 299 - 305 m u. T. • hinterfüllt in 3 Stufen; 1.Stufe Schlauchpacker 187 -209 m u. T., 2.Stufe 187.0 - ca. 76 m u. T, 3.Stufe inkl. oberhalb Strumpf ca. 76 - 0 m u. T. • 187 - 209 m u. T. Schlauchpacker (Abb. 31), ca. 29-76 m u. T. Strumpf
Hinterfüllbaustoff	Kümix von Küchler, total ca. 3300 Liter



Abb. 30 Bohrplatz mit Bohrgerät P1



Abb. 31 Ausbau Bohrung P1

Eingebaute 2"Stahlverrohrung (links), geschlitzt von 299 bis 305 m u. T. (mittig, gefräste Schlitze mit weissen Pfeilen markiert), Einbau Gewebeschlauchpacker von 187 bis 209 m u. T. (rechts)

4.2.6.2 Geologie / Lithologie / Bohrlochlogging

Ca. 70 m vom Bohrplatz entfernt wurde die reflexionsseismische Linie FZHS 22-03 durchgeführt. Auf Basis von dieser wurde die Rinnentiefe bei ca. 310 m u. T. und das Top der basalen grobklastischen Lockergesteine bei ca. 210 m u. T. erwartet. Eine Lage von Schottern oder Moränen wurde innerhalb der homogenen Seetone von ca. 40 bis 65 m u. T. erwartet (Abb. 32).

Die prognostizierte Abfolge und Grenztiefen wurden angetroffen. Die Rinnenbasis lag bei 310 m u. T.. Unter oberflächennahen Stillwasserablagerungen und der grobklastischen Lage von 26 bis 73 m u. T. wurden mächtige Stillwasserablagerungen bzw. Seetone angetroffen. Darunter folgte ab 208 m u. T. eine Abfolge von glaziofluvatilen Schottern und Moränenmaterial. Die gesuchten basalen Schotterlagen sind vorhanden (siehe nachfolgende Tabelle und Abb. 33). Bzgl. deren Durchlässigkeit und Wasserführung wird auf das Kapitel 4.2.6.3 verwiesen.

Von oben nach unten wurden grob folgende Einheiten erbohrt (für Details wird auf das beiliegende geologische Bohrprofil und die Probentafel im Anhang verwiesen):

Tabelle 13 Lithostratigraphische Abfolge in der Bohrung P1

Top m u. T.	**Basis m u. T.**	**Stratigraphie**	**Lithologie, dominierend**
0	2	Künstliche Auffüllung	Siltiger Kies mit Sand
2	26	Stillwasserablagerungen	Graubeiger tonig-siltiger Feinsand
26	62	Moräne evtl. umgelagert	stark tonig-siltiger Kies mit Sand & Steinen, polymikt, kantengerundet, weit gestuft
62	73	Glaziofluviatile Schotter	leicht tonig-siltiger Kies mit wenig bis viel Sand, polymikt, gerundet
73	194	Glaziolakustrine Stillwasserablagerungen	graue bis beigegraue siltige Tone (einzelne dropstones)
194	212	Sillwasser-, Deltaablagerungen, umgelagerte Moräne	beigegraue siltige Tone mit wenig bis reichlich Sand & Kies, polymikt, kanten- bis gerundet
212	252	Glaziofluviatile Schotter	Leicht tonig-siltiger Kies mit wenig bis viel Grobsand, polymikt, kanten- bis gut gerundet, Spülverluste
252	294	Moräne / umgelagerte Moräne	Wechsel von stark tonig-siltigem Kies mit viel Sand und Steinen / Blöcken und graubeiger siltiger Ton mit Kies und Sand sowie Steinen
294	310	Glaziofluviatile Schotter	Leicht tonig-siltiger Kies mit wenig bis viel Sand, polymikt, kanten- bis gut gerundet, eng gestuft, Spülverluste
310	320	Molasse USM	Beiger / rötlicher siltiger Tonstein

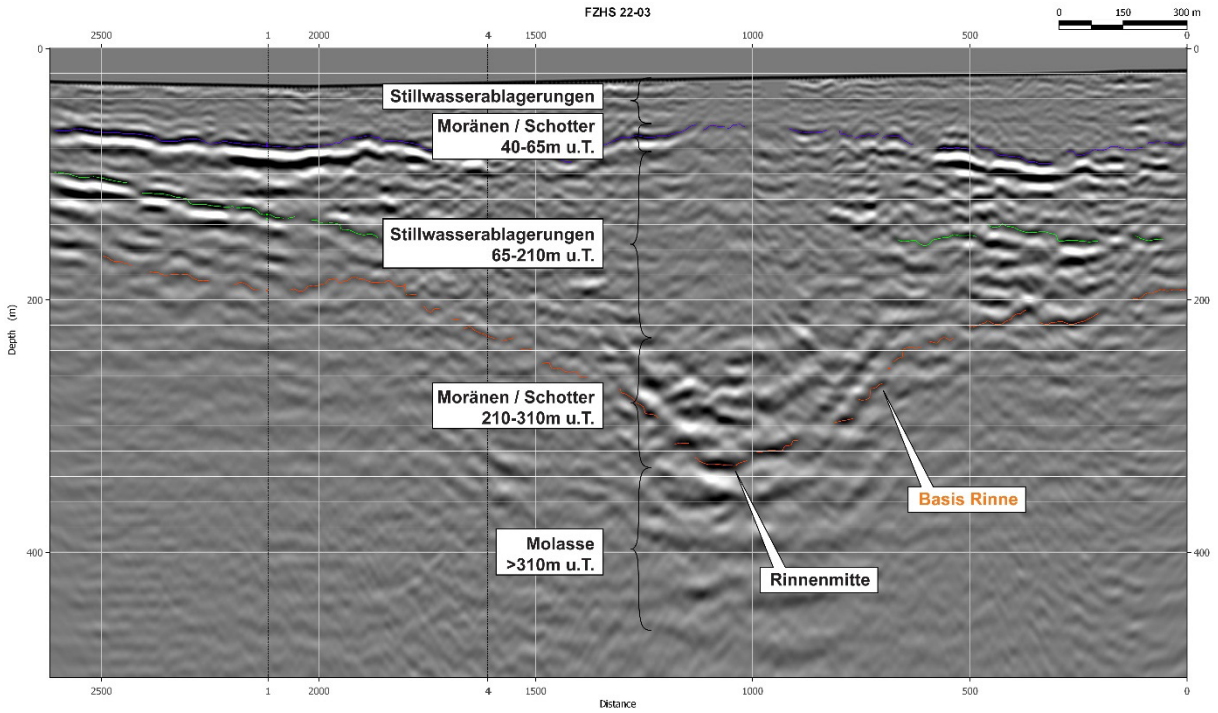


Abb. 32 Lithologische Prognose auf Basis Seismik W-E-Linie FZHS 22-03 entlang der Piste 10-28, die Bohrung P1 liegt ca. 70 m von der Messlinie entfernt



Abb. 33 Beispiel einer tiefen und mächtigen sauberen Schotterlage (212-240 m u. T.) in der Bohrung P1

Tabelle 14 und Abb. 35 geben einen Überblick über das geophysikalische Logging in der Bohrung P1. Die Logs finden sich in Abb. 34.

Tabelle 14 Logging in der Bohrung P1

Messdatum	06.07.2023
Bohrlochintervall	70 - 314 m u.T
Logs	1. Befahrung: Temperatur und Fluidleitfähigkeit (Salinität) 2. Befahrung: Natürlicher Gamma, DIL (Gebirgsleitfähigkeit)
Anmerkungen	Direkt vor dem Logging erfolgte ein wiper trip (Putzen des Bohrlochs). Das Logging erfolgte in der Ton-Polymer-Spülung.
Resultate	Die Messungen zeigen von ca. 207-250 m u. T. die geringsten Gammawerte, sowie die typische DIL-Variationen, die für Ton-arme bzw. wasserführende Schichten sprechen. Anomalien in der Temperatur und Saliniät z.B. bei 220 m u. T. unterstützen dies und deuten auf Wasserflüsse hin. In den basalen Schotterlagen von 294 bis 310 m u. T. wurden abgesehen von Änderungen in der Temperatur und Salinität am Top und der Basis der Schicht keine typischen Gamma- und DIL-Werte wie in den oberen Schottern gemessen. Evtl. sind diese basalen Schotter siltig-toniger oder stärker durch die Ton-Spülung beeinflusst. Das Top der Tonlagen der USM in 310 m u. T. korreliert mit höheren Gamma- und DIL-Werten. Zudem sind Anomalien in der Temperatur und Salinität zu erkennen. Temperaturmessungen vor dem Auffüllversuch am 11.07.2023 haben auf Bohrsohle eine Temperatur von ca. 22°C gezeigt. Auch wenn die Hinterfüllung erst oberhalb von 209 m u. T. ansetzt und somit der basale und nicht-hinterfüllte Bereich kaum durch die Hydratationswärme beeinflusst ist, wird die gemessene basale Temperatur auf Grund der vorgängigen Arbeiten im Bohrloch nicht ganz die Ruhetemperatur widerspiegeln.



Abb. 34 Links: Logging der Temperatur-Salinität, rechts: Gamma-DIL, Bohrung P1

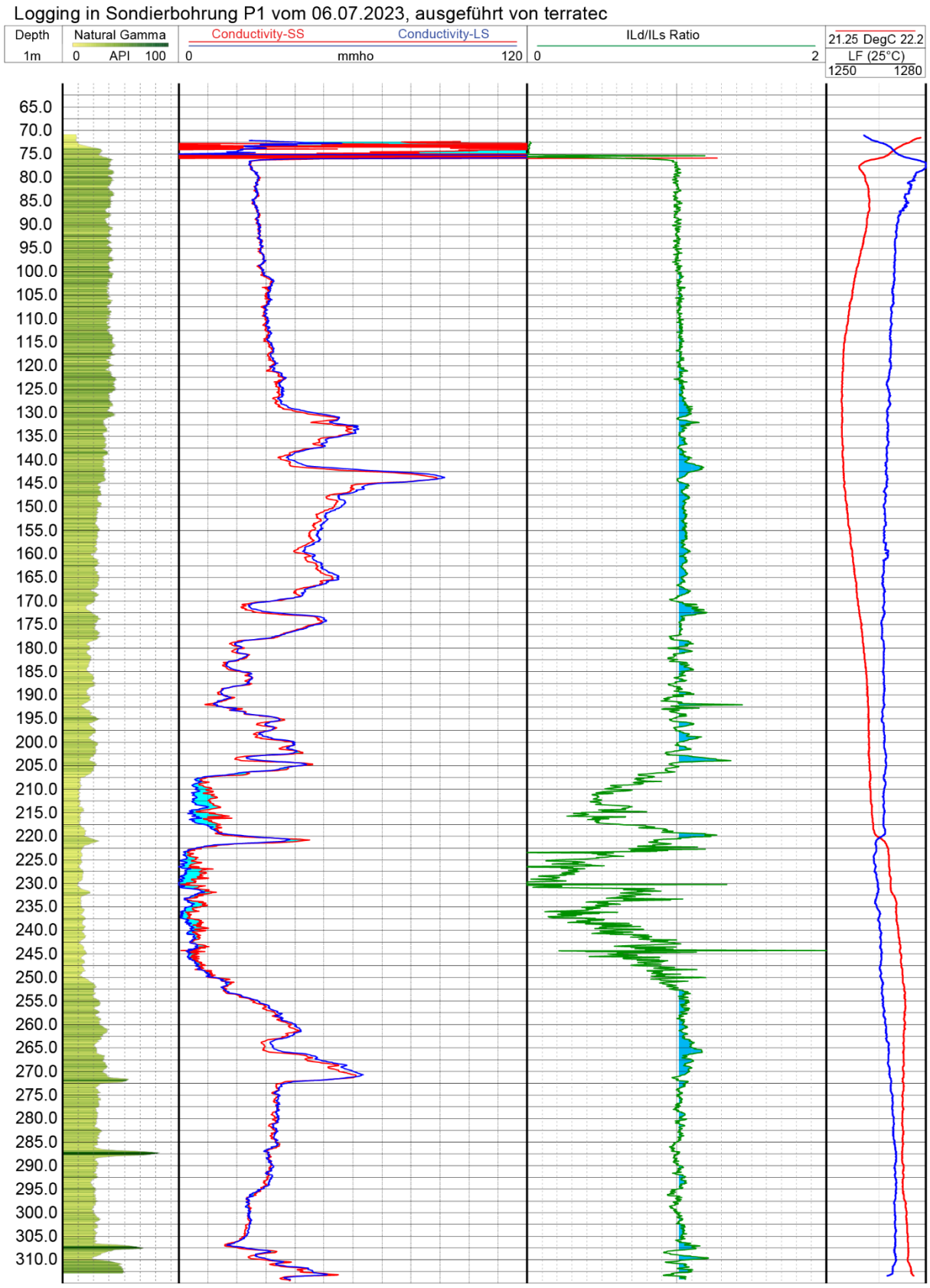


Abb. 35 Logging-Kurven gemessen in Sondierbohrung P1

4.2.6.3 Aussagen zur Wasserführung, Durchlässigkeiten und Potential

Auffüllversuch: Nach dem Einbau des 2"-Rohres und erfolgter Hinterfüllung wurde am 11.07.2023 ein einfacher Auffüllversuch durchgeführt. Vor der Zugabe von Wasser wurde im 2"-Rohr ein Grundwasserspiegel von 18.4 m u. T. gemessen. Dabei sei beachtet, dass das Bohrloch nicht entsandet wurde, dass der Filterkuchen nicht entfernt wurde und sich restliche schwere Bohrspülung im Bohrloch befand. Ab Tankwagen wurden während ca. 50 Minuten ca. 250 Liter Frischwasser drucklos direkt in das 2"-Rohr Wasser eingespült (max. 5 Liter / Minute). Mit der Eingabe von ca. 5 Liter / Minute stellte sich ein Gleichgewicht ein, so dass das Bohrloch gerade nicht übergelaufen ist. Mit dem Lichtlot konnte nach dem Auffüllen eine Absenkung des Wasserspiegels von ca. 10 cm pro Minute gemessen werden. Das Wasser konnte nur über den geschlitzten Rohrbereich von 299-305 m u. T. in den offenen Ringraum von 208 m u. T. bis 320 m u. T. eintreten. Ob das gesamte Wasser in die basale Schotterlage von 294-310 m u. T. oder auch in die Schotter von 212-252 m u. T. abgeflossen sind, kann nicht beantwortet werden. Temperaturmessungen 30 Minuten nach dem Auffüllversuch zeigen keine eindeutigen Indizien.

