

Abschlussbericht

Potential der tieferen Geothermie in den Kantonen Nid- und Obwalden

Auftraggeber:

Amt für Umwelt und Energie Kt. Nidwalden
Amt für Raumentwicklung und Energie Kt. Obwalden



Autoren:

Andreas Ebert
Geo Explorers AG
Wasserturmplatz 1, 4410 Liestal
Tel. 061 821 60 40
www.geo-ex.ch
info@geo-ex.ch



Liestal, 24.04.2025

Projekt	Potentialstudie Geothermie Kantone NW & OW	
Objekt / Standort	Kantone NW & OW	
Auftraggeber	Amt für Umwelt und Energie Nidwalden Energiefachstelle	Amt für Raumentwicklung und Energie ARE Energie- und Klimafachstelle
Adresse	Stansstadterstr. 59 Postfach 1251 6371 Stans	St. Antonistr. 4 6060 Sarnen
Konto-Nr.	2790/3130.00	6315.3132.20
Referenz-Nr.	R2790-S7207	R6315-S6113
Besteller	Luca Pirovino (Kt. NW)	Yolanda Grille (Kt. OW)
Ausführende Büros	Geo Explorers AG	
Projektleitung	Andreas Ebert	
Qualitätssicherung	Christian Häring	
Sachbearbeitung	Andreas Ebert	
Dateiname / Version	25_04_Geothermisches Potential NW-OW.docx	
Datum Bericht	28.02.2025 Review 24.04.2025	
Beilagen	• Querprofil Bürgenstock – Engelberg • Querprofil Bürgenstock – Engelberg mit Datengrundlagen • Querprofil Hergiswil – Brünigpass • Querprofil Hergiswil – Brünigpass mit Datengrundlagen • Lithostratigraphische Haupteinheiten und Gesteinseigenschaften • Playregister bzw. Übersicht potentieller Plays in Kantonen Nid- und Obwalden	

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Einleitung	14
2.1	Aufgabe und Ziele	14
2.2	Anmerkungen zur Potentialbewertung	14
2.3	Abgrenzung	15
2.4	Untersuchungsgebiet.....	15
2.5	Geothermische Nutzungsarten und deren Reifegrad	16
2.5.1	Übersicht Nutzungsarten	16
2.5.2	Erdwärmesonden	17
2.5.3	Tiefe Grundwasserbrunnen	18
2.5.4	Hydrothermale Nutzungen	18
2.5.5	Petrothermale Nutzungen	18
2.6	Geothermische Projekte in der Schweiz	20
2.7	Notwendige Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung	22
2.8	Vor- und Nachteile der geothermischen Nutzung.....	25
2.9	Übersicht geologischer Aufbau in Nid- und Obwalden	26
3	Datengrundlagen	30
3.1	Tiefbohrungen	30
3.2	Seismik.....	31
3.3	Querprofile.....	35
3.4	Bewertung Datengrundlage	38
4	Aufbau geologischer Untergrund in Nid- und Obwalden.....	39
4.1	Strukturgeologische Querprofile in Nid- und Obwalden.....	39
4.2	Schichtenverzeichnis / Lithostratigraphie	44
5	Untergrundparameter und potentielle Aquifere & Plays.....	46
5.1	Untergrundtemperaturen	46
5.2	Hydrogeologische Eigenschaften und potentielle Aquifere	51
5.2.1	Einleitung.....	51
5.2.2	Vergleich mit Nordschweiz	51
5.2.3	Tiefenabhängigkeit	52
5.2.4	Karst.....	52
5.2.5	Wichtigkeit von Bruchzonen und Klüftung.....	53
5.2.6	Wichtigste Aquifere im Untersuchungsgebiet.....	56
5.3	Playregister und Play-Vorkommen in den Kantonen NW & OW.....	61
5.3.1	Beispiel Kanton Aargau	61
5.3.2	Play-Typen in den Kantonen Nid- und Obwalden	62
6	Geothermisches Potential.....	65
6.1	Notwendige Voraussetzungen	65
6.2	Erfolgswahrscheinlichkeit	65
6.3	Geothermisches Potential pro Play in Nid- und Obwalden	67
6.3.1	Übersicht Play-Potentiale	67
6.3.2	Faktenblätter pro Play.....	67
6.4	EWS und oberflächennahes Grundwasser	79
6.5	Vergleich Wärmenachfrage und geothermisches Potential	80
7	Synergie im Rahmen einer geothermischen Nutzung	82
7.1	Begleitende oder alternative Nutzungen	82
7.2	Erdgasvorkommen	82
7.3	Lithiumgewinnung.....	83
8	Risiken / Konflikte / Anforderungen	85
8.1	Fündigkeitsrisiken	85
8.2	Seismische Risiken	85
8.3	Erdbeben und begleitende Risiken in Nid- und Obwalden	87

8.4	Bohrtechnische und geologische Risiken.....	91
8.5	Gesellschaftliche Risiken.....	91
8.6	Finanzielle Risiken.....	92
8.7	Risiken während der Nutzung.....	92
8.8	Anforderungen an den Bohrstandort.....	93
8.8.1	Allgemeine Anforderungen	93
8.8.2	Spezifische Anforderungen an Sondierbohrungen und untiefe Bohranlagen	94
8.8.3	Spezifische Anforderungen für tiefe Produktionsbohrungen	95
8.9	Konflikte bzw. konkurrenzierende Nutzungen im Untergrund.....	98
9	Erschliessungstechniken	98
10	Typisches Vorgehen der Erkundung und Erschliessung	101
11	Gesetzesgrundlagen und Verordnungen.....	102
11.1	Kanton Nidwalden	102
11.2	Kanton Obwalden	103
12	Förderbeiträge	104
13	Schlussfolgerungen & empfohlenes Erkundungskonzept	105
13.1	Wissensstand	105
13.2	Geothermische Plays.....	105
13.3	Geothermisches Potential.....	106
13.3.1	Wärmenutzung	106
13.3.2	Stromproduktion	106
13.3.3	Aquiferspeicher / Wärmenutzung eiszeitliche Rinnen	107
13.4	Wirtschaftlichkeit und Risiken	108
13.5	Empfehlungen	109
13.6	Beispiele für empfohlene Erkundungsstandorte.....	110
13.6.1	Beispiel eiszeitliche Rinne zwischen Stans und Buochs	110
13.6.2	Bruchzonen in Helvetischen Decken, Beispiel Kerns.....	112
14	Literaturliste.....	115
15	Glossar	117

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Geologischer Aufbau des Untergrunds in Nid- und Obwalden.....	8
Abb. 2	Erfolgversprechendste untiefe und mitteltiefe Plays in Nid- und Obwalden	9
Abb. 3	Erfolgversprechendste tiefe Plays in den Kantonen Nid- und Obwalden	10
Abb. 4	Petrothermale Geothermie in den Kantonen Nid- und Obwalden	11
Abb. 5	Vorkommen der verschiedenen Plays in Nid- und Obwalden	12
Abb. 6	Mögliche Bohrziele und geothermisches Potential	13
Abb. 7	Untersuchungsgebiet	16
Abb. 8	Geothermische Nutzungsarten sortiert nach Tiefe und Reifegrad.....	17
Abb. 9	Installierte geothermische Leistung in Europa	19
Abb. 10	Voraussetzungen für ein erfolgreiches hydrothermales Projekt	23
Abb. 11	Voraussetzungen für ein erfolgreiches EGS o. AGS Projekt.....	24
Abb. 12	Vor- und Nachteile Geothermie	25
Abb. 13	Tektonische Einheiten vom Jura bis in die Alpen.....	27
Abb. 14	Tektonische Einheiten in Nid- und Obwalden	28
Abb. 15	Paläogeografische Karte der Helvetischen Decken	28
Abb. 16	Einblicke in die Geologie / Tektonik im Untersuchungsgebiet.....	29
Abb. 17	Tiefbohrungen in den Kantonen Nid- und Obwalden und Umgebung	30
Abb. 18	Seismik in Kantonen Nid- und Obwalden	33
Abb. 19	LEAG-Seismik LU09-76	33
Abb. 20	Ausschnitt Seismik-Linie GVM11-06	34
Abb. 21	Ausschnitt Seismik-Linie GVM11-02	34

Abb. 22	Seismisches Profil 89-WF-10 am Wellenberg.....	35
Abb. 23	Publizierte struktureologische Querprofile	36
Abb. 24	NNW-SSE-Querprofil Stansstad – Wellenberg – Grassengrat.....	36
Abb. 25	NNW-SSE-Querprofil Bürgenstock – Dallenwil – Titlis.....	37
Abb. 26	Querprofile und Seismik vom Bürgenstock bis zum Titlis	37
Abb. 27	Profilspuren der nachfolgenden Querprofile	39
Abb. 28	Struktureologisches Querprofil Bürgenstock – Engelberg (siehe Anhang).....	40
Abb. 29	Datengrundlage Querprofil Bürgenstock – Engelberg (siehe Anhang).....	41
Abb. 30	Struktureologisches Querprofil Hergiswil – Brünigpass (siehe Anhang).....	42
Abb. 31	Datengrundlage Querprofil Hergiswil – Brünigpass (siehe Anhang)	43
Abb. 32	Schichtabfolge in den Helvetischen Decken	45
Abb. 33	Untergrundtemperaturen in umliegenden Tiefbohrungen	47
Abb. 34	Variation der oberflächennahen Untergrund-Temperatur in EWS.....	48
Abb. 35	Querprofil Bürgenstock – Engelberg mit überlagerten Felstemperaturen.....	49
Abb. 36	Querprofil Hergiswil – Brünigpass mit überlagerten Felstemperaturen	50
Abb. 37	Abhängigkeit der Durchlässigkeit mit der Tiefe.....	53
Abb. 38	Abhängigkeit der Durchlässigkeit mit der Tiefe in Süddeutschland	54
Abb. 39	Änderung Durchlässigkeit mit Tiefe in Bohrungen am Wellenberg	54
Abb. 40	Bandbreite der Durchlässigkeiten.....	55
Abb. 41	Potentiell wasserführende Schichten und Brüche.....	56
Abb. 42	Playregister für Muschelkalk Bsp. Kanton Aargau	61
Abb. 43	Erfolgversprechendste geothermische Plays und deren Potential	63
Abb. 44	Querprofil vom Bürgenstock zum Titlis mit Playtypen (siehe Abb. 28)	64
Abb. 45	Abschätzung des geothermischen Potentials pro Play (siehe auch Anhang).....	68
Abb. 46	Bestehende Erdwärmesonden	79
Abb. 47	Grundwasserwärmennutzungen in Nidwalden	80
Abb. 48	Wärmenachfragedichte	81
Abb. 49	Lithium-Vorkommen in der Nordschweiz	83
Abb. 50	Lithium-Konzentrationen in Aquiferen.....	84
Abb. 51	Alle aufgezeichneten Erdbeben von 1975-2024, inkl. historischer Beben.....	88
Abb. 52	Epizentren der Erdbeben in Nid- und Obwalden.....	88
Abb. 53	Tiefenlage der Erdbeben in Nid- und Obwalden.....	89
Abb. 54	Tiefenlage Erdbeben in Nid- und Obwalden	90
Abb. 55	Bohrplatz und -anlage für Tiefen bis ca. 400 m	95
Abb. 56	Erschliessungsbohrung in Itingen.....	95
Abb. 57	Bsp. für eine Bohranlage für grosse Tiefen	96
Abb. 58	Bsp. für eine Bohranlage für mittlere Tiefen	96
Abb. 59	Basis Lockergestein bzw. Rinne in m ü.M.	111
Abb. 60	Schematischer Aufbau der eiszeitlichen Rinne mit Erschliessung	111
Abb. 61	Konzept Erkundung und Erschliessung quartäre Rinne in Nidwalden	112
Abb. 62	Mögliche Erschliessung der Bruchstrukturen in Helvetischen Decken.....	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Auswahl von tiefen und aktuellen Geothermiebohrungen in der Schweiz.....	21
Tabelle 2	Tiefbohrungen tiefer 400 m u. T. im Untersuchungsgebiet und umgebend.....	31
Tabelle 3	Zusammenstellung Lithium-Messwerte aus Bohrungen tiefer 100 m.....	84
Tabelle 4	Erschliessungstechniken für oberflächennahe/untiefe Geothermie.....	99
Tabelle 5	Erschliessungstechniken für «mitteltiefe» und «tiefe» Geothermie	100
Tabelle 6	Phasen der Erkundung und Erschliessung eines geothermischen Reservoirs....	101

1 Zusammenfassung

Für den vorliegenden Bericht wurden alle zugänglichen Untergrunddaten in den Kantonen Nid- und Obwalden und Tiefbohrungen in umliegenden Kantonen hinsichtlich des geologischen Aufbaus des Untergrundes und dessen Eignung für eine geothermische Nutzung analysiert. Es wurden potentielle geothermische Plays¹ ausgeschieden, bewertet und deren geothermisches Potential abgeschätzt.

Mit den bestehenden geologischen Grundlagendaten kann der geologische Aufbau des Untergrundes im Untersuchungsgebiet gut abgebildet werden (Abb. 1). Die Tiefenlage der verschiedenen Schichten sowie relevante Bruchzonen können lokalisiert werden. Einige Schichtgrenzen wie z. B. innerhalb der Molasse und zum Nordhelvetischen Flysch oder die Basis des Permokarbons sowie der Verlauf von Bruchzonen in grösserer Tiefe sind sehr vage, da kaum Tiefendaten vorhanden sind und die Auflösung der Seismik zum Teil zu gering ist. Mit den bestehenden Grundlagen können keine genauen Bohrziele etwa entlang von Bruchflächen definiert werden.

In den Kantonen Nid- und Obwalden haben nur Bohrungen am Wellenberg Tiefen über 500 m erreicht (5 Bohrungen zwischen 610 und 1'865 m). Folglich ist der Kenntnisstand zu tatsächlichen Gesteinseigenschaften, Wasserführung, Wasserchemie usw. sehr gering. Allerdings gibt es wenige Tiefbohrungen in den benachbarten Kantonen in ähnlicher Geologie, die es erlauben, berechnete Rückschlüsse hinsichtlich Gesteinsdurchlässigkeit, Wasserführung und Temperaturen für das Untersuchungsgebiet abzuleiten. Entsprechend kann das geothermische Potential auch für die Kantone Nid- und Obwalden abgeschätzt werden.

Die Kantone Nid- und Obwalden gehören geologisch zu den vielfältigsten Kantonen (kristallines Gestein, Schichten von Permokarbon bis Tertiär, unzählige Bruchstrukturen und grosse Störzonen bzw. Überschiebungsbahnen in verschiedensten Tiefenlagen). Entsprechend können viele verschiedene geothermische Plays definiert werden, wobei die erfolgversprechendsten generell an Bruchzonen in spröde reagierenden Gesteinen (z. B. Kalksteine) oder Paläokarst gebunden sind (Abb. 2, Abb. 3 und Abb. 5). Dies belegen angetroffene wasserführende Bruchzonen und Klüfte sowie Paläokarst in umliegenden Tiefbohrungen und Tunnelbauten (z. B. Tiefbohrung Entlebuch-1 mit einer Tiefe von 5'144 m). Zudem entstanden während der letzten Eiszeiten rund 350 m tiefe Rinnen, welche mit Lockergestein gefüllt wurden. Darin vorkommende basale wasserführende Schotter eignen sich für eine Wärmenutzung oder als Aquiferspeicher.

Eine Auswahl von neun geothermischen Plays sowie deren räumliche Ausbreitung und Potential sind in Abb. 2 bis Abb. 4 dargestellt (für weitere Plays und mehr Details siehe auch Abb. 43 und Faktenblätter in Kapitel 6.3.2). Die zu erwartenden Schüttungsraten liegen bei den attraktivsten Plays zwischen 5 bis 30 l/s (im allerbesten Fall auch über 50 l/s bei gleichzeitig hohen Fündigkeitsrisiken). Da diese Plays in verschiedensten Tiefenlagen angetroffen werden, variieren die zu erwartenden Felstemperaturen zwischen rund 30 bis über 150°C. Die thermischen Entzugsleistungen können je nach Schüttungsrate und Temperatur konservativ betrachtet rund 0.5 bis 6 MW_{th} pro Brunnen erreichen. Die Fündigkeitschancen werden abhängig von Tiefe, Erkundungs- und Wissensstand je nach Play mit gering bis mittelhoch eingeschätzt (Abb. 2 bis Abb. 4).

¹ Als geothermisches Play wird ein potentieller Zielhorizont bzw. eine ähnliche wiederkehrende hydrogeologische Gegebenheit definiert.

Aufgrund der Schottervorkommen in den eiszeitlichen Rinnen und der vielen tiefgreifenden Bruch- und Störzonen, welche potentiell durchlässig und wasserführend sind, werden die Kantone Nid- und Obwalden als geothermisch attraktiv bewertet. Der geschätzte Energiebezug aus dem Untergrund von jährlich 100 GWh könnte einen Anteil von über 10% am Gesamtbedarf für Raumwärme und Warmwasser der beiden Kantone von 800 GWh abdecken (entspricht ca. 20% des derzeit mit fossilen Energieträgern generierten Wärmebedarfs).

Das Verhältnis von Fündigkeitschancen, Bohrkosten und Erkundungskosten zu Nutzen, Erfolg und Reproduzierbarkeit unterscheidet sich stark von Play zu Play (Abb. 2 bis Abb. 4, Abb. 6 und Kapitel 13.4). Insbesondere die Plays mit einer Tiefe von über 4 km weisen hohe Fündigkeitsrisiken auf, müssen aufwändig erkundet werden und können nur teuer erschlossen werden. Bei Gesamtkosten von über 100 Mio. CHF für die Erkundung, der Erstellung einer Dublette mit 2x5 km Bohrungen, Pumptests und Monitoring resultieren im besten Fall eine thermische Leistung von 5 bis 10 MW_{th}. Der Wärmepreis variiert entsprechend von 18 bis 36 Rp/kWh; wohlgemerkt für den Best Case, aber ohne Förder- oder Risikobeiträge. Demgegenüber stehen die Plays in den Helvetischen Decken mit Tiefen bis 1.5 km und die eiszeitlichen Rinnen mit erwarteten thermischen Leistungen von 0.5 bis 3 MW_{th} pro Dublette. In diesen können Nachweise rascher, günstiger und mit höheren Fündigkeitschancen erfolgen. Dafür müssen 1-2 Mio. CHF (eiszeitliche Rinne) bis 2.5-7 Mio. CHF (Bruchzonen in Helvetischen Decken) aufgewendet werden. Im Fall der eiszeitlichen Rinnen kann mit Wärmekosten von 14 bis 18 Rp/kWh gerechnet werden. Zudem ist die Reproduzierbarkeit deutlich höher als im Fall der tiefen Plays. Allerdings ist keine direkte Wärmenutzung oder Stromproduktion möglich.

Da die Bohrkosten mit der Tiefe exponentiell ansteigen und auch die Risiken hinsichtlich Fündigkeit, Bohrproblemen und Erdbeben zunehmen, wird empfohlen, zu Beginn die untiefen erfolgversprechendsten Plays zu testen (eiszeitliche Rinnen und Bruchzonen in den Helvetischen Decken), welche zudem eine einfachere und höhere Reproduzierbarkeit ermöglichen (Abb. 6). Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen können bei Erfolg sukzessive die tieferen Plays mit entsprechend höheren Kosten aber auch höheren Temperaturen getestet und erschlossen werden. An vielen Standorten im Untersuchungsgebiet können verschiedene Plays in verschiedenen Tiefen gleichzeitig von einem Standort aus erkundet werden (siehe auch Kapitel 13, Schlussfolgerungen und Empfehlungen).

Diese Studie hat alle zugänglichen hydrogeologischen Tiefendaten aufgearbeitet und basierend darauf mögliche geothermische Plays identifiziert, das geothermische Potential bewertet und soweit möglich quantifiziert. Auch wurden Empfehlungen abgegeben, wie und wo mit einer Erkundung gestartet werden könnte. Basierend auf der vorliegenden Studie müsste in einem nächsten Schritt eine geothermische Erkundungsstrategie erstellt werden, bei der konkrete Standorte, Bohrziele, Tests und Untersuchungen definiert werden.

Anmerkung: Die Potentialbewertung hängt stark von den vorhandenen Daten zum Untergrund, der Interpretation dieser Daten und dem Bewertungsschema ab (siehe Kapitel 2.2). Es bestehen verschiedene Interessen, den Untergrund zu nutzen (Geothermie, CCS, Erdgas-Speicher usw.). Von Vorteil sollte für die teure Erkundung des tiefen Untergrundes eine Multiexploration vorgesehen werden, bei welcher mit einer Bohrung gleichzeitig mehrere Ziele verfolgt werden.

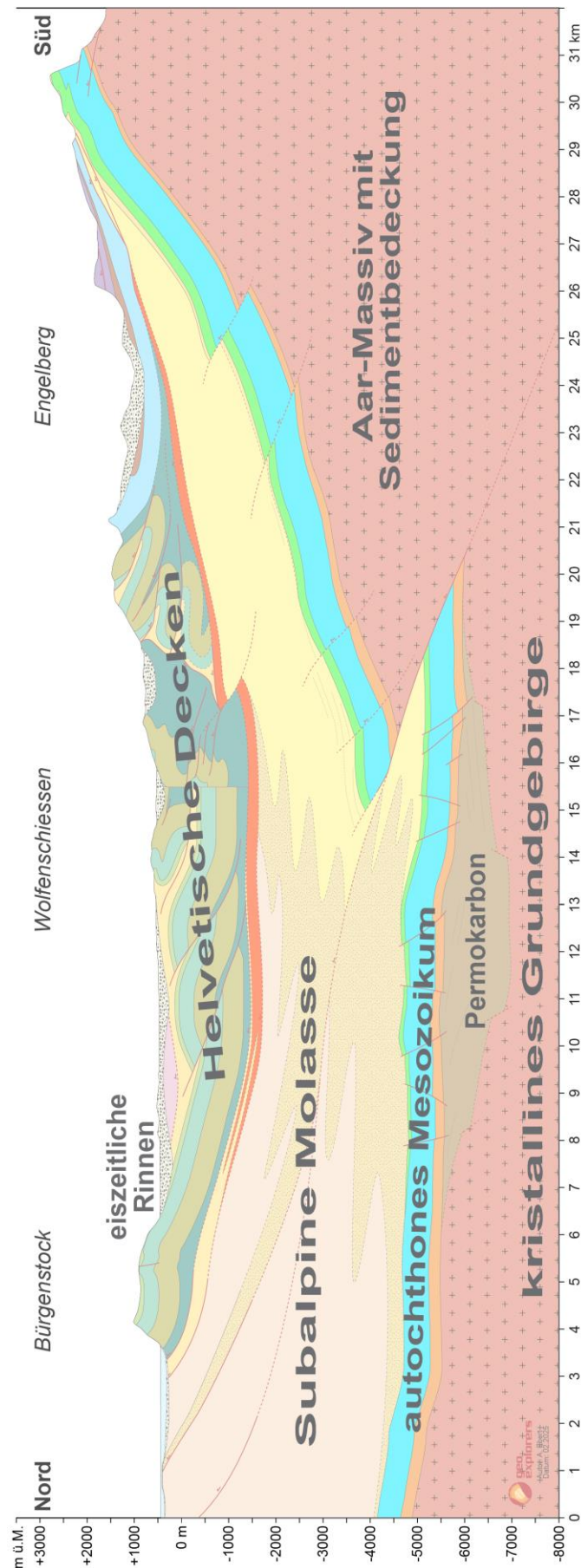


Abb. 1 Geologischer Aufbau des Untergrunds in Nid- und Obwalden

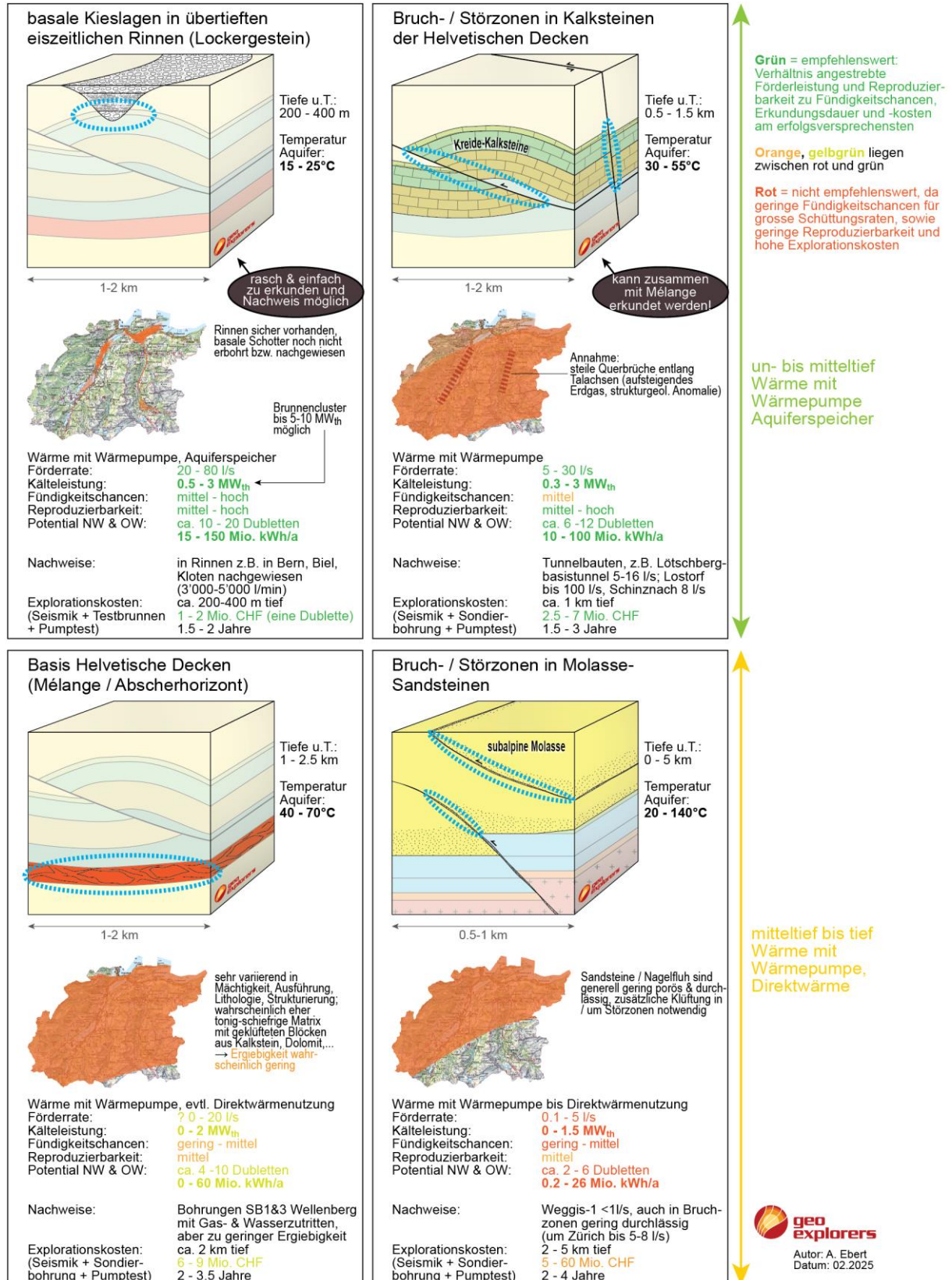


Abb. 2 Erfolgsversprechendste untiefe und mitteltiefe Plays in Nid- und Obwalden

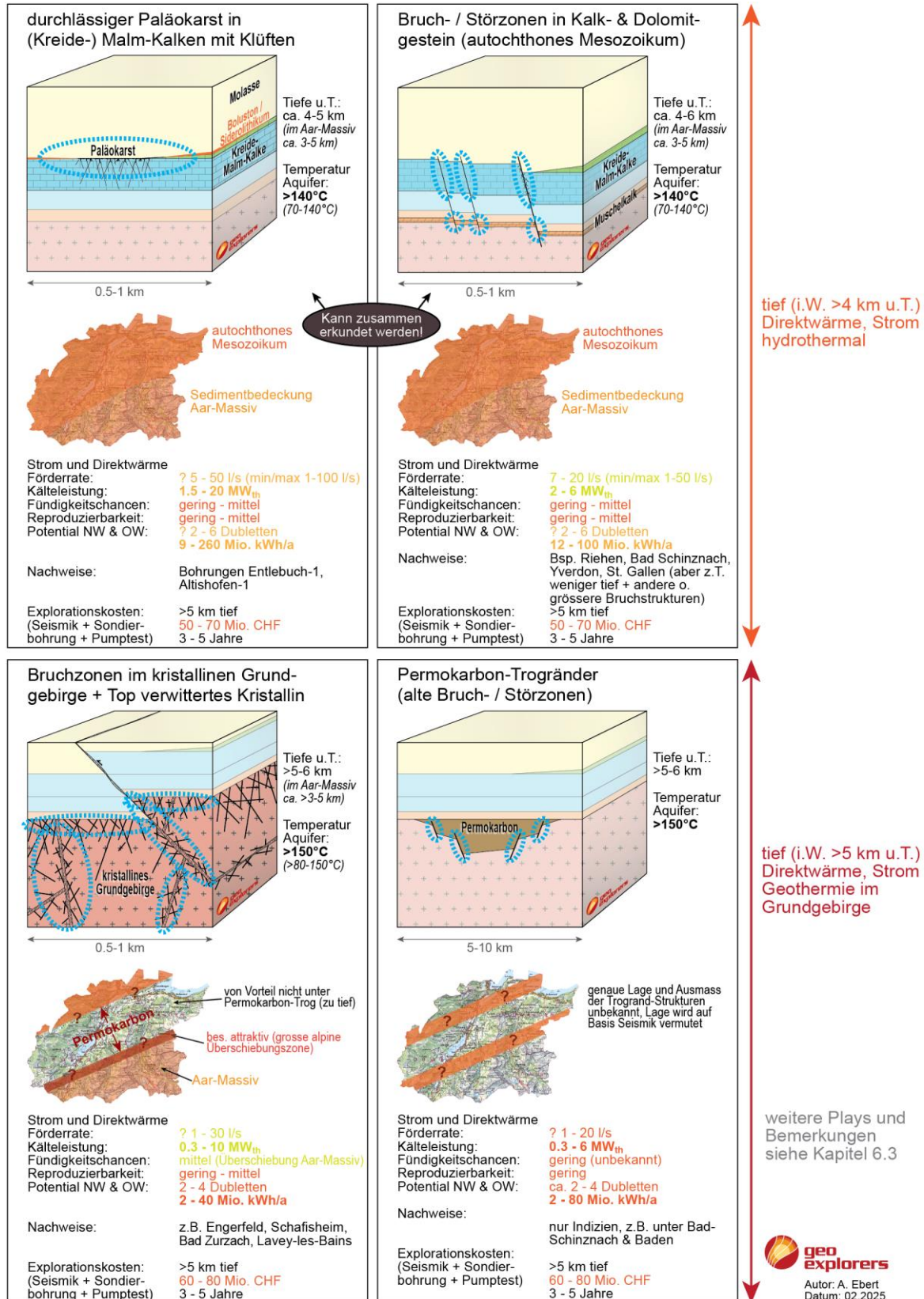


Abb. 3 Erfolgversprechendste tiefe Plays in den Kantonen Nid- und Obwalden

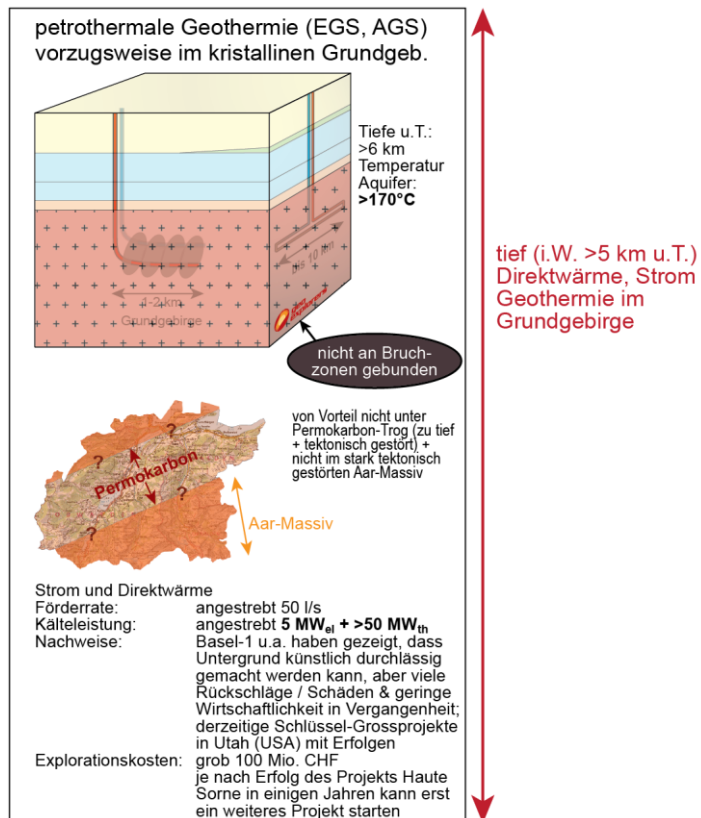


Abb. 4 Petrothermale Geothermie in den Kantonen Nid- und Obwalden



Abb. 5 Vorkommen der verschiedenen Plays in Nid- und Obwalden

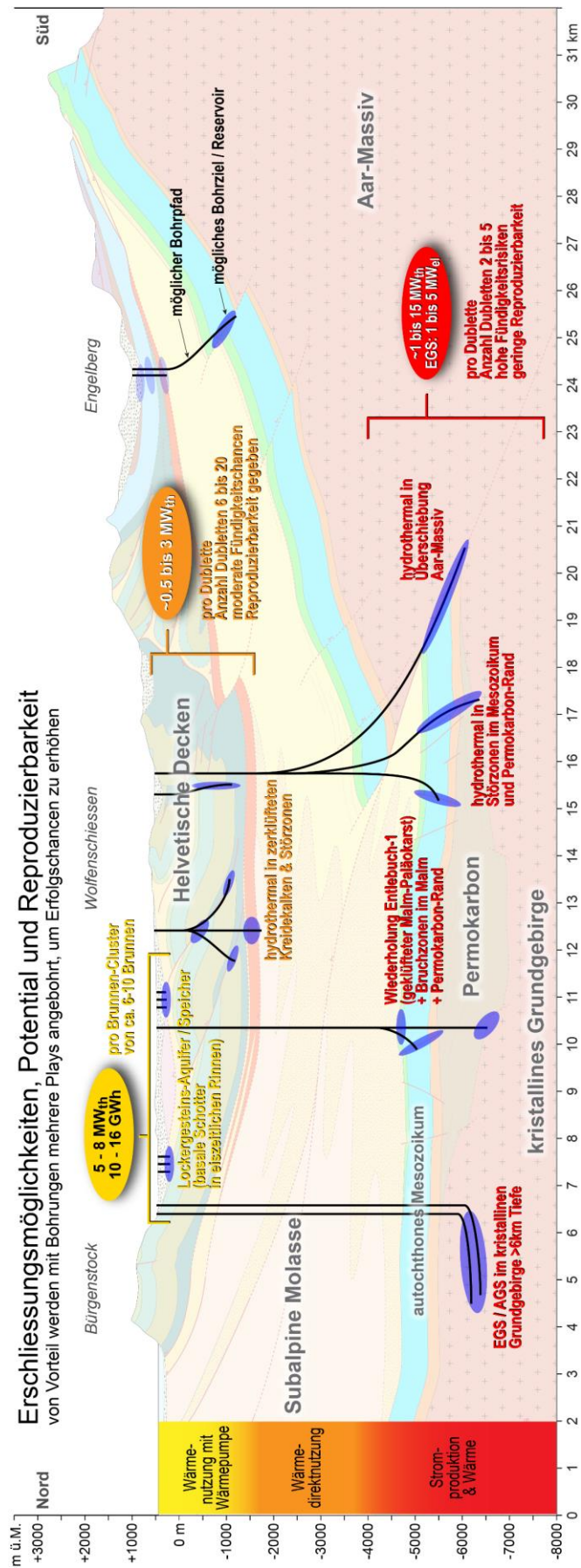


Abb. 6 Mögliche Bohrziele und geothermisches Potential

2 Einleitung

2.1 Aufgabe und Ziele

Im Kontext der Energie- und Klimapolitik der Kantone Nid- und Obwalden soll abgeklärt werden, inwiefern die tiefere Geothermie eine Rolle spielen kann. Viele Wärmenetze werden mit Holz und für die Spitzenabdeckung mit fossilen Energien betrieben. Holz wird zunehmend auch eine knappe Ressource und die fossilen Energien sollen ersetzt werden. Deshalb wird gefordert, dass die Wärmeversorgung zusätzliche Kapazitäten zur Wärmebereitstellung mit erneuerbaren Energien wie der Geothermie und gegebenenfalls den Einsatz von thermischen Aquiferspeichern aufbaut. Des Weiteren stellt sich auch die Frage, ob die geothermische Stromproduktion einen Beitrag leisten kann.