Durchlässigkeits-Abschätzungen: Auf Basis des Auffüllversuches können nachfolgende Grundwasserparameter abgeschätzt werden. Dabei sei beachtet: Beim Testbrunnen wurden nur die untersten 6 Meter geschlitzt, d.h. nur im Bereich des unteren Grundwasserstockwerks. Vermutlich wurde nur das unteres Stockwerk hydraulisch durch den Auffüllversuch erfasst. Der Abfluss lag bei ca. 10 cm/min, was bei einem Innendurchmesser von 52 mm ca. 0.2 l/min entspricht. Dies entspricht ca. $3.3x10^{-6}$ m^3/s. Wird eine Mächtigkeit des unteren Schotterkörpers von 16 m bei einem Bohrdurchmesser von 152 mm berücksichtigt, so ergibt sich eine eher schlechte hydraulische Durchlässigkeit kf von ca. $4.4x10^{-7}$ m/s. Die resultierenden Werte müssen auf Grund der fehlenden Brunnenentwicklung und kurzen Filterstrecke mit nur wenigen Schlitzen als Minimalwerte betrachtet werden. Evtl. waren auch die wenigen Schlitze z.T. durch den Einbau verstopft, so dass die Durchlässigkeiten scheinbar so tief sind.

Spülverluste / Lithologie: Während den Bohrarbeiten wurden ab ca. 210 m u. T. deutliche und kontinuierliche Spülverluste festgestellt. Während dem Bohrvortrieb beliefen sich diese auf über 20'000 Liter; wobei sich kontinuierlich ein Filterkuchen aufgebaut hat, welcher den Abfluss minimierte. Wie oben im Kapitel Geologie festgehalten, wurden von 212 bis 252 m u. T. und von 294 bis 310 m u. T. relativ saubere, gut gerundete Schotter mit wenig bis viel Sand erbohrt. Besonders in diesen erfolgten die Spülverluste.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auf Basis der angebohrten Lithologien (Schotter), der deutlichen Spülverluste während dem Bohren und der Interpretationen der geophysikalischen Logs durchlässige Schotterlagen im Bereich von 212 bis 252 m u. T. vorliegen. Ob die basalen Schotterlagen von 294 bis 310 m u. T. auch so durchlässig sind, ist nicht eindeutig. Auf Basis der Logs, Spülverluste und der Auffüllversuche scheint es, dass diese basale Kieslage weniger durchlässig bzw. toniger ist. Die ermittelten Durchlässigkeiten auf Basis des Auffüllversuches sind sicher zu tief (siehe Gründe oben). Entsprechend wäre es irreführend ein Potential für einen möglichen Brunnen wie im Fall der Bohrung SE1 abzuschätzen.

Kennzahlen zu Durchlässigkeiten, Wasserführung, Grundwasserchemie, -parametern usw. werden mit einem nachfolgenden Testbrunnen erhoben. Die Sondierbohrungen dienten dem lithologischen Nachweis der Schotterlagen sowie zur Planung des Testbrunnens (bester Standort, Absetztiefen usw.). Sie wurden mit dem 2"-Rohr ausgebaut, um mit den Auffüllversuchen qualitative Aussagen zu möglichen Durchlässigkeiten machen zu können, um sie als Piezometer-Messstellen verwenden zu können und um in diese Markierstoffe nach Erstellung des Testbrunnens für die Bestimmung von Fliesswegen eingeben zu können.

4.2.7 Sondierbohrung E1

4.2.7.1 Bohrarbeiten und Bohrlochausbau

Die Sondierbohrung wurde ähnlich erstellt wie die vorgängigen Bohrungen. Allerdings wurde ein artesisches Grundwasservorkommen («Arteser») angebohrt, welches zu Anpassungen des Bohrverfahrens geführt hat. Da in 48-50 m u. T. ein totaler Spülverlust erfolgte, wurde entschieden, die Zone mit einer grösseren Schutzverrohrung mit Aussendurchmesser von 219 mm zu überbohren. Am nächsten Tag wurde in einem Tiefenintervall von ca. 50-60 m u. T. ein Arteser festgestellt. Das Druckniveau stieg in der aufgeschraubten Schutzverrohrung bis auf eine Höhe von 2 m ü. T. und verharrte dort. Der Ausfluss lag bei ca. 60-100 l/min (Abb. 36). Um den Arteser zu stoppen, wurde die 219 mm Schutzverrohrung bis auf 30 m u. T. und die 178 mm Schutzverrohrung bis auf 72 m u. T. verlängert. Der Ringraum zwischen beiden Verrohrungen wurde mit Dichtringen abgedichtet, so dass der artesische Ausfluss gestoppt werden konnte. Anschliessend wurde wie vorgesehen mit dem PDC weiter bis in das Top der Molasse gebohrt. Mit der Hinterfüllung konnte die Bohrung erfolgreich abgedichtet werden und es wurden nach Abschluss keine artesischen Austritte mehr verzeichnet.



Abb. 36 Artesischer Ausfluss aus Sondierbohrung E1

In der nachfolgenden Tabelle und im beiliegenden Bohrprofil sind die Details beschrieben.

Tabelle 15 Zusammenfassung bohrtechnische Details Bohrung E1

Bohrgerät	Nordmeyer SMAG DSB 2/10 (Abb. 37)
Ausführungsdatum	12. – 24.07.2023
GOK = Bezugsfläche	420.96 m ü. M. (= Asphaltplatz)
Bohrtiefe	284 m u. T.
Bohrsysteme / Bohrkronen	0 - 30 m u. T.: temporäre Schutzverrohung AD 219 mm 0 - 72 m u. T.: temporäre Schutzverrohung AD 178 mm 72 - 284 m u. T. destruktiv mit PDC ∅152 mm (Abb. 38)
Bohrspülung	• 0 - 72 m u. T. Lufthebeverfahren • 72 – 284 m u. T. Wasser-Ton-Polymer-Spülung • totaler Spülverluste bei ca. 50 m u. T., weitere mässige Spülverluste ab 206 m u. T. (total ca. 4 m^3)
Bohrausbau	• Schacht AD 21.5cm, bodenbündig einzementiert • 0 - 281 m u. T. Stahlrohr AD 58 mm ID 52 mm, 6 m Rohre mit Muffen verschraubt (Abb. 38) einzementiert, geschlitzt 251 - 257 m u. T. • hinterfüllt in 4 Stufen; 1.Stufe Schlauchpacker 181 -203 m u. T., 2.Stufe 181.0 - ca. 70 m u. T, 3.Stufe Strumpf 70 - 30 m u. T., 4.Stufe 30 m u. T. bis GOK • 181 - 203 m u. T. Schlauchpacker (Abb. 38), ca. 30-70 m u. T. Strumpf
Hinterfüllbaustoff	Kümix von Küchler, total ca. 4300 Liter



Abb. 37 Bohrplatz mit Bohrgerät E1



Abb. 38 Ausbau Bohrung E1

Temporäre Schutzverrohrung AD 219 mm und 178 mm (links), eingebaute 2"Stahlverrohrung (2. v.l.), verwendete PDC-Bohrkrone (3. v.l.), Einbau Gewebeschlauchpacker von 181 bis 203 m u. T. (rechts)

4.2.7.2 Geologie / Lithologie / Bohrlochlogging

Wenige Meter vom Bohrplatz entfernt wurde die reflexionsseismische Linie FZHS 22-04 durchgeführt. Auf Basis von dieser wurde die Rinnentiefe bei ca. 280 m u. T. und das Top der basalen grobklastischen Lockergesteine bei ca. 240 m u. T. erwartet. Eine Lage von Schottern oder Moränen wurde innerhalb der homogenen Seetone von ca. 45 bis 65 m u. T. erwartet (Abb. 39).

Die prognostizierte Abfolge und Grenztiefen wurden angetroffen. Die Rinnenbasis lag etwas untiefer als erwartet bei 268 m u. T.. Unter oberflächennahen Stillwasserablagerungen und der grobklastischen Lage von 48 bis 64 m u. T. wurden mächtige Stillwasserablagerungen bzw. Seetone angetroffen. Darunter folgte ab 200 m u. T. eine Abfolge von glaziofluvatilen Schottern, Stillwasserablagerungen und Moränenmaterial. Die gesuchten basalen Kieslagen sind vorhanden, wenn auch etwas tonig-siltiger als bei den anderen Bohrungen (siehe nachfolgende Tabelle und Abb. 40). Bzgl. deren Durchlässigkeit und Wasserführung wird auf das Kapitel 4.2.7.3 verwiesen.

Von oben nach unten wurden grob folgende Einheiten erbohrt (für Details wird auf das beiliegende geologische Bohrprofil und die Probentafel im Anhang verwiesen):

Tabelle 16 Lithostratigraphische Abfolge in der Bohrung E1

Top m u. T.	**Basis m u. T.**	**Stratigraphie**	**Lithologie, dominierend**
0	2	Künstliche Auffüllung	tonig-siltiger Kies mit Sand
2	18	Stillwasserablagerungen	beigegrauer siltiger Ton
18	30	Moräne evtl. umgelagert	stark tonig-siltiger Kies mit Sand, polymikt, kantengerundet, weit gestuft
30	48	Glaziolakustrine Stillwasserablagerungen	beigegrauer siltiger Ton mit Sand
48	60	Glaziofluviatile Schotter	Leicht tonig-siltiger Kies mit reichlich bis viel Grobsand, polymikt, eckig bis gut gerundet, Spülverluste
60	200	Glaziolakustrine Stillwasserablagerungen	graue bis beigegraue siltige Tone (einzelne dropstones, teils sandig)
200	212	umgelagerte Moräne	stark tonig-siltiger Grobsand und Kies mit Steinen, polymikt, eckig bis kantengerundet
212	240	Glaziofluviatile Schotter / umgelagerte Moräne	Leicht bis mässig tonig-siltiger eckiger-kantengerundeter Grobsand und gerundeter Kies mit einzelnen Steinen, polymikt, Spülverluste
240	268	Glaziofluviatile Schotter, Sillwasser-, Deltaablager-ungen, umgelagerte Moräne	Wechselfolge von leicht tonig-siltigem polymiktem gerundetem bis kantengerundetem Grobsand bis Grobkies, graubeigem siltigem Ton mit Sand und z.T. viel Kies, beigem tonig-siltigem Feinsand
268	284	Molasse USM	Beiger / rötlicher siltiger Tonstein

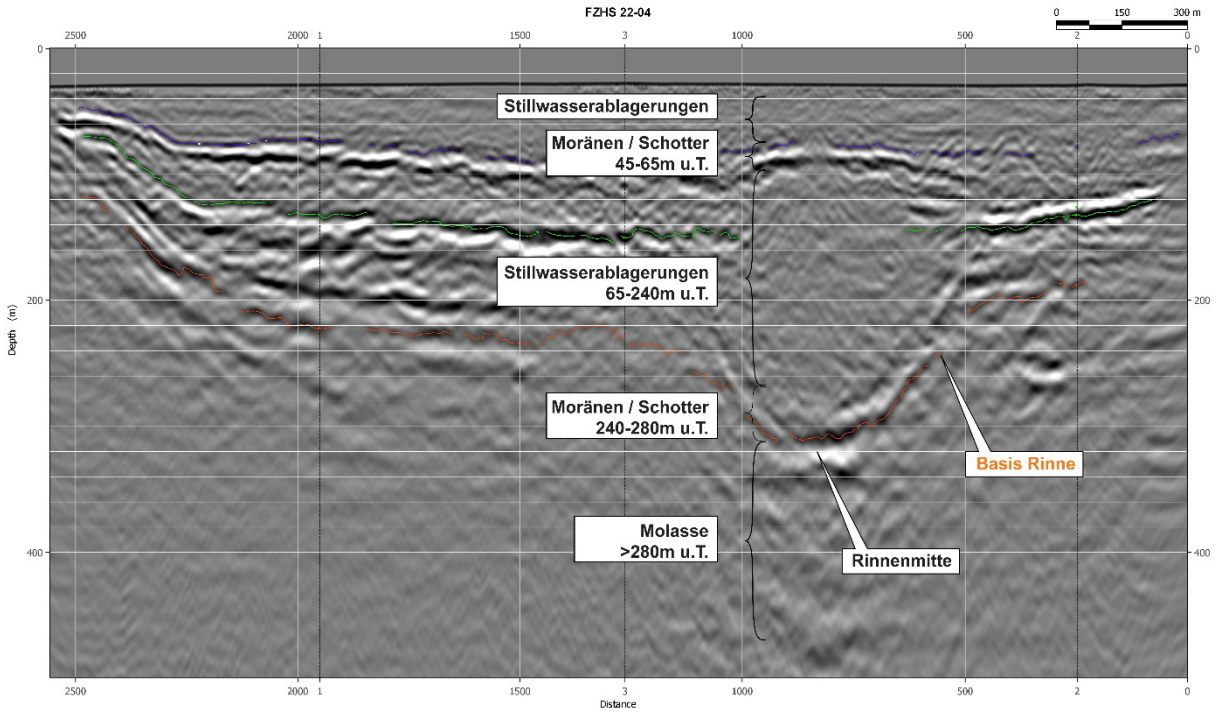


Abb. 39 Lithologische Prognose auf Basis Seismik

NNE-SSW-Linie FZHS 22-04, die Bohrung E1 liegt wenige Meter von der Messlinie entfernt im Bereich der Rinnenmitte

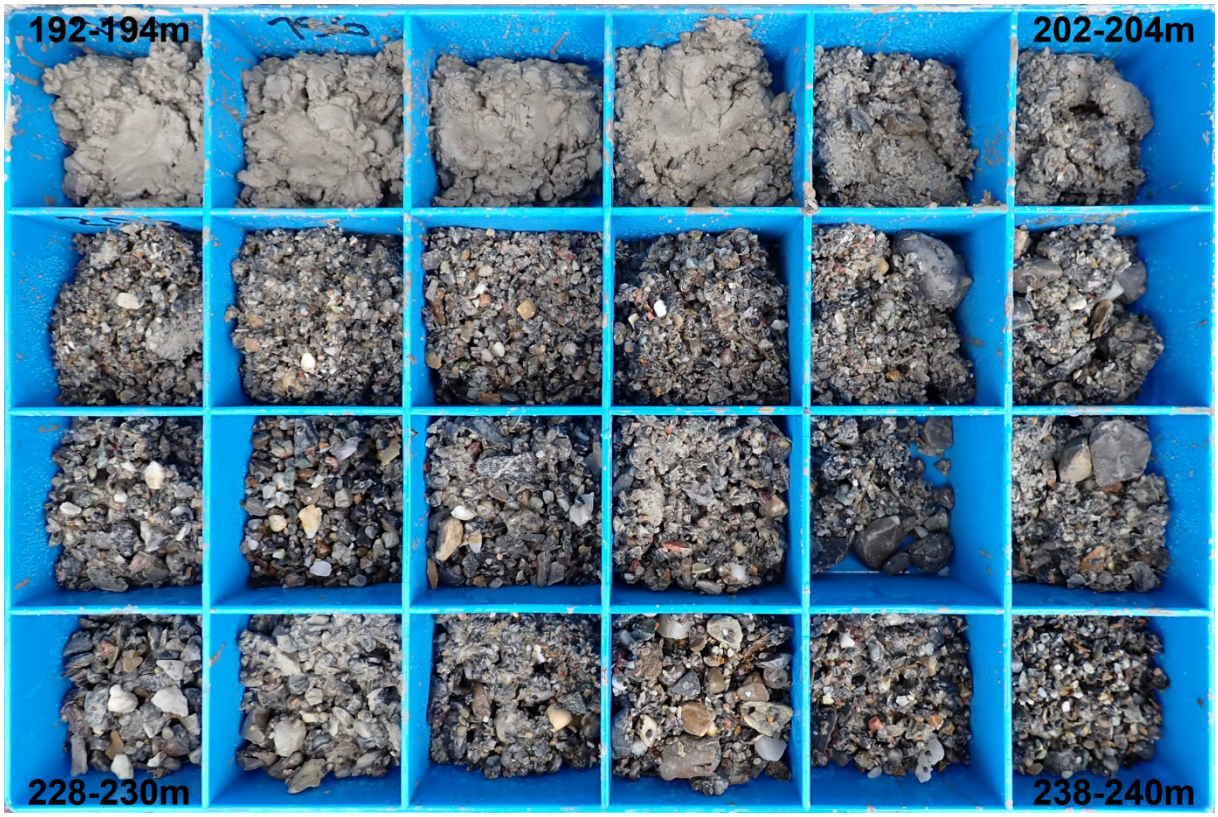


Abb. 40 Beispiel einer tiefen und mächtigen Kies-dominierten Lage (212-240 m u. T.) in der Bohrung E1

Tabelle 17 und Abb. 42 geben einen Überblick über das Logging in der Bohrung E1. Die Logs sind in Abb. 42 ersichtlich.

Tabelle 17 Logging in der Bohrung E1

Messdatum	19.07.2023
Bohrlochintervall	72 – 281.65 m u.T
Logs	1. Befahrung: Temperatur und Fluidleitfähigkeit (Salinität) 2. Befahrung: Natürlicher Gamma, DIL (Gebirgsleitfähigkeit) 3. 4-Arm Kaliber, Neigung, vergeblicher Versuch BMR
Anmerkungen	Direkt vor dem Logging erfolgte ein wiper trip (Putzen des Bohrlochs). Das Logging erfolgte in der Ton-Polymer-Spülung. Die BMR-Messung war nicht möglich, da die Sonde auf der schweren Bohrspülung "aufschwamm" bzw. an der Schutzverrohrung von 0-72 m u.T. durch die magnetische Anziehung festhaftete.
Resultate	Die Messungen zeigen von ca. 207-237 m u. T. die geringsten Gammawerte, sowie die typische DIL-Variationen, die für Ton-arme bzw. wasserführende Schichten sprechen. Anomalien in der Temperatur und Saliniät insbesondere in der Steigung ab ca. 200 m u. T. unterstützen dies. In den basalsten Schotterlagen wurden auch tiefe Gammawerte von 253 bis 262 m u. T., aber weniger ausgeprägte DIL-Anomalien wie in den oberen Schottern gemessen, aber ebenfalls Änderungen in der Steigung der Temperatur und Salinität. Auffällig sind auch die Ausbrüche bzw. Auswaschungen in den Lagen von 200-235 m u. T.. Diese bekräftigen das Vorliegen von wenig bindigen und somit instabilen Schotterlagen. In den untersten Kieslagen sind diese weniger ausgeprägt, evtl.. weil dort die Lagen weniger mächtig und / oder toniger sind. Evtl. ist dort auch die Stützwirkung durch die Tonspülung besser. Temperaturmessungen vor dem Auffüllversuch am 24.07.2023 haben auf Bohrsohle eine Temperatur von ca. 21°C gezeigt. Auch wenn die Hinterfüllung erst oberhalb von 203 m u. T. ansetzt und somit der basale und nicht-hinterfüllte Bereich kaum durch die Hydratationswärme beeinflusst ist, wird die gemessene basale Temperatur auf Grund der vorgängigen Arbeiten im Bohrloch nicht ganz die Ruhetemperatur widerspiegeln.



Abb. 41 Einführen der BMR-Sonde in die Bohrung P1

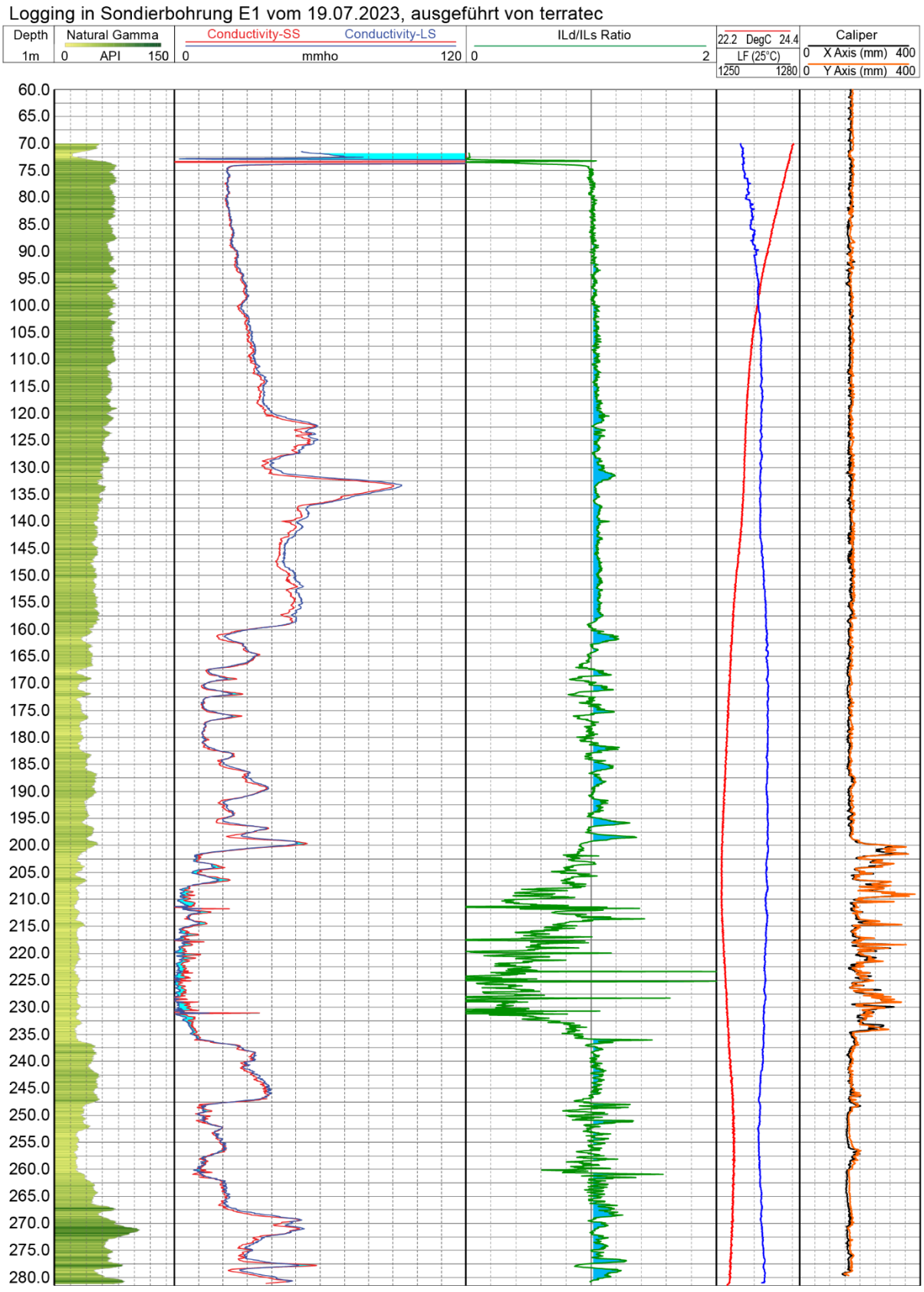


Abb. 42 Logging-Kurven gemessen in Sondierbohrung E1

4.2.7.3 Aussagen zur Wasserführung / Durchlässigkeiten und Potential

Auffüllversuch: Nach dem Einbau des 2"-Rohres und erfolgter Hinterfüllung wurde am 20.07.2023 ein einfacher Auffüllversuch durchgeführt. Vor der Zugabe von Wasser wurde im 2"-Rohr ein Grundwasserspiegel von 24.2 m u. T. gemessen. Dabei sei beachtet, dass das Bohrloch nicht entsandet wurde, dass der Filterkuchen nicht entfernt wurde und sich restliche schwere Bohrspülung im Bohrloch befand. Ab Hydrant konnte nur kurz Wasser eingespült werden, da das Wasser unmittelbar übergelaufen ist. Ein Gleichgewicht konnte mit rund 1-2 l/min erreicht werden. Mit dem Lichtlot konnte nach dem Auffüllen eine Absenkung des Wasserspiegels von 56 cm innerhalb einer Stunde gemessen werden. Das Wasser konnte nur über den geschlitzten Rohrbereich von 251-257 m u. T. in den offenen Ringraum von 203 m u. T. bis 284 m u. T. eintreten. Ob das gesamte Wasser in die basale Schotterlage von 248-264 m u. T. oder auch in die Schotter von 212-240 m u. T. abgeflossen sind, kann nicht beantwortet werden. Temperaturmessungen 30 Minuten nach dem Auffüllversuch zeigen keine eindeutigen Indizien.

Durchlässigkeits-Abschätzungen: Auf Basis des Auffüllversuches können nachfolgende Grundwasserparameter abgeschätzt werden. Dabei sei beachtet: Beim Testbrunnen wurden nur die untersten 6 Meter geschlitzt, d.h. nur im Bereich des unteren Grundwasserstockwerks. Vermutlich wurde nur das unteres Stockwerk hydraulisch durch den Auffüllversuch erfasst. Der Abfluss lag bei ca. 1-2 l/min, was umgerechnet ca. $3.3x10^{-5}$ m^3/s entspricht. Wird eine Mächtigkeit des unteren Schotterkörpers von 16 m bei einem Bohrdurchmesser von 152 mm berücksichtigt, so ergibt sich eine eher schlechte hydraulische Durchlässigkeit k_f von ca. $4.4x10^{-6}$ m/s. Die resultierenden Werte müssen auf Grund der fehlenden Brunnenentwicklung und kurzen Filterstrecke mit nur wenigen Schlitzen als Minimalwerte betrachtet werden. Evtl. waren auch die wenigen Schlitze z.T. durch den Einbau verstopft, so dass die Durchlässigkeiten scheinbar so tief sind.