Für die Wärmegewinnung und Stromproduktion sind möglichst hohe Quelltemperaturen erwünscht. Hohe Temperaturen von über 100 °C sind aber keine zwingende Voraussetzung für die Nutzung der Geothermie, da für die reine Wärmegewinnung auch tiefere Temperaturen in Kombination mit einer Wärmepumpe in Frage kommen.

Im Auftrag des Amts für Umwelt und Energie Nidwalden und des Amts für Raumentwicklung und Energie Obwalden wurde eine Potentialstudie zur geothermischen Nutzung des Untergrundes der Kantone Nid- und Obwalden erstellt. Die Kantone sind im Besitz vieler Bohrberichte, Bohrprofile und geologischer Daten, welche als Grundlage dienen. Des Weiteren stellten Geologiebüros Tunnelprofile zur Verfügung.

Die vorhandenen Grundlagen zum Aufbau des tieferen Untergrundes und bisherige Erkenntnisse aus Bohrungen und seismischen Erkundungen wurden hinsichtlich Eignung für eine geothermische Nutzung zusammengetragen und aufgearbeitet. Potentielle Plays bzw. Zielhorizonte wurden definiert, lokalisiert und deren Potential für die Wärmeentnahme oder Wärmespeicherung abgeschätzt und bewertet. Zur Ermittlung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses sind insbesondere das Temperaturniveau, die Entnahmeleistung (MW), die Energiemenge bzw. die Speicherkapazität (MWh) und mögliche Bohrtiefen von Interesse. Die oberflächennahen Grundwasserleiter und Erdwärmesonden wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Für Fachbegriffe wird auf die Erklärungen im Glossar verwiesen.

2.2 Anmerkungen zur Potentialbewertung

Die Bewertung des Potentials hängt stark vom Umfang bestehender Untergrunddaten ab. Mit den bestehenden reflexionsseismischen Daten in den Kantonen Nid- und Obwalden kann der strukturelle Aufbau des Untergrundes definiert werden. Es ist möglich, die grobe Tiefe und die Lage der wichtigsten Schichten und die grossen Störzonen abzubilden. Aufgrund der zum Teil geringen Auflösung der seismischen Daten und Lücken zwischen den Seismiklinien können aber nicht alle relevanten Bruchzonen und keine detaillierten Bohrziele definiert werden. Für die sichere Bestimmung von Untergrundparametern wie Temperatur, Durchlässigkeit und Wasserführung braucht es Bohrungen. Im Studiengebiet selber gibt es nur Tiefbohrungen beim Wellenberg bis auf 1'895 m u.T.. Ansonsten gibt es wenige tiefe Bohrungen im Alpenvorland (z. B. Entlebuch-1 mit 5'144 m u.T. und Weggis-1 mit 2'133 m u.T.). Es müssen daher Erfahrungswerte aus ähnlichen geologischen Untergrundkonstellationen auf die Situation im Studiengebiet übertragen werden. Entsprechend werden die Meinungen je nach Interpretation

hinsichtlich des geothermischen Potentials variieren. Aufgrund des eher bescheidenen Datenbestandes, der bisher geringen Erfahrungen aus Geothermieprojekten in der Schweiz und des hohen notwendigen Risikokapitals für die Erkundung und Erschliessung der Tiefengeothermie sind in der vorliegenden Studie die Potentialabschätzungen konservativ und die Empfehlungen zurückhaltend. Es werden dennoch alle möglichen Plays präsentiert und mit bisher gewonnenen Erkenntnissen und Messwerten beschrieben.

2.3 Abgrenzung

Oberflächennahe Grundwässer, Erdwärmesonden und Karstquellen werden in dieser Studie nicht berücksichtigt bzw. in Kapitel 6.4 nur kurz zusammengefasst. Diese haben im Studiengebiet ein grosses Potential und werden bereits genutzt und kontinuierlich ausgebaut. Der Fokus der vorliegenden Studie liegt auf der bisher nicht genutzten Tiefengeothermie.

Im Jahr 2014 wurde der Bericht «Erdgas und Tiefengeothermie für die Kantone Nid- und Obwalden» erstellt. Dieser stellt eine kondensierte Zusammenfassung bestehender Daten hinsichtlich Geologie, Potential, Infrastruktur, Wirtschaftlichkeit und Risiken dar und skizziert ein mögliches Vorgehenskonzept. Der Fokus der vorliegenden Studie liegt hingegen auf einer detaillierten Untergrundanalyse. Die bestehenden Seismikdaten wurden interpretiert und in neue struktureologische Querprofile integriert, potentielle Plays wurden definiert, lokalisiert und basierend auf Play-Fairway-Analysen inkl. geothermischem Potential beschrieben und bewertet. Empfehlungen hinsichtlich der weiteren Erkundung wurden abgegeben.

2.4 Untersuchungsgebiet

Der Untersuchungsperimeter umfasst das gesamte Gebiet der Kantone Nid- und Obwalden (Abb. 7). Für die Analysen wurden aber auch umliegende Daten der Nachbarkantone berücksichtigt (siehe Kapitel 3).

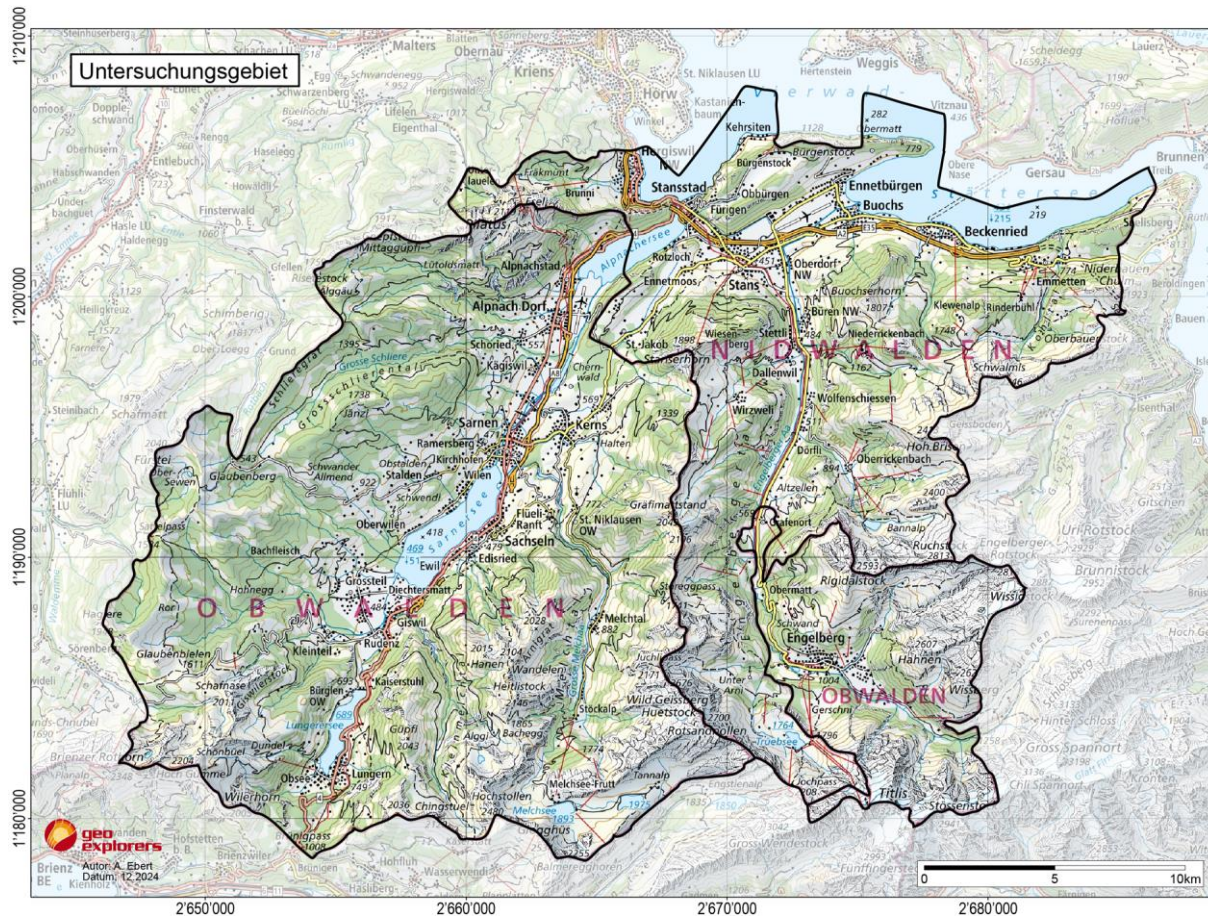


Abb. 7 Untersuchungsgebiet

2.5 Geothermische Nutzungsarten und deren Reifegrad

2.5.1 Übersicht Nutzungsarten

Je nach Tiefe, Geologie, Aquifertyp und Bohrausbau können verschiedene geothermische Nutzungsarten unterschieden werden. Die verschiedenen Nutzungsarten sind in Abb. 8 grafisch zusammengefasst. Übersichtliche Beschreibungen der verschiedenen Nutzungsarten finden sich in weiterführenden Publikationen².

Eine Zusammenfassung der Erschliessungstechniken ist zudem in Kapitel 9 gegeben. Grob können folgende Unterscheidungen gemacht werden:

- Oberflächennahe Nutzungen mit tiefem Temperaturniveau wie EWS (Erdwärmesonden) und Grundwasserbrunnen für die Wärmeabgewinnung mittels Wärmepumpe oder zur Wärme-Kälte-Speicherung
- Mitteltiefe Nutzungen im Temperaturbereich von ca. 25 bis 60°C für die Wärmedirektnutzung mit tiefen Erdwärmesonden oder hydrothermalen Singletten oder Dubletten, die an Bruchstrukturen oder durchlässige Poren aquifere gebunden sind.

² <https://geothermie-schweiz.ch/geothermie/geothermie-uebersicht/> oder <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/geothermie/geothermische-nutzungssysteme-uebersicht>

- Tiefe Geothermie mit hydrothermalen Nutzungen oder EGS (enhanced geothermal system) für die Wärmedirektnutzung oder die Stromgewinnung

geothermische Nutzungsarten

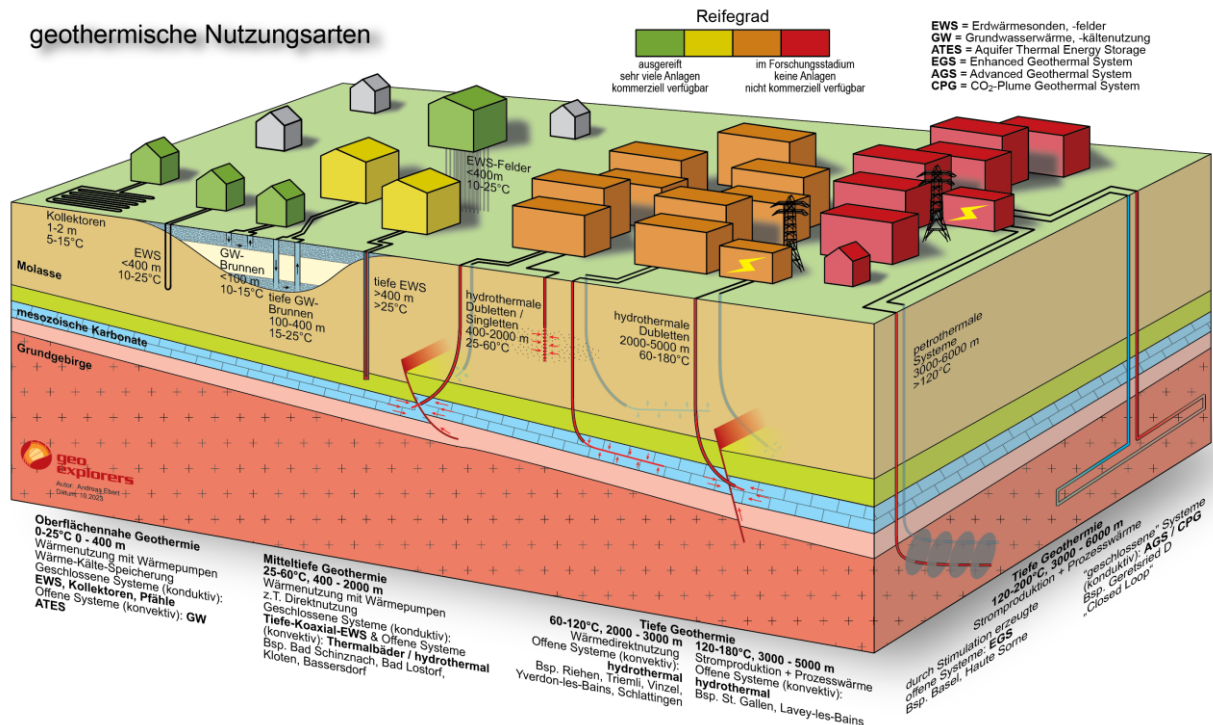


Abb. 8 Geothermische Nutzungsarten sortiert nach Tiefe und Reifegrad

Die Nutzungsarten sind an den Schweizer Untergrund im Mittelland angepasst.

Grundsätzlich kann man 5 gängige geothermische Nutzungsarten unterscheiden: tiefe EWS (Erdwärmesonden), tiefe Aquiferbrunnen, hydrothermale Singletten oder Dubletten, EGS (Enhanced Geothermal System) und AGS (Advanced Geothermal System). Es gibt Bestrebungen, die genannten Systeme mit anderen Nutzungen zu kombinieren, wie z. B. mit der Einspeicherung von CO₂ (CPG CO₂-Plume Geothermal System), der Nutzung von anderen effektiveren Wärmeträgermitteln wie CO₂ oder der Lithium-Gewinnung aus dem geförderten Thermalwasser.

Je tiefer die Bohrungen und je aufwändiger die Techniken zur Erhöhung der Durchlässigkeit des Untergrunds, desto geringer sind derzeit der Reifegrad und die Erfolgchancen bei sehr hohen Erschliessungskosten. Z. B. sind Erdwärmesonden kommerziell ab Stange verfügbar; hingegen sind hydrothermale Systeme mit Fündigkeitsrisiken verbunden und EGS immer noch im Entwicklungsstadium und müssen sich erst beweisen. AGS (advanced geothermal system) steckt derzeit erst am Anfang und wird noch als komplett unwirtschaftlich eingestuft.

2.5.2 Erdwärmesonden

Die derzeit gängigen tiefen EWS reichen bis in Tiefen von 400 bis 800 m. Dies sind Doppel-U- oder Koaxial-Sonden, welche in ein schmales Bohrloch (Durchmesser ca. 152 mm) gestellt und mit einer Zementsuspension hinterfüllt werden. Es handelt sich um einen geschlossenen Kreislauf, in welchem ein Wärmeträgermedium (Wasser mit oder ohne Frostschutz) in der

Sonde zirkuliert und konduktiv die Wärme/Kälte aus dem Untergrund entzieht oder im Fall der Speicherung einträgt.

2.5.3 Tiefe Grundwasserbrunnen

In der Schweiz handelt es sich bei tiefen Grundwasserbrunnen um offene Systeme im Lockergestein bis in Tiefen von rund 350 m. Ähnlich wie im oberflächennahen Grundwasser werden tiefe Aquifere als Wärmequelle oder als thermische Speicher genutzt. In der Schweiz handelt es sich meist um Kieslagen, welche während der Eiszeiten in übertiefen eiszeitlichen Rinnen abgelagert wurden und von mächtigen Stillwassersedimenten überlagert sind. Somit handelt es sich um grosse, zusammenhängende, abgeschlossene und kaum fliessende tiefe Aquifere, die sich deshalb besonders gut als Aquiferspeicher (ATES) eignen. Die Erschliessung erfolgt mit grösseren Bohrlöchern als bei der EWS (teleskopiert mit Bohrdurchmessern zwischen ca. 1'000 mm bis 250 mm), welche mit Filterrohren ausgebaut werden.

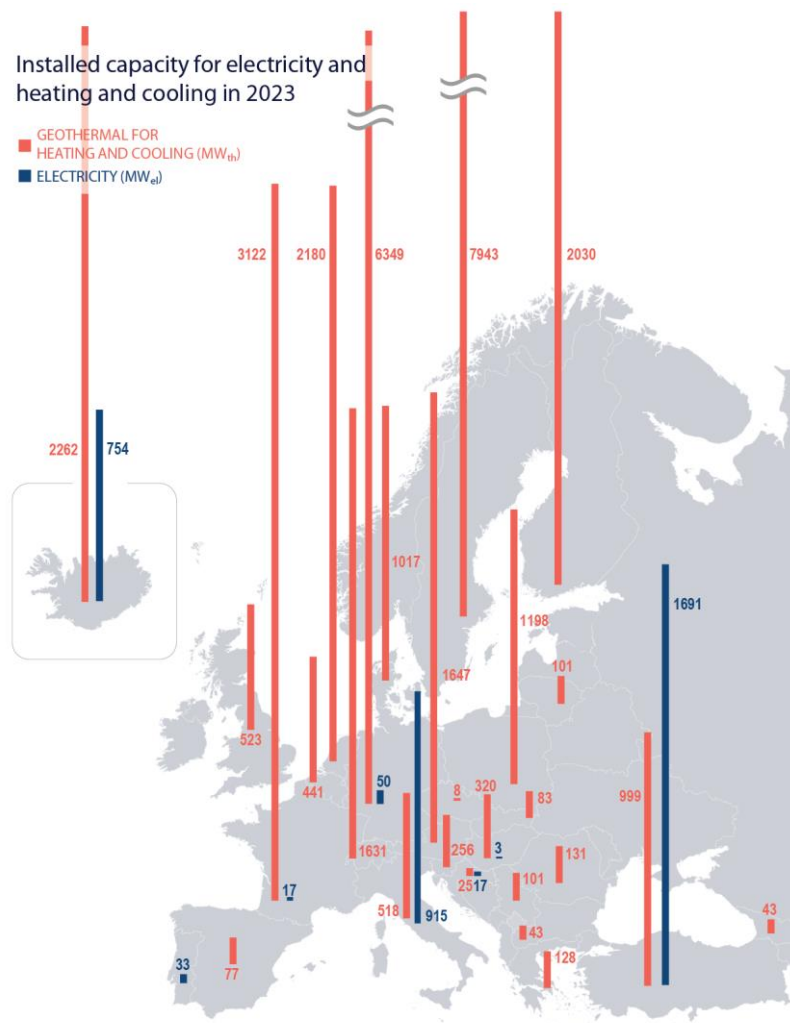
2.5.4 Hydrothermale Nutzungen

Wird tiefes warmes Felsgrundwasser bzw. Thermalwasser geothermisch genutzt, so spricht man von hydrothermalen Geothermie. Es handelt sich um ein offenes System, bei dem das Heisswasser über eine Bohrung gefördert und das abgekühlte Wasser wieder in den Aquifer zurückgegeben wird (= Dublette bestehend aus einer Förder- und einer Rückgabeböhrung). Ergänzungen mit weiteren Böhrungen sind möglich. Damit eine Nutzung möglich ist, wird ein durchlässiges und wasserführendes Gestein mit einem ergiebigen Aquifer benötigt. Für eine ausreichende Durchlässigkeit sind z. B. Karsthöhlräume, geklüftete Gesteine, Bruchzonen oder poröse Sandsteine notwendig. Abgesehen von den sedimentären Porenspeichern sind die grössten Erfolge in grossen Bruch- bzw. Störzonen zu erwarten, welche aber zielgenau erschlossen werden müssen. Beispiele in der Schweiz für die hydrothermale Nutzung aus Kluftaquiferen im Muschelkalk in Verbindung mit Bruchzonen sind z. B. Riehen oder Bad Schinznach. In Zürich, Kloten und Bassersdorf bestehen Beispiele für hydrothermale Nutzungen in porösen Sandsteinen und Konglomeraten in der Oberen Meeresmolasse. Grundsätzlich nimmt die Durchlässigkeit mit der Tiefe eher ab, sodass die hydrothermale Nutzung in der Schweiz insbesondere für die Wärmenutzung geeignet ist. Mit Stimulationsmassnahmen kann die Förderleistung verbessert werden (z. B. Einpumpen von Säure, um das Bohrloch besser an eine Störzone anzuschliessen). Thermische Leistungen liegen bei wenigen MW_{th} (Bsp. Riehen 5 MW_{th}) bis ca. 40 MW_{th} oder 5 MW_{el} (Anlagen in Bayern). Hydrothermale Anlagen sind technisch ausgereift und es gibt in Europa viele funktionierende Anlagen. Allerdings sind diese immer von geologischen Voraussetzungen im Untergrund abhängig, sodass jeweils ein Fündigkeitsrisiko besteht. Die installierte elektrische Leistung aus Geothermieranlagen betrug im Jahr 2023 in Europa rund 3.5 GW_{el} und die Wärme- und Kältenutzung ca. 30 GW_{th} (EGEC Geothermal Market Report 2023; Abb. 9).

2.5.5 Petrothermale Nutzungen

Die petrothermale Geothermie umfasst tiefe heisse Gesteinskörper, z. B. kristallines Grundgebirge, welche eine geringe Porosität, Klüftung und Durchlässigkeit aufweisen und in welchen somit kaum bis keine Felsgrund- bzw. Thermalwässer frei zirkulieren. Das gering durchlässige Gestein in Tiefen von drei und mehr Kilometern wird mit Stimulationsmassnahmen

künstlich durchlässig und somit geothermisch nutzbar gemacht (siehe nachfolgend EGS) oder mit einem Netz von Bohrungen ähnlich wie Erdwärmesonden erschlossen (siehe nachfolgend AGS). Die petrothermalen Systeme sind noch im Anfangsstadium, hatten in der Vergangenheit mit Rückschlägen und Projektabbrüchen zu kämpfen und sind in Mitteleuropa noch nicht wirtschaftlich. Dafür sind diese Systeme weniger standortabhängig, sind nicht von Fündigkeitsrisiken abhängig und sind einfacher skalierbar (siehe nachfolgendes Kapitel).



Quelle (leicht verändert):
https://www.egec.org/wp-content/uploads/2024/07/EGEC_2022-Key-Findings_Market-Report.pdf

Abb. 9 Installierte geothermische Leistung in Europa

EGS (Enhanced Geothermal System)

EGS (auch als Deep Heat Mining oder Hot Dry Rock bezeichnet) sind künstlich erstellte Wärmetauscher in grosser Tiefe von rund 4 bis 5 km. Dafür werden das tiefe und heisse kristalline Grundgebirge oder andere homogene und kompetente Gesteine, welche generell gering durchlässig sind, mit Wasser, das in das Bohrloch gepumpt wird, aufgebrochen. Mit weiteren Bohrungen wird dann eine Zirkulation mit Wasser durch den künstlichen Wärmetauscher ermöglicht. Mit EGS wird in der Regel primär Strom produziert. In der Schweiz gab es einen ersten Versuch, ein künstliches geothermisches Reservoir im kristallinen

Grundgebirge in 5 km Tiefe unter Basel zu schaffen, der aber aufgrund von spürbaren Erdbeben abgebrochen wurde. Derzeit wird mit sanfteren Stimulationsmethoden (Multi-Stage-Stimulation) und somit reduzierten Erdbebenrisiken ein neuer Anlauf im Jura genommen (Projekt Haute-Sorne). Im Gegensatz zur hydrothermalen Nutzung ist EGS geologisch eher ortsunabhängig und ist nicht an lokale Bruchzonen gebunden. Angestrebte Leistungen liegen bei 5 MW_{el} (Bsp. Basel und Haute-Sorne) bis einige 100 MW_{el} (Bsp. 400 MW_{el} Cape Station Projekt in Utah).

AGS (Advanced Geothermal System)

AGS ist ein geschlossenes geothermisches System im tiefen Untergrund. Es werden kilometerlange horizontale Bohrlöcher gebohrt, dass geschlossene Kreisläufe entstehen, in welchen ein Wärmeträgermedium fliesst und ähnlich wie bei einer Erdwärmesonde die Wärme an die Oberfläche bringt. Generell werden die horizontalen Stränge der Bohrungen nicht wie üblich mit Rohren ausgebaut, sondern bleiben offen oder die Bohrlochwand wird mit einem «Dichtemittel» versiegelt. Bisher ist AGS im Pilot-Stadium und aufgrund der hohen Bohrkosten noch nicht wirtschaftlich. Eine erste, grossmassstäbliche und kommerzielle Pilotanlage entsteht derzeit in Bayern in Geretsried.

Für Details, Chancen, Pro- und Contra wird auf Kapitel 9 verwiesen.

2.6 Geothermische Projekte in der Schweiz

Nachfolgend wird eine Auswahl von bekannten und aktuellen Geothermieprojekten mit Tiefbohrungen in der Schweiz gelistet.

Die wenigen Projekte und Erfolge zeigen die Problematik auf, dass in der Schweiz nicht wie etwa in Bayern regionale Tiefenaquifere vorliegen, welche vergleichsweise mit hohen Erfolgchancen erschlossen werden können. Bei uns ist die Geothermie an lokale durchlässige Phänomene wie z. B. Bruch- bzw. Störzonen gebunden, welche entsprechend mit Fündigkeitsrisiken verbunden sind. Zudem ist die Erkundung in einigen Gebieten noch spärlich und somit der Kenntnisstand zum Untergrund gering. Gleichwohl ist eine erfolgreiche und langfristige geothermische Nutzung möglich, wie einige bestehende Anlagen zeigen.

Tabelle 1 Auswahl von tiefen und aktuellen Geothermiebohrungen in der Schweiz

(nach Datum sortiert, l/s pro Bohrung)

Bohrung / Kanton	Datum erreichte Endtiefe	Bohrtiefe (Bohrlänge) / Geologie Aquifer	Zweck	Potential (in Grün = Erfolg, in Rot = Misserfolg)
Riehen 1+2, BS	1988	1547 / 1247 m Muschelkalk / Bruchzone	Hydrothermal Wärme Quartier	25 l/s, 67°C
Reinach-1	1989	1793 m Malm, Hauptrogenstein, Muschelkalk	Hydrothermal	Zu geringe Durchlässigkeiten, 82°C
Geothermiebohrung Bassersdorf, ZH	1993	800 m Molasse OMM	Erkundung + Wärme für Krankenhaus	7 l/s, 23°C (Auslauftemp.)
Schinznach S3, AG	1996	891 m Muschelkalk / Bruchzone	Thermal-Heilwasser, Wärme	8 l/s, 44°C (Auslauftemp.)
Yverdon F5	1998	1479 m Dogger, Malm, Kreide Kalksteine / Bruchzonen	Hydrothermal Thermalbad	>100 l/s, 22-59°C
Basel-1, BS	2006	5009 m EGS im Kristallin	EGS Strom, Wärme	Abbruch wegen Erdbeben, 180°C
GTB Sonnengarten Triemli, ZH	2010	2708 m Muschelkalk, Kristallin	Hydrothermal Erkundung, Wärme (als tiefe EWS genutzt)	Zu geringe Durchlässigkeiten, 97°C
Schlattingen 1+2, TG	2011/ 2013	1508 m bzw. 1172 m (2013 m), Muschelkalk	Hydrothermal Wärme für Gewächshaus	7.9 l/s, 65°C bzw. 10 l/s, 68°C
St. Gallen GT-1, SG	2013	4450 m Muschelkalk / Bruchzone	Hydrothermal Strom, Wärme	Abbruch wegen Erdgas / Erdbeben, 6 l/s 145°C
Genf Satigny, GE	2018	744 m Kreidekalke	Hydrothermal Erkundung, Wärme	50 l/s, 33°C
Genf Lully, GE	2020	1456 m Malmkalke	Hydrothermal Erkundung, Wärme	nicht ergiebig, 53°C
Lavey-1, VD	2022	2956 m (3220 m) Kristallin / Bruchzone	Hydrothermal Strom, Wärme Thermalbad	<2 l/s, 123°C
Vinzel-1, VD	2022	2252 m (2418 m) Dogger / Bruchzone	Hydrothermal Wärme	Bohrprobleme, trocken
Vinzel-1 sidetrack 1	2022	2233 m (2335 m) Dogger / Bruchzone	Hydrothermal Wärme	1-2 l/s
Vinzel-1 sidetrack 2	2023	1524 m (1820 m) Malmkalk / Bruchzone	Hydrothermal Wärme	150 l/s, 33°C (ca. 20°C zu kühl)
Forsthaus, Bern	2022/ 2023	3x500 m Sandsteine der USM	Geospeicher Hochtemperatur	USM mit geringer Durchlässigkeit
Yverdon Montagny2	2023	1140 m (1630 m) Malmkalk / "damage-zone" einer Bruchzone	Hydrothermal Wärme für Gewächshaus	2-3 l/s (auch sidetrack nicht ergiebig)
Flughafen Zürich	2023/24	Brunnen + 3 Sondier- bohrungen ca. 300 m Quartäre Rinne	Wärme-Kälte- Aquiferspeicher	>50 l/s, 20°C

2.7 Notwendige Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung

Die erfolgreiche Umsetzung einer geothermischen Erschliessung hängt von verschiedenen Parametern ab, welche sich für offene, künstliche und geschlossene Systeme unterscheiden. Die wichtigsten Parameter für die thermische Leistung sind unabhängig vom System die Temperatur und der Durchfluss. Für die Erzeugung von Wärme oder Strom sollten beide hohe Werte aufweisen. Die Temperatur ist weniger kritisch, da sie mit den bestehenden Daten gut prognostiziert werden kann (je nach Tiefe bis $\pm 10^{\circ}\text{C}$). Hingegen zeigen die verschiedenen hydrothermalen Projekte in der Schweiz (Kapitel 2.6), dass die Förderrate stark variieren kann (von 0 bis 150 l/s) und nur schwer prognostiziert werden kann. Die Förderrate hängt stark von der Durchlässigkeit des Gesteins ab. In der Schweiz ist diese generell an Bruch- und Störzonen, also geklüftetes Gestein, gekoppelt. Diese sind aber nur lokal vorhanden und müssen punktgenau erbohrt werden. Insbesondere Geothermieprojekte mit dem Ziel der Stromerzeugung setzen auf EGS oder AGS, da diese Techniken nicht von lokalen Bruch- und Störzonen abhängig sind. Das Reservoir wird in homogenen Gesteinskörpern wie z. B. dem kristallinen Grundgebirge künstlich hergestellt. Neben den geologischen Voraussetzungen spielen auch die Bohrkosten, der Erkundungs- und Reifegrad, der Standort und die Akzeptanz eine Rolle. In den Abb. 10 und Abb. 11 werden die wichtigsten Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung eines geothermischen Projekts gelistet und gewichtet.