Spülverluste / Lithologie: Abgesehen vom totalen Spülverlust und den artesischen Ausflüssen in den oberen Schottern zwischen 50-60 m u. T. wurden während den Bohrarbeiten ab ca. 206 m u. T. besonders in den kiesigen Lagen kontinuierliche Spülverluste festgestellt. Diese waren etwas geringer als bei den vorgängigen Bohrungen und beliefen sich während dem Bohrvortrieb auf ca. 4'000 Liter; wobei sich kontinuierlich ein Filterkuchen aufgebaut hat, welcher den Abfluss minimierte. Wie oben im Kapitel Geologie festgehalten, wurden von 212 bis 240 m u. T. und von 248 bis 264 m u. T. relativ saubere bis mässig siltig-tonige und gut bis kantengerundete Schotter mit wenig bis viel Sand erbohrt. Tendenziell waren die Schotter weniger sauber und besonders im unteren Bereich siltiger und toniger als in der Bohrung SE1. Auf Grund von rezirkuliertem Spülungsmaterial ab rund 240 m u. T. und der sehr tonigen Spülung war die lithologische Zuordnung aber nicht immer eindeutig.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auf Basis der angebohrten Lithologien (Grobsand / Kies), der Spülverluste während dem Bohren und der Interpretationen der geophysikalischen Logs durchlässige Schotterlagen im Bereich von 212 bis 240 m u. T. vorliegen. Ob die basalen Schotterlagen von 248 bis 268 m u. T. auch so durchlässig sind, ist nicht eindeutig. Auf Basis der Logs, geringeren Spülverluste und der Auffüllversuche und beobachteten Lithologien scheint es, dass diese basalen Kieslagen weniger durchlässig bzw. tonig-siltiger sind. Die ermittelten Durchlässigkeiten auf Basis des Auffüllversuches sind sicher zu tief (siehe Gründe oben). Entsprechend wäre es irreführend ein Potential für einen möglichen Brunnen wie im Fall der Bohrung SE1 abzuschätzen.

Kennzahlen zu Durchlässigkeiten, Wasserführung, Grundwasserchemie, -parametern usw. werden mit einem nachfolgenden Testbrunnen erhoben. Die Sondierbohrungen dienten dem lithologischen Nachweis der Schotterlagen sowie zur Planung des Testbrunnens (bester Standort, Absetztiefen usw.). Sie wurden mit dem 2"-Rohr ausgebaut, um mit den Auffüllversuchen qualitative Aussagen zu möglichen Durchlässigkeiten machen zu können, um sie als Piezometer-Messstellen verwenden zu

können und um in diese Markierstoffe nach Erstellung des Testbrunnens für die Bestimmung von Fliesswegen eingeben zu können.

4.3 Testbrunnen

Der Testbrunnen ist in Planung.

4.4 Konzepte und Erschliessung

Diese Phase wird nach dem erfolgreichen Testbrunnen begonnen.

4.5 Betrieb und Monitoring

Nach erfolgter Erschliessung und Anpassungen in der Energiezentrale erfolgt der Betrieb und das Monitoring.

5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

5.1 Vergleich und Bewertung der verschiedenen geophysikalischen Methoden

Immer wenn wenig Untergrunddaten vorhanden sind und / oder ein zielgerichtetes Bohren notwendig ist, sind geophysikalische Erkundungen unerlässlich. So wird das Risikokapital für nicht-fündige aber teure Bohrungen minimiert. Da im Falle von Bohrungen nur Punktdaten erhoben werden, bräuchte es ein Vielfaches an Bohrungen, um ein ähnliches strukturelles Abbild vom Untergrund zu erhalten, als dies mit geophysikalischen Daten möglich ist. Entsprechend kann mit den geophysikalischen Erkundungen viel Zeit und Geld gespart werden. Mit der Kombination von verschiedenen Methoden können neben dem strukturellen Aufbau auch Aussagen zu möglichen Lithologien oder Wasserführung gemacht werden. Allerdings kann der tatsächliche Nachweis einer Durchlässigkeit oder Wasserführung nur mit Bohrungen erfolgen.

Im Fall vom Flughafen wurde die Rinne im weiten Umkreis noch nie durchbohrt und es lagen keine geophysikalischen Erkundungen vor. Entsprechend unbekannt war die Rinnentiefe, -geometrie und deren Aufbau. Auch der genaue Verlauf der Rinne oder ob diese sich in Sub-Rinnen aufteilt, war unbekannt. Entsprechend hätte man eine Bohrung nur mit Risiken planen können. Die Chance wäre gross gewesen, dass die Bohrung am falschen Platz lokalisiert und keine Schotter angebohrt worden wären, oder ein zu schwaches Bohrgerät aufgeboten worden wäre und dieses eine tiefere Rinnenbasis nicht hätte erreichen können. Mit den geophysikalischen Messungen konnte ein gutes Abbild vom Untergrund erstellt werden und der Rinnenverlauf, -tiefe, -geometrie und interne Aufbau konnten definiert werden. Basierend auf den Ergebnissen konnten drei Standorte für Sondierbohrungen definiert und die Bohrungen geplant werden. Wie die nachfolgenden Sondierbohrungen gezeigt haben, waren die Prognosen aus der Seismik sehr gut.

Mit dem P&D-Projekt wurde die Standard-Erkundung mit der Reflexionsseismik um die passive Seismik und ERT ausgeweitet, um auch zu evaluieren, ob andere alternative und bisher wenig genutzte Methoden ähnliche Ergebnisse liefern können. Letztere sind weniger aufwändig und kostengünstiger. Auf Grund der engen und tiefen Rinnengeometrie mit messtechnisch anspruchsvollen Sedimenten bestanden bisher bei den alternativen Methoden keine Erfahrungen hinsichtlich der Auflösungsmöglichkeit bezüglich der Rinnenform, der grossen Tiefen und des internen Schichtaufbaus.

Vor den Vergleichsmessungen stellten sich folgende Fragen:

- Wie lassen sich die tiefen quartären Rinnen bestmöglich geophysikalisch erkunden?
- Kann mit geeigneten alternativen Messmethoden (z.B. ERT, passive Seismik) auf aufwändige und teure seismische Vermessungen verzichtet werden, bzw. eignen sich diese allenfalls auch besser, die Rinnengeometrie mit grossen Tiefen, steilen Flanken und mächtigen Seeton-Ablagerungen abzubilden?
- Welche der Methoden ist am zielführendsten und wirtschaftlichsten?

Wie oben in den Ergebnissen bereits beschrieben, konnten die alternativen Methoden die Rinne zwar auch ersichtlich machen, aber ihre Auflösungsgenauigkeit und Eindringtiefe waren deutlich schlechter als bei der Reflexionsseismik. Eine Bohrplanung nur mit den alternativen Methoden wäre hier nicht möglich gewesen. In nachfolgender Tabelle 18 werden die drei geophysikalischen Methoden, welche am Flughafen Zürich zum Einsatz kamen, verglichen. Die Refraktionsseismik wird hier nicht miteinbezogen, da sie nur eine zusätzliche Auswertemethode der Reflexionsseismik darstellt.

Tabelle 18 Vergleich der geophysikalischen Methoden

	Reflexionsseismik	**Passive Seismik**	**ERT (kommerzielle Geräte)**
Typisches Einsatzgebiet	Visualisierung vom strukturgeologischen 2D o. 3D-Aufbau im tieferen Untergrund, nur indirekte Aussage zu Gesteinstyp, Wasserführung usw. möglich	1D Abbildung der Eigenschwingungen der Lithologie Pakete & damit verbundene, indirekte Aussage zur Gesteinsdichtigkeit, keine direkte Aussage zu Gesteinstyp, Wasserführung, Strukturen usw. möglich	2D & 3D Visualisierung von Materialparametern bzgl. elektrischem Widerstand und damit indirekte Aussagen zu Lithologien & Wasserführung möglich, für bis ca. 50 m tiefe Anwendungen entwickelt
Auflösung Rinne an sich (Ränder, Form)	Gute vertikale und horizontale Auflösung möglich, teilweise Schwierigkeiten bei steilen Flanken und ähnlichen Gesteinsdichten am Schichtkontakt	Mässige horizontale Auflösung durch 1D Charakter der Messungen (Interpolation), nicht überall gute Übereinstimmung mit Reflexions-seismik	Vertikale Strukturen nicht sichtbar in Modellen (Gewichtung auf horizontale Schichtung in Inversion), Tiefenabdeckung für Felskontakt Rinnenmitte nicht gross genug
Auflösung interner Aufbau Rinne	Gute Auflösung horizontaler Schichten möglich	Anzeichen einer horizontalen Schichtung erkennbar, aber geringes Auflösungsvermögen (Interpretation schwierig)	Anzeichen einer horizontalen Schichtung erkennbar, wo nicht durch Störsignale beeinflusst, bis ca. 150 m Tiefe gut
Tiefengenauigkeit	Abhängig vom geschätzten Kompressionswellengeschwindigkeitsfeld, Fehler ca. ± 50 m	Abhängig von geschätzter vertikalen Scherwellengeschwindigkeitsverteilung, Fehler etwas grösser als bei Reflexionsseismik	Tiefen bis ca. 150 m mit geschätztem Fehler vergleichbar mit Reflexionsseismik, Tiefenlimit bei ca. 200 m
Technischer Aufwand	Gross, grössere Mannschaften, sowie viel und teures Material (Vibro-Truck) nötig	Gering, kleine Mannschaftsgrössen, jedoch teure Sensoren	Mittel, günstigeres Material & geringere Mannschaftsgrössen als Reflexionsseismik nötig
Technische Einschränkungen	Schwerer Vibro-Truck an befahrbare Wege gebunden, oft Noise, min. Abstände um z.B. Gasleitungen nötig	Sehr anfällig auf Windbeeinflussung und andere Störeinflüsse	Dichtes Leitungsnetz im Untergrund, Lithologien mit sehr geringen Widerständen (v.a. oberflächennah), versiegelte Oberflächen
Personeller Aufwand	Im Fall Flughafen 10 Personen notwendig	Generell mit 1-2 Personen möglich	8 Personen für Flughafen (lange Linien, wenig Zeit), bei kürzeren, zeitunkritischen Linien auch mit 1-2 Personen möglich
Logistischer Aufwand	Gross, Spezialmessfirma notwendig, die nicht beliebig verfügbar ist → grosser Vorlauf nötig auch für Permitting, Ausschreibung, Bewilligungen oft notwendig	Gering, für längere Profile sind mehrere, sehr teure Sensoren nötig, welche nicht überall verfügbar sind, Auswertung ist sehr spezialisiert & es gibt weltweit wenige Spezialisten	Gering bis mittel, es gibt nur wenige kommerzielle Instrumente, die für grössere Tiefen in Frage kommen und nur wenige Spezialisten für die Methode weltweit
Kosten	Teuer, ca. 16’000 Fr / km	Günstig, ca. 4’000 Fr / km	Mittel, ca. 8’000 Fr / km
Geologische Aussage	Nur für grossräumige Strukturen geeignet, bei untiefen Untersuchungen (wie Flughafen) geologische Aussagen nur mit hochauflösender Seismik möglich	Methode generell nur für Abbildung tiefer gelegener und starker Kontraste geeignet (z.B. Übergang Lockergestein-Fels), interne Strukturen schlecht auflösbar	Tiefe ERT nur für grossräumige Strukturen geeignet, kann interne Strukturen auflösen, Messungen mit nur einer Array Geometrie können entweder nur horizontale oder vertikale Strukturen auflösen

Bewertung Reflexionsseismik

Im Fall der tiefen Rinne und einer Umgebung wie beim Flughafen mit Pisten, vielen Leitungen, aber gleichwohl geringer Bebauung und der Möglichkeit zur relativ geraden Linienführung hat die Reflexionsseismik die am besten aufgelösten Daten erzielt (Übergang Fels sowie interne Strukturen und Tiefenabdeckung wurden am deutlichsten abgebildet). Basierend auf diesen Daten war eine genaue Interpretation der Rinnengeometrie, der Rinnenmitte und des Rinnenverlaufes möglich.

Abb. 43 zeigt einen Vergleich der drei seismischen Methoden anhand der querenden Linie, entlang welcher alle diese Methoden angewandt wurden. Es wurde eine ungefähre Interpretation des Übergangs vom Lockergestein zum Fels (violette Linie) alleine basierend auf der Refraktionsseismik der Linie FZHS 22-04 (Abb. 43 a) gemacht. Diese wurde dann auf den entsprechenden Linien der Passiven Seismik (Abb. 43 b) und der Reflexionsseismik (Abb. 43 C) überlagert. Die Form der Rinne und deren Tiefe ist bei der Reflexionsseismik und der Refraktionsseismik sehr ähnlich. Die interpretierten Tiefen hängen vom benutzten Geschwindigkeitsfeld (Reflexionsseismik) und von der Geschwindigkeit, die für den Fels verwendet wird (Refraktionsseismik) ab. Die Differenz der interpretierten Tiefen dieser zwei Methoden liegt bei ca. ± 50 m. Vergleicht man die Interpretation der Refraktionsseismik mit der Passiven Seismik, dann erkennt man, dass zwar die Form dieser Interpretation in der H/V Analyse (Abb. 43 b oben) ebenfalls recht gut abgebildet ist, nicht aber im Geschwindigkeitsmodell der komplizierten Inversions-Analyse (Abb. 43 b unten). Nachfolgend wird zu jeder der alternativen Methoden eine Abschätzung deren Anwendbarkeit für ähnliche Probleme gegeben.

Bewertung Refraktionsseismik

Die Refraktionsseismik erzielte generell gute Resultate, wenn auch weniger hochauflösend als die Reflexionsseismik. Wo die Geophone auf der befestigten Oberfläche platziert werden müssen, oder in Gebieten, wo dichte Schichten innerhalb weicher Schichten erwartet werden, ist es schwierig eine genaue Refraktionsauswertung zu erzielen. Der logistische und finanzielle Aufwand für eine tiefe und hochauflösende Refraktionsseismik ist trotz weniger Schusspunkten ähnlich der Reflexionsseismik. Mögliche Inversionsartefakte in den Modellen können die Interpretation erschweren, wenn nur die Daten der Refraktionsseismik zur Verfügung stehen. Gesamthaft lohnt sich eine reine Refraktionsseismik für ähnliche Anwendungen daher nicht, sie stellt jedoch eine günstige Art dar, bei der man aus den Reflexionsdaten zusätzliche Informationen gewinnen kann (ca. 2.5 % der Kosten der gesamten Reflexionsseismik).

Bewertung Passive Seismik

Nur mit der Passiven Seismik alleine wäre es schwierig gewesen, Bohrziele bzw. den tiefsten Rinnenbereich zu bestimmen. Der interne Aufbau der Rinne konnte nicht überzeugend definiert werden und die Tiefe der Grenze von Quartär zu Fels war im Geschwindigkeitsmodell unklar. Mit den Peaks der H/V Analyse lässt sich allerdings die Form der Rinne befriedigend abbilden. Die sehr flexible Art der Aufstellung der Geophone und der geringe logistische Aufwand machen die Passive Seismik zu einer attraktiven Erstsondierungs-Methode, mit welcher grössere Gebiete in kurzer Zeit grob erkundet werden könnten. Jedoch schränken die sehr spezialisierte Auswertung, die geringe Auflösungskraft im Geschwindigkeitsmodell und die geringe Anzahl vorhandener und teurer Spezialgeophone momentan die grossräumige Anwendung der Methode ein.

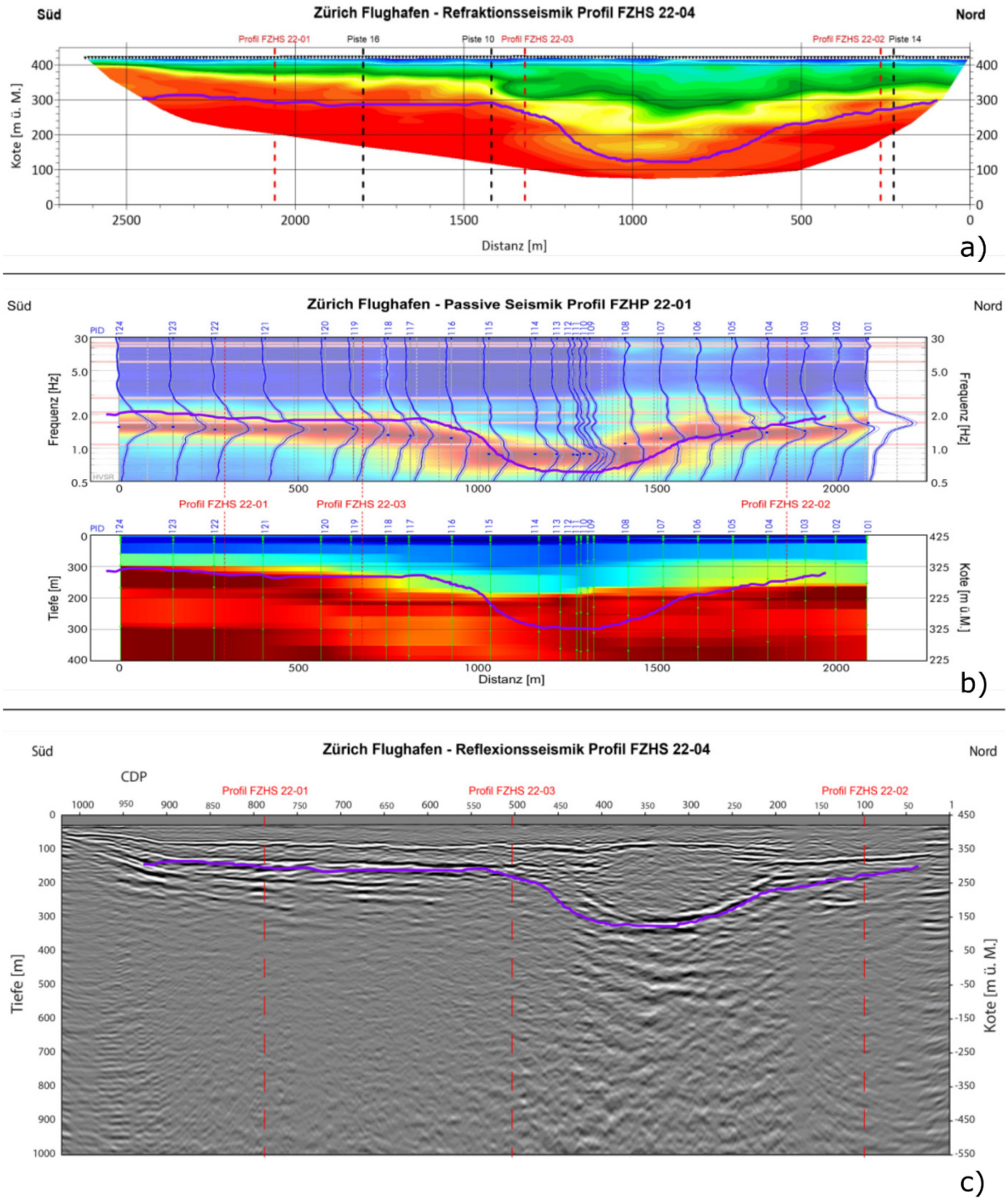


Abb. 43 Vergleich der Interpretation aller seismischen Methoden

Eine einfache Interpretation der Felsoberfläche (violette Linie) wurde auf der Refraktionsseismik (a) gemacht. Legt man diese über die Passive Seismik (b) und die Reflexionsseismik (c) kann man die Unterschiede der verschiedenen Methoden etwas hervorheben. Siehe Text für Erklärungen.

Bewertung ERT

Bei der ERT haben verschiedene Faktoren zu einer teilweise geringen Datenqualität geführt (vergleiche mit Kapitel 4.1). Dies kann wahrscheinlich auf eine Vielzahl an Leitungen im nahen Untergrund, vermutete Leckströme aus langen Kabelauslagen, wie auch den geologischen Schichtaufbau mit mächtigen, leitfähigen Tonlagen zurückgeführt werden. Auf der nördlichen Linie war es möglich, ein glaubwürdiges Modell mit den Rohdaten zu erzeugen. Dieses hat eine wesentlich geringere Eindringtiefe als die Reflexionsseismik bei vergleichbarer Profillänge, zeigt aber zumindest in oberflächennahen Bereichen eine Übereinstimmung der interpretierten Schichtgrenzen (Abb. 18) und kann im Vergleich zur Reflexionsseismik auch deren Mächtigkeit abbilden. Für Untersuchungen mit der gleichen Zielstellung und in ähnlichen Gebieten wie dem Flughafen (dichtes Leitungsnetz im nahen Untergrund, tiefe Rinnen) wird die ERT mit derzeit kommerziell verfügbaren Geräten keine geeignete Alternative zur Reflexionsseismik darstellen.

Es existiert eine Studie der Universität Genf (Carrier et. al, 2019) bei der tiefe geoelektrische (DERT) Messungen für eine geothermale Prospektion mit einer neueren, noch nicht direkt kommerziell verfügbaren Technologie durchgeführt wurden. Diese Technologie (IRIS Instruments V-FullWaver) kommt ohne Kabelverbindungen zwischen den Elektroden aus und kann daher sehr flexibel im 2D und 3D Bereich eingesetzt werden. Für die genaue Funktionsweise ist an dieser Stelle auf die Publikation Carrier et.al (2019) und die IRIS Website verwiesen.

Die 4.5 km lange 2D ERT Linie, welche mit diesem System gemessen wurde, verlief mehrheitlich über Felder und Wiesen nördlich von Genf. Der Elektrodenabstand betrug 50 m und es wurden entlang der Linie 2’318 Messpunkte erzielt. Zum Vergleich, auf den 5.72 km ERT Linien am Flughafen Zürich wurden über 9’000 Messpunkte generiert. Die Anzahl Messpunkte hat einen erheblichen Einfluss auf das Auflösungsvermögen. Um Noise zu unterdrücken, wurden die Messungen in Genf jeweils 60-74 Mal gestapelt, was einer Messdauer pro Punkt von ca. 4-5 Minuten entspricht. Mit einem kommerziellen Gerät und unter Zeitdruck wie am Flughafen mit Sperrzeiten ist es kaum möglich, mit solchen Akquisitionsparametern lange Profillinien zu messen.

In der Profilmitte existiert in Genf die Bohrung Geo-01 mit 744 m Tiefe. Diese Bohrung weist 28 m Quartär-Überlagerung auf. Darunter folgt bis 407 m Tiefe Molassefels, welcher in grösserer Tiefe durch Kalksteine abgelöst wird. Am Flughafen Zürich beträgt die Lockergesteinsmächtigkeit ca. 300 m. Die Zieltiefen der DERT Messungen lagen zwischen 200-700 m unter Terrain, während die Zieltiefen am Flughafen Zürich auf maximal 300-400 m begrenzt waren. Die Ziele der ERT-Messungen waren unterschiedlich. In Genf sollten wasserführende Bereiche entlang von Bruchzonen im Fels aufgedeckt werden, am Flughafen Zürich die Rinnenform mit mächtigen Lockergesteinsablagerungen.

Die DERT Daten von Genf wurden mit reflexionsseismischen und gravimetrischen Daten entlang der selben Profillinie verglichen. Das Fazit des Projekts war, dass das Auflösungsvermögen der DERT und gravimetrischen Daten geringer sind als die der Reflexionsseismik und dass höchstens Regionen von tieferen oder höheren Potentialanomalien ausgeschieden werden können. Weiter wird angemerkt, dass via DERT die Existenz von Fluiden in den geologischen Einheiten evaluiert werden kann. Dies mag auf Festgesteine zutreffen, ist in Lockergesteinsablagerungen allerdings nicht ohne weiteres übertragbar, da auch variierende Tonanteile einen grossen Einfluss auf die gemessenen Widerstände im Untergrund haben und ähnliche Anomalien wie mineralisierte Grundwässer hervorbringen können. Für die Anwendung in Lockergesteins-Grundwasserkörpern, wie dies in der Untersuchung am Flughafen Zürich der Fall ist, ist rein mit der geoelektrischen Methode in Abwesenheit von Bohrungen oder anderen geophysikalischen Methoden nicht eindeutig bestimmbar, ob Grundwasser in einer Formation vorhanden ist. Zu diesem Schluss kommt auch die Studie in Genf.

Als Fazit sind die beiden Feldversuche in Genf und am Flughafen Zürich nicht direkt vergleichbar. Die geologische Ausgangssituation ist grundlegend verschieden. Zudem sind die Systeme, welche für die

Messungen benutzt wurden, nicht vergleichbar, da ein kommerzielles ERT System mit langen Kabelauslagen und dem damit verbundenen elektromagnetisch induzierten Noise belastet ist, was bei dem FullWaver System komplett wegfällt. Die möglichen Gründe weshalb die Messung am Flughafen Zürich nicht vollständig erfolgreich verlief, sind bereits in Kapitel 4.1 erläutert. Was die Studien gemeinsam haben, ist die Einsicht, dass die Auflösung der Methode für eine Bohrstandortsondierung alleine nicht ausreichend ist. Es können zwar Regionen im Untergrund ausgeschieden werden, welche potentiell vielversprechend für die geothermale Nutzung sein können, eine detaillierte Aussage über den strukturellen Aufbau des Untergrundes ist für die Zieltiefen, welche hier von Interesse sind, allerdings nicht möglich.

Es wäre interessant gewesen, das FullWaver System am Flughafen Zürich einsetzen zu können, allerdings stand dieses für die Untersuchung nicht zur Verfügung, weshalb auf kommerziell verfügbare Instrumente zurückgegriffen werden musste. Bereits mit bestehenden Systemen ist es nicht ganz einfach, Experten für kommerzielle ERT Untersuchungen und Auswertungen zu finden. Mit dem generell komplexeren FullWaver System wird es noch schwieriger werden, geschultes Personal zu finden, welches solche Untersuchungen zu hohen Qualitätsstandards durchführen kann.

5.2 Fazit Sondierbohrungen

Mit den Sondierbohrungen konnte der Nachweis erbraucht werden, dass an der Basis der quartären Rinnen mächtige und durchlässige Schotterlagen vorliegen. Somit rechtfertigt sich die nächste Phase 3 mit der Erstellung eines Testbrunnens.

Zudem haben die Sondierbohrungen geholfen, den besten Standort für den folgenden Testbrunnen zu definieren und überhaupt diesen zu planen. Es hat sich gezeigt, dass die Rinne nach Süden tiefer ist und tendenziell dort die Schotterlagen durchlässiger sind. Mit den Sondierbohrungen konnte der lithologische Aufbau des Untergrundes, die wahre Tiefe der Schichtgrenzen und mögliche Probleme, wie artesische Bedingungen definiert und erkannt werden. Diese essentiellen Erkenntnisse flossen in das Bohrkonzept und Ausschreibung des Testbrunnens ein.