Erfolgsblume für hydrothermale bzw. natürlich offene Systeme

Voraussetzungen und notwendige Parameter
für ein erfolgreiches Projekt (nicht abschliessend)

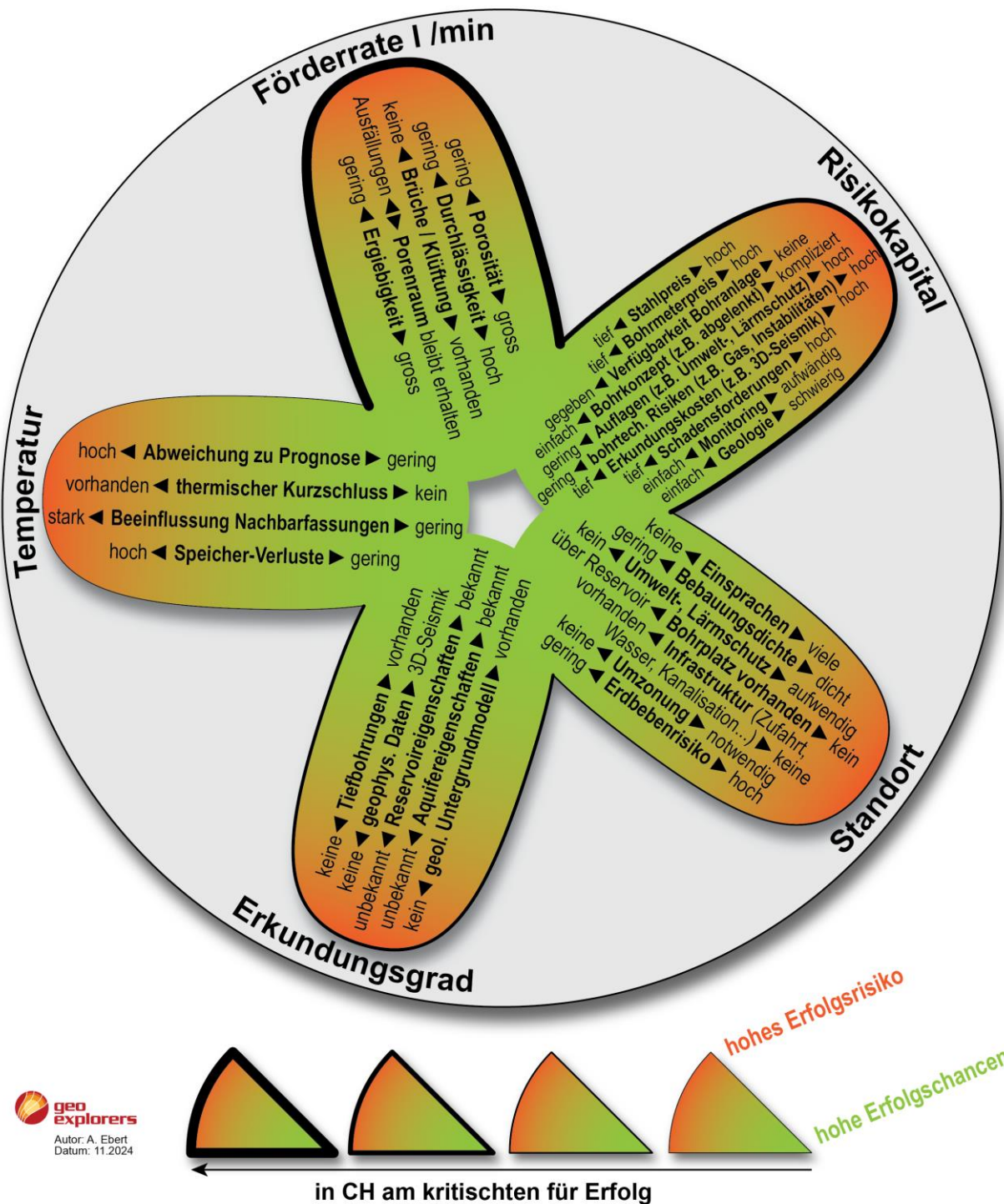


Abb. 10 Voraussetzungen für ein erfolgreiches hydrothermales Projekt

Erfogsblume für künstliche / geschlossene Systeme (z.B. EGS, AGS)

Voraussetzungen und notwendige Parameter
für ein erfolgreiches Projekt (nicht abschliessend)

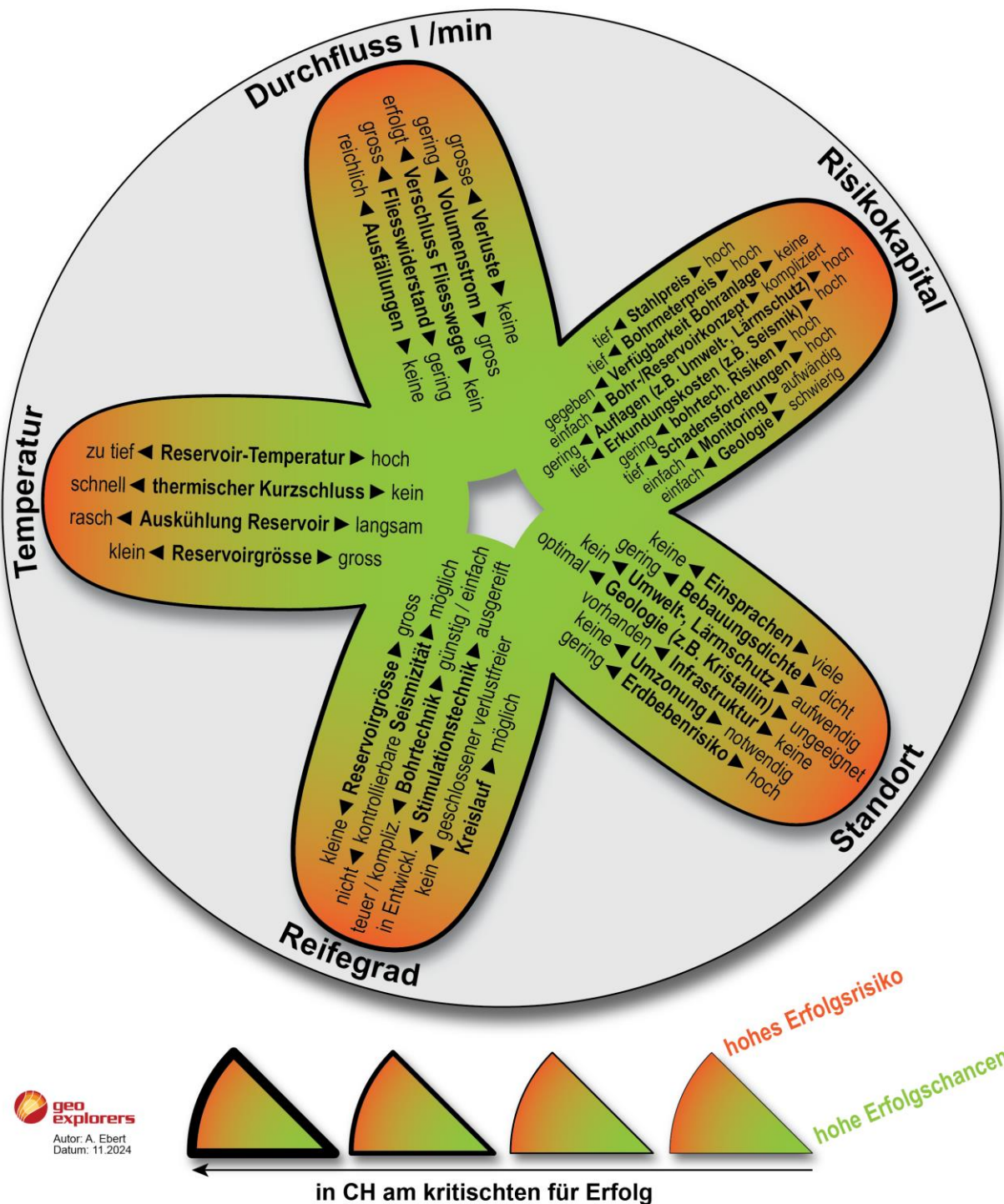


Abb. 11 Voraussetzungen für ein erfolgreiches EGS o. AGS Projekt

2.8 Vor- und Nachteile der geothermischen Nutzung

Abb. 12 listet die Vor- und Nachteile der Geothermie, unterschieden in hydrothermale und künstliche Systeme. Die wichtigsten Vorteile der Geothermie gegenüber anderen Energiequellen sind, dass sie einheimisch, unabhängig, erneuerbar, klimaneutral, sicher, zuverlässig, vielseitig, flexibel und rund um die Uhr verfügbar ist. Die genannten Nachteile sind ein Abbild der Situation heute und beziehen sich überwiegend auf den noch geringen Entwicklungsstand und die entsprechend höheren Kosten und Erfolgsrisiken. Mit zunehmenden Projekten und erfolgreicher Entwicklung heben sich einige Nachteile auf. Einige Beispiele im Ausland zeigen in die richtige Richtung, indem etwa Bohrkosten stark minimiert werden können. Der Vergleich mit den Anfängen der Erdwärmesonden-Branche (zu Beginn teuer, langsam, fehlende Erfahrung, kaum Bohrgeräte usw.) und der heutigen Industrie mit Standardverfahren und einem Massengeschäft zeigt, wohin sich die tiefere Geothermie bewegen könnte.

Vor- und Nachteile der Geothermie, unterschieden in hydrothermal und EGS und AGS

Hydrothermale natürliche Systeme

Vorteile:

- einheimische & unabhängige Energiequelle
- erneuerbare Energiequelle
- umweltverträglich und klimaneutral
- immer & rund um die Uhr verfügbar / Bandenergie
- sichere, zuverlässige & stabile Energiequelle
- vielseitig & flexibel nutzbar (Wärme, Strom, Speicher)
- grosses Potential / insbesondere für Wärme
- einzelne funktionierende Systeme in CH vorhanden
- kann von oben nach unten entwickelt werden
(→ Minimierung Risikokapital)
- grundsätzlich Technik erprobt / vorhanden
- begleitende Nutzungen (z.B. Lithium, CO₂ Speicherung)

Nachteile:

- derzeit kostenintensiv (z.B. hohe Planungs- & Bohrkosten)
- Bohrkosten nehmen exponential mit Tiefe zu
- geol. Voraussetzungen notwendig (i.W. Permeabilität)
→ standortabhängig, nicht skalierbar & Fündigkeitsrisiken
- natürliche Durchlässigkeit nimmt mit Tiefe ab
- häufig eine vorgängige detaillierte Erkundung notwendig
- mit zunehmender Tiefe steigendes Risiko der Seismizität
- einige Fehlschläge in CH
- vergleichsweise kleine Leistung pro Dublette
im Vergleich zu anderen Wärme- / Stromquellen
- Beeinträchtigung Grundwasser möglich

stimulierte & geschlossene Systeme (EGS, AGS)

Vorteile:

- wie für hydrothermal
- + Leistung skalierbar / vergrößerbar
(und damit Kostenminimierung)
- eher geologisch standortunabhängig
- effizientere zirkulierende Fluide möglich (CO₂)
- Seismizität zunehmend im Griff

Nachteile:

- derzeit kostenintensiv (z.B. hohe Planungs- & Bohrkosten)
- derzeit in CH ohne Subventionen nicht wirtschaftlich
- derzeit geringe Akzeptanz in Bevölkerung
- fehlende funktionierende Referenzprojekte in CH
- mit zunehmender Tiefe Risiko der Seismizität
- gewisse geol. Voraussetzungen notwendig
→ häufig eine vorgängige Erkundung notwendig
- vergleichsweise kleine Leistung
im Vergleich zu anderen Wärme- / Stromquellen
- Langzeitstabilität noch ungewiss; hat bei vergangenen Projekten zum Abbruch geführt (z.B. Auskühlung, Verschliessung durch Ausfällungen)

Abb. 12 Vor- und Nachteile Geothermie

2.9 Übersicht geologischer Aufbau in Nid- und Obwalden

Das Querprofil in Abb. 13 zeigt den groben geologischen Aufbau vom Juragebirge über das Mittelland bis in die Alpen. Das Untersuchungsgebiet liegt im rechten Teil der Abbildung zwischen Pilatus und Engstlenalp. Die Lage der grossen geologischen bzw. tektonischen Einheiten an der Oberfläche ist in Abb. 14 ersichtlich. Von unten nach oben ist der Untergrund im Untersuchungsgebiet wie folgt aufgebaut:

In Tiefen von über 6 km liegt das **kristalline Grundgebirge** vor (in der Abb. 13 rosa), in welchem sich vor mehr als 250 Mio. Jahren grosse Gräben gebildet haben. Diese **Permokarbontröge** wurden mit einer mächtigen Abfolge von Brekzien, Sandsteinen, Tonsteinen und Kohle gefüllt (in der Abb. 13 braun). Die Herkunft der bekannten Erdgasaustritte um Sarnen, am Wellenberg und in Tunnelbauten wird der Kohle in diesen Trögen zugeordnet (Inkohlungsprozesse mit Freisetzung von Methan).

Darüber wurde das **Mesozoikum** abgelagert (in der Abb. 13 blau). Das Mesozoikum bezeichnet eine Schichtenabfolge, welche vor 252 bis 66 Mio. Jahren abgelagert wurde und umfasst u.a. die Schichten des Muschelkalks, des Keupers und des Jurazeitalters. Jüngere Schichten aus der Kreidezeit wurden entweder nicht abgelagert oder lagen nachfolgend über Meer und waren somit der Verwitterung und Abtragung ausgesetzt. Ein bekanntes Phänomen, das damals entstand und z. B. in der Bohrung Entelbuch-1 angebohrt wurde, ist der **Paläokarst**. Es handelt sich um eine alte Verkarstung der Kalksteine, was sich in Spalten und Klüften äussert, welche meist mit einem Residium (z. B. rote eisenschüssige Bolustone, Siderolithikum oder Quarzsand) gefüllt sind. Da sich das Mesozoikum tektonisch kaum bewegt hat, wird es auch als Autochthon bezeichnet. Das Mesozoikum besteht grösstenteils aus marinen Ablagerungen wie z. B. Kalksteinen und Mergeln. Im Untersuchungsgebiet ist das komplette Mesozoikum ca. 0.8 km mächtig und liegt grob in einer Tiefe von 5 km. Die mesozoischen Schichten fallen nach Süden ein und sind im Untersuchungsgebiet durch die Alpenbildung verbogen und von Brüchen durchsetzt.

Im südlichsten Bereich der Kantone Nid- und Obwalden folgt das **Aar-Massiv**, welches eine ähnliche Abfolge von Kristallin und mesozoischer bis eozäner Sedimentbedeckung aufweist (in der Abb. 13 rosa, blau). Das Aar-Massiv wurde im Miozän vor ca. 20 - 5 Mio. Jahren aufgewölbt und über die nördliche Abfolge überschoben (Grindelwald-Phase). Entsprechend taucht die mesozoische Sedimentbedeckung des Aar-Massivs nach Süden bis an die Oberfläche auf und bildet die Kette der Wendenstöcke und des Titlis (Abb. 16, rechts oben). Südlich davon ist das Kristallin des Aar-Massivs an der Oberfläche aufgeschlossen. Durch die tektonische Beanspruchung ist das Aar-Massiv stark deformiert, verfaltet und von Brüchen und Überschiebungen durchsetzt. Diese Einheit unter den helvetischen Decken wird auch **Infrahelvetikum** genannt.

Über dem Mesozoikum folgen tertiäre klastische Sedimente, welche während der Alpenbildung abgelagert wurden. Diese **Molasse**-Sedimente wurden im Oligozän und Miozän vor ca. 34-6 Mio. Jahren in einem Vorlandbecken abgelagert, wobei die jüngeren Sedimente wieder erosiv abgetragen wurden (in der Abb. 13 gelb). Es handelt sich dabei um den Abtragungsschutt der werdenden Alpen. Die Molasse besteht aus Konglomeraten (Nagelfluh, Abb. 16 links oben), Sandsteinen, Mergeln und Tonsteinen. Je nach Ablagerung unter oder über dem Meeresspiegel unterscheidet man in Meeres- oder Süsswassermolasse. Von Nord nach Süd nimmt die Mächtigkeit von 0 bis ca. 5 km zu. Die südlichsten Bereiche der Molasse, welche zum Teil auch unter der Alpenfront liegen, wurden in die Alpenbildung miteinbezogen. Sie sind folglich

verfaltet, steil gestellt und verschuppt und werden als **Subalpine Molasse** bezeichnet. An der Oberfläche findet man sie entlang einem Streifen von Finsterwald, Eigental, Horw zur Rigi.

Noch weiter südlich gehen die Molasse-Sedimente unter den helvetischen Decken in den **Nordhelvetischen Flysch** über (in der Abb. 13 beige). Die genaue räumliche Abgrenzung ist unbekannt. Der Nordhelvetische Flysch wurde zeitlich vor der Molasse im späten Eozän und frühen Oligozän ebenfalls in einem Vorlandbecken, allerdings in einem tiefmarinen Becken vor dem heranrückenden aktiven Gebirgsgürtel abgelagert. Generell handelt es sich dabei um eine gut-gebankte, marine, meist graue Sandstein - Tonstein - Mergel - Abfolge, die Turbiditströmen (Unterwasser-Trübestrome an steilen marinen Hängen) zugeordnet wird. Der Nordhelvetische Flysch ist z. B. an der Nordflanke des Titlis anstehend. Nach Süden geht der Nordhelvetische in den **Südhelvetischen Flysch** über. Letzterer wurde nach Norden überschoben und ist nördlich des Pilatus und des Bürgenstocks an der Oberfläche anstehend.

Über der Molasse und dem Nordhelvetischen Flysch folgen die **Helvetischen Decken**. Dabei handelt es sich ebenfalls um mesozoische Sedimente, welche aber entlang einer basalen Überschiebung einige Dutzend Kilometer von Süden nach Norden überschoben wurden. Im Untersuchungsgebiet wurzeln diese Decken südlich des Aar-Massivs (Abb. 15). Die Gesteine sind entsprechend stark deformiert, was sich in Falten mit ca. Ost-West-Faltenachsen, Überschiebungen in nördliche Richtung und Brüchen äussert (siehe Abb. 16). Die Platznahme der helvetischen Decken der Zentralschweiz erfolgte vor rund 38 bis 20 Mio. Jahren (Prabé- bis Kiental-Phase). Durch die nachfolgende Aufwölbung des Aar-Massivs vor 20 bis 5 Mio. Jahren wurden die Decken weiter deformiert und veränderten ihre Lage weiter nach Norden (gravitativer Kollaps während der Grindelwald-Phase). Innerhalb des Untersuchungsgebietes können zwei helvetische Decken unterschieden werden, die Drusberg- und Axen-Decke. Die **Drusberg-Decke** ist die obere Decke und besteht aus den jüngeren Kreide- und Tertiär-Sedimenten; eine Abfolge von marinen Kalksteinen und Mergeln, sowie tertiären Sandsteinen, Mergeln und Kalken. Der nördliche frontale Bereich (u. a. Pilatus und Bürgenstock) wird auch als Randkette bezeichnet. Die Drusberg-Decke wurde von der unteren **Axen-Decke** abgeschert. Die Axen-Decke besteht folglich grösstenteils aus den älteren Jura-Sedimenten. Es handelt sich dabei um Mergel und Kalksteine. Der Deckentrenner zwischen Drusberg- und Axen-Decke bildet eine «weiche» duktil-reagierende, dunkle Tonschiefer-Mergel-Abfolge (Palfris-, Vitznau-, Zementstein-Schichten). Aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit hat die Nagra in den 90er Jahren in diesen Schichten Untersuchungen für ein mögliches Tiefenlager am Wellenberg durchgeführt.

Die Helvetischen Decken werden von den **Penninischen Decken** überlagert. Zu nennen sind unter anderem die Klippen-Decke, welche z. B. das Stanserhorn und Buochserhorn bildet sowie die Schlieren-Decke, welche am Glauenberg ansteht. Diese sind für die geothermische Nutzung nicht relevant.

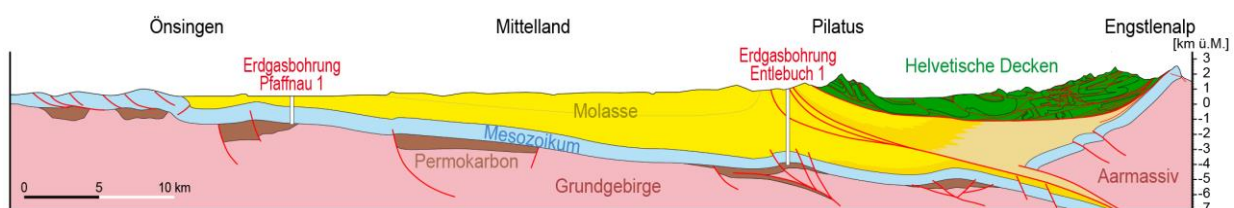


Abb. 13 Tektonische Einheiten vom Jura bis in die Alpen

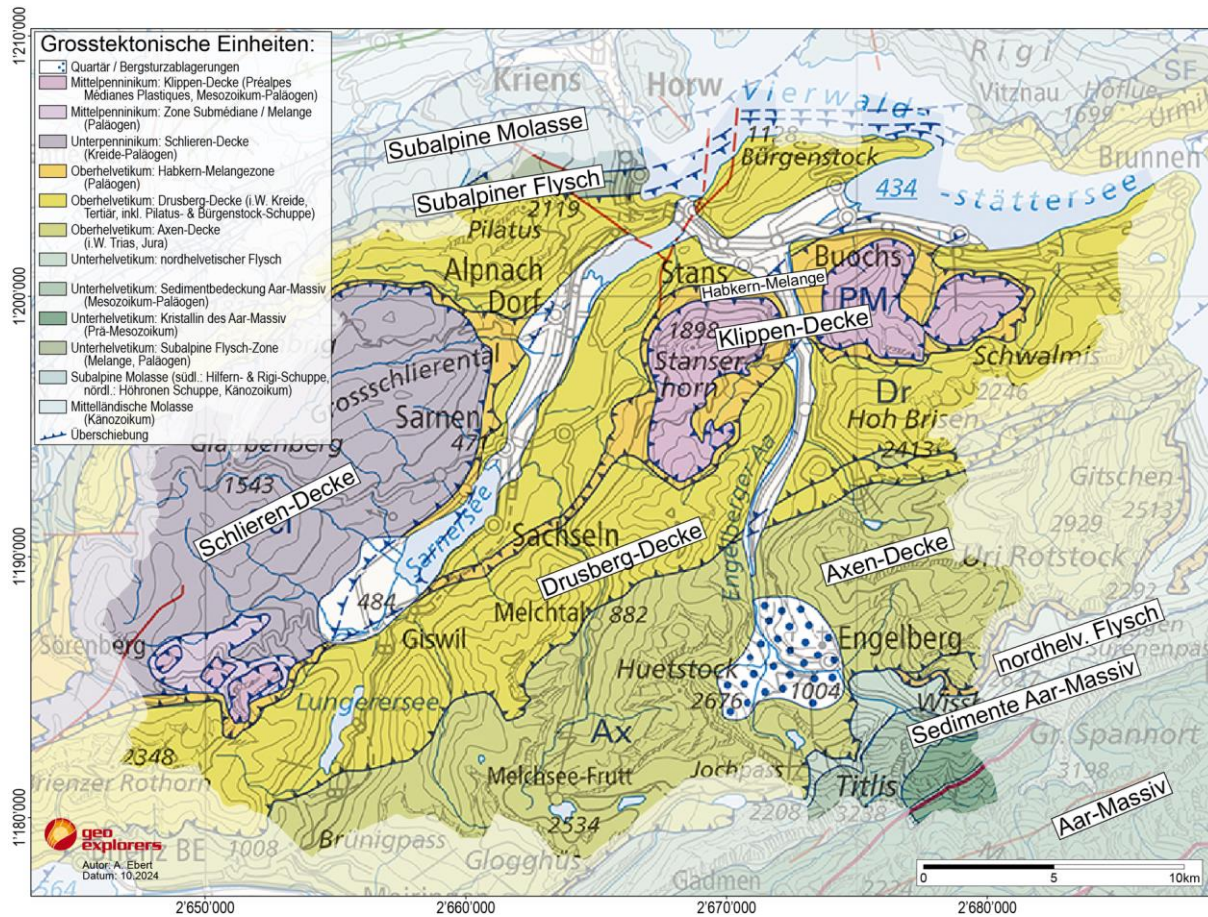


Abb. 14 Tektonische Einheiten in Nid- und Obwalden

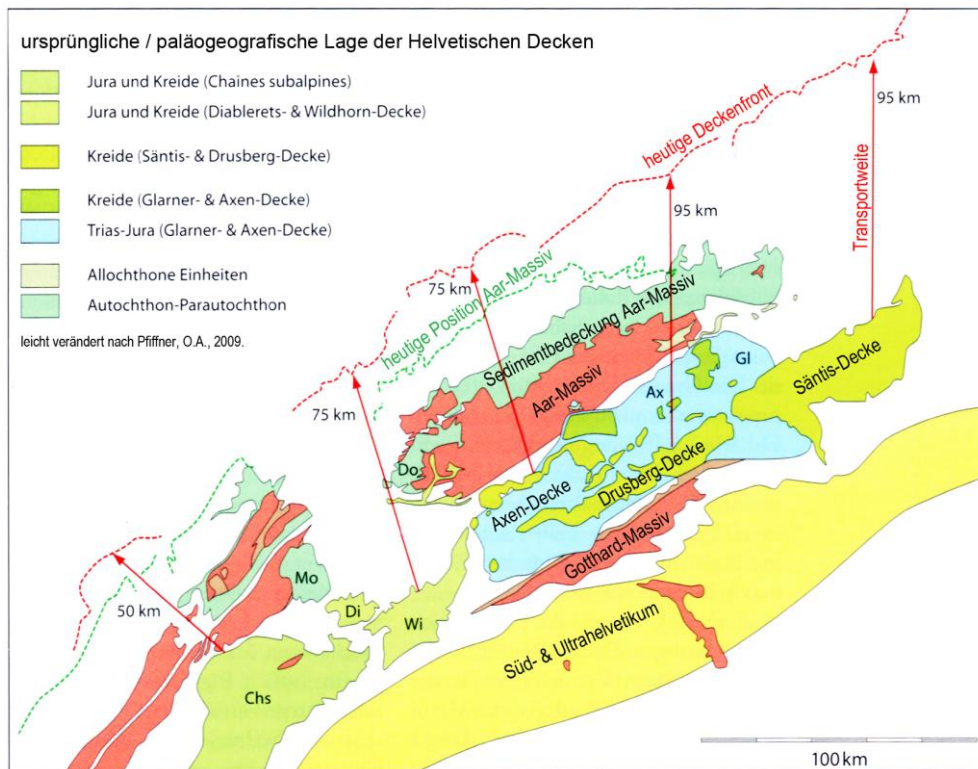


Abb. 15 Paläogeografische Karte der Helvetischen Decken

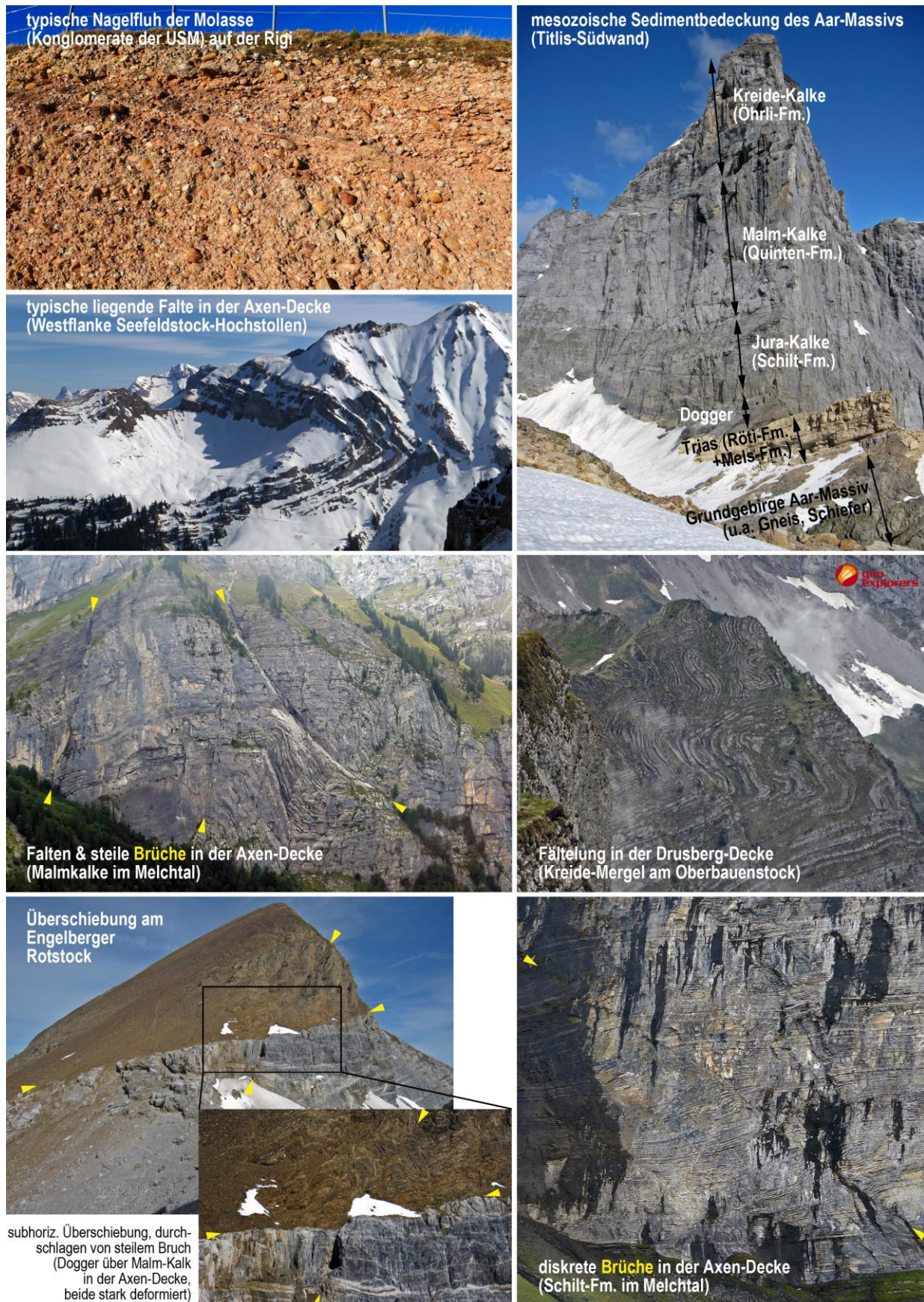


Abb. 16 Einblicke in die Geologie / Tektonik im Untersuchungsgebiet

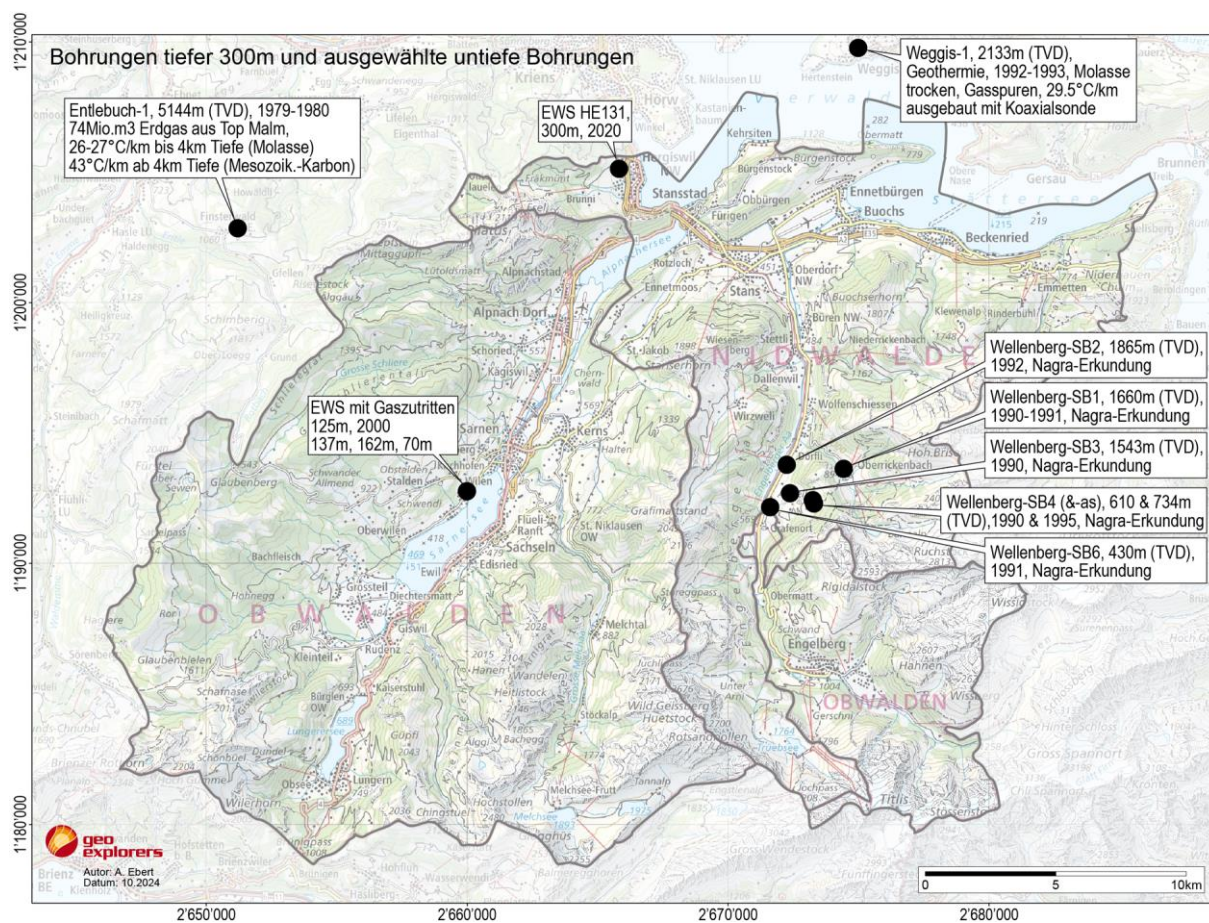
3 Datengrundlagen

In den nachfolgenden Kapiteln werden alle Daten zum tieferen Untergrund in den Kantonen Nid- und Obwalden dargestellt. Diese werden unterschieden nach Tiefbohrungen, Seismik, Querprofilen und Berichten.

3.1 Tiefbohrungen

In den Kantonen Nid- und Obwalden gibt es zwar reichlich Bohrungen, aber diese sind grösstenteils Erdwärmesonden, die nur bis in Tiefen von rund 200-300 m reichen. Es gibt nur 6 Bohrungen, welche grössere Tiefen zwischen 430 und 1'865 m (TVD³) erreichen. Diese liegen alle am Wellenberg und wurden im Zusammenhang mit den Untersuchungen für ein Tiefenlager von der Nagra erstellt (Nagra NTB96-01). Die nächst tieferen Bohrungen liegen im Kanton Luzern. Diese sind die Erdgas-Bohrung Entlebuch-1 (5'144 m TVD) aus den Jahren 1979-1980 (Vollmayr & Wendt, 1987), sowie die Geothermie-Bohrung Weggis-1 (2'133 m TVD) aus den Jahren 1992-1993 (Greber et al., 1994).

In der nachfolgenden Tabelle werden relevante Tiefbohrungen dokumentiert.



³ TVD = true vertical depth, Bohrtiefe ab Terrain (nicht Bohrlänge)

Tabelle 2 Tiefbohrungen tiefer 400 m u. T. im Untersuchungsgebiet und umgebend

Name Bohrung, sortiert nach Bohrtiefe	X	Y	Ansatzhöhe m ü. M.	Bohrlänge in m (TVD)	Ausführungsjahr	Zweck
Entlebuch-1 (LU)	2651204	1202853	1'080	5'282 (5'144)	1979-80	Erdöl / Erdgas
Weggis-1 (LU)	2674984	1209580	457	2'302	1992-93	Geothermie
Wellenberg-SB2 (NW)	2672245	1193581	532	1'870 (1'865)	1992	Erkundung Tiefenlager
Wellenberg-SB1 (NW)	2674430	1193432	846	1'670 (1'660)	1990-91	Erkundung Tiefenlager
Wellenberg-SB3(NW)	2672367	1192505	738	1'547 (1'543)	1990	Erkundung Tiefenlager
Wellenberg-SB4 (NW)	2673269	1192108	958	758 (734)	1990	Erkundung Tiefenlager
Wellenberg-SB4-av / as	2673249/52	1192218/13	942	735 / 858 (735 / 610)	1994-95	Erkundung Tiefenlager
Wellenberg-SB6 (NW)	2671608	1191976	628	431 (430)	1991	Erkundung Tiefenlager

Name Bohrung	Erreichte Formation	Max. gemessene Temperaturen	Durchlässigkeiten, Wasserzutritte, Besonderheiten
Entlebuch-1 (LU)	Oberkarbon	172 °C in 5'282 m	Top Malm mit Klüften und Paläokarst, darin totale Spülverluste, 74.4 Mio. m ³ Methan gefördert (von 1985-1994), zusätzlich 2'278m ³ Kondensat & Leichtöl und 1'330m ³ Wasser; nach Leeren des Gasreservoirs wurde kein weiteres Wasser gefördert; duales Lagerstätten-System mit geringer Matrix-Porosität von ca. 3% und gut permeablen Klüften & Karst; ansonsten Molasse und Malm dicht; kalkige & dolomitische Fazies des Muschelkalks mergeliger und weniger geklüftet als in N-CH → geringere Durchlässigkeit
Weggis-1 (LU)	Molasse USM	73 °C in 2'133 m	Durchwegs auch in Bruchzonen geringe Durchlässigkeit und keine/kaum Wasserführung; während Pumptests von ca. 1 l/s wurde Bohrloch innert einer Stunde leergepumpt; über weite Strecken Erdgaszutritte bzw. -indizien; Bruchzonen mit Klufkalzit verfüllt; unbedeutende Matrixporosität von wenigen %, einzelne Sandsteinlagen bis max. 10%, nur Fissurationsporosität; als tiefe koaxiale Erdwärmesonde bis 2'295 m u.T. ausgebaut mit Abnehmerleistung 200 kW und gelieferter Wärmemenge von ca. 420 MWh.
Wellenberg-SB2 (NW)	Palfris-Fm.	Ca. 76 °C in 1'837 m	Transmissivitäten und Durchlässigkeitsbeiwert, sowie Zuflüsse nehmen mit Tiefe ab; je nach Lithologie wurden in der SB1 und SB2 in Tiefen >500 m Transmissivitäten von ca. 10 ⁻⁶ bis 10 ⁻¹² m ² /s bzw. kf-Werte von ca. 10 ⁻⁸ bis 10 ⁻¹³ m/s bestimmt; stark deformierte Gesteine mit Scherzonen und Klüften; aus diesen erfolgten Wasserzuflüsse insb. dort, wo Gestein kompetent; diverse Grundwasserstockwerke (u.a. alte Na-Cl-Wässer tiefer 400m); aus Nagra NTB 93-38 und NTB 96-01
Wellenberg-SB1 (NW)	Mélange & Nordhelv. Flysch	Ca. 63 °C in 1'550 m	
Wellenberg-SB3(NW)	Mélange		

3.2 Seismik

In den Kantonen Nid- und Obwalden wurden einige reflexionsseismische Erkundungen durchgeführt. Diese sind auf der Karte in Abb. 18 lokalisiert. Erste seismische Vermessungen erfolgten von der LEAG (AG für Luzernisches Erdöl) in den Jahren 1977 und 1978 (Lahusen & Wyss, 1995). Diese hielt von 1974 bis 1980 eine Schürfbewilligung in den Kantonen Nid- und Obwalden. Gesamthaft wurden in dieser Zeit ca. 150 km seismische Linien vermessen. Die Linie LU09-76 bzw. LEAGLUZNRU7609 ist im Seismischen Atlas der Schweiz veröffentlicht (Sommaruga et al., 2012, Abb. 19). Die Qualität der damaligen Seismik ist zufriedenstellend, um den ungefähren Verlauf von Schichtpaketen wie das autochthone Mesozoikum zu

definieren, aber nicht geeignet, um ein detailliertes Abbild des Untergrunds mit Bruchzonen zu erhalten (Abb. 19).

Aus diesem Grund erfolgten später weitere seismische Erkundungen. Die TKG (Tiefengas Konsortium, ein Konsortium bestehend aus der Swissspetrol Holding Ltd. und Sulzer Brothers Ltd.) unterstützt durch das NEFF (Schweizer «National Energy Research Foundation») führte im Jahr 1990 weitere seismische Messungen in den Kantonen Nid- und Obwalden und Uri aus (Bodmer & Gunzenhauser, 1992; TKG, 1977). Total wurden 11 Linien mit einer Gesamtlänge von ca. 205 km vermessen. Dafür erhielt die TKG im Jahr 1989 die Schürfrechte in den Kantonen Nid- und Obwalden. Zusätzlich erfolgten Erdgas-Analysen und gravimetrische Messungen, um Schwereanomalien zu bestimmen. Die Qualität der Seismik ist ähnlich der LEAG-Seismik.

Des Weiteren wurde im Rahmen des NFP20 (Deep Structures of Switzerland) im Jahr 1990 die Seismik-Linie C1 durch das obere Aare-Tal vom Brünigpass bis zur Handegg geschossen. Deren Auflösung ist in den oberen Kilometern gering, denn der Fokus lag auf sehr tiefen Strukturen von über 5 km Tiefe. Im Rahmen der Vermessungen wurde der strukturelle Aufbau des nördlichen Aar-Massivs visualisiert (Pfiffner et al., 1997, Fig. 11-6a).

Im Rahmen einer Explorationskampagne für mögliche Erdgasspeicher, strategische Erdgasfelder und mögliche geothermische Ressourcen erfolgte eine weitere Erkundung mittels reflexionsseismischer Messungen durch die GVM AG (Gasverbund Mittelland AG) im Jahr 2011. Dafür hielt die GVM AG eine Schürfbewilligung in den Kantonen Nid- und Obwalden in den Jahren 2010 bis 2014. Es wurden 7 Linien mit einer Gesamtlänge von ca. 113 km vermessen (Ebert et al., 2013). Die Qualität der Seismik variiert von gut bis ausreichend und erlaubte, den internen Aufbau der Helvetischen Decken, deren Basis und das Autochthone Mesozoikum inkl. Permokarbonvorkommen besser als die alten Linien zu visualisieren (Abb. 20 und Abb. 21). Die nachfolgenden Querprofile, die im Rahmen dieser Studie konstruiert wurden, beruhen zu einem grossen Teil auf dieser Seismik.

Mit der Erkundung des Wellenbergs durch die Nagra wurden in den Jahren 1989 und 1994 mehrere seismische Profile über und um den Wellenberg (südlich Wolfenschiessen) vermessen (Nagra NTB96-01). Diese weisen Längen zwischen ca. 2 und 5.5 km auf. Das Ziel war, den internen Aufbau des Übergangs zwischen Drusberg- und Axen-Decke zu visualisieren (Abb. 22). Für die vorliegende Studie sind diese Daten weniger relevant.

Grundsätzlich ist die Qualität der Seismik unbefriedigend, wo der Untergrund stark tektonisch gestört ist (im Bereich von Bruch- und Störzonen), die Schichten sehr steil stehen und wo aufgrund der Topographie, Infrastruktur oder Überbauung messtechnische Schwierigkeiten auftreten (Noise, keine gerade Linienführung, Schusspunktlücken, low-force usw.). Neben der Linienwahl und den Messparametern hat auch das Processing einen Einfluss auf die Qualität der Seismik. Die Qualität bzw. Kartierbarkeit des Untergrundes ist auf alten seismischen Linien schlechter als auf neuen.

Ein Grossteil der Seismik konnte für diese Studie berücksichtigt werden, ist aber nicht öffentlich zugänglich.

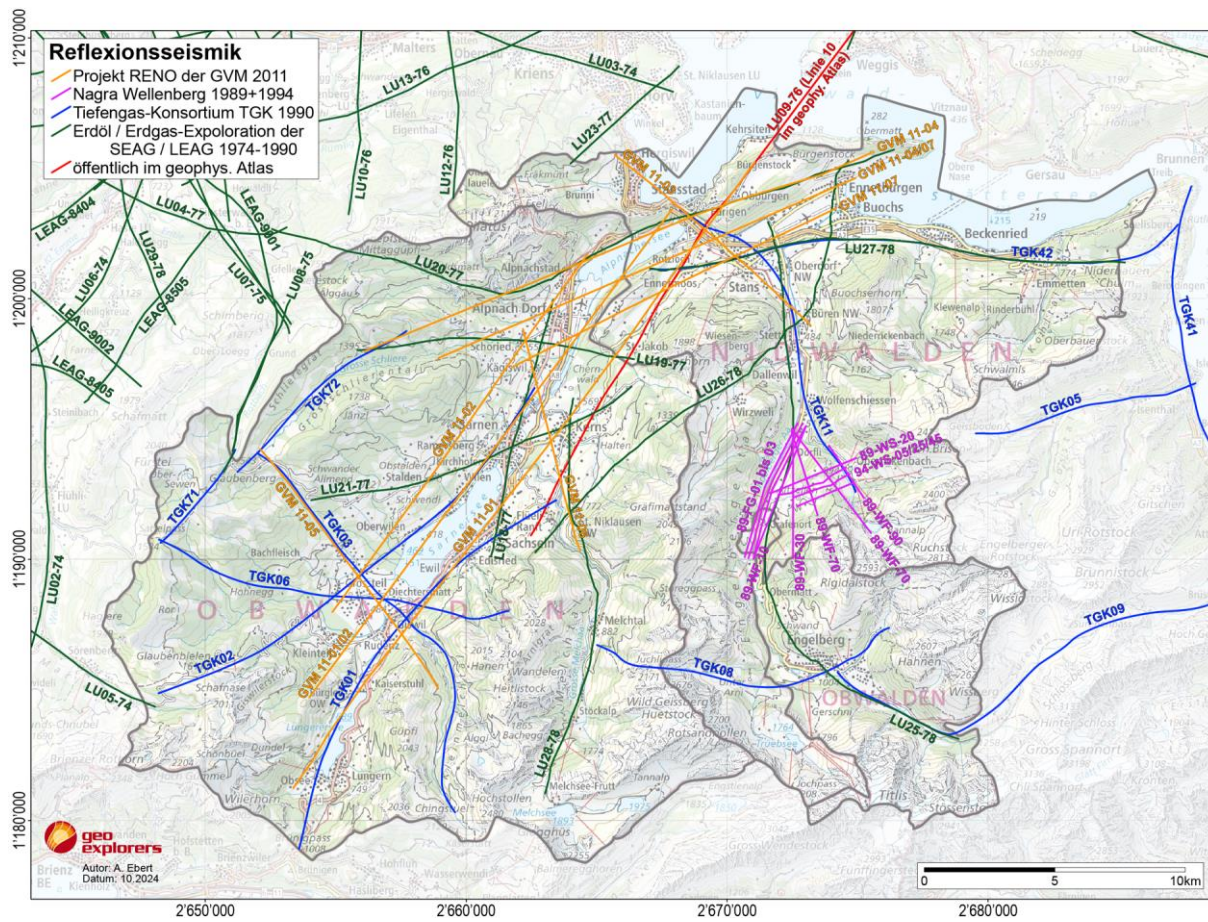


Abb. 18 Seismik in Kantonen Nid- und Obwalden

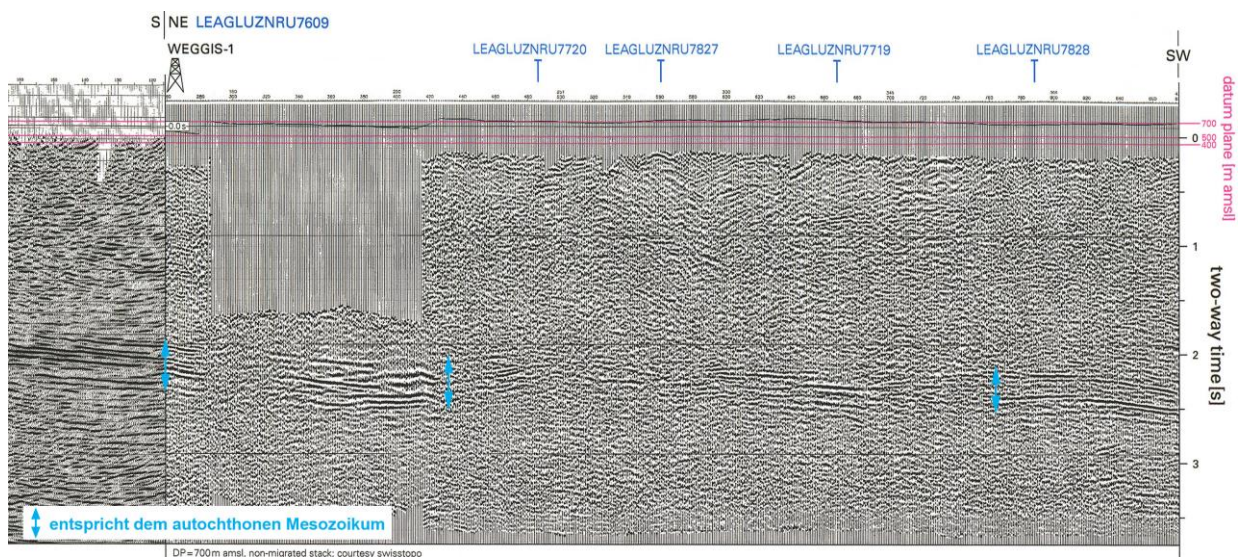


Abb. 19 LEAG-Seismik LU09-76

Auf der alten LEAG-Seismik ist das autochthone Mesozoikum erkennbar, aber eine detaillierte Kartierung von Schichten oder Brüchen ist nicht möglich. Die Helvetischen Decken sind nicht erkennbar. Ausschnitt aus dem Seismischen Atlas der Schweiz, Sommaruga et al., 2012.

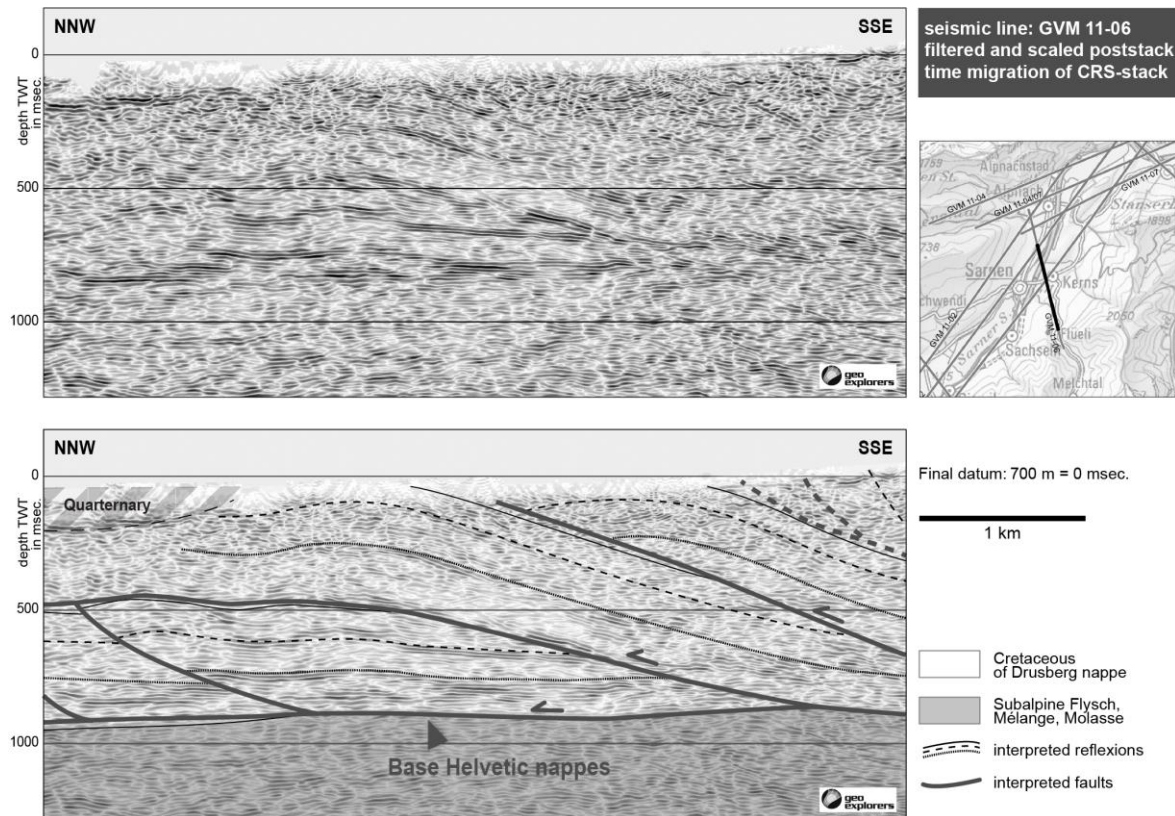


Abb. 20 Ausschnitt Seismik-Linie GVM11-06

Mit der Seismik konnten die Verschiebung und die Verfallung der Drusberg-Decke visualisiert werden. Abbildung aus Ebert et al., 2013.

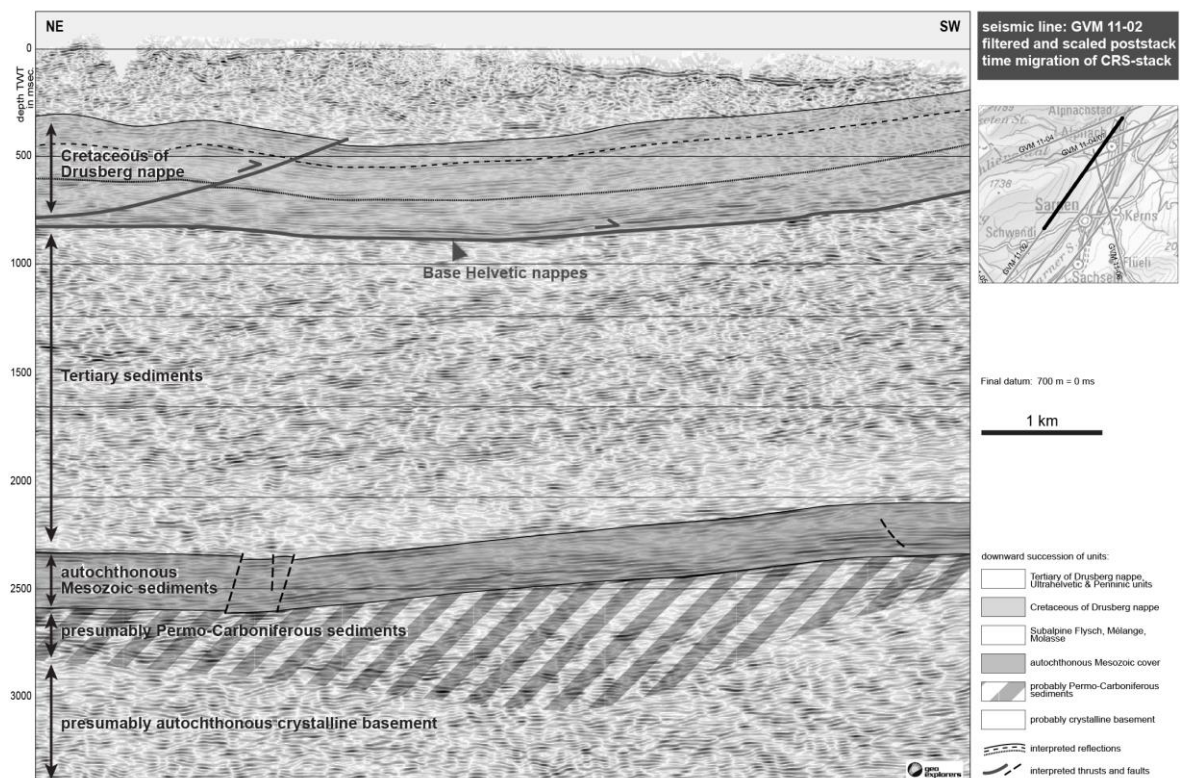


Abb. 21 Ausschnitt Seismik-Linie GVM11-02

Mit der Seismik konnten die Basis der Helvetischen Decken, das autochthone Mesozoikum und das Permokarbonvorkommen definiert werden. Abbildung aus Ebert et al., 2013.

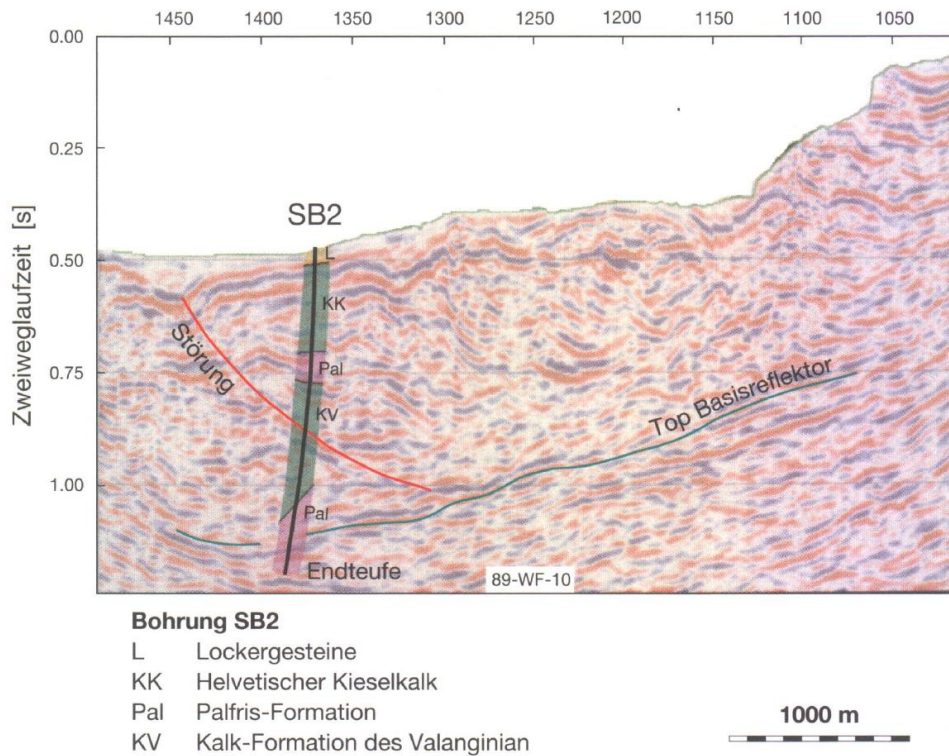


Abb. 22 Seismisches Profil 89-WF-10 am Wellenberg

Die Basis der Helvetischen Decken kann interpretiert werden. Fig. A2.1-2 aus Nagra NTB 96-01.

3.3 Querprofile

Wie in der Abb. 23 ersichtlich, gibt es diverse strukturelle Querprofile, die im Wesentlichen auf der Oberflächengeologie beruhen. Deshalb verlaufen fast alle Profilsuren in die gleiche Richtung, senkrecht zur Einengung bzw. zum Faltenbau und entlang der Bergkämme und nicht entlang der Täler, weil die Geologie unter dem Talboden generell unbekannt ist. Da seit dem Erstellen der Querprofile kaum neue Tiefendaten hinzugekommen sind, stellen diese Daten immer noch zu einem grossen Teil den bestehenden Wissensstand zum Untergrund dar. Zwar haben sich Erkenntnisse zur Strukturgeologie etwas geändert, aber grundlegend zeigen die Querprofile den typischen Aufbau der helvetischen Decken im Untersuchungsgebiet. Die Querprofile sollten nicht als Bohrplanung verwendet werden, da dafür die Datengrundlage zum tiefen Untergrund zu gering ist.

Nachfolgend werden Beispiele bestehender tieferreichender Querprofile gezeigt (Abb. 24 bis Abb. 26). Für die Vergleichbarkeit sind alle im Streichen⁴ der Schichten auf die gleiche Profilsur entlang des Engelberger Aa-Tals eingepasst. Die Querprofile zeigen, dass trotz ähnlicher Datengrundlage der Untergrund je nach Autor unterschiedlich interpretiert wird. Die grosse Variation der Interpretationen liegt am geringen Kenntnisstand vom tieferen Untergrund (i. W. fehlende Tiefbohrungen und hochaufgelöste Seismik).

Wie auf der geologischen Karte und auf den Fotos in Abb. 16 ersichtlich, zeigen die Querprofile nur die grösseren Strukturen. Tatsächlich sind viel mehr Brüche und Falten vorhanden, die

⁴ Das Streichen beschreibt die Orientierung der Schicht. Es handelt sich dabei um eine gedachte horizontale Linie auf der geneigten Schichtfläche.

Strukturgeologische Querprofile und Tunnelprofile
 farblich unterschieden nach Autoren bzw. Referenz mit Angabe Publikationsdatum (kurze o. weniger tief reichende Querprofile sind nicht abgebildet)

geoexplorers
 Autor: A. Ebert
 Datum: 12.2024

0 5 10 km

120°0'00"
119°0'00"
118°0'00"

2°65'00" 2°66'00" 2°67'00" 2°68'00"

Seite 36 von 119

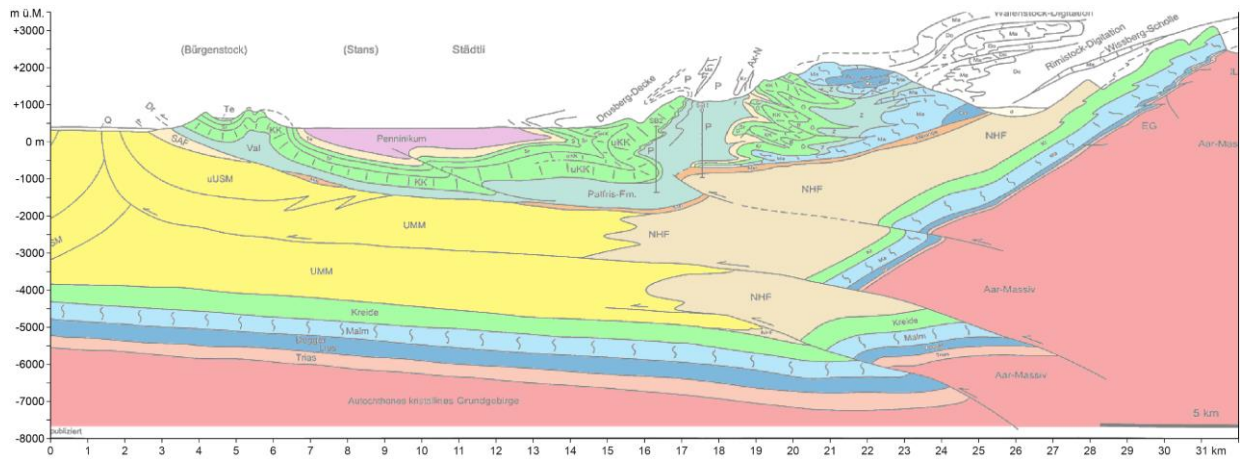


Abb. 25 NNW-SSE-Querprofil Bürgenstock – Dallenwil – Titlis

(Pfiffner 1996 in Nagra NTB 96-01; für die Vergleichbarkeit eingepasst auf das neue Querprofil Bürgenstock-Engelberg)

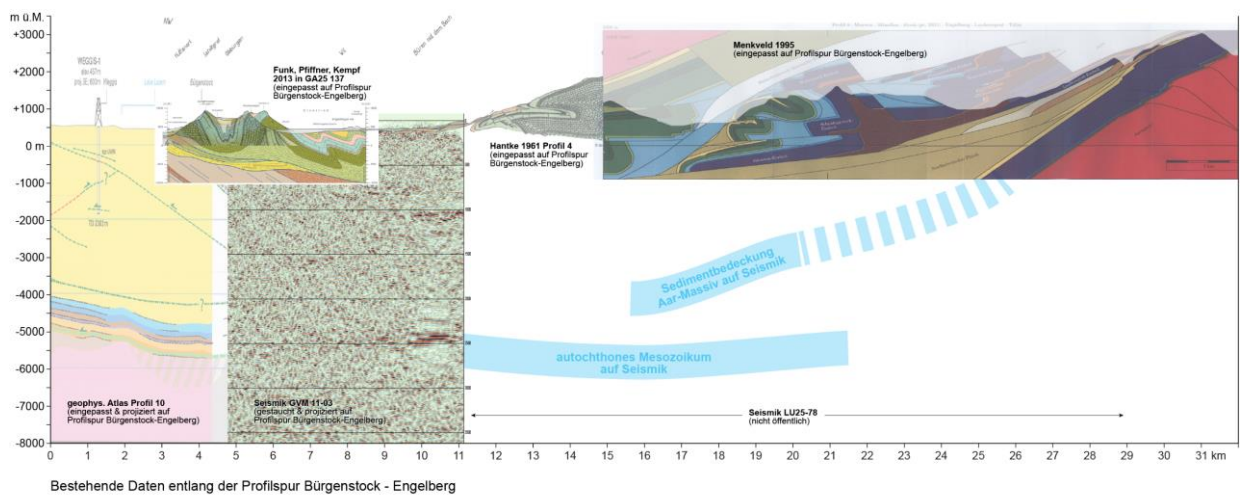


Abb. 26 Querprofile und Seismik vom Bürgenstock bis zum Titlis

(Verschiedene Autoren (Angaben in Abbildung); für die Vergleichbarkeit eingepasst auf das neue Querprofil Bürgenstock-Engelberg)

3.4 Bewertung Datengrundlage

Im Untersuchungsgebiet gibt es zwar reichlich Bohrungen (einige Hundert EWS, Brunnen, Sondierbohrungen usw.), aber keine tiefen Bohrungen, welche das autochthone Mesozoikum erreicht haben. Nur eine Bohrung am Wellenberg hat die helvetischen Decken durchbohrt. Es gibt einzelne Bohrungen im Alpenvorland bzw. entlang der Alpenfront, welche die Subalpine Molasse sowie das autochthone Mesozoikum erbohrt haben. Zudem treten alle Schichten immer irgendwo zu Tage (z. B. das autochthone Mesozoikum beim Titlis). Deshalb und weil viele Schichten schweizweit ähnliche Eigenschaften aufweisen und schon verschiedentlich erbohrt und getestet wurden, können trotz fehlender Tiefbohrungen alle Schichten grob hinsichtlich ihrer Eignung für eine geothermische Nutzung bewertet werden.