Es hat sich bewährt, dass zuerst mit einfachen und günstigen Sondierbohrungen der Untergrund lithologisch untersucht wurde. Somit konnte das Risikokapital deutlich miniert werden. Im Vergleich zu den Kosten eines Testbrunnens konnten für ein Drittel der Kosten drei Sondierbohrungen abgeteuft werden. Zudem konnten rasch erste Ergebnisse zum Potential des Untergrundes an drei Orten erbracht werden. Im Gegensatz zu den Sondierbohrungen wird sich nämlich die Erschliessung mit einem Testbrunnen auf Grund der Komplexität und den wenigen Bohrfirmen mit verfügbaren Bohrgeräten, welche dazu überhaupt in der Lage sind, zeitlich verzögern. Zudem können die Sondierbohrungen als Monitoringbohrungen verwendet werden; z.B. um während Pumptests den Grundwasserspiegel zu messen oder um Markierstoffe einzuspülen, damit Fliesswege und –zeiten bestimmt werden können.

Der Vergleich der tatsächlich angebohrten Geologie und den geophysikalischen Daten zeigen gute Übereinstimmungen. Die Tiefen der Schichtgrenzen im Bohrprofil und auf der Seismik unterscheiden sich je nach Gesteinstyp und Tiefenlage um 0-40 m. Insbesondere der auf der Seismik schwierig zu definierende Schichtaufbau im tiefen Rinnenbereich konnte im Detail bestimmt werden.

In Tabelle 19 werden die geplanten Ziele den tatsächlich erreichten Zielvorstellungen gegenübergestellt. Alle Zielvorgaben wurden erfolgreich umgesetzt.

Tabelle 19 Vergleich geplante und umgesetzte Ziele

Zielsetzung zu Beginn:	Erreichte Ziele:
• Nachweis wasserführender Schotter insbesondere an der Basis der Rinne	• Erfolgreich nachgewiesen an allen 3 Standorten
• Bewertung der Schotterlage hinsichtlich lithologischer Zusammensetzung, Mächtigkeit und Durchlässigkeit sowie Variation dieser Parameter entlang der Rinne	• Lithologien, deren Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten wurden bestimmt.
• Definition lithologischer Aufbau der Rinne von GOK bis Basis als Grundlage für die Planung des Testbrunnens	• Rinnenaufbau konnte bestimmt werden und in die Konzepte des Testbrunnens einfliessen.
• Qualitative Bewertung der Durchlässigkeit / Wasserführung der Schotterlagen auf Basis von Spülverlusten, geophysikalischem Logging, Bohrproben und einfachen Auffüllversuchen	• Mit Hilfe der Spülverluste, Lithologien, Auffüllversuche und Logs war eine min. Abschätzung der Durchlässigkeiten möglich.
• Definition bester Standort für einen Testbrunnen	• Der beste Standort für den Testbrunnen konnte gewählt werden.
• Machen Sondierbohrungen Sinn?	• Mit den Sondierbohrungen konnten rasch und mit wenig Risikokapital der Nachweis von durchlässigen Schottern erbraucht werden, die eine Weiterführung des Projektes rechtfertigten. Sie haben wichtige Entscheidungsgrundlagen für den Standort des Testbrunnens und für dessen Planung geliefert.

6 Weiteres Vorgehen

Gemäss der geplanten Phasen (siehe Kapitel 3) soll nun am besten Standort ein Testbrunnen erstellt werden. Es ist geplant, dass dieser rund 200 m entfernt von der Sondierbohrung SE1 zu liegen kommt. Das Bohrkonzept wurde erstellt und die Ausschreibung erfolgt derzeit. Da die Bohrfirmen derzeit äusserst stark ausgelastet sind und für diese Brunnentiefe nur wenige Bohranlagen überhaupt in der Lage sind, den Brunnen zu erstellen, wird die Fertigstellung des Testbrunnens nicht vor Ende Sommer 2024 erfolgen.

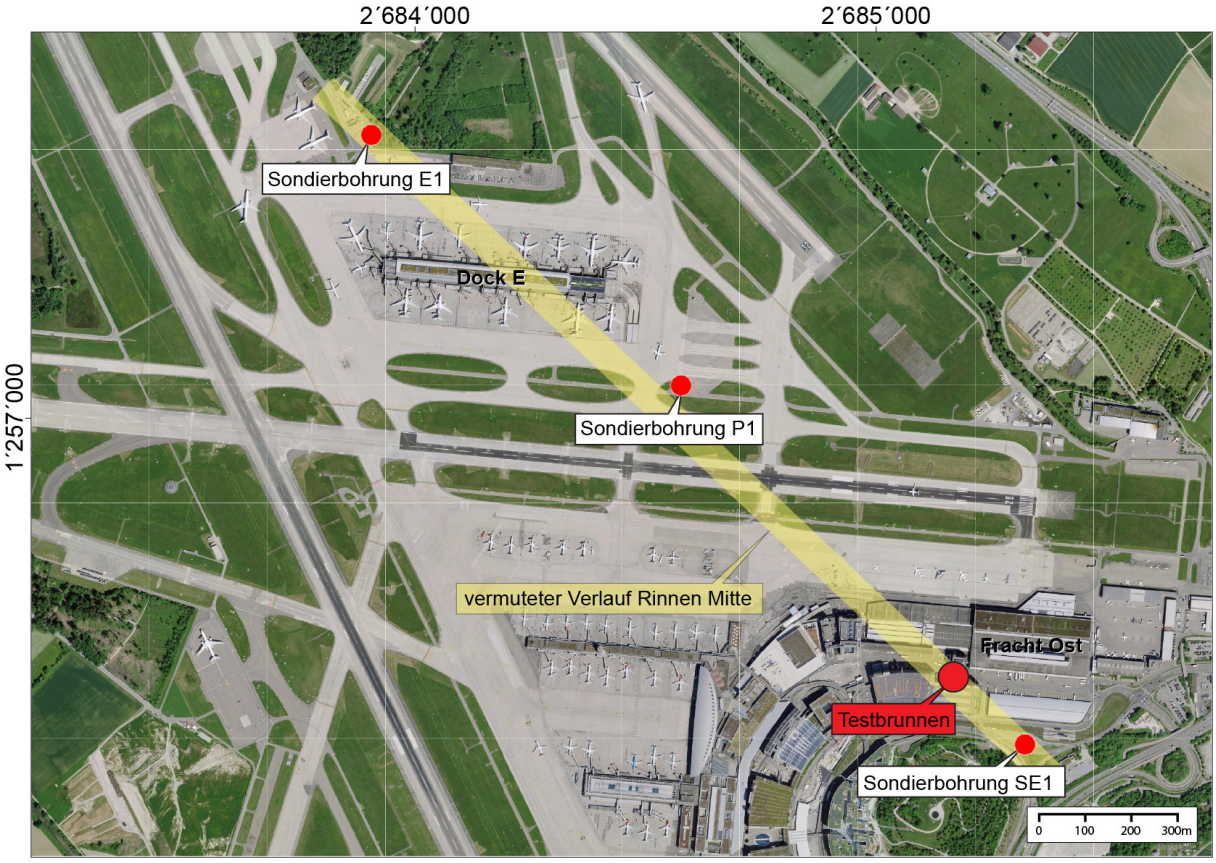


Abb. 44 Standort des Testbrunnens in der Nähe der Sondierbohrung SE1

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Eine offene Zusammenarbeit sollte erst nach dem offiziellen Medienanlass (siehe Kapitel 8) erfolgen. Gleichwohl wurde der Kontakt und Austausch mit universitären Einrichtungen bereits gesucht und aufgenommen. Dabei lag der Fokus mehr allgemein auf den tiefen quartären Rinnen hinsichtlich Wissenstransfer und Austausch von Erkenntnissen und wie diese erkundet werden können. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick:

Organisation / Personen	**Datum Austausch / Zusammenarbeit**	**Themen des Austausches / der Zusammenarbeit**	**Relevante Publikationen**
Universität Bern Institut für Geologie Gruppe Exogene Geologie, Prof. Fritz Schlunegger & Dr. Marius Büchi	Aug. + Dez. 2022, Juni 2023	Kenntnisstand zu verschiedenen Rinnen in der Schweiz	Bandou, et al. 2022 Büchi et al. 2016 Büchi et al. 2018 Schwenk et al. 2022 Stucki et al. 2010
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Geowissenschaften Prof. Philipp Blum	Nov. + Dez. 2022	Problematik 3 K-Regelung und Einfluss auf Mikrofauna; NMR-Sonde	Koch et al. 2021
Universität Genf Section of earth and environmental sciences Prof. Matteo Lupi	Juni 2022	Neue ERT-Messsysteme	Carrier et al. 2019
HSLU Thermische Energiespeicher Willy Villasmil	Sept. 2023	Thermische Energiespeicher im Untergrund	

8 Kommunikation

Es ist ein offizieller Medienanlass von Seite Flughafen Zürich geplant. An diesem soll das Projekt der Öffentlichkeit vorgestellt werden. Es wurde bewusst damit gewartet, bis der Nachweis vorliegender durchlässiger Schotter mit den Sondierbohrungen erbracht worden war.

9 Publikationen

Publikationen sind noch nicht erfolgt.

10 Literaturverzeichnis

Bandou D., Schlunegger F., Kissling E., Marti U., Schwenk M., Schläfli P., Douillet G. & Mair D. (2022), Three-dimensional gravity modelling of a Quaternary overdeepening fill in the Bern area of Switzerland discloses two stages of glacial carving. Scientific reports 12:1441. https://doi.org/10.1038/s41598-022-04830-x

Buechi M.W., Frank S.M., Graf H.R., Menzies J., Anselmetti F.S. (2016), Subglacial emplacement of tills and meltwater deposits at the base of overdeepened bedrock troughs. Sedimentology 64/3. https://doi.org/10.1111/sed.12319

Buechi, M.W., Graf H.R., Haldimann P., Lowick S.E., Anselmetti F.S. (2018), Multiple Quaternary erosion and infill cycles in overdeepened basins of the northern Alpine foreland. Swiss Journal of Geosciences 111:133–167. https://doi.org/10.1007/s00015-017-0289-9

Carrier A., Fischanger F., Gance J., Cocchiararo G., Morelli G., Lupi M. (2019), Deep electrical resistivity tomography for the prospection of low- to medium-enthalpy geothermal resources. Geophysical Journal International 219, 2056-2072. https://doi.org/10.1093/gji/ggz411

Koch F., Menberg K., Schweikert S., Spengler C., Hahn H.J., Blum P. (2021), Groundwater fauna in an urban area – natural or affected? Hydrology and Earth System Sciences 25/6. https://doi.org/10.5194/hess-25-3053-2021

Schwenk M.A., Schläfli, P., Bandou D., Gribenski N., Douillet G.A., Schlunegger F. (2022), From glacial erosion to basin overfill: a 240 m-thick overdeepening–fill sequence in Bern, Switzerland. Scientific Drilling 30, 17-42. https://doi.org/10.5194/sd-30-17-2022

Stucki M.D., Reber R., Schlunegger, F. (2010), Subglacial tunnel valleys in the Alpine foreland: an example from Bern, Switzerland. Swiss Journal of Geosciences 103:363-374. https://doi.org/10.1007/s00015-010-0042-0

11 Anhang

- Bohrprofile der Sondierbohrungen
- Fototafeln der Sondierbohrungen

Bohrkataster-Nummer: Sondierbohrung E1 für Aquiferspeicher

Objekt: Kloten / Flughafen Zürich Ecke Rietstr. / Rütistr. (nördl. Dok E)

Ansatzhöhe (m ü.M.):	420.96	Bewilligungsnummer:	ID BD01096890	Parzelle:	4100
Koordinaten:	2683904 / 1257615	Bohrunternehmer:	Blétry AG, Küttigen	Massstab:	1:1350
Neigung / Richtung (°):	vertikal	Ausführungsdatum:	12.07. - 24.07.2023	Geol. Aufnahme:	Geo Explorers AG

Bohrart	BohrØ [mm]	Höhe [m ü.M.]	Tiefe [m]	Lithologische Beschreibung	Stratigraphische Zuordnung	Grundwasser / Ausbau
Imlochhammer	219	420	0	2 silt-toniger FEINKIES mit reichlich Sand	künstliche Auffüllung	Abschluss GOK siehe Bemerkungen
				4 beiger, stark siltiger, leicht toniger FEIN- bis MITTELSAND	Quartär, glaziolakustrine Stillwasserablagerung	
				beigegrauer, siltiger TON / toniger SILT z.T. mit wenig Feinkies (dropstone?)		
				18		
		400	20	beigerauer, stark siltig-toniger FEIN- und MITTELKIES mit wenig Sand, kantengerundet bis gerundet, weit gestuft, polymikt (i.W. Kalksteine)	Quartär, (umgelagerte) Moräne	
				30		
	178	380	40	beigegrauer, siltiger TON / toniger SILT mit wenig bis viel Fein-Mittelsand und mit wenig Fein- bis Mittelkies (dropstone?), eckig/kantengerundet bis gerundet	Quartär, glaziolakustrine Stillwasserablagerung	Gewebestrumpf von 30-70m u.T.
				48		
				leicht siltig-toniger bis sauberer FEIN- und MITTELKIES mit reichlich bis viel Sand (i.W. Grobsand), eckig/kanten bis gut gerundet, polymikt, eng gestuft (i.W. Kalksteine, Quarz, Gneis, Radiolarit)	Quartär, glaziofluviatile Ablagerungen (Schotter)	
				60		
		360	60	64 beiger, leicht bis stark siltig-toniger FEINSAND mit wenig Grobsand und Feinkies	Quartär, Stillwasser- / Deltaablagerungen	temporäre Schutzverrohrung 219mm bis 30 m u.T. & 178mm bis 72 m u.T. (Ringraum zwischen 219 & 178mm mit Dichtringen abgedichtet)
				Abfolge von grauem & beigegrauem siltigem TON / toniger SILT mit wenig bis mässig viel Grobsand bis Feinkies & leicht siltig tonigem GROBSAND bis FEINKIES (letztere unklar ob Nachfall, da nach längeren Pausen gefördert), eckig bis kantengerundet	Quartär, Stillwasser- / Rinnenablagerungen / umgelagerte Moräne	
				76		
PDC	152	340	80			
		320	100			totale Spülverluste bei 50m u.T.;
		300	120			ARTESER mit 0.2bar (Ruhepegel bei 2m ü.T.) & ca. 60-100l/min von 50 bis 60m u.T. (konnte während Bohrvortrieb und abschliessend vollständig abgedichtet werden);
		280	140	homogener grauer siltiger TON, vereinzelt mit einzelnen kantengerundeten Kiesstücken (dropstone), z.T. leicht sandig und Übergang in toniger SILT	Quartär, glaziolakustrine Stillwasserablagerung (Seetone)	
		260	160			mässige Spülverluste ab 206m u.T. (ca. 4m3 während Bohrvortrieb)
		240	180			Gewebeschlauchpacker von 181-203m u.T.
				200		
		220	200	wenig bis stark siltig-toniger GROBSAND und FEINKIES polymikt, eckig bis kantengerundet (200-204m stark siltig-tonig, 204-208m mässig siltig-tonig, 208-212m wenig siltig-tonig), Spülverluste	Quartär, umgelagerte Moräne	
				212		
		200	220	leicht bis mässig siltig-toniger, eckiger bis kantengerundeter GROBSAND und FEINKIES mit reichlich gerundetem Mittel- bis Grobkies und einzelnen Steinen (Steine auf Grund Bohrfortschritt abgeleitet), polymikt (i.W. Kalksteine und Quarz); Spülverluste	Quartär, glaziofluviatile Ablagerungen (Schotter) und umgelagerte Moräne	
				240		
		180	240	dunkelgraubeiger, siltiger TON / toniger SILT mit wenig Sand, 240-244m: viel Grobsand bis Grobkies, 240-244m: reichlich Grobsand bis Feinkies, polymikt, kantengerundet (unklar wieviel Grobsand & Kies = Nachfall o. rezirkuliertes Spülungsmaterial)	Quartär, umgelagerte Moräne / Stillwasser-ablagerungen	
				248		
				256 leicht siltig-toniger GROBSAND bis GROBKIES gerundet, polymikt i.W. Kalke, Qz., Radiolarit, (Nachfall... siehe 240-248m)	Q. glaziofluv. Schotter / umgelagerte Moräne	Stahlrohr 2" bis 281 m u.T. (Filterrohr von 251-257 m u.T.), AD/ID: 58/52mm; 4stufige Hinterfüllung von 0-203 m u.T. mit Küchler Kümix Dichte 1.73kg/l (Injektionsvolumen 330+1600+880+1620 Liter)
		160	260	260		
				264 beiger, siltig-toniger FEINSAND (mit viel gerundetem Grobsand - Feinkies = wahrsch. Nachfall u./o. rezirkulierte Spülung)	Quartär, glaziolaku. Stillwasser-, Deltaablag.	
				268		
				sauberer GROBSAND bis FEINKIES, polymikt, kantengerundet bis gerundet, (Nachfall... wie bei 240-248m)	Q. glaziofluv. Schotter	
				grauer, siltiger TON mit viel Feinsand (Nachfall siehe 256-260m)	Molasse, USM	
		140	280	beiger und rötlicher, siltiger TON (Nachfall... wie bei 256-260m)		
				284		

Bemerkungen:

· Grundwasserspiegel am 24.07.23 bei 24.2 m u.T. (gemessen im 2"Rohr nach vollendetem Ausbau, kein vollständiger Austausch der Spülung, keine Entfernung Filterkuchen bzw. kein Entsanden), Auffüllversuch mit sehr langsamer Absenkrate;
· Hinterfüllung in 3 Stufen: Gewebeschlauchpacker 181-203m u.T., 2.Stufe 203-70m u.T., Strumpf 30-70m u.T., 4.Stufe 30m u.T. bis GOK;
· Abschluss an GOK mit GW-Betonschacht Typ 015 AD 21.5cm ID 15.5cm Länge 33cm bodenbündig einzementiert mit dichtem verschlossenen Deckel, Abschluss 2" Rohr mit verschliessbarem Dichtdeckel; Bohrpunkt vom Flughafen-Geometer eingemessen;
· ab ca. 240m u.T. wurde Sand + Kies auf Grund hoher Spülungsdichte + vollen Mulde zurück in Kreislauf gepumpt (bei Interpretation berücksichtigt!)

Bohrkataster-Nummer: Sondierbohrung P1 für Aquiferspeicher

Objekt: Kloten / Flughafen Zürich Dip Charlie C1 (Enteisungsplatz)

Ansatzhöhe (m ü.M.):	426.53	Bewilligungsnummer:	ID BD01096890	Parzelle:	3139.14
Koordinaten:	2684575 / 1257070	Bohrunternehmer:	Blétry AG, Küttigen	Massstab:	1:1550
Neigung / Richtung (°):	vertikal	Ausführungsdatum:	29.06. - 11.07.2023	Geol. Aufnahme:	Geo Explorers AG

Bohrart	BohrØ [mm]	Höhe [m ü.M.]	Tiefe [m]	Lithologische Beschreibung	Stratigraphische Zuordnung	Grundwasser / Ausbau
Imlochhammer	178	420	0	siltiger FEIN- und MITTELKIES mit wenig Sand	künstliche Auffüllung	Abschluss GOK siehe Bemerkungen
			2	graubeiger, siltiger FEINSAND mit wenig Mittelsand, trocken-feucht	Quartär, Stillwasserablagerungen / Deltaablagerungen	
		400	16	graubeiger, stark siltiger, leicht toniger FEINSAND nass		
			20	graubeiger, stark siltig-toniger FEIN- bis GROBKIES mit wenig Sand und Steinen, polymikt, weit gestuft, kantengerundet (i.W. Kalksteine und wenig Quarz)	Quartär, Moräne	
		380	26	Wechselfolge von wenig bis stark siltig-tonigem FEIN- und MITTELKIES mit viel Grobsand, polymikt, weit gestuft, kantengerundet bis gerundet (i.W. Kalksteine und wenig Quarz)	Quartär, Moräne / umgelagerte Moräne	Gewebestrumpf von 29-77m u.T.
		360	40	leicht siltig-toniger bis sauberer FEIN- und MITTELKIES mit wenig bis viel Sand (i.W. Mittel- und Grobsand), polymikt, eng gestuft (i.W. Kalksteine und Quarz)	Quartär, glaziofluviatile Ablagerungen (Schotter)	
			60	grauer, homogener siltiger TON	Quartär, glaziolakustrine Stillwasserablagerung (Seetone)	temporäre Schutzverrohrung bis 76 m u.T.
		340	62			
			80			
		320	73			
			100			
		300	120			
			132	grauer leicht beiger, homogener siltiger TON / toniger SILT		
		280	140			
			148	beigegrauer, siltiger TON / toniger SILT, vereinzelte Lagen mit wenig Feinsand, vereinzelt mit einzelnen kantengerundeten Kiesstücken (dropstone)		
		260	160			
			180			
		240	194			
PDC	152		200	beigegrauer, siltiger TON / toniger SILT, lagenweise mit reichlich Fein-, Mittelsand und wenig Feinkies (kantengerundet, evlt. Dropstone)	Quartär, Stillwasser- / Deltaablagerungen / umgelagerte Moräne	Gewebeschlauchpacker von 187-209m u.T.
		220	208			deutliche & kontinuierliche Spülverluste ab 210m u.T. (>20m3 während Bohrvortrieb)
			212	mässig siltig-toniger FEIN- bis GROBKIES mit viel Sand (i.W. Grobsand), polymikt, gerundet, weitgestuft	Q. Moräne / Schotter in See geschüttet	
		200	220	Wechselfolge von leicht siltig-tonigem bis sauberen KIES (i.W. Fein- und Mittelkies) mit wenig bis viel Grobsand und leicht siltig-tonigem SAND (i.W. Grobsand) mit reichlich bis viel Fein- und Mittelkies, polymikt (Kalksteine, Quarz, Radiolarite, Gneis,...), kantengerundete bis gut gerundete Kiese, eng gestuft, deutliche und kontinuierliche Spülverluste, reine grobe Schotter: 214-216m, 218-220m, 226-240m, 248-252m	Quartär, glaziofluviatile Ablagerungen (Schotter)	
		180	240			
			252	Wechselfolge von stark siltig-tonigem Kies (i.W. FEIN- und MITTELKIES) mit reichlich bis viel Sand und einzelnen zerbohrten Steinen / Blöcken und graubeiger siltiger TON / tonigem SILT mit viel Fein- und Mittelkies und reichlich Sand und einzelnen zerbohrten Steinen, polymikt (wie oben), kantengerundet bis gut gerundet, weit gestuft (natürlicher Ton schwer von Filterkuchen / Spülung zu unterscheiden), weiterhin mässige Spülverluste	Quartär, Moräne / umgelagerte Moräne	
		160	260			
			280			
		140	294			Stahlrohr 2" bis 317 m u.T. (Filterrohr von 299-305 m u.T.), AD/ID: 58/52mm; 3stufige Hinterfüllung von 0-209 m u.T. mit Küchler Kümix Dichte 1.75kg/l (Injektionsvolumen 330+1356+1565 Liter)
		300	300	Wechselfolge von leicht siltig-tonigem bis sauberen Kies (i.W. FEIN- und MITTELKIES) mit wenig bis viel Grobsand & stark siltig-tonigem SAND (i.W. Grobsand) mit reichlich bis viel Fein- & Mittelkies, polymikt (Kalke, Qz, Radiolarit, Gneis,...), kanten- bis gut gerundete Kiese, eng gestuft; grauer sehr weicher Tongehalt -> schwere Unterscheidung zwischen natürlichem Ton & Filterkuchen; reine grobe Schotter: 296-304m	Quartär, glaziofluviatile Ablagerungen (Schotter), umgelagerte Moräne	
		120	310			
			320	beiger und rötlicher, siltiger TON (zerbohrter Tonstein?) mit reichlich Kies aus Nachfall und zirkulierter Spülung	Molasse, USM	

Bemerkungen:

· Grundwasserspiegel am 11.07.23 bei 18.4 m u.T. (gemessen im 2"Rohr nach vollendetem Ausbau, kein vollständiger Austausch der Spülung, keine Entfernung Filterkuchen bzw. kein Entsanden), Auffüllversuch mit ca. 5 l/min möglich, Absenkung mit ca. 10cm/min;
· Hinterfüllung in 3 Stufen: Gewebeschlauchpacker 187-209m u.T., 2.Stufe 187 - ca. 76m u.T., 3.Stufe 76m u.T. bis GOK Strumpf 29-76m u.T.;
· Abschluss an GOK mit bodenbündigem, einbetoniertem Betonschacht AD 325mm, 2" Rohr mit verschliessbarem Dichtdeckel verschlossen; Bohrpunkte vom Flughafen-Geometer eingemessen;
· ab ca. 250m u.T. wurde teilweise Sand + Kies auf Grund hoher Spülungsdichte + vollen Mulde zurück in Kreislauf gepumpt (bei Interpretation berücksichtigt!)