Wie die Unterschiede in den verschiedenen geologischen Querprofilen je nach Autor zeigen, kann der strukturelle Aufbau des tieferen Untergrunds nicht genau vorhergesagt werden und lässt Spielraum für Interpretationen. Dies liegt nicht nur an den fehlenden Tiefbohrungen, sondern auch an der lückenhaften und eher unbefriedigenden Qualität insbesondere der älteren Seismik und der sehr komplexen Geologie (Falten in jeglichen Massstäben, unzählige Brüche und Überschiebungen sowie variierende Schichtmächtigkeiten). Mit den neueren Seismik-Daten aus dem Jahr 2011 konnten aber einzelne Bereiche genauer definiert werden, sodass die für diese Studie neu konstruierten Querprofile eine bessere Vorhersagbarkeit zulassen. Die Unsicherheiten entlang der neuen Querprofile werden in den nachfolgenden Kapiteln aufgezeigt. Der Untergrund kann aber trotzdem nicht lückenlos kartiert werden. Dafür liegen zu wenige räumliche Tiefendaten vor.

Grundsätzlich kann mit Hilfe der bestehenden Daten der grobe Aufbau des Untergrundes vorhergesagt werden. Die räumliche Lage der wichtigsten Überschiebungsbahnen und die Tiefenlagen der verschiedenen Schichteinheiten können befriedigend bis gut bestimmt werden. Somit können potentielle geothermische Plays definiert und lokalisiert werden. Daraus abgeleitet und auf Basis von ähnlichen erbohrten und getesteten Schichten in der Schweiz kann das geothermische Potential abgeschätzt und die mögliche Bandbreite von hydrogeologischen Parametern für die verschiedenen Schichten bzw. Aquifere bewertet werden.

Je nach Lage der Plays werden die Daten sicher nicht ausreichen, um Bohrziele genau definieren zu können. Dafür sind ergänzende seismische Erkundungen und Sondierbohrungen notwendig.

4 Aufbau geologischer Untergrund in Nid- und Obwalden

4.1 Strukturgeologische Querprofile in Nid- und Obwalden

Für die Studie wurden zwei neue strukturgeologische Querprofile durch die Kantone Nid- und Obwalden konstruiert (Abb. 28 und Abb. 30; Spur der Profile in Abb. 27). Angepasst an den Massstab wird der Untergrund vereinfacht dargestellt, d.h. kleine Brüche und Falten wurden nicht übernommen. Viele tiefe Strukturen (z. B. Falten, Brüche oder Permokarbon) stellen Annahmen basierend auf geologischen Konstruktionen oder erkannte Indizien aus der Seismik dar und können stark von der tatsächlichen Realität abweichen. Deshalb sind auf Extraabbildungen für jedes Querprofil die Datengrundlage und die daraus resultierenden Unsicherheiten beschrieben (Abb. 29 und Abb. 31).

Die **Querprofile sind im Anhang** im grösseren Massstab vorhanden und dienen nachfolgend (Abb. 28 bis Abb. 31) nur zur Übersicht.

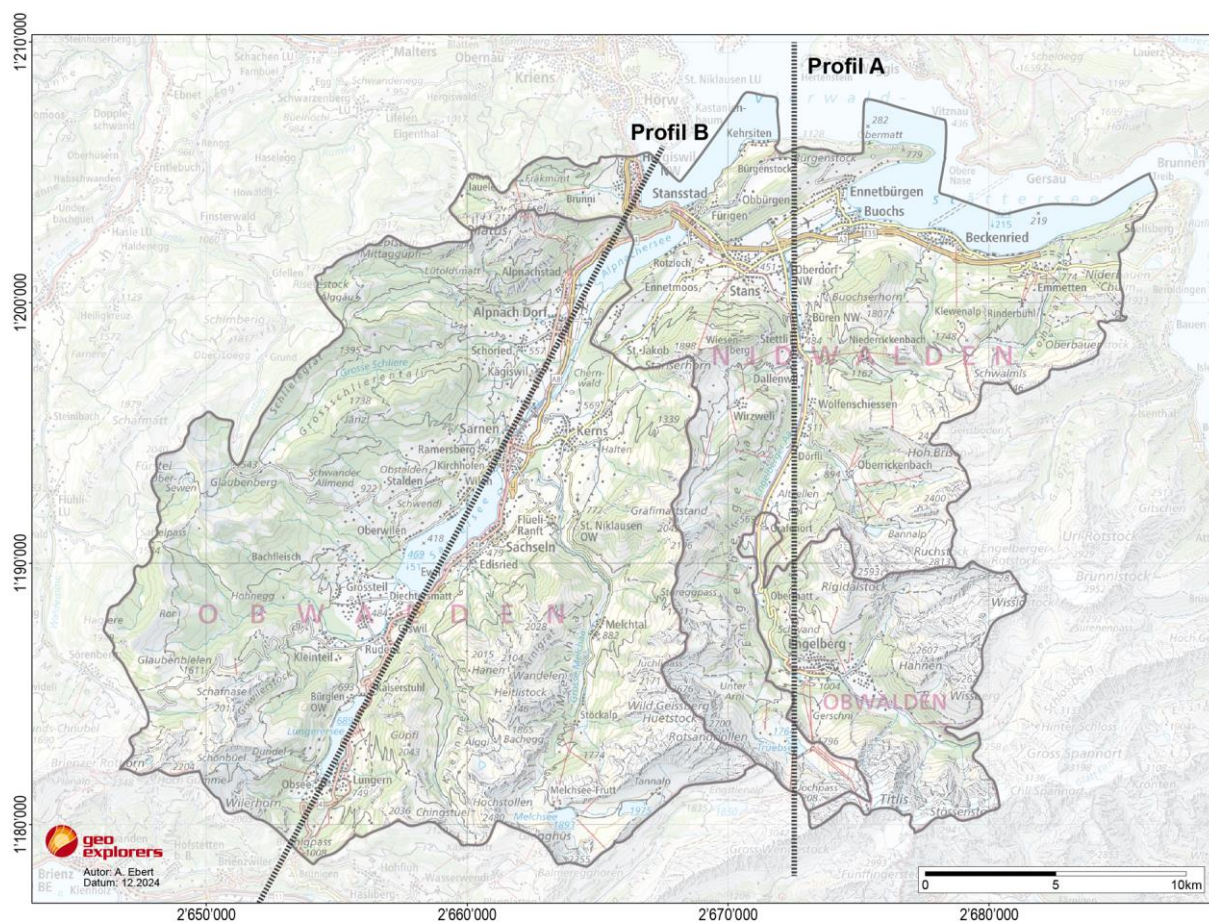
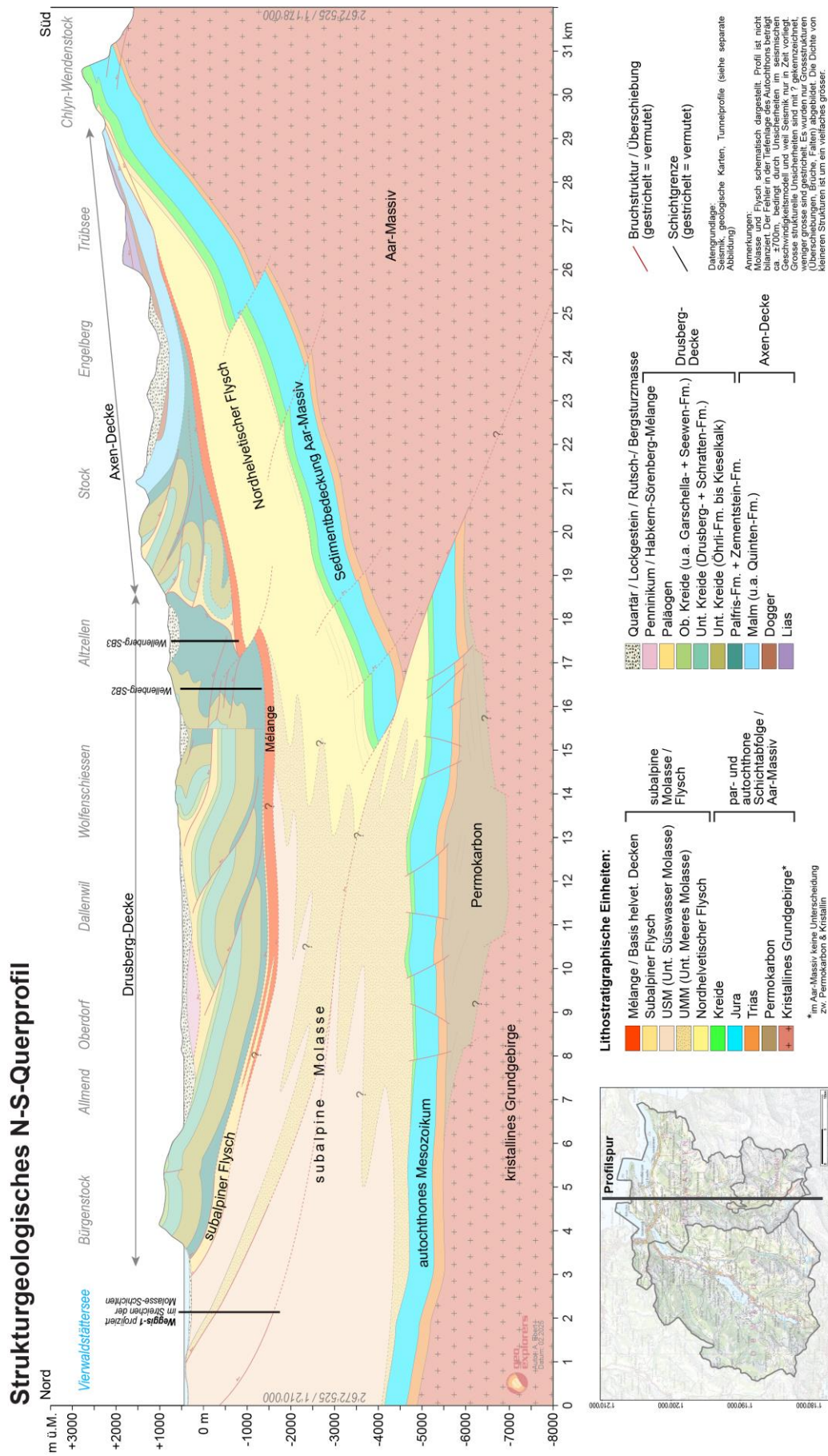


Abb. 27 Profilsuren der nachfolgenden Querprofile



Strukturgeologisches N-S-Querschnitt

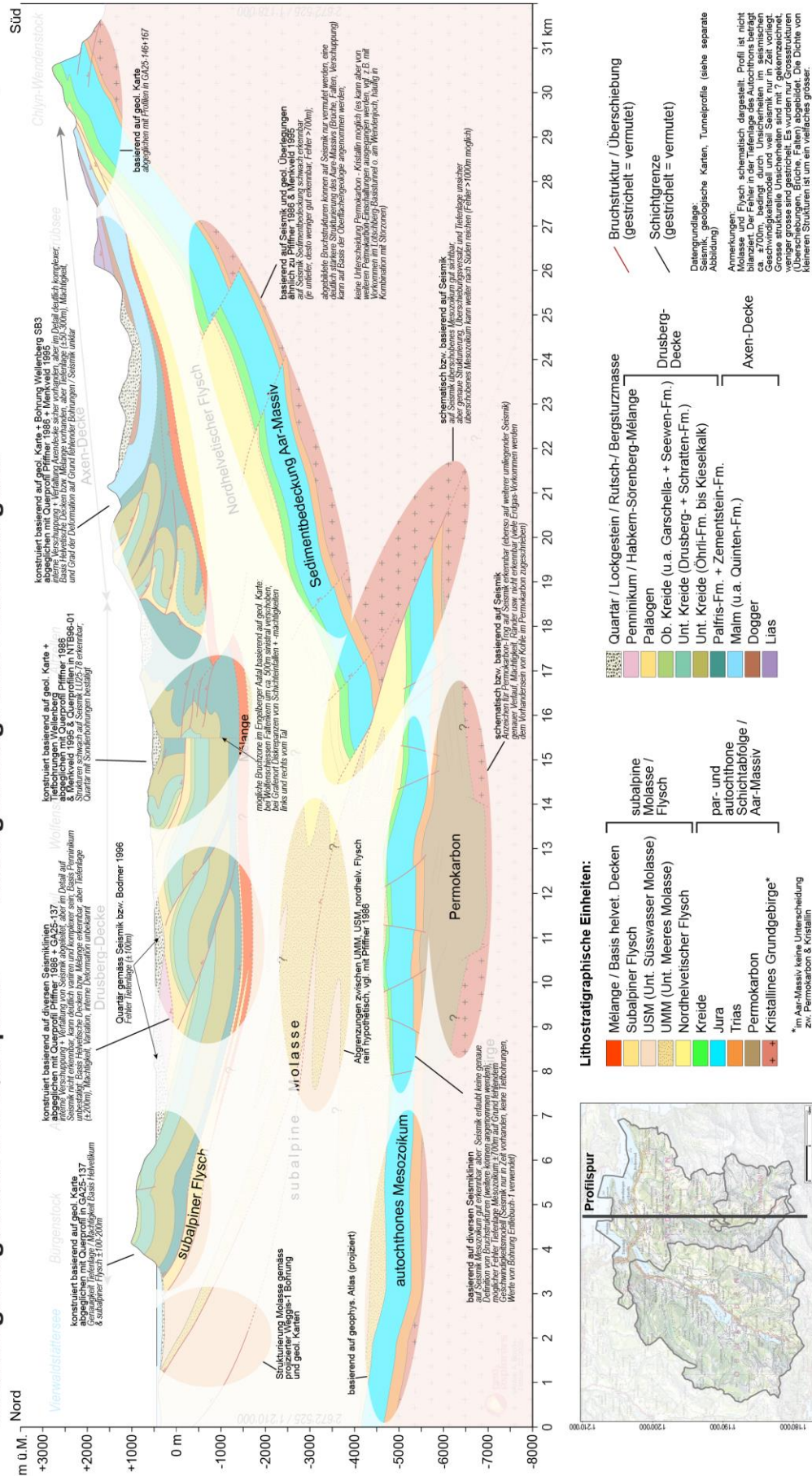


Abb. 29 Datengrundlage Querprofil Bürgenstock – Engelberg (siehe Anhang)

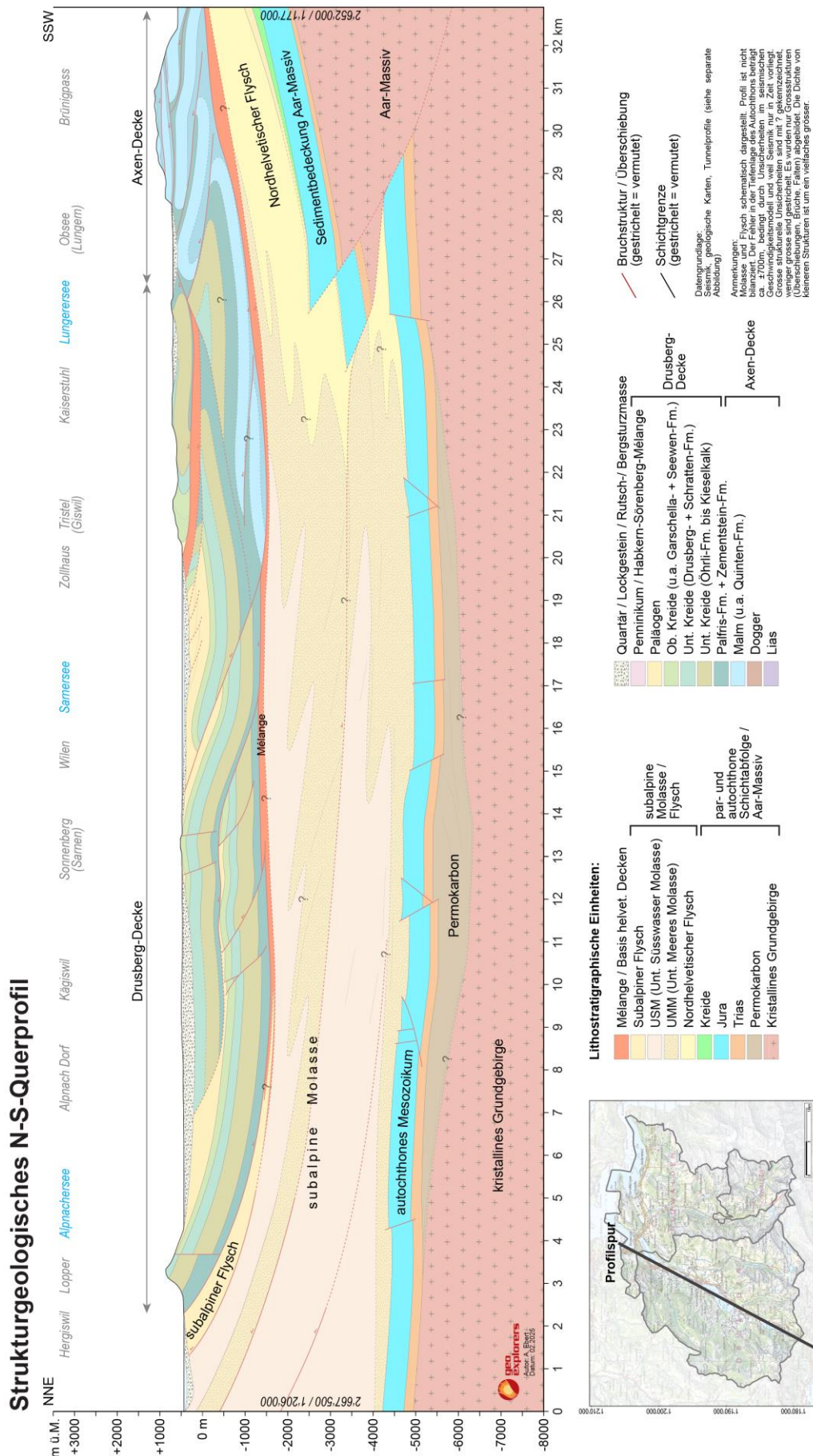


Abb. 30 Strukturgeologisches Querprofil Hergiswil – Brünigpass (siehe Anhang)

Strukturgeologisches N-S-Querprofil

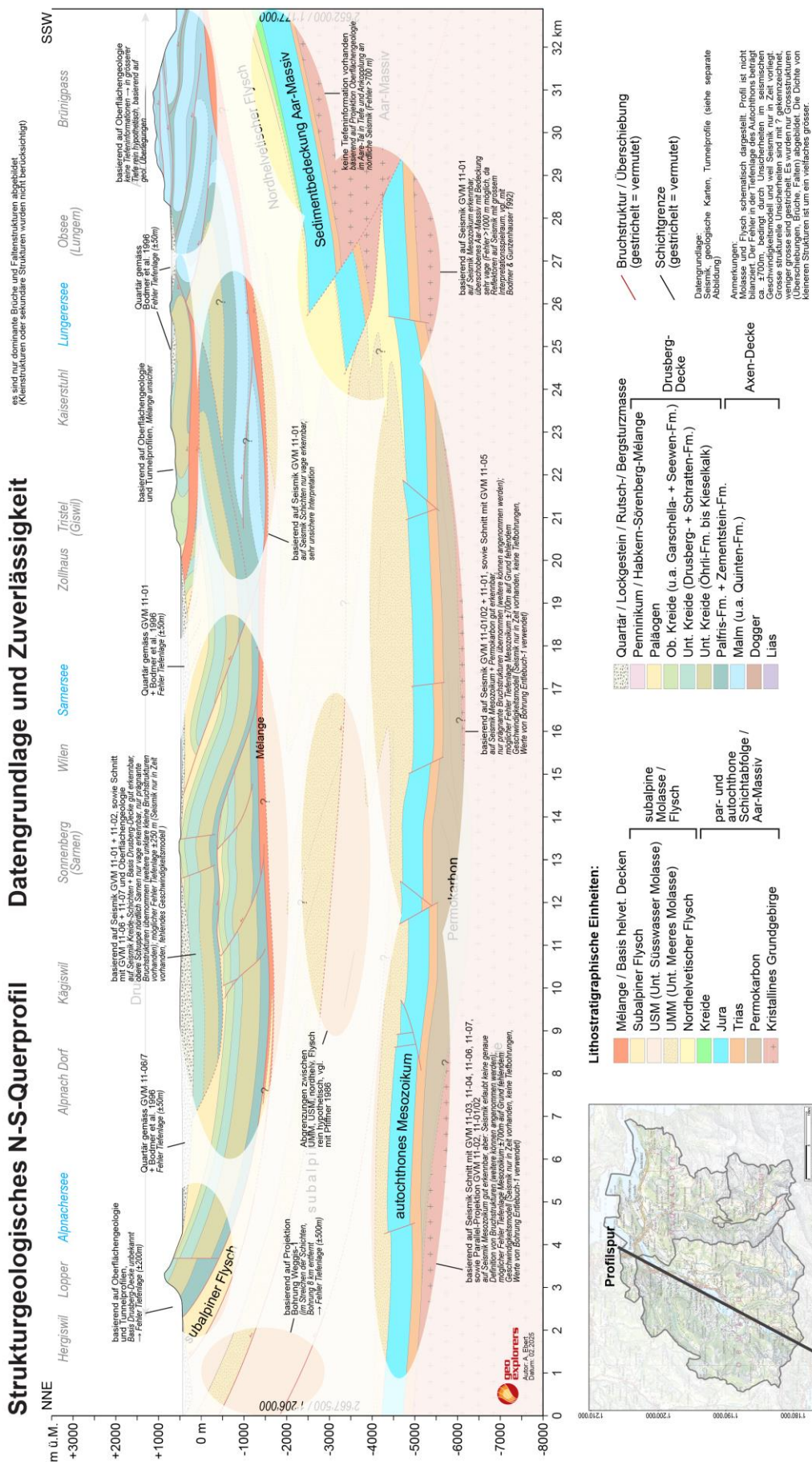


Abb. 31 Datengrundlage Querprofil Hergiswil – Brünigpass (siehe Anhang)

4.2 Schichtenverzeichnis / Lithostratigraphie

Das genaue Wissen über den Untergrund und die vorliegenden Lithologien ist entscheidend für die Definition und Lokalisierung von geothermischen Plays und die Bestimmung der zu erwartenden Temperaturen. Neben den struktureologischen Querprofilen ist auch die Lithologie (Gesteinsart) der verschiedenen Gesteinspakete wichtig. Die Lithologie definiert, wie eine Schicht auf Deformation reagiert, also ob diese z. B. ausreichend geklüftet und entsprechend durchlässig und wasserführend sein kann oder nicht (eine kompetente Gesteinsart etwa wie ein Kalkstein ist beispielsweise besser geeignet als ein inkompetenter Tonstein). Aufgrund der fehlenden Tiefbohrungen beruhen die Angaben auf der Korrelation mit Aufschlüssen an der Oberfläche und umgebenden Tiefbohrungen, wie etwa die Bohrung Entlebuch-1 und Weggis-1.

Für die Gesteine, welche an der Oberfläche aufgeschlossen sind, ist die Lithostratigraphie gut bekannt und mehrfach beschrieben. Eine gute Zusammenfassung für die Helvetischen Decken bildet das lithostratigraphische Sammelprofil in Gubler 1997 (Abb. 32). Die in Abb. 32 eingefärbten Schichten (Malm- und Kreide-Kalksteine, Trias-Dolomitgesteine und Kristallin des Grundgebirges) sind für diese Studie von Bedeutung. Die tiefer liegenden Schichtabfolgen können nur auf Basis von Bohrprofilen aus umliegenden Tiefbohrungen (z. B. Entlebuch-1 oder Weggis-1) und abtauchenden Schichten (z. B. am Titlis) vermutet werden. Auf dem Querprofil im Anhang «Lithostratigraphische Haupteinheiten und Gesteinseigenschaften» sind die verschiedenen Schichtabfolgen und deren Eigenschaften für die verschiedenen tektonischen Einheiten zusammengefasst (u. a. Helvetische Decken, Molasse, autochthones Mesozoikum, Aar-Massiv). Das Schichtenverzeichnis auf diesem Querprofil im Anhang hilft, die Lithologien und folglich die Gesteinseigenschaften hinsichtlich ihrer Eignung als geothermisches Reservoir zu bewerten und Plays zu lokalisieren. In Blau sind die wichtigsten Merkmale und Nachweise zur Durchlässigkeit und Wasserführung beschrieben. Diese werden im Kapitel 5.2 bewertet.

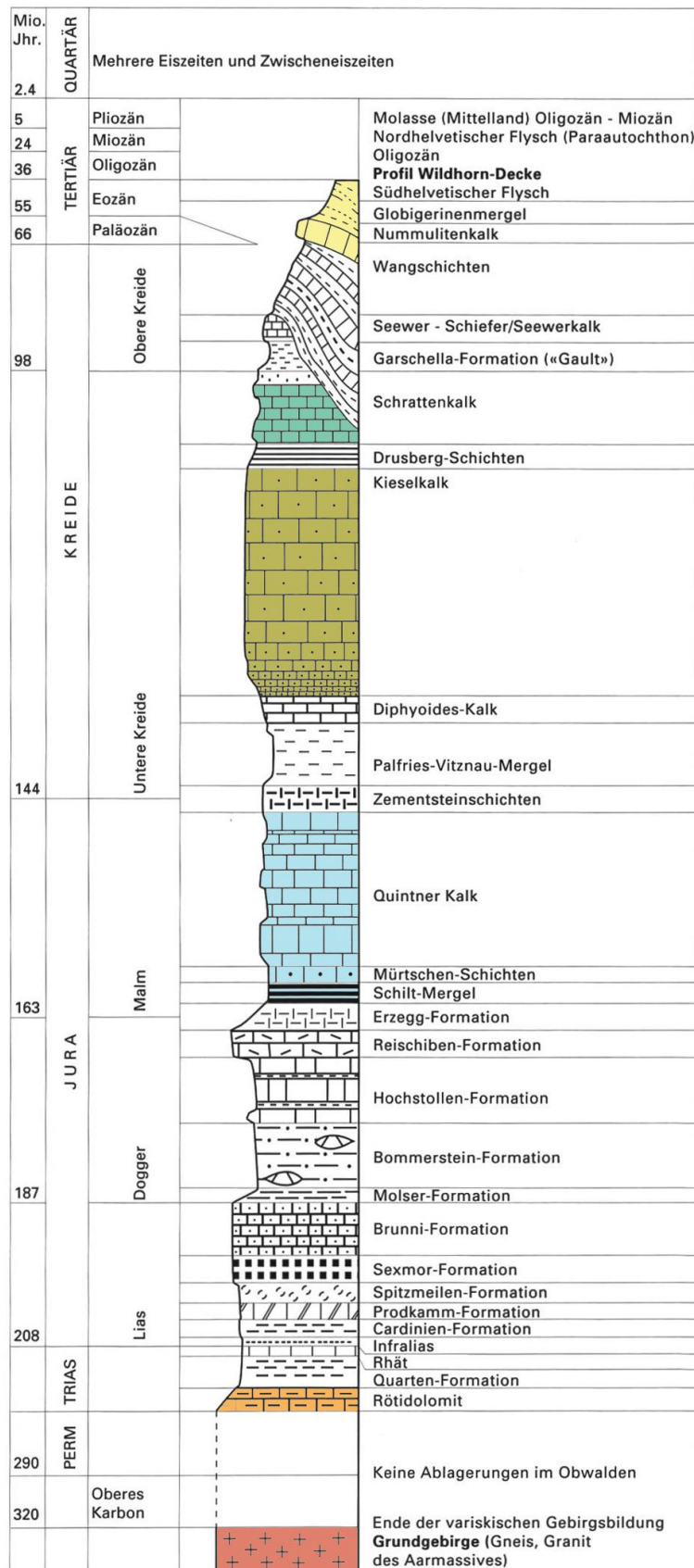


Abb. 32 Schichtabfolge in den Helvetischen Decken
Sammelprofil aus Gubler, 1997 (leicht verändert)

5 Untergrundparameter und potentielle Aquifere & Plays

Damit eine geothermische Nutzung erfolgreich ist, sind geothermische Plays notwendig⁵, welche möglichst hohe Temperaturen und eine ausreichende Durchlässigkeit bzw. gute Speichereigenschaften (hohe Porosität, geeignete Grundwasser-Flie遝geschwindigkeit und geringe Energieverluste) aufweisen. Je nach Nutzungsart werden unterschiedliche Anforderungen gestellt (vgl. mit Kapitel 2.5). Nachfolgend werden die zu erwartenden Untergrundtemperaturen, die Gesteinsdurchlässigkeit (Permeabilität) und die Wasserführung beschrieben und bewertet (letztere wird auch auf dem Querprofil im Anhang «Lithostratigraphische Haupteinheiten und Gesteinseigenschaften» pro Schicht beschrieben). Zudem werden die geothermischen Plays definiert und bewertet. Abgeleitet davon wird das Potential im nachfolgenden Kapitel quantifiziert.

5.1 Untergrundtemperaturen

Die Geothermische Karte der Schweiz⁶ zeigt für die Kantone Nid- und Obwalden einen mittleren Oberflächenwärmefluss von rund 65 bis 90 mW/m². Der Oberflächenwärmefluss ist für ein Tiefengeothermieprojekt jedoch keine kritische Grösse, da man lediglich an der Temperatur in der Zieltiefe interessiert ist und diese in der Regel nicht dem Oberflächenwärmefluss entsprechen muss. Man sollte sich deshalb auf die Temperaturinformationen aus bestehenden Tiefbohrungen abstützen. Der Wärmefluss ermöglicht aber, thermische Anomalien zu erkennen, welche z. B. durch aufsteigende Thermalwässer verursacht sein können.

Für die Temperaturbestimmung kommen die in Abb. 33 genannten und gezeigten Bohrungen in Frage. Auch wenn einige Bohrungen bis zu 30 km von Nid- und Obwalden entfernt liegen, können diese Daten auf das Untersuchungsgebiet übertragen werden, wie die Homogenität aller Daten in Abb. 33 zeigt. Der Datensatz zeigt, dass im Alpenvorland und unter der Alpenfront der gemittelte Temperatur-Tiefen-Gradient mit ca. 22 °C/km in den tertiären Schichten unter dem üblich angenommenen Gradienten von 30 °C/km liegt. In den darunterliegenden mesozoischen Schichten liegt dieser mit gemittelt ca. 40 °C/km aber über dem üblichen Gradienten. In grossen Tiefen an der Basis des Mesozoikums werden wieder Temperaturen erreicht, die mit dem üblichen Gradienten von 30 °C/km korrelieren. Das Angleichen an den Gradienten von 30 °C/km wird auch an anderen Orten in der Schweiz beobachtet. In Basel liegt z. B. ein umgekehrter Trend vor, mit ca. 40 °C/km bis ca. 2.5 km Tiefe gefolgt von ca. 28 °C/km, sodass sich auch dort in grossen Tiefen die Temperaturen wieder dem üblichen gemittelten Gradienten von 30 °C/km annähern.

Der tiefere Gradient in den tertiären Schichten kann damit erklärt werden, dass im sich dazumal absenkenden Molassebecken rasch, km-mächtiger, kühler Abtragungsschutt der werdenden Alpen abgelagert wurde. Evtl. führen zusätzlich die quarzreichen Sandstein- und Nagelfluhlagen der Molasseschüttungen im Alpenvorland mit ihren höheren Gesteinswärmeleitfähigkeiten zu einer schnelleren Abfuhr der Wärme aus der Tiefe, was sich in einem flacheren Temperaturgradienten äussert.

Wie die Messungen in Erdwärmesonden im Kanton Basel-Landschaft (siehe Abb. 34) zeigen, variieren üblicherweise die Oberflächentemperaturen stark. Die Variationen werden im Wesentlichen durch unterschiedliche lithologische Eigenschaften (unterschiedliche

⁵ Definition siehe Glossar

⁶ siehe map.geo.admin.ch, Wärmestromdichte 500

Wärmeleitfähigkeiten), aber auch z. B. Topographieeffekte, Unterschiede in der Vegetation und Bebauung, sowie Anomalien durch fließendes Wasser verursacht.

Eine Prognose der Untergrundtemperaturen in Nid- und Obwalden ist möglich und unkritisch für die Definition des geothermischen Potentials. Auf den nachfolgenden Querprofilen in Abb. 35 und Abb. 36 sind die zu erwartenden Felstemperaturen für 40 °C, 70 °C, 100 °C und 140 °C überlagert. Die Tiefenlagen wurden aus den gemittelten Messdaten aus den Bohrungen in Abb. 33 übernommen. Die Balken auf der Abbildung spiegeln den möglichen Fehlerbereich wider.

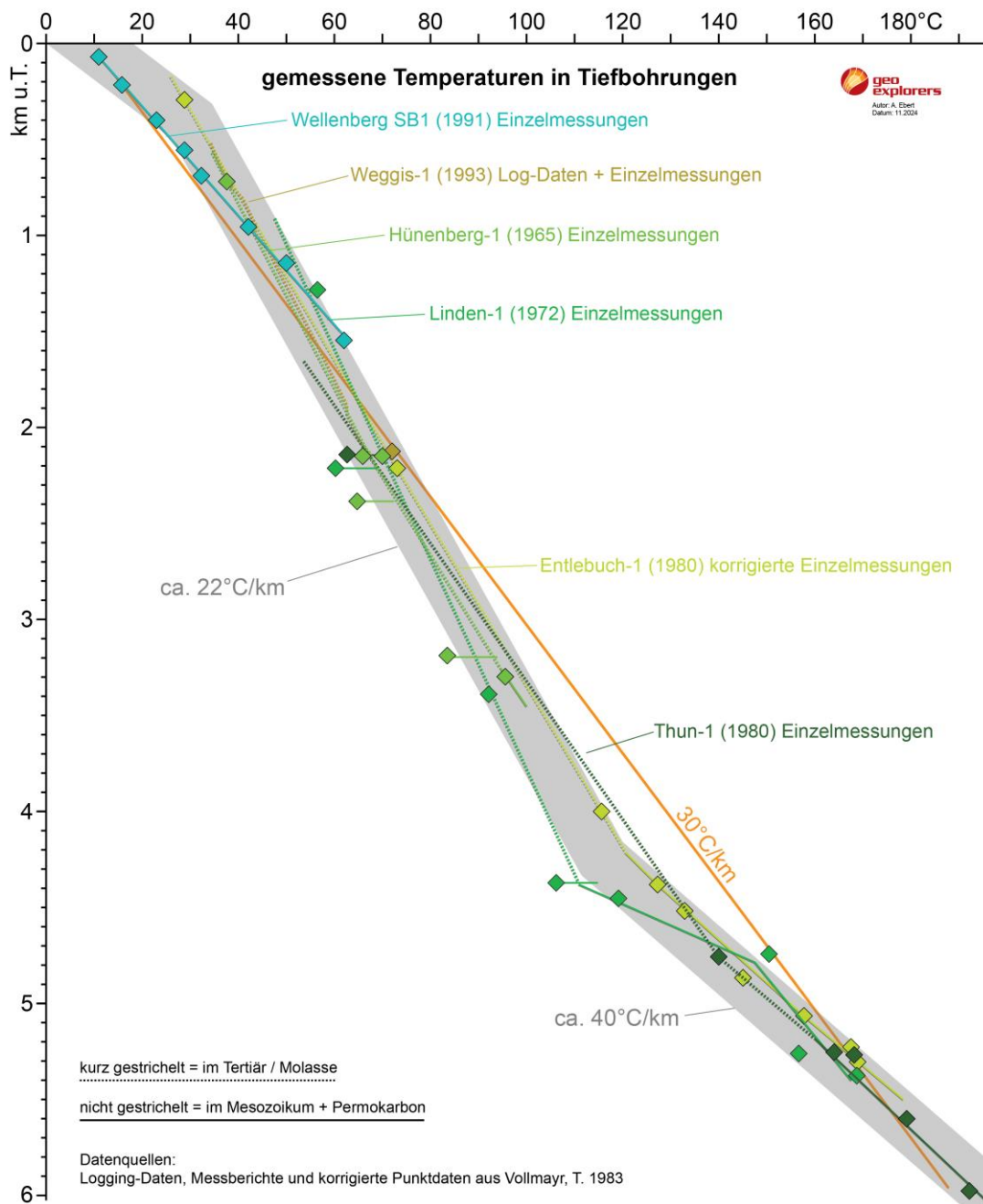


Abb. 33 Untergrundtemperaturen in umliegenden Tiefbohrungen

Es wird entlang von jedem Temperatur-Tiefenprofil nach Tertiär (gepunktete Linienabschnitte) und Mesozoikum + Permokarbon (nicht gestrichelt) unterschieden.

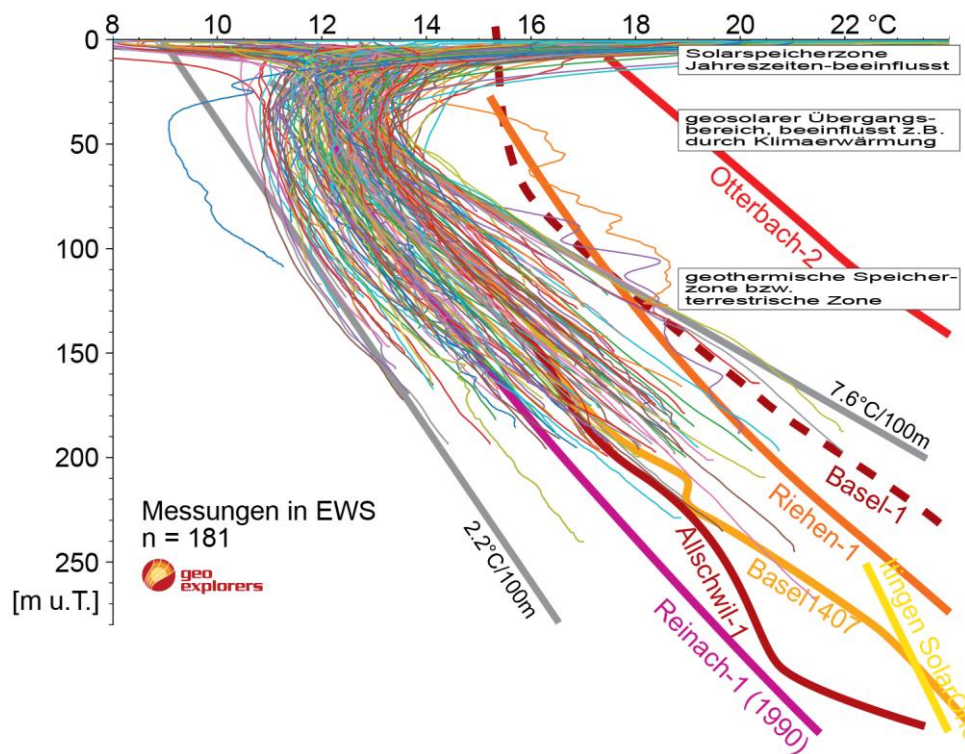


Abb. 34 Variation der oberflächennahen Untergrund-Temperatur in EWS

Temperatur-Tiefenprofile in Tiefbohrungen in und um Basel und in EWS im Kanton Basel-Landschaft aus Ebert, A., Dörner, E. & Bänninger, D., 2022. Die oberflächennahe Untergrundtemperatur variiert deutlich von 2.2 bis 7.6°C/100m.

Strukturgeologisches N-S-Querprofil mit überlagerten Felstemperaturen

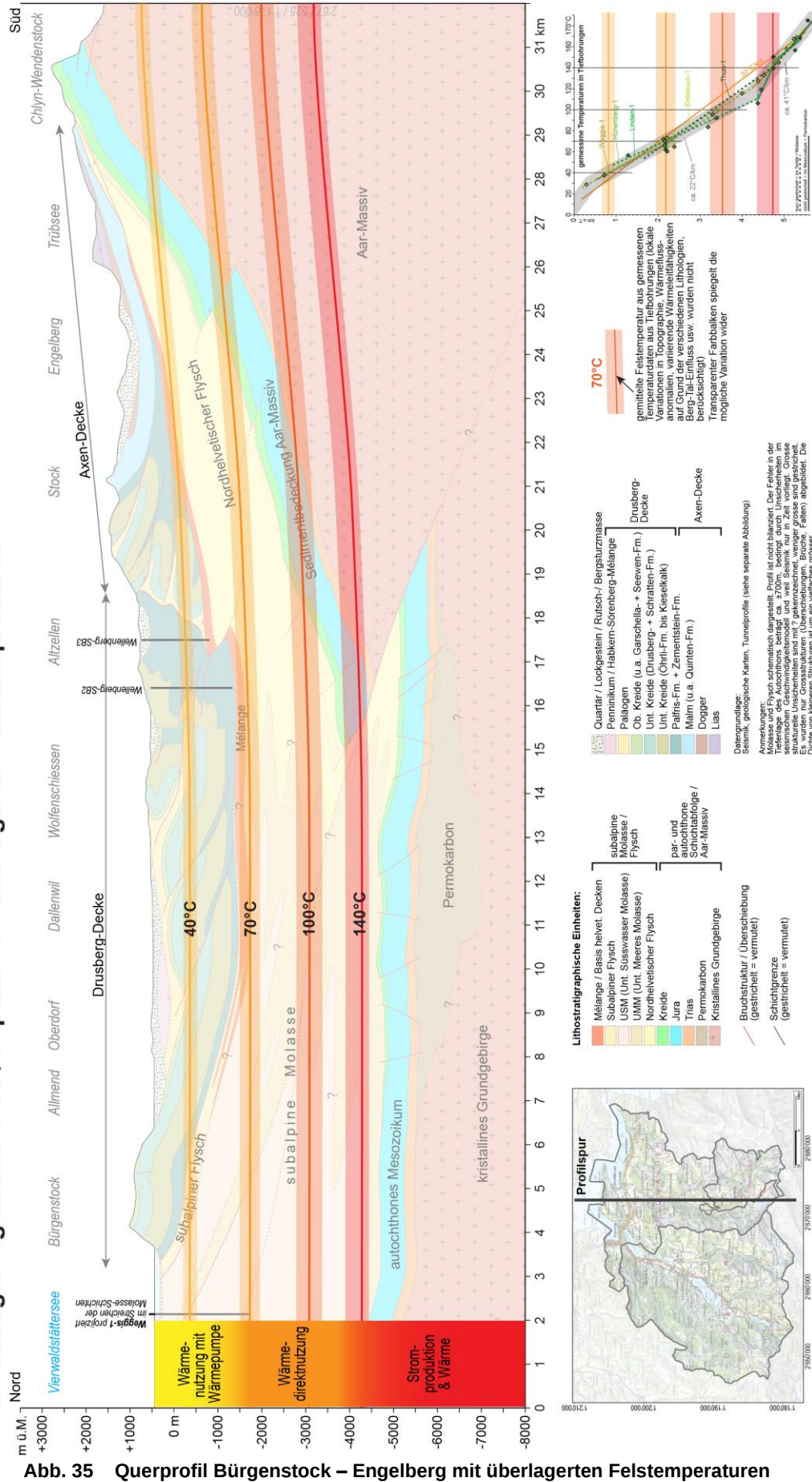


Abb. 35 Querprofil Bürgenstein – Engelberg mit überlagerten Felstemperaturen

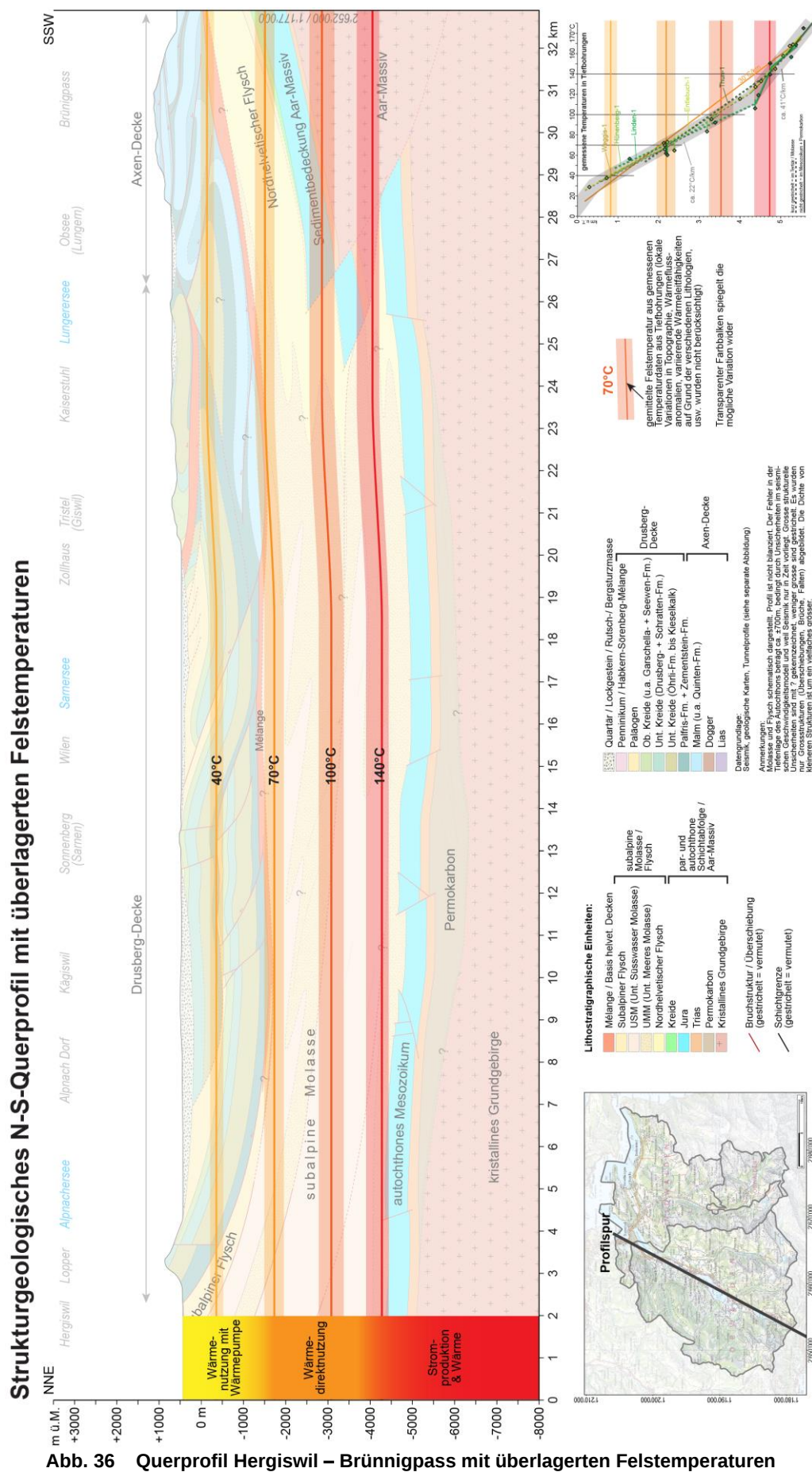


Abb. 36 Querprofil Hergiswil – Brünigpass mit überlagerten Felstemperaturen

5.2 Hydrogeologische Eigenschaften und potentielle Aquifere

5.2.1 Einleitung

Der Erfolg einer geothermischen Nutzung hängt grösstenteils von der Durchlässigkeit des Gesteins ab. Wie aktuelle und vergangene Projekte in der Schweiz zeigen, ist eine Nutzung nur dann möglich, wenn die Schüttungsrate, also die Durchlässigkeit und Ergiebigkeit, ausreichend sind. Da oft über grössere Gebiete hinweg keine Tiefendaten vorliegen, muss auf Daten aus ähnlichen geologischen Situationen zurückgegriffen werden. Dies betrifft auch das vorliegende Untersuchungsgebiet. Deshalb werden nachfolgend auch Werte aus der Nordschweiz beschrieben.

Die allgemeine Schichtabfolge in den Kantonen Nid- und Obwalden wird in Kapitel 4.2 für jede tektonische Einheit beschrieben. Die Schichten, welche als mögliche Aquifere in Frage kommen, sind im Anhang und Abb. 41 in Blau eingefärbt. Die wichtigsten Eigenschaften der Schichten hinsichtlich Durchlässigkeit und Wasserführung sind ebenfalls in der Abbildung angegeben. Nachfolgend werden deshalb nur die wichtigsten potentiellen Aquifere zusammenfassend beschrieben. Für ergänzende Informationen wird auf den Anhang verwiesen.

5.2.2 Vergleich mit Nordschweiz

Aufgrund fehlender Bohrungen und Bohrdaten liegen für das Untersuchungsgebiet keine Durchlässigkeitsbeiwerte oder Transmissivitäten für die tieferen Schichten vor. Zum Vergleich und Verständnis, welche Werte in den verschiedenen Schichten erwartet werden können und wie gross die Variation ist, sind in Abb. 40 ermittelte Durchlässigkeiten der verschiedenen Schichten/Aquifere, die in Tiefbohrungen in der Nordschweiz getestet wurden, grafisch dargestellt. Es sei angemerkt, dass viele Durchlässigkeiten die maximalen Werte darstellen, welche oftmals nach einer Ansäuerung ermittelt wurden. Es zeigt sich, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte durch die Ansäuerung oft um eine Grössenordnung verbessert wurden bzw. der Aquifer dadurch besser mit der Bohrung angeschlossen werden konnte. Die Durchlässigkeiten variieren von undurchlässig bis durchlässig. Die deutlichen Schwankungen können unterschiedlichen geologischen Gegebenheiten zugeordnet werden. Zudem muss beachtet werden, dass besonders im Fall von einzelnen diskreten Kluft- und Bruchflächen anstatt dem Durchlässigkeitsbeiwert die Transmissivität (Produkt aus Durchlässigkeitsbeiwert und Mächtigkeit der Schicht oder wasserführenden Zone) gebräuchlicher ist. Der Durchlässigkeitsbeiwert bezieht sich auf die Gesteinseigenschaft und die Transmissivität auf die Bewertung des Gesamtaquifers (also Durchlässigkeit und Mächtigkeit).

Grundsätzlich zeigen erwartungsgemäss die Kreide- und Malmkalke, die Dolomite und Kalksteine der Schinznach Formation und das Top Kristallin höhere Durchlässigkeiten als die restlichen Schichten (Abb. 40). Es handelt sich um kompetente Gesteine, die auf eine tektonische Beanspruchung spröde reagieren, was sich in einer ausgeprägten Klüftung äussern kann. Im Fall der reinen Kalksteine können zusätzlich die Verkarstung bzw. Lösungsvorgänge zu Hohlräumen in jeglichen Massstäben führen, oft bevorzugt entlang den wasserführenden Klüften und Bruchzonen, aber auch entlang von Schichtgrenzen. Gleichwohl wurden auch in diesen Schichten Durchlässigkeiten ermittelt, die in den Bereichen undurchlässig bis schwach durchlässig liegen. Die Unterschiede können mit dem Fehlen von Klüften, Bruch- oder Störzonen sowie Karst erklärt werden. Durchwegs zeigt sich, dass ausreichende Wasserzuflüsse nur aus den Klüften bzw. Bruchzonen registriert wurden (oberflächennah auch

aus dem Karst). Entsprechend werden in der Nordschweiz die höchsten Durchlässigkeiten grundsätzlich im Juragebirge insbesondere in oder im Bereich von Stör- bzw. Bruchzonen erwartet, also dort wo die tektonische Beanspruchung und begleitende Verkarstung am grössten war.

Diese Erkenntnisse lassen sich auch auf das Untersuchungsgebiet übertragen. In den Kantonen Nid- und Obwalden liegen ebenfalls ähnliche Schichten vor, die lokal geklüftet, verkarstet und von Bruch- bzw. Störzonen durchzogen sind. Die Bandbreite der Durchlässigkeiten in Abb. 40 ist somit übertragbar. Generell werden die höchsten Durchlässigkeiten und Wasserführungen in den potentiellen Schichten (z. B. Malmkalke, Kreidekalke, Kristallin) in Bereichen erwartet, welche tektonisch am stärksten beansprucht wurden, also geklüftet und häufiger von Brüchen durchsetzt sind.

5.2.3 Tiefenabhängigkeit

Zudem gilt, dass allgemein die Gesteinsdurchlässigkeit mit der Tiefe abnimmt (Abb. 37 und Abb. 38). Entsprechend nimmt tendenziell die Durchlässigkeit der mesozoischen Schichten im Mittelland vom Juragebirge nach Süden zu den Alpen hin ab. Es dürfen somit untiefe gute Beispiele nicht zwingend in die Tiefe extrapoliert werden. Ausnahmen bilden grössere steile Bruch- und Störzonen, die von Vorteil parallel zur Haupteinspannung liegen, sodass offene Klüfte möglich sind. Je älter diese aber sind, desto eher sind die offenen Klüfte verheilt oder alteriert (Mineralausfällungen oder -umwandlungen durch zirkulierende Fluide), sodass deren Porosität und Durchlässigkeit abnehmen. Die Abnahme der Gesteinsdurchlässigkeit mit der Tiefe wurde auch in den Tiefbohrungen der Nagra am Wellenberg beobachtet, siehe Abb. 39. Da im Untersuchungsgebiet einige potentielle Schichten (z. B. autochthone Malmkalke) einige Kilometer unter der Oberfläche liegen, ist diese Tatsache bei der Bewertung der Plays und Risikoabwägung zwingend zu beachten.

5.2.4 Karst

Karstvorkommen (z. B. Karsthöhlen) reichen generell nur bis ca. 100 m (in einzelnen Fällen auch einige 100 m tief) unterhalb des ehemals tiefsten Vorfluterniveaus, welches meist dem eiszeitlichen Talboden entspricht (z. B. Jeannin et al., 2015 oder Häuselmann & Siegenthaler, 2015). Generell entstehen Karsthohlräume in reinen Kalksteinen; können aber auch z. B. in Dolomitgestein, Gips oder Salz entstehen. In Nid- und Obwalden kommen die Karstphänomene in den Helvetischen Decken hauptsächlich nur in den Malm- und Kreidekalken vor (i. W. Seewer Kalk, Schrattenkalk, Quintner Kalk).⁷

Eine Ausnahme bildet der Paläokarst am Top vom autochthonen Mesozoikum. Dieser wird nachfolgend beschrieben und stellt auch ein geothermisches Play dar. Ebenso wird davon ausgegangen, dass feine Haarrisse und Klüfte auch in grösseren Tiefen von bis zu 1'500 m durch Lösungsprozesse aufgeweitet sein können und Durchlässigkeiten von bis zu 10^{-6} m/s aufweisen können (Abb. 38 und Jeannin et al., 2015).

⁷ Der Karst und seine Erscheinungen in den Kantonen Nid- und Obwalden werden in folgenden Publikationen im Detail beschrieben: Bögli, 1987; Trüssel, 1997; Gubler, 1997. Da der oberflächennahe Karst für die tiefere Geothermie kaum von Bedeutung ist, wird für weitere Informationen auf diese Publikationen verwiesen.

5.2.5 Wichtigkeit von Bruchzonen und Klüftung

Generell trifft man im tieferen Untergrund in den meisten Gebieten die potentiellen Schichten/Aquifere an (z. B. Malmkalke, Muschelkalk-Dolomite, kristallines Grundgebirge). Viele Bohrungen zeigen aber, dass diese Schichten oft zu gering durchlässig und wasserführend sind (Bsp. Triemli in Zürich, siehe Tabelle 1). Die Bohrungen in Riehen und Reinach bei Basel machen deutlich, wie essentiell ein Bohren in Bruchzonen ist. Mit den Bohrungen sollte der potentiell durchlässige Muschelkalk geothermisch erschlossen werden. Beide liegen nur 9 km auseinander und liegen am Rand vom Oberrheingraben. Die Bohrungen in Riehen waren fündig und werden seit über 30 Jahren geothermisch genutzt. Hingegen war die Bohrung Reinach nicht fündig. Obwohl die Bohrung weniger als 1 km von der grossen Rheintalflexur entfernt liegt und man in dieser Nähe noch eine tektonische Überprägung erwarten könnte, wurden in den gleichen Schichten wie in Riehen keine durchlässigen bzw. ausreichend wasserführenden Klüfte oder Bruchzonen angebohrt. Die maximalen Durchlässigkeiten erreichten auch nach mehrmaligen Ansäuerungen nur Werte im Übergangsbereich zwischen "sehr schwach durchlässig" bis "schwach durchlässig", sodass eine Nutzung nicht möglich war.

Zusammen mit anderen Beispielen in der Schweiz zeigt dies, dass eine ausreichende Wasserführung bzw. Gesteinsdurchlässigkeit grundsätzlich nur dort angetroffen wird, wo die potentiellen Schichten geklüftet oder von Bruch- und Störzonen durchzogen sind.

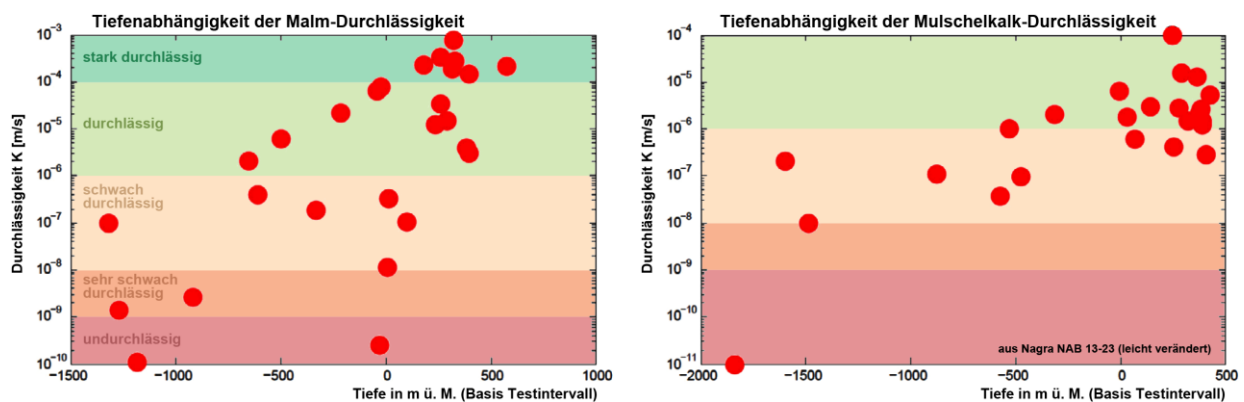


Abb. 37 Abhängigkeit der Durchlässigkeit mit der Tiefe

Durchlässigkeitsbeiwerte ermittelt im Malm (links) und im Muschelkalk (rechts), aus Nagra NAB 13-23

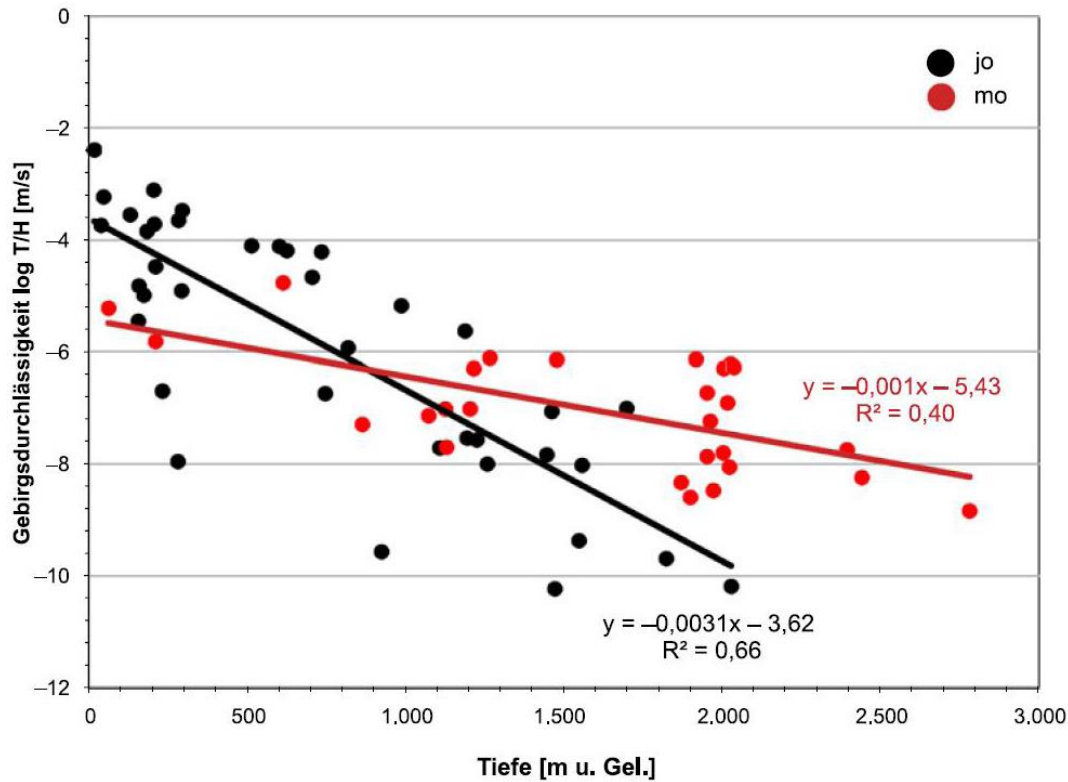


Abb. 38 Abhängigkeit der Durchlässigkeit mit der Tiefe in Süddeutschland

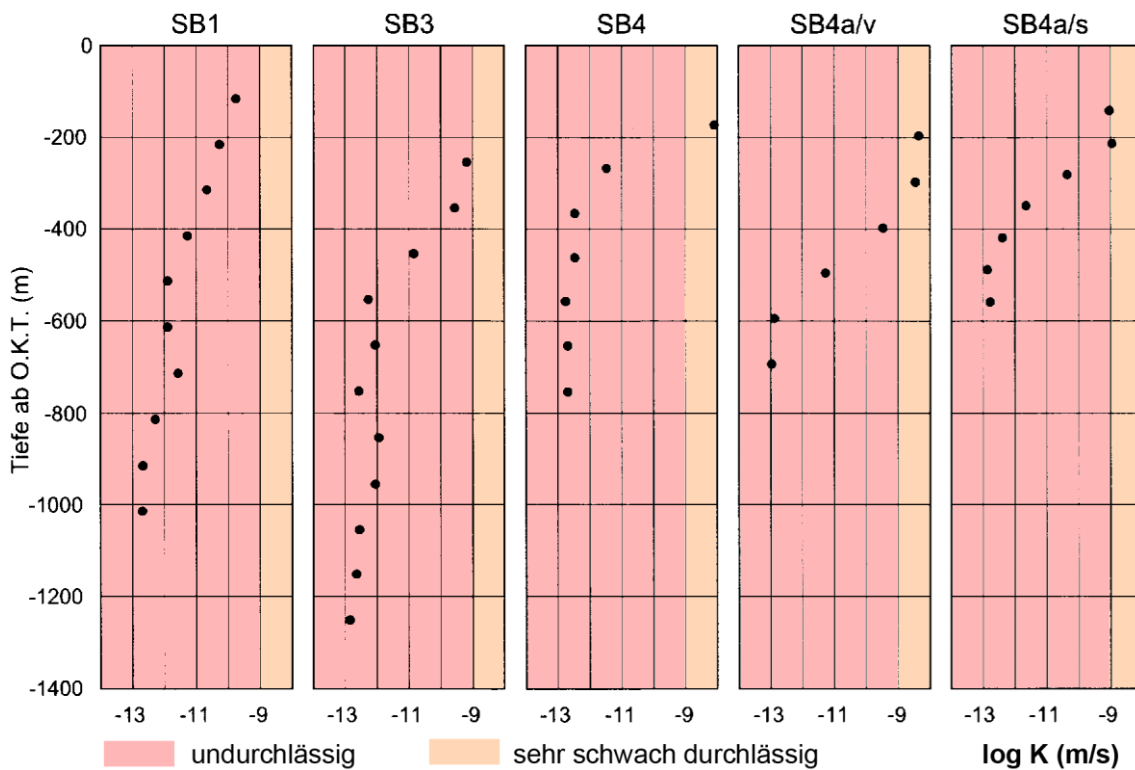


Abb. 39 Änderung Durchlässigkeit mit Tiefe in Bohrungen am Wellenberg

Gesteinsdurchlässigkeit im Wirtgestein (u.a. Palfris-Fm. & Vitznau-Mergel) nimmt mit der Tiefe ab, aus Nagra NTB96-01 (leicht verändert).