Bohrkataster-Nummer: Sondierbohrung SE1 für Aquiferspeicher

Objekt: Kloten / Flughafen Zürich Parkplatz P18 (beim Circle)

Ansatzhöhe (m ü.M.):	435.49	Bewilligungsnummer:	ID BD01096890	Parzelle:	6022
Koordinaten:	2685322 / 1256290	Bohrunternehmer:	Blétry AG, Küttigen	Massstab:	1:1700
Neigung / Richtung (°):	vertikal	Ausführungsdatum:	15.06. - 28.06.2023	Geol. Aufnahme:	Geo Explorers AG

Bohrart	BohrØ [mm]	Höhe [m ü.M.]	Tiefe [m]	Lithologische Beschreibung	Stratigraphische Zuordnung	Grundwasser / Ausbau
Imlochhammer, PDC, Rollenmeissel	178	420	0			
			2	bräunlicher, leicht lehmiger KIES mit Sand	künstliche Auffüllung	Abschluss GOK siehe Bemerkungen
			4	beiger, leicht siltig/toniger FEIN- und MITTELKIES mit viel Sand, polymikt, gerundet, weit gestuft, trocken		
			10	FEIN- und MITTELKIES polymikt, gerundet, i.W. Kalke & Quarz; 4-8m: mit reichlich Mittel- und Grobsand; 8-10m: siltig mit reichlich Fein-Grobsand	Quartär, Hochterrassenschotter, fluvioglaziale Ablagerungen (Schotter)	Gewebestrumpf von 0-42m u.T.
		400	40	FEIN- bis GROBKIES mit reichlich Grobsand, polymikt, gut gerundet, i.W. Kalksteine, Quarz		
			42			
			48	beigegrauer, toniger SILT mit reichlich Sand & Kies		temporäre Schutzverrohrung bis 45.4 m u.T.
		380	54	tonig siltiger KIES (Fein- bis Grobkies) mit reichlich Sand, polymikt, gut bis kantengerundet, weit gestuft, i.W. Kalksteine, Quarz, wenig Radiolarit und Serpentinit)	Quartär, Moräne / umgelagerte Moräne	
			60			
			64	stark tonig siltiger FEIN- und MITTELKIES mit viel Sand, polymikt, kantig bis kantengerundet, weit gestuft, i.W. Kalksteine, Quarz, wenig Radiolarit und Serpentinit		
		360	80			
		340	100	homogener, grauer, siltiger TON, vereinzelt mit einzelnen kantengerundeten Kiesstücken (dropstone)	Quartär, glaziolakustrine Stillwasserablagerung (Seetone)	
		320	120			
		300	140			
			148			
		280	160	beigegrauer, siltiger TON / toniger SILT		
			172			
PDC	152	260	180	beigegraue, siltige TONE / toniger SILT mit wenig, selten mit reichlich Fein- bis Grobsand und Feinkies, polymikt, kantengerundet bis gerundet, i.W. Kalksteine, Quarz und wenig Radiolarit…	Quartär, Stillwasserablagerung / Deltaablagerungen / umgelagerte Moräne	Gewebeschlauchpacker von 194-215.5m u.T.
		240	200			
		220	220			deutliche & kontinuierliche Spülverluste ab 226m u.T. (ca. 12m3 während Bohrvortrieb)
			228			
		200	240	leicht siltig toniger KIES (Fein- bis Grobkies) mit reichlich bis viel Sand (i.W. Grobsand), polymikt, gerundet bis kantengerundet, i.W. Kalksteine, Quarz und wenig Radiolarit, Serpentinit; mässige Spülverluste	Quartär, glaziofluviatile Ablagerungen (Schotter)	
		180	260			
			260			
		160	280	grauer, toniger SILT mit viel Feinsand und wenig, selten reichlich Mittel- bis Grobsand und Feinkies, polymikt, gerundet bis kantengerundet, weit gestuft	Quartär, Stillwasserablagerung / Deltaablagerungen / umgelagerte Moräne	
		140	300			
		120	320			Stahlrohr 2" bis 341.5 m u.T. (Filterrohr von 317.5-323.5 m u.T.), AD/ID: 58/52mm; 3stufige Hinterfüllung von 0-215.5 m u.T. mit Küchler Kümix Dichte 1.79kg/l (Injektionsvolumen 330+2050+600 Liter)
			320			
			330	KIES (Fein- bis Grobkies, Mittelkies dominiert) mit wenig bis reichlich Sand, polymikt, gut gerundet, eng gestuft, i.W. Kalksteine und Quarz und an Basis einzelne graue Fein-Mittelsandsteine (=Erosionsrelikte der unterliegenden Molasse?); deutliche Spülverluste	Quartär, glaziofluviatile Ablagerungen (Schotter)	
		100	340		Molasse, OMM	
			346	grauer FEIN- bis MITTELSANDSTEIN, gut sortierter Quarz-Sandstein mit Glaukonit und Glimmer; Kies höchstwahrscheinlich Nachfall; auf Grund von Spülverlusten wenig Probenmaterial gefördert -> klare Grenzziehung Molasse zu Lockergestein nicht möglich		

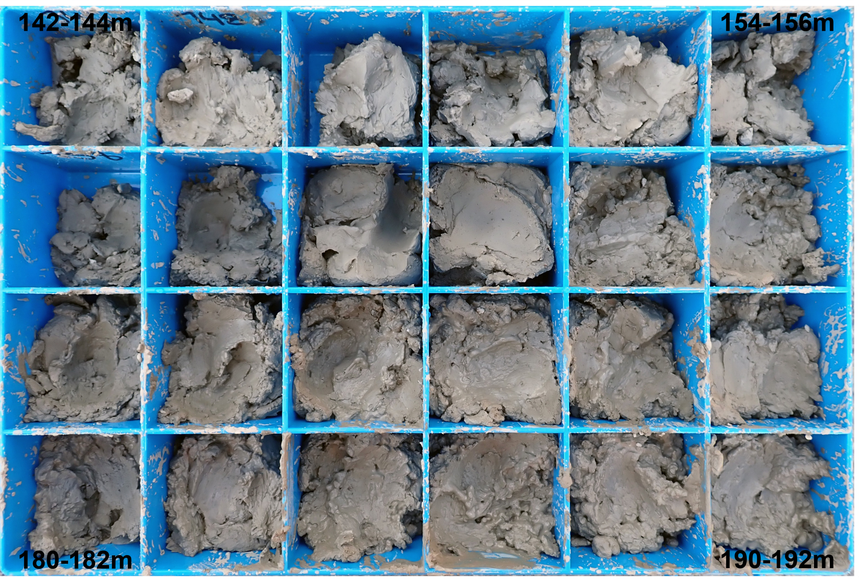
Bemerkungen:

· Grundwasserspiegel am 28.06.23 bei 35.5 m u.T. (gemessen im 2"Rohr nach vollendetem Ausbau, kein vollständiger Austausch der Spülung, keine Entfernung Filterkuchen bzw. kein Entsanden), Auffüllversuch mit >200 l/min ohne messbaren Aufstau möglich, total 6450 l in 41min zugegeben;
· Hinterfüllung in 3 Stufen: Gewebeschlauchpacker 215.5-194m u.T., 2.Stufe 194 - ca. 42m u.T., Strumpf 42m u.T. bis GOK;
· Abschluss an GOK mit GW-Betonschacht Typ 015 mit AD 21.5cm ID 15.5cm Länge 33cm bodenbündig einzementiert mit dichtem verschlossenen Deckel, 2" Rohr mit verschliessbarem Dichtdeckel verschlossen; Bohrpunkte vom Flughafen-Geometer eingemessen;













mit gewaschenem grobkörnigem Anteil von 20-48m,
60-76m auf siltig-tonigem Gemenge!

Bohrung E1; 24.07.2023

Schotter von 48-60, 200-240, 248-256, 264-268 m u.T. (Nachfall u./o. rezirkulierter Kies ab ca. 240 m u.T.,

Spülverluste in den Schotterlagen, Arteser von 50-60 m u.T.

Top Fels bei 268 m u.T.

geo explorers















mit gewaschenem grobkörnigem Anteil von 254-288m
auf siltig-tonigem Gemenge!

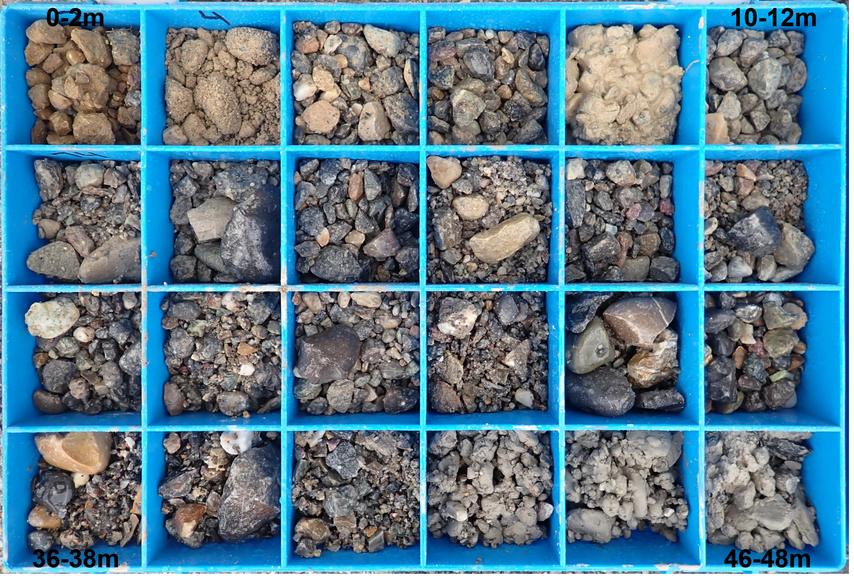
Bohrung P1; 05.07.2023

Schotter von 62-73m u.T., 212-252m u.T. und 294-310m u.T.

Spülverluste in den Schotterlagen

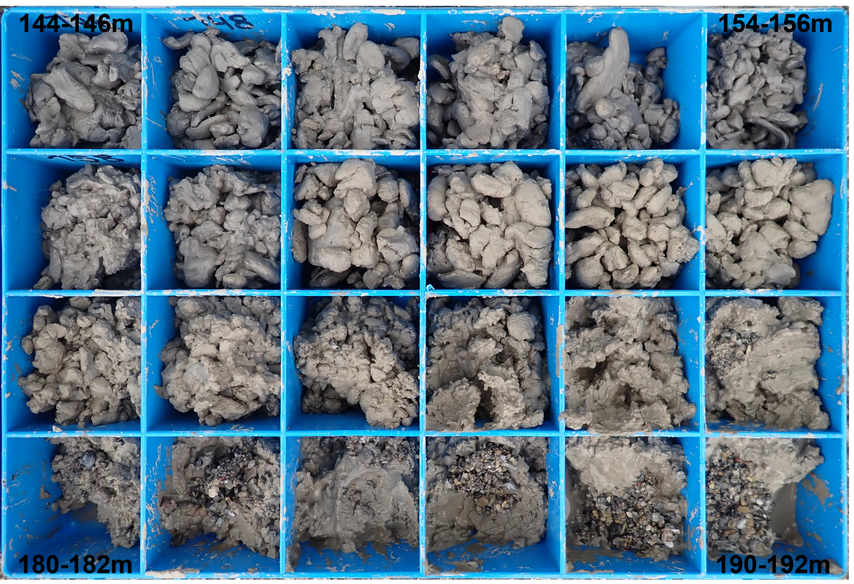
Top Fels bei 310m u.T.

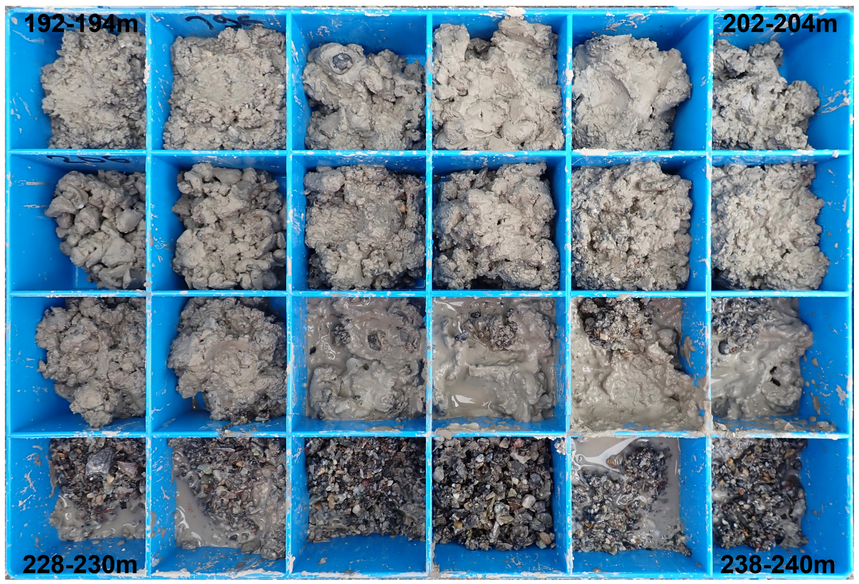
geo explorers

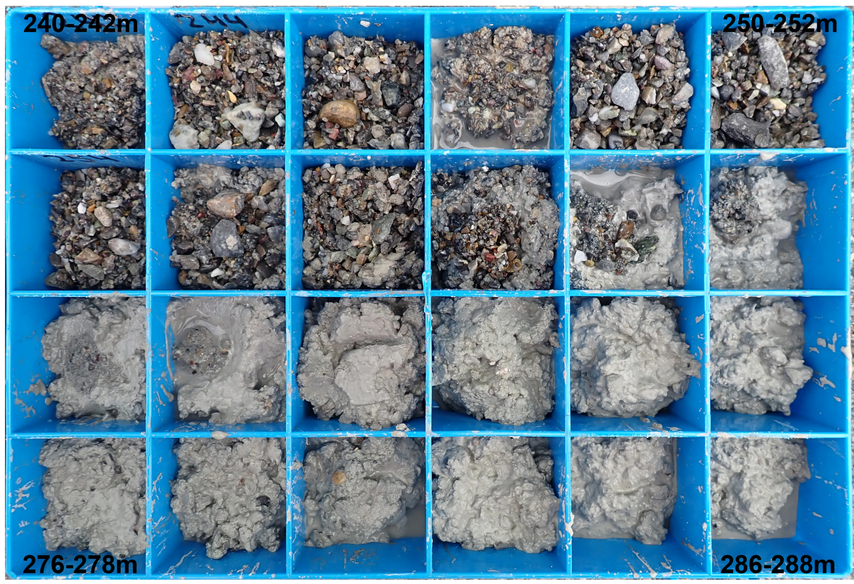














mit gewaschenem grobkörnigem Anteil von 178-192m,
220-242m und 258-268m auf siltig-tonigem Gemenge!

Bohrung SE1; 22.06.2023

Schotter von 0-42m u.T., 228-260m u.T. und 320-330m u.T.

Spülverluste in den Schotterlagen

Top Fels bei 330m u.T.

geo explorers