Durchlässigkeiten für Malmkalke (schwarz) und Muschelkalk (rot), aus Stober 2013

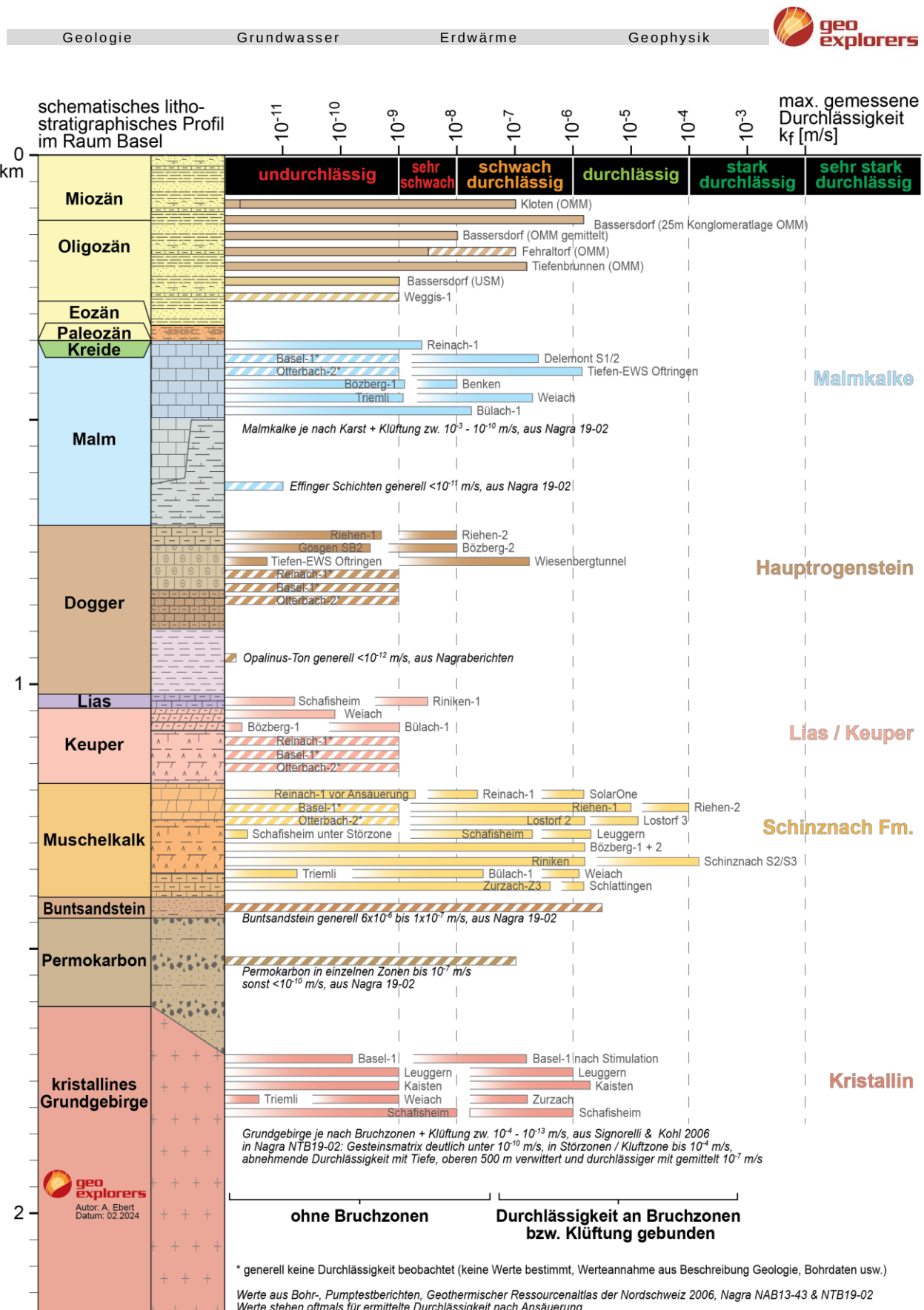


Abb. 40 Bandbreite der Durchlässigkeiten

Es werden Daten aus Tiefbohrungen der Nordschweiz und Mittelland gezeigt

5.2.6 Wichtigste Aquifere im Untersuchungsgebiet

In der Gesteinsabfolge im Untersuchungsgebiet können grob und regional Gesteinsschichten unterschieden werden, welche potentiell durchlässig und wasserführend sein können (Aquifere = Grundwasserleiter) und solche, die mit grosser Wahrscheinlichkeit gering durchlässig sind (Aquitarde/Aquiclude = Grundwassergeringleiter bzw. Grundwassernichtleiter). Die Aquitarde/Aquiclude kommen somit für eine geothermische Nutzung kaum in Frage. Dies sind generell dichte Gesteine, wie Tonsteine oder Mergel. Zwei bekannte Beispiele für Aquiclude sind der Opalinuston im autochthonen Mesozoikum oder die Palfris-Formation am Wellenberg. Basierend auf den Lithologien können Gesteinsschichten unterschieden werden, welche sich generell für eine geothermische Nutzung eignen würden oder nicht. Entsprechend kann bei tiefergehenden Analysen der Fokus auf die potentiellen Aquifere gelegt werden. Wie verschiedene Tiefbohrungen (siehe Abb. 40) gezeigt haben, können auch diese angeblich potentiellen Aquifere aufgrund einer zu geringen Matrixpermeabilität gering durchlässig und nicht wasserführend sein.

Die potentiell wichtigsten Aquifere des Untersuchungsgebiets werden nachfolgend aufgeführt (siehe auch Anhang, Abb. 41 und nachfolgende Faktenblätter pro Play).

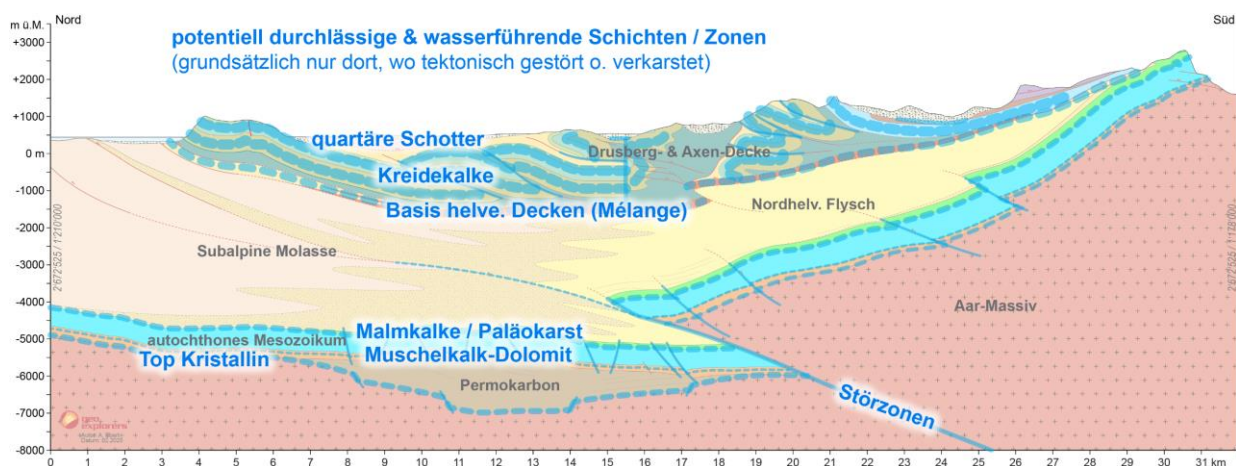


Abb. 41 Potentiell wasserführende Schichten und Brüche

Kreide- und Malmkalke

Kreide- und Malmkalke sind eine wenige hundert Meter mächtige Abfolge von Kalksteinen unterbrochen von tonig-mergeligen Lagen, die generell nur dann durchlässig ist, wenn die Kalksteine verkarstet und / oder geklüftet sind (Bsp.: Seewen-Fm., Schrattenkalk-Fm., Öhrlifm., Quinten-Fm., autochthone Malmkalke). Die primäre Porosität ist sehr gering, folglich auch die Matrix-Durchlässigkeit (Nagra NTB96-01). Eine ausreichende Klüftung ist an eine tektonische Beanspruchung, also generell an Bruch- oder Störzonen, gebunden. Die Durchlässigkeit ist stark an lokale Strukturen (Brüche und Karst) gebunden.

Wie oben schon beschrieben, muss die Tiefenabhängigkeit der Durchlässigkeit beachtet werden. Diese ist innerhalb der Helvetischen Decken zu erkennen. Oberflächennah wird von Durchlässigkeitsbeiwerten von lokal bis 10^{-4} bis 10^{-6} m/s ausgegangen, welche in Tiefen unter 400 m auf Werte von unter 10^{-6} m/s zurückgehen (Nagra NTB96-01). Reine Karststrukturen (abgesehen vom Paläokarst und aufgeweitete Risse und Klüfte) werden nur bis in Tiefen von

wenigen hundert Metern erwartet. Ebenso muss angenommen werden, dass die Durchlässigkeit und Wasserführung in den tiefen Kreide- und Malmkalken des autochthonen Mesozoikums nochmals tiefer sind (siehe Abb. 37 und Abb. 38). Dies bestätigen die Tiefbohrungen Entlebuch-1, Linden-1 und Thun-1, welche eine sehr tiefe Matrixporosität aufweisen und abgesehen vom Paläokarst am Top vom Malm nicht bzw. kaum wasserführend waren. Folglich muss der Fokus für eine geothermische Nutzung in diesen tiefen Kalkschichten zwingend auf grossen Bruch- und Störzonen liegen.

Beispiele für tiefe geothermische Nutzungen in den Kreide- und Malmkalken finden sich in Yverdon-les-Bains. Die kürzlich erstellte Geothermiebohrung in Vinzel hat in den Malmkalken ebenfalls Wasser angetroffen. Die verschiedenen Wasserzutritte im Lötschbergtunnel von 300 bis 1000 l/min (Ziegler & Isler, 2013) bestätigen ebenfalls, dass wasserführende Zonen in der Tiefe vorhanden sind, aber an Kluft-, Bruch- und Störzonen gebunden sind.

Paläokarst

Unter Paläokarst werden alte Karstrelikte verstanden, welche im Untersuchungsgebiet in der erdgeschichtlichen Vergangenheit im Zeitraum der Kreide bis Eozän entstanden sind (Jeannin et al., 2015). Es handelt sich dabei um eine ehemalige verkarstete Landoberfläche unter subtropischen Flachlandbedingungen, welche später durch die Molasse- und Flyschsedimente ab dem Eozän bis Oligozän (vor ca. 45 bis 23 Mio. Jahre) überlagert wurden. In der Schweiz findet man diese häufig am Top der Malmkalke in Form von Spalten, Höhlen und Klüften, welche mit einem Lösungsrückstand (z. B. rote eisenschüssige Bolustone, Siderolithikum oder Quarzsand) gefüllt sind.

Entsprechend wird der Top Malm unter der Molassebedeckung als ehemaliger verkarsteter Horizont (Paläokarst) als potentiell höher durchlässig erachtet als die darunterliegenden Malmschichten. Dort, wo der Paläokarst in Tiefbohrungen und auch in Erdwärmesonden-Bohrungen angebohrt wurde, hat sich gezeigt, dass der Paläokarst in zwei Hauptformen vorkommen kann. Entweder ist der Paläokarst von Boluston überlagert und gefüllt oder der Paläokarst ist teilweise offen, nicht oder nur wenig von Boluston und dafür mit Huppersand gefüllt. Im ersten Fall ist der Paläokarst dicht und undurchlässig. Im zweiten Fall kann der Paläokarst durchlässig und wasserführend sein, insbesondere wenn dieser noch tektonisch überprägt wurde und zusätzlich geklüftet ist, wie im Fall der Bohrung Entlebuch-1.

Die Bohrung Entlebuch-1 liegt dem Untersuchungsgebiet am nächsten. Dort wurde am Top Malm ein duales Reservoirsystem festgestellt; mit einer gering porösen Kalksteinmatrix, die aber durch eine Klüftung und den Paläokarst angeschlossen wird. Aus dieser wurden über 74 Mio. m³ Erdgas und über 3'300 m³ Wasser und Kondensat gefördert. Allerdings wurde nach dem Leeren der Gasblase kein weiteres Wasser mehr gefördert. Diese Tatsache zeigt auch, wie wichtig bei der geothermischen Nutzung eine Rückgabe des produzierten Heisswassers ist.

Grundsätzlich können das Vorhandensein von Paläokarst und deren ausreichende Durchlässigkeit kaum vorhergesagt werden. Dies zeigen in den untiefen Bereichen viele Erdwärmesonden-Bohrungen, bei welchen auf engem Raum manche grosse Wasserzutritte und andere keinen Paläokarst oder nur dichten Boluston aufweisen. Eine zielgerechte Erschliessungstechnik ist unerlässlich.

Muschelkalk

Generell werden in der Nordschweiz die Kalk- und Dolomitgesteine des Oberen Muschelkalks bzw. der Schinznach Formation (alte Bezeichnung: Trigonodusdolomit und Hauptmuschelkalk) als die potentiell bedeutendsten Aquifere für eine geothermische Nutzung betrachtet. Es handelt sich um eine mehrere 10 m mächtige Abfolge von spröde reagierenden Kalk- und Dolomitgesteinen, die porös, häufig geklüftet und z. T. verkarstet sind. Diese Schichten weisen die höchste Durchlässigkeit von bis zu $k_f = 10^{-4}$ m/s auf (Abb. 40), wobei sich diese stark innerhalb der Schichten und von Ort zu Ort unterscheiden. Trotz hohen Porositäten von bis zu 20 % ist die Durchlässigkeit an Klüfte und Bruchzonen gebunden. Die Matrixpermeabilität ist generell deutlich tiefer. Bekannte Beispiele sind die Geothermieranlagen in Riehen, das Thermal- und Heilwasser von Bad Schinznach oder die Thermalquellen in Baden sowie SolarOne in Itingen.

Im Untersuchungsgebiet scheint es aber, dass der Muschelkalk mergeliger und dünner vorliegt. Dies hat die Bohrung Entlebuch-1 ergeben. Entsprechend wird die Durchlässigkeit geringer sein und nur dann ausreichend für eine Nutzung sein, wenn die Kalksteine und Dolomite ausreichend mächtig, weniger mergelig und stark geklüftet sind. Dort, wo der Muschelkalk im Süden z. B. beim Titlis als Rötidolomit wieder an die Oberfläche kommt, ist er zwar häufig geklüftet, aber mit einigen Metern bis max. ca. 20 m eher geringmächtig. Für eine ausreichende Prognose fehlen Bohrungen mit Untergrunddaten.

Kristallines Grundgebirge

In der Nordschweiz wird das Top Kristallin, das vor der Ablagerung des Buntsandsteins der Verwitterung ausgesetzt war, zusammen mit dem auflagernden porösen Buntsandstein auch als möglicher Aquifer angesehen (Nagra NAB 13-23). In vereinzelten Bohrungen (z. B. Tiefbohrung Benken) wurden in der Übergangszone des durchlässigen Buntsandsteins und verwitterten Top Kristallins Wasserzutritte festgestellt. In der Nordschweiz scheint es, dass das Kristallin insbesondere dann durchlässig ist, wenn dieses nicht bzw. nur von wenig Permokarbon überlagert ist.

Auch in tiefer gelegenen Bruchzonen bzw. geklüfteten Grundgebirgszonen werden in Bohrungen im Jura-Gebiet aber auch in den Alpen Wasserzutritte und höhere Durchlässigkeiten insbesondere in den oberen 500 m beschrieben (Chevalier et al. 2010, Nagra NTB 02-03; Forschungsbohrung am Grimsel in Egli et al., 2018), welche aber nicht immer wirtschaftlich nutzbar sind. Zwei bekannte Bsp. für eine geothermische Nutzung aus dem Kristallin sind Bad Zurzach mit bis zu 460 m tiefen Bohrungen und einer Konzession von 8.3 l/s mit 39 °C sowie Lavey-les-Bains mit drei Bohrungen bis 515 m und max. 1'330 l/min und 68 °C. Allerdings hat eine neue im Jahr 2022 erstellte 3'220 m tiefe Bohrung in Lavey-les-Bains keine nutzbaren Wasserzutritte finden können (siehe Tabelle 1).

In den nächstgelegenen wenigen Tiefbohrungen im Mittelland, in denen Kristallin angebohrt wurde, wurde ebenfalls mehr oder weniger verwittertes Kristallin mit unterschiedlichen Dichten von offenen und geschlossenen Klüften angetroffen. Häufig sind die Klüfte verheilt und somit geschlossen. Ein Beispiel für eine Bohrung mit offenen Klüften und kataklastischen Störzonen ist die 2'007 m tiefe Nagra-Bohrung Schaffisheim mit gleichwohl geringen Durchlässigkeiten von durchschnittlich $k_f = 10^{-7}$ - 10^{-8} m/s und einzelnen Zonen bis max. $k_f = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Weitere Bohrungen ohne Durchlässigkeiten oder Wasserzutritten sind z. B. Triemli und Pfaffnau-1. Da

das Kristallin bei den Erkundungen meist nicht von Interesse war, gibt es kaum Werte zu den Durchlässigkeiten im Kristallin.

Ähnlich wie im Fall des Muschelkalks fehlen in Nid- und Obwalden Bohrungen mit Untergrunddaten, sodass genaue Prognosen kaum möglich sind. Zudem wird auf die Tatsache hingewiesen, dass die Durchlässigkeiten mit der Tiefe abnehmen Kapitel 5.2.3. Im Untersuchungsgebiet liegt das autochthone kristalline Grundgebirge in sehr grossen Tiefen von über 5 bis 7 km. In den südlichsten Bereichen gelangt das Kristallin des Aar-Massivs sukzessive bis zur Oberfläche und ist durch die tektonische Beanspruchung während der Alpenbildung deformiert und somit von Bruchzonen und geklüfteten Zonen durchzogen. Aber auch hier fehlen Tiefendaten, sodass die Annahme, dass wasserführende Bruchzonen vorliegen, zwar berechtigt ist, aber die Lage und Ausprägung der Zonen unbekannt sind. Auch ist unklar, in welchem Ausmass diese potentiell durchlässigen Zonen später wieder durch Mineralreaktionen oder Ausfällungen abgedichtet wurden. Z. B. zeigt der Lötschberg-Basistunnel über weite Strecken keine oder nur geringe Wasserzutritte im Kristallin. Es wurden nur relevante Wasserzutritte im Kreuzungsbereich von Klüften und Bruchzonen registriert, welche aber häufig innerhalb von Stunden bis Tagen versiegten.

Molasse

Die Molasse besteht aus einer Wechselfolge von siltig-tonigen und mergeligen Lagen, Schichten und Rinnenfüllungen aus Sandsteinen sowie mächtigen Nagelfluh-Bänken. Je näher zum Liefergebiet, also Richtung Alpen, desto mehr nehmen die groben Sedimente wie die Nagelfluh-Bänke zu. Sandsteinlagen und die Nagelfluhbänke können porös und somit durchlässig und wasserführend sein. Der tatsächliche Porenraum hängt aber von der Diagenese bzw. Versenkungsgeschichte und allfälliger Mineralisation der Porenräume ab. Verschiedene Bohrungen zeigen, dass im Mittelland von Nord nach Süd und mit zunehmender Überlagerung der Porenraum abnimmt. Während z. B. die Sandsteine und Nagelfluhbänke der Oberen Meeresmolasse im Raum Zürich und Kloten Porositäten von bis zu über 20% und Durchlässigkeiten von bis zu über 10^{-6} m/s aufweisen, nehmen diese Werte nach Süden rasch ab. Bereits in der Geothermiebohrung Fehraltorf wurden nur noch Werte für die Porosität von 5-8% und Durchlässigkeiten von über 10^{-7} bis 10^{-8} m/s ermittelt. Diese Bohrung war entsprechend nicht nutzbar. Die nahe gelegenen Bohrungen Entlebuch-1 und Weggis-1 bestätigen dieses Bild. Die Molassesedimente in den beiden Bohrungen sind gering porös (einzelne Lagen bis max. 10%), weisen keine verbundene Porosität auf und sind gering durchlässig. Dies bestätigt ein Pumptest in der Geothermiebohrung Weggis-1. Während des Pumptests mit 1 l/s hat sich das Bohrloch innert einer Stunde geleert. Selbst die durchbohrten Störzonen waren nicht wasserführend. Die möglichen Hohlräume wie Klüfte sind durch spätere Ausfällungen bzw. Mineralisierung durch Kalzit geschlossen.

Es muss angenommen werden, dass die tiefgelegenen Molasse-Sedimente in Nid- und Obwalden selbst entlang von Bruchzonen eine geringe Porosität und Durchlässigkeit aufweisen. Eine erhöhte Durchlässigkeit und Wasserführung kann nur dort erwartet werden, wo Sandstein- oder Nagelfluhbänke durch junge Bruchvorgänge deformiert wurden und seither die Klüfte nicht erneut verheilt sind.

Quartäre/eiszeitliche Rinnen

In der Schweiz gibt es im Mittelland und Alpenvorland tiefe quartäre Rinnen, welche mit Lockergestein gefüllt sind. Diese Rinnen entstanden während der letzten Eiszeiten unter der mächtigen Eisbedeckung. Unter den Gletschern sammelte sich das Schmelzwasser zu grossen Flüssen. Durch die grosse Eisüberdeckung stand das Schmelzwasser unter Druck und wies zusammen mit der Sedimentfracht ein grosses erosives Potential auf. So konnten die bis ca. 350-400 m tiefen und einige Hundert Meter breiten Rinnen entstehen. Nach der Gletscherschmelze bildeten diese Rinnen grosse Seen, ähnlich wie heute der Vierwaldstättersee oder Zürichsee, die sukzessive verlandeten.

Derzeit werden die eiszeitlichen Rinnen an verschiedenen Orten in der Schweiz erkundet und erschlossen. Auch in der Vergangenheit wurden diese vereinzelt mit Singletten erschlossen und genutzt. Eine der ältesten Fassungen befindet sich in Seon bei Lenzburg. Dort werden aus Schottern in einer Tiefe von 267 – 305 m sehr alte, gering mineralisierte und sauerstoffarme Grundwässer mit einer Aquifer-Temperatur von 19.5 °C entnommen. Die Grundwässer werden als Trinkwasser und für die Wärmenutzung mit 1.35 MW für ein Hallenbad genutzt. An verschiedenen anderen Orten (z. B. in Biel, Bern, Münsingen, Zürich, Flughafen Zürich, Zug usw.) wurden ebenso an der Basis der Rinnen immer wieder mehrere Dutzend Meter mächtige, durchlässige und wasserführende, saubere bis wenig siltig-sandige Schotter angetroffen. Diese weisen Durchlässigkeiten von k_f über 10^{-4} m/s auf. Verschiedene Pumpversuche zeigen, dass Pumpraten von 3'000 bis 5'000 l/min pro Brunnen möglich sind.

Die eiszeitlichen Rinnen sind lithologisch ähnlich aufgebaut. Meist folgt über den basalen Schottern und Moränenablagerungen eine dichte Abfolge von Stillwasserablagerungen (siltige Seetone). Richtung Alpen scheint es, dass der Anteil der Stillwasserablagerungen zu Gunsten der kiesigen Ablagerungen abnimmt. Es hat sich gezeigt, dass das Grundwassergefälle in diesen basalen Schottern sehr flach ist. Beim Flughafen Zürich konnte der Nachweis erbracht werden, dass der Aquifer der basalen Schotter ein nahezu stehendes und abgeschlossenes Gewässer bildet. Dies sind optimale Voraussetzungen für einen Aquiferspeicher.

In Nid- und Obwalden werden auf Basis der seismischen Erkundungen ebenfalls tiefe Rinnen vermutet (Bodmer et al., 1996). Dies bestätigen auch die unzähligen Bohrungen in den Talgebieten, die die Basis dieser eiszeitlichen Rinnen noch nirgends erreicht haben.

Rezente Brüche

Wie in Kapitel 8.3 beschrieben, erfolgen im Untersuchungsgebiet immer wieder stärkere Erdbeben auch in Tiefenbereichen, welche für die Geothermie attraktiv sind. Jedes Erdbeben bedeutet, dass unter Spannung stehendes Gestein bricht und Gesteinspakete zueinander verschoben wurden. Dies kann entlang von neuen aber auch entlang von bestehenden alten Bruchflächen erfolgen, welche Schwachstellen darstellen und somit reaktiviert werden können. Dies bedeutet, dass regelmässig Gestein neu oder wieder aufgebrochen, geklüftet und zerrüttet wird. Somit werden potenzielle Wasserwege entlang von Bruchzonen neu gebildet, aufrecht erhalten oder reaktiviert. Dies kann im Fall der geothermischen Nutzung positiv aber auch nachteilig bewertet werden. Positiv, weil wiederkehrend Wasserwegsamkeiten gebildet werden; negativ, weil die Gefahr der induzierten Seismizität mit spürbaren Erdbeben besteht (siehe Kapitel 8.2 und 8.3).

5.3 Playregister und Play-Vorkommen in den Kantonen NW & OW

5.3.1 Beispiel Kanton Aargau

Im Rahmen eines Projektes der Swisstopo und des Kantons Aargau ("play based exploration", Play-Definition siehe Glossar) im Jahr 2023 wurde am Beispiel des Muschelkalks von Geo Explorers AG ein Playregister erstellt. Dies zeigt, dass selbst innerhalb einer spezifischen Schicht verschiedenste struktur- und hydrogeologische Voraussetzungen vorliegen können. Diese sollten beachtet werden, damit das beste geothermische Play gefunden werden kann. In Abb. 42 werden die verschiedenen Muschelkalk-Plays, welche auch auf andere Schichten übertragen werden können, dargestellt. Ähnliche Plays mit relevanten Bruchzonen kommen ebenfalls in den Kantonen Nid- und Obwalden vor (z. B. Play-Typ Mk4) und sind entsprechend attraktiv für eine Erkundung.

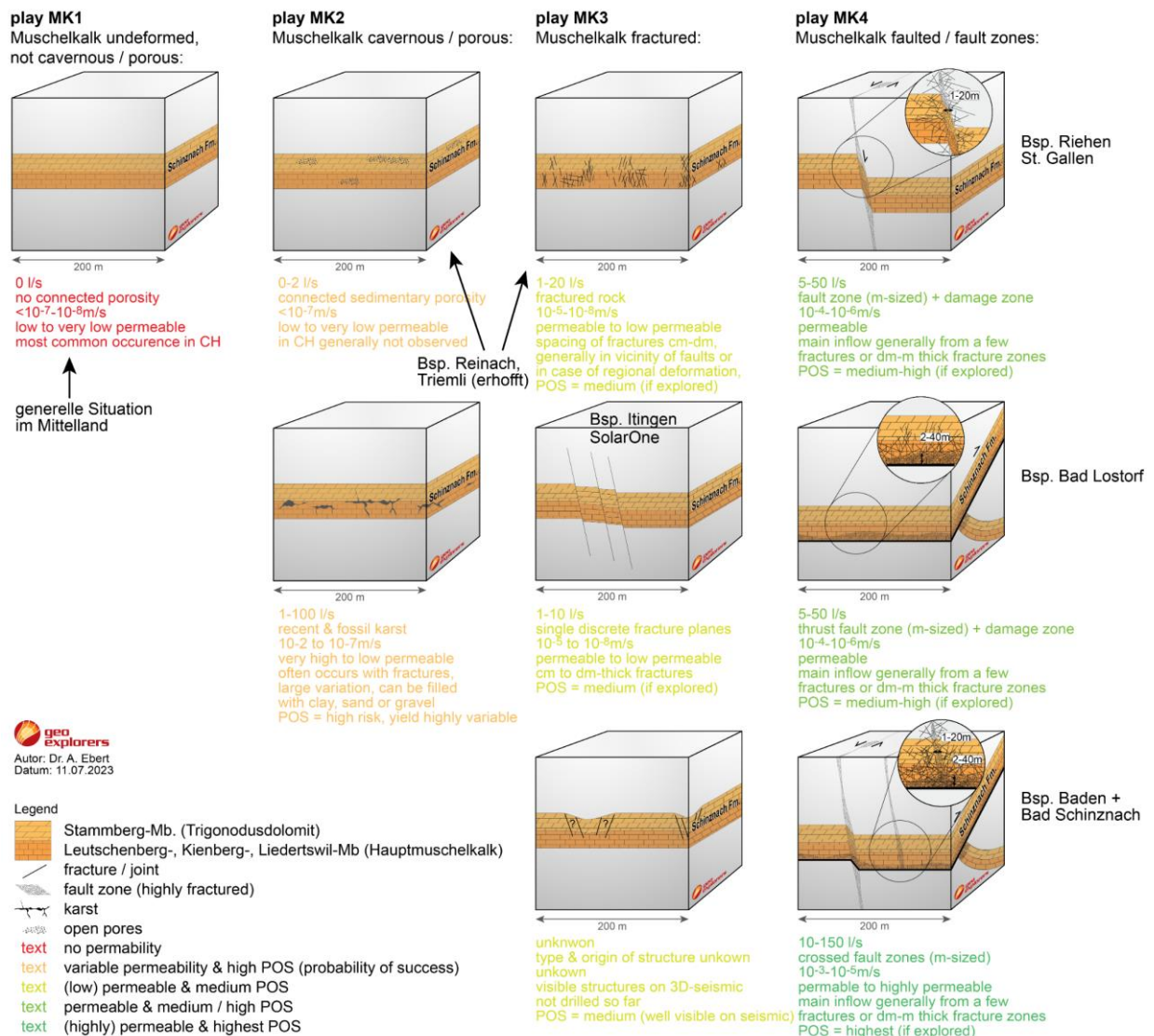


Abb. 42 Playregister für Muschelkalk Bsp. Kanton Aargau

5.3.2 Play-Typen in den Kantonen Nid- und Obwalden

Auf der Übersicht in Abb. 43 werden die wichtigsten geothermischen Plays in den Kantonen Nid- und Obwalden dargestellt und deren Vorkommen auf einer Karte eingegrenzt (rote Flächen). Pro Play-Typ werden die Eigenschaften, Vorkommen, bestehenden Nachweise, deren Potential, die Erkundung der Plays usw. in separaten Faktenblättern in Kapitel 6.3.2 beschrieben und bewertet. Da der Kenntnisstand insbesondere für die tiefen Plays gering ist und somit z. B. lokale Bruchstrukturen vereinzelt zwar auf der Seismik erkennbar sind, aber lateral nicht weiterverfolgt werden können, sind die roten Flächen auf den Karten so zu verstehen, dass in diesen Gebieten das Potential besteht, die notwendige Schicht und allfällige Bruchzonen anzutreffen. Könnten die Bruchstrukturen genau lokalisiert und verfolgt werden, so könnten Gebiete ausgeschieden werden, ähnlich wie für das Play E.

Die meisten und die erfolgversprechendsten Plays sind an Bruch- bzw. Störzonen gebunden. Entlang dieser Bruchzonen kommen alle oben erwähnten Gesteinsschichten in Frage, die zur Klüftung und Verkarstung neigen (im Wesentlichen reine Kalksteine und kristallines Grundgebirge). Die Eigenschaften der Schichten und Strukturen wurden im Kapitel 5.2 beschrieben. Auf dem Querprofil in Abb. 44 werden die verschiedenen möglichen Play-Typen lokalisiert. Um die Übersichtlichkeit zu wahren und aufgrund des geringen Datenstands wird auf weitere Unterteilungen der Play-Typen wie in Abb. 42 verzichtet. Unter anderem werden Bruch- und Störzonen-Typen (z. B. Ab-, Auf- oder Überschiebung) nicht unterschieden. Im Fall zukünftiger Detailanalysen einer lokalen Struktur oder Schicht im Untersuchungsgebiet macht es aber Sinn, die Play-Typen mit zunehmendem Kenntnissgewinn während der Erkundung zu verfeinern.

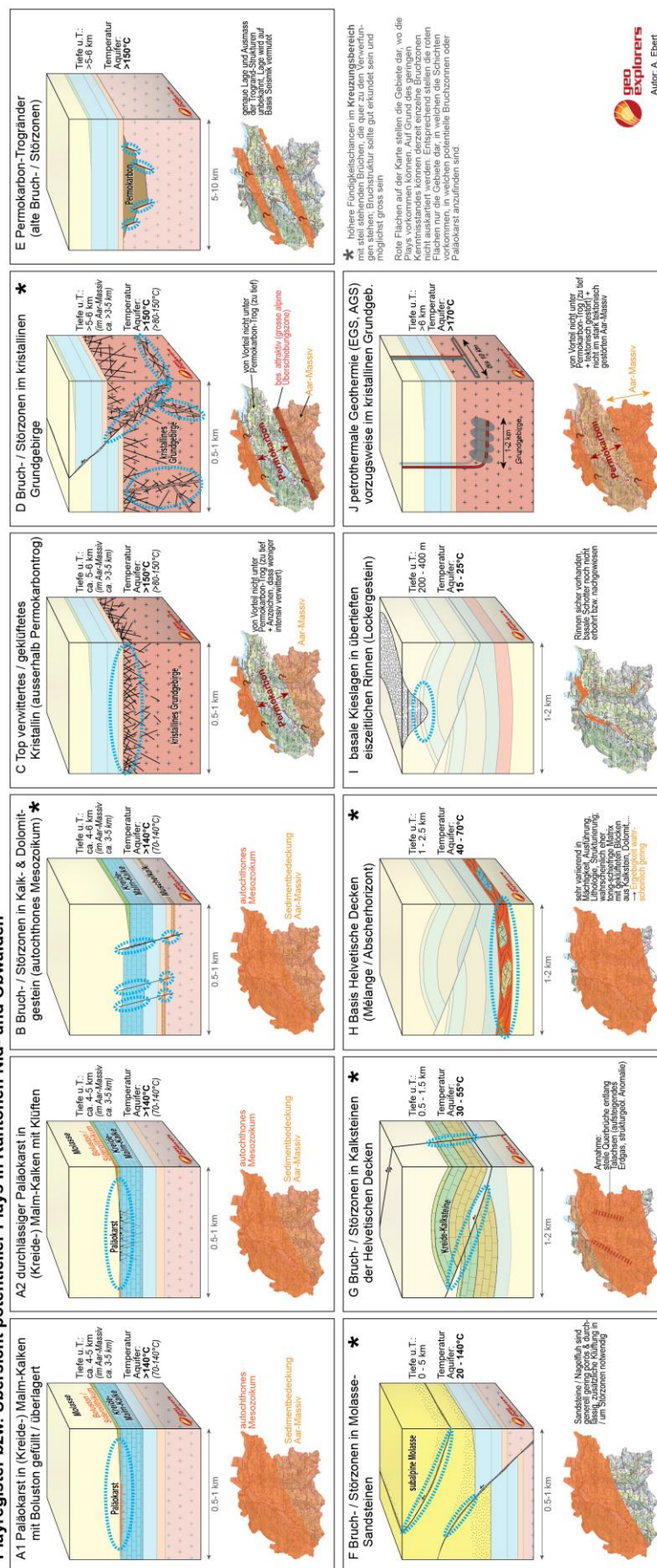
Die **Play-Typen A1 bis E** betreffen Strukturen (Paläokarst, Klüftung, Bruch- und Störzonen) im tiefen autochthonen Mesozoikum und darunterliegenden Grundgebirge, sowie die Sedimentbedeckung des Aar-Massivs und das kristalline Aar-Massiv selbst. Wie die Karten zeigen, kommen diese Schichten im ganzen Kantonsgebiet vor. Wie oben erläutert, ist es derzeit nicht möglich, Paläokarst oder diskrete Bruchzonen zu kartieren.

Die **Play-Typen F bis H** betreffen ebenfalls Bruch- und Störzonen, aber in weniger tiefen Schichten. Play-Typ F spiegelt mögliche Bruch- und Störzonen in Sandsteinen und Nagelfluhbänken der Molasse wider. Die Play-Typen G stellen Brüche und Störzonen in den reinen und kompetenten Kalksteinen der Helvetischen Decken dar; das Play H die Basis/Mélange der Helvetischen Decken. Die Tiefen der Play-Typen G und H reichen von 0 bis max. 1.5 bis 2.5 km. Auch diese Plays sind nahezu im ganzen Kantonsgebiet vorhanden.

Das **Play I** bezieht sich auf die basalen Kieslagen in übertieften eiszeitlichen Rinnen. Der **Play-Typ J** im kristallinen Grundgebirge steht für die petrothermale Geothermie, also die Erzeugung von künstlichen geothermischen Reservoiren im tiefen und überwiegend dichten Kristallin.

Die zu erwartenden Tiefenlagen und entsprechenden Aquifertemperaturen sind ebenfalls in Abb. 43 angegeben. Da entlang der Bruchzonen die Tiefenlage der Schichten aufgrund der Bruchvorgänge (versetzte Schichtabfolge) sowie des generellen Einfallens der Schichten nach Süden variiert, ist für jedes Play ein Tiefen- bzw. Temperaturbereich angegeben.

Playregister bzw. Übersicht potentieller Plays in Kantonen Nid- und Obwalden



* höhere Fundamentalkontinuität im Kreuzungsbereich mit den Störzonen, die die Plays vorkommen können. Auf Grund des geringen Ausmasses der Plays sind die Plays nicht auskartiert werden. Entsprechend stellen die roten Flächen nur die Gebiete dar, in welchen die Schichten Permokarbonat-Troggränder, Störzonen oder Paläokarst anzufinden sind.

Rote Flächen auf der Karte stellen die Gebiete dar, wo die Plays vorkommen können. Auf Grund des geringen Ausmasses der Plays sind die Plays nicht auskartiert werden. Entsprechend stellen die roten Flächen nur die Gebiete dar, in welchen die Schichten Permokarbonat-Troggränder, Störzonen oder Paläokarst anzufinden sind.

Abb. 43 Erfolgversprechendste geothermische Plays und deren Potential

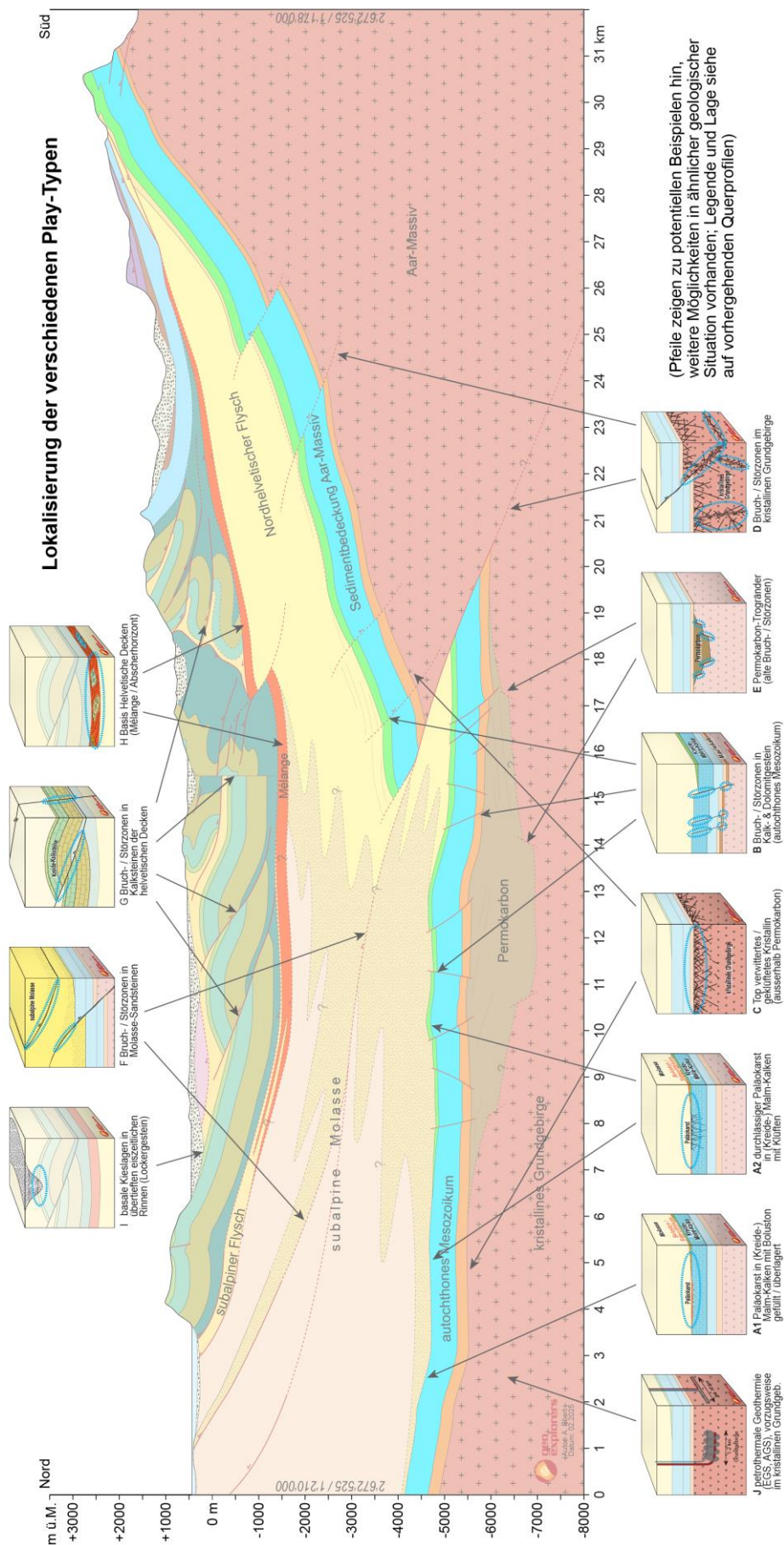


Abb. 44 Querprofil vom Bürgenstock zum Titlis mit Playtypen (siehe Abb. 28)

6 Geothermisches Potential

6.1 Notwendige Voraussetzungen

Das geothermische Potential hängt im Wesentlichen von den beiden Parametern Temperatur-Spreizung und Schüttungsrate ab. Die thermische Leistung berechnet sich entsprechend aus $P_{th} = c \cdot Q \cdot \Delta T$ mit c = spez. Wärmekapazität, Q = Wasserfluss in l/s, ΔT = Temperaturspreizung.

Genauer wird das geothermische Potential bestimmt durch:

- die Ergiebigkeit der wasserführenden Zonen, welche wiederum geprägt sind durch
 - die Durchlässigkeit und Porosität der Gesteine
 - die Mächtigkeit / das Volumen der durchlässigen Zonen
 - das Vorhandensein von Felsgrundwasser

Ohne durchlässige Zonen gibt es keine Fließwege, damit ausreichend Wasser zufließen und gefördert werden kann. Liegen keine primär durchlässigen Gesteine wie z. B. Flussschotter oder poröse Sandsteine vor (Porenaquifere), liegt der Fokus auf Bruchzonen in kompetenten Gesteinen, in welchen z. B. Kalksteine geklüftet, eventuell zusätzlich verkarstet und damit durchlässig sind (Kluft- / Karstaquifere). Je nach Durchlässigkeit der Reservoirgesteine bzw. Ergiebigkeit und Förderrate wird durch das Pumpen der Grundwasserspiegel in der Bohrung unterschiedlich stark abgesenkt. Je schneller Wasser nachfließen kann, desto geringer ist die Absenkung. Die Fördermenge muss entsprechend an die Absenkung bzw. Durchlässigkeit angepasst werden, wobei ein möglicher thermischer Kurzschluss zwischen Produktions- und Förderbohrung vermieden werden muss.

- die Untergrundtemperatur, welche wiederum geprägt ist durch
 - den geothermischen Gradienten / Wärmefluss
 - den Zufluss warmer Tiefenwässer
 - den Einfluss durch eindringende kalte Oberflächenwässer

Es wird eine möglichst hohe Grundwassertemperatur angestrebt, welche z. B. durch aufsteigende Tiefenwässer wie im Fall Bad Schinznach erhöht sein kann.

- den Motor für Felsgrundwasserfluss, welcher einen dauerhaften Zufluss an konvektiver Wärme garantiert und die Richtung der Zuflüsse definiert. Dieser wird bestimmt durch
 - das allgemeine Druckpotential am Projektstandort
 - das Druckpotentialgefälle im Aquifer (= Grundwasserleiter)
 - die Infiltration bzw. das Quellgebiet und Zuflussgebiet.

Ohne den Druckspiegelgradienten im Grundwasserleiter kann kein Wasser fließen und dies würde bei einer geothermischen Dublette schnell zum thermischen Kurzschluss führen. Das Druckspiegelgefälle gibt die Richtung vor, von wo dauerhaft Wasser zufließen kann. Im Fall der Wärme-/Kältespeicherung sind Aquifere mit keinem oder nur geringem Grundwasserfluss von Vorteil, damit die Energieverluste gering bleiben.

6.2 Erfolgswahrscheinlichkeit

Für die Bewertung des geothermischen Potentials kann der **probability of success (POS)** angewendet werden. Der POS kommt aus der Erdölindustrie und quantifiziert das Potential einer Ressource: $POS = P1 \cdot P2 \cdot P3 \cdot P4$ ($P1$ = Reservoir, $P2$ = Trap, $P3$ = Source bzw. petroleum

charge, P_4 = Retention). $P = 0$ steht für nicht vorhanden bzw. maximales Risiko und $P = 1$ steht für 100% sicher bzw. kein Fündigkeitsrisiko. Dies kann in der Geothermie ähnlich angewandt werden und je nach geothermischem System kann dies angepasst und erweitert werden:

- P_1 = Liegt überhaupt ein **potentielles Reservoirgestein** vor (z. B. Malmkalke oder Muschelkalk), welches zur Klüftung oder Verkarstung neigt oder porös ist und somit ein Wasserfluss erlaubt?
- P_2 = Wie gut ist die Tiefe des Reservoirs und somit die **Reservoir-Temperatur** prognostizierbar?
- P_3 = Liegen **Bruchstrukturen** vor, welche verantwortlich für die **Klüftung** sind? Sind diese Zonen ausreichend mächtig? Wie sind die Klüfte im Spannungsfeld orientiert? Im Fall von porösen Gesteinen wird die **Porosität** (z. B. primär sedimentär oder Karst) hinsichtlich Porengrösse, Dichte, Kommunikationsfähigkeit der Poren, Alter, Mineralisierung usw. bewertet.
- P_4 = Ist ein ausreichender **Wasserzufluss** vorhanden bzw. ist das Reservoir ergiebig? Wie sind die **Wasserchemie**, der Druckspiegel, die Fliessgeschwindigkeit, die Erneuerung?

Bsp. POS Play Bruchzonen in Kreidekalken in den helvetischen Decken zwischen Sarnen und Kerns

- Die Kreide-Kalke liegen sicher vor, also $P_1 = 1$.
- Die Tiefenlage sowie der geothermische Gradient und damit die Aquifertemperatur können gut prognostiziert werden, also $P_2 = 0.9$.
- Relevante Bruchstrukturen und damit geklüftete oder zerbrochene Zonen sind mit grosser Wahrscheinlichkeit vorhanden (siehe Seismik), $P_3 = 0.95$.
- Zwar weiss man von der Seismik, dass diese Bruchzonen vorhanden sind, aber sie wurden noch nicht angebohrt. Aufgrund des Unwissens zur Ausprägung der Bruchzonen (Intensität der Klüftung, Breite der Zonen) und zu den typischen Aquifereigenschaften (Durchlässigkeit, Ergiebigkeit, Herkunft, Geochemie usw.) muss P_4 konservativ angesetzt werden, $P_4 = 0.6$.
- $POS = 1 \cdot 0.9 \cdot 0.95 \cdot 0.6 = 0.5 \rightarrow$ die Erfolgswahrscheinlichkeit liegt entsprechend im Bereich möglich/moderate bis angemessene Erfolgswahrscheinlichkeit.

POS Erfolgswahrscheinlichkeit

1	sehr hohe Wahrscheinlichkeit
0.8	angemessene geol. Zuversicht, geringes Risiko
0.6	
0.4	möglich, moderate Erfolgswahrscheinlichkeit
0.2	hohes Fündigkeitsrisiko
0	praktisch unmöglich

Die Erfolgchancen pro Play für die angeführten Schüttungsraten sind in Abb. 45 angegeben und werden in den nachfolgenden Faktenblättern pro Play beschrieben.

6.3 Geothermisches Potential pro Play in Nid- und Obwalden

6.3.1 Übersicht Play-Potentiale

In Abb. 45 wird das geothermische Potential pro Play im Untersuchungsgebiet abgeschätzt und das Risiko bewertet. Es werden für die potentiellen Plays/Aquifere die Temperatur, die Bandbreite möglicher Schüttungsraten (abgeleitet von Erfahrungswerten aus anderen Projekten in ähnlicher geologischer Situation), die Erfolgswahrscheinlichkeit hinsichtlich prognostizierter Schüttungsrate und die abgeleitete thermische Leistung pro Bohrung bzw. Brunnen angegeben. Zudem werden die Anzahl möglicher Brunnendubletten und der mögliche Energiebezug pro Jahr abgeschätzt. Auf einer Karte werden mögliche Erschliessungsgebiete ausgeschieden.

Die zu erwartenden realistischen Schüttungsraten liegen bei den attraktivsten Plays zwischen 5 bis 30 l/s; im Fall der basalen Schotter in den eiszeitlichen Rinnen bei 20 bis 80 l/s. Da diese Plays in verschiedenen Tiefenlagen angetroffen werden, variieren die zu erwartenden Felstemperaturen zwischen rund 30 bis über 140 °C (15 bis 25 °C in den basalen Schottern der Rinnen). Die thermischen Entzugsleistungen können je nach Schüttungsrate und Temperatur rund 0.5 bis 10 MW_{th} pro Brunnen erreichen. Konservative Werte sollten aber eher bei 0.5 bis 3 MW_{th} angesetzt werden. Die Fündigkeitschancen für die erwarteten Schüttungsraten müssen je nach Play, dessen Tiefe, Erkundungs- und Wissensstand mit gering bis mittel (alle tiefen Plays A bis F und H) sowie mittel bis hoch (untiefe Plays G und I) eingeschätzt werden. Aufgrund der Vorkommen unzähliger Bruchzonen sind pro Play mehrere Förderbrunnen bzw. Brunnendubletten möglich.

Siehe auch Kapitel 6.5 «Vergleich Wärmenachfrage und geothermisches Potential».

6.3.2 Faktenblätter pro Play

Nachfolgend werden die verschiedenen Plays in Form von Faktenblättern genauer beschrieben, bewertet und deren Potential quantifiziert. Des Weiteren wird eine mögliche Erkundung mit Zielen, Vorgehen, Grobkosten und Dauer aufgezeigt.

Abgrenzung: Oberflächennahe Grundwässer, Erdwärmesonden, Karstquellen usw. werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Playregister bzw. Übersicht potentieller Plays in Kantonen Nid- und Obwalden

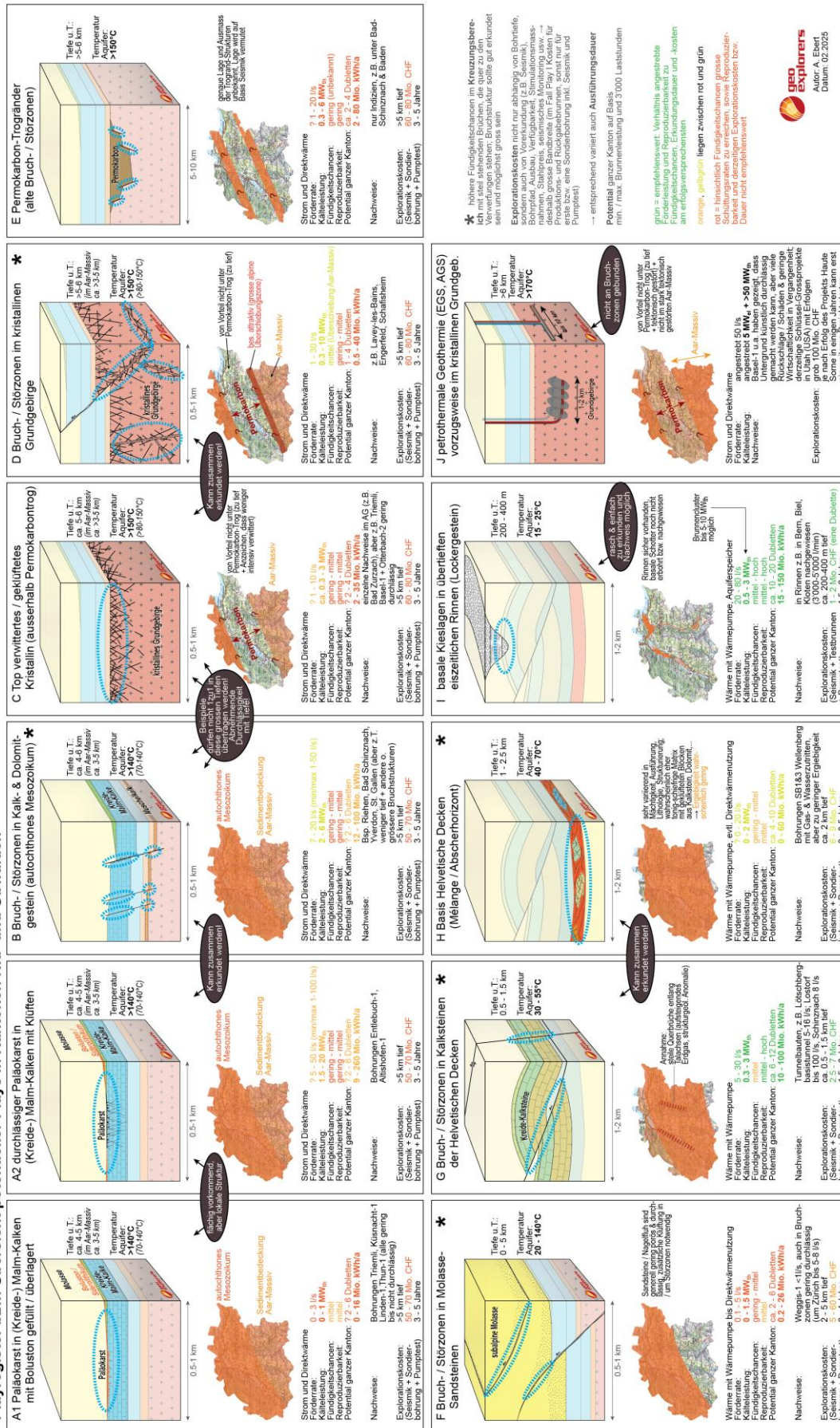
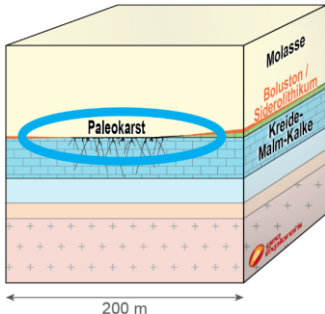


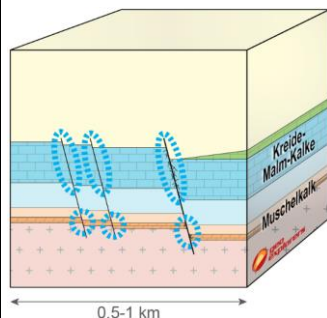
Abb. 45 Abschätzung des geothermischen Potentials pro Play (siehe auch Anhang)

Auswahl von Playtypen in Kantonen Nid- und Obwalden / Geologie / Ort	Chancen / Risiken / bestehende Nachweise / Potential / Nutzungsart (da mit einer Bohrung häufig mehrere Plays bzw. potentiell durchlässige Horizonte angebohrt werden, können Risiken minimiert werden und durch das Anschliessen von mehreren Horizonten / Plays das Potential erhöht werden; nachfolgend wird nur auf die vielversprechendsten Plays eingegangen; i. V. zu anderen Abschätzungen sind unsere Angaben konservativer; Energie-Herleitung mit 3000 Laststunden pro Jahr; das totale Potential für Kanton ist als absoluter Maximalwert zu verstehen, der nur im besten Fall erreicht wird)	Erkundungsziele / Vorgehen / Kosten / Dauer (ohne Wartezeiten bzgl. Finanzierung, Entscheidungsfindung usw.)																														
A Paläokarst (Kreide-) Malm-Kalke Playtyp: Paläokarst am Top (Kreide-) Malm-Kalke Tektonik: Verkarstete (Kreide-) Malmkalke des tiefen autochthonen Mesozoikums, einer ehemaligen Landoberfläche, bevor diese mit tertiären Sedimenten abgedeckt wurden  bevorzugte Projektorte: ganzer Kanton, südlich Linie Kaiserstuhl – Melchtal – Wellenberg; untiefen in Kreide-Malm-Kalken des Aar-Massivs 	Chancen: - In der ganzen Schweiz wird am Top Malm immer wieder Paläokarst angebohrt (ehemalige verkarstete Landoberfläche). Dieser Paläokarst = Siderolithikum = Eozän ist unterschiedlich ausgeprägt (massive Kalke mit o. ohne Karst, zusätzlich mit o. ohne Klüften) und unterschiedlich mit Sedimenten verfüllt / überlagert (z. B. durchlässige Huppersande o. undurchlässige eisenschüssige Bolustone). - Immer wieder wurden bei EWS - Bohrungen aber auch einzelnen Tiefbohrungen reichlich Wasser am Top Malm o. Erdgas angetroffen. Hinsichtlich einer ergiebigen Nutzung und Zirkulation wurde Top Malm aber noch nicht getestet. Risiken: - Lokale Vorkommen, die unterschiedlich ausgebildet sind. Die Vorkommen und deren Ausprägung sind kaum vorhersagbar oder geophysikalisch explorierbar. Zwar wird der Paläokarst sehr oft angebohrt, aber häufig ist dieser mit dichtem Boluston verfüllt bzw. überlagert und somit undurchlässig und nicht wasserführend. - EWS - Bohrungen zeigen, dass die Vorkommen innerhalb einer Parzelle einmal stark wasserführend sein können und am anderen Ort nicht. - Die meisten bestehenden Tiefbohrungen haben trotz Vorkommen von Paläokarst / Siderolithikum keine besonderen Durchlässigkeiten gezeigt. Es scheint, dass die Wahrscheinlichkeit deutlich grösser ist, undurchlässigen Paläokarst anzubohren, als durchlässigen und wasserführenden. - Hinzu kommt, dass nicht gesichert ist, dass verbundene Paläokarst-Systeme vorliegen und somit eine Zirkulation zwischen Produktions- und Rückgabeborung möglich ist. Nachweise: - Diverse EWS mit Wasserführung in angetroffenem Paläokarst. - Tiefbohrungen Entlebuch-1 und Altshofen-1 haben durchlässigen und gas- / wasserführenden und geklüfteten Paläokarst angetroffen (Entlebuch mit >74 Mio. m³, >3'300 m³ Wasser + Kondensat, versiegende Wasserförderung nach dem Leeren des Gasreservoirs). - Viele Tiefbohrungen haben Paläokarst am Top Malm erbohrt, welcher aber nicht ausreichend durchlässig war (z. B. Basel-1, Triemli, Thun-1). Die vorgefundenen eozänen Bolustone versiegeln die Klüfte & Karsterscheinungen. Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden): <table><tr><td>Aquifer-Temperatur:</td><td>>140 °C (im Aar-Massiv weniger tief u. somit kühler 70-140 °C)</td></tr><tr><td>Förderrate:</td><td>0 – 50 l/s (je nach Klüftung, Verfüllung mit Boluston usw., evtl. bis 100 l/s)</td></tr><tr><td>therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:</td><td>0 – 20 MW_{th} (realistisch, falls durchlässig, sind eher 5 MW_{th})</td></tr><tr><td>Fündigkeitschancen:</td><td>gering - mittel (kaum explorierbar, lokal, meist von Boluston abgedichtet)</td></tr><tr><td>Reproduzierbarkeit:</td><td>gering - mittel</td></tr><tr><td>Anzahl Dubletten ganzer Kanton:</td><td>flächig vorhanden aber nur lokale Strukturen, abhängig von Geologie & Platzbedarf → 2 – 6 Dubletten möglich</td></tr><tr><td>Therm. Kälteleistung total Kanton:</td><td>0 – max. 120 MW_{th} (grosse Unsicherheit, erste Nachweise notwendig)</td></tr><tr><td>Nutzbare Energie pro Jahr:</td><td>0 – max. 260 Mio. kWh/a</td></tr></table> Nutzungsart: Strom, Direktwärmenutzung, evtl. kombiniert mit Nutzung bzw. Verstromung angetroffenes Erdgas	Aquifer-Temperatur:	>140 °C (im Aar-Massiv weniger tief u. somit kühler 70-140 °C)	Förderrate:	0 – 50 l/s (je nach Klüftung, Verfüllung mit Boluston usw., evtl. bis 100 l/s)	therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	0 – 20 MW _{th} (realistisch, falls durchlässig, sind eher 5 MW _{th})	Fündigkeitschancen:	gering - mittel (kaum explorierbar, lokal, meist von Boluston abgedichtet)	Reproduzierbarkeit:	gering - mittel	Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	flächig vorhanden aber nur lokale Strukturen, abhängig von Geologie & Platzbedarf → 2 – 6 Dubletten möglich	Therm. Kälteleistung total Kanton:	0 – max. 120 MW _{th} (grosse Unsicherheit, erste Nachweise notwendig)	Nutzbare Energie pro Jahr:	0 – max. 260 Mio. kWh/a	Erkundungsziele: - Nachweis von nutzbarem, verbundenem, durchlässigem Paläokarst am Top Malm, insbesondere dort wo zusätzlich geklüftet (z. B. dort wo verfaultet (Antiklinal-Struktur) und von Brüchen durchzogen) - Grundlagendaten erheben zu Fließwegen, Infiltration, Geochemie, Alter, ... - Testen, wie die Ergiebigkeit erhöht werden kann bzw. wie ein möglichst grosses Volumen angeschlossen werden kann (mit Hilfe von angepasster Bohrtechnik, Bohrfeld oder Stimulationsmassnahmen) - Konzept, wie die lokalen Vorkommen vorgängig lokalisiert und bewertet werden können, damit eine risikoarme Erschliessung möglich wird Vorgehen für ein Pilotprojekt: - Top Malm und mögliche Anomalien (Brüche, Falten) mit Reflexionsseismik aufdecken (zu diskutieren, ob bestehende Seismik ausreicht o. noch eine 3D-Seismik notwendig ist) - Risikoanalyse bzgl. spürbarer Erdbebengefährdung & Erdgasführung - Sondierbohrung von Vorteil in Bereiche, die tektonisch gestört sind & somit zusätzlich geklüftet sind, wahrscheinlich werden side-tracks notwendig sein Aufgrund hoher Fündigkeitsrisiken & Bohrkosten sollte zwingend auf eine Multiexploration mit verschiedenen Zielhorizonten gesetzt werden. - Pumptests, geochemische Messungen usw. - Stimulationsmassnahmen (Ansäuern) und Langzeitpumptest - Bei Erfolg Erstellen zweiten Brunnen der Dublette und Zirkulationstests Kosten (je nach Lage, Fläche Seismik, Bohrtiefe 4-6 km u. T., Ausbau, Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen): <table><tr><td>Reflexionsseismik:</td><td>2 – 8 Mio. CHF</td></tr><tr><td>Sondierbohrung inkl. Pumptest, Monitoring:</td><td>40 – 60 Mio. CHF</td></tr><tr><td>Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:</td><td>40 – 60 Mio. CHF</td></tr></table> Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz). Dauer (stark abhängig von Verfügbarkeit, deshalb grosse Bandbreite): <table><tr><td>Vorgängige Planung, Bewilligungen:</td><td>6 – 12 Monate</td></tr><tr><td>Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung</td><td>8 – 14 Monate</td></tr><tr><td>Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung</td><td>14 – 24 Monate</td></tr><tr><td>Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest</td><td>10 – 16 Monate</td></tr></table> Wie die letzten Geothermieprojekte zeigen, muss im Fall von solch tiefen Bohrungen mit mehreren Jahren für die Entscheidungsfindung, Finanzierung, Planung, Bewilligungen, Ausschreibungsphase usw. gerechnet werden.	Reflexionsseismik:	2 – 8 Mio. CHF	Sondierbohrung inkl. Pumptest, Monitoring:	40 – 60 Mio. CHF	Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	40 – 60 Mio. CHF	Vorgängige Planung, Bewilligungen:	6 – 12 Monate	Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung	8 – 14 Monate	Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung	14 – 24 Monate	Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest	10 – 16 Monate
Aquifer-Temperatur:	>140 °C (im Aar-Massiv weniger tief u. somit kühler 70-140 °C)																															
Förderrate:	0 – 50 l/s (je nach Klüftung, Verfüllung mit Boluston usw., evtl. bis 100 l/s)																															
therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	0 – 20 MW _{th} (realistisch, falls durchlässig, sind eher 5 MW _{th})																															
Fündigkeitschancen:	gering - mittel (kaum explorierbar, lokal, meist von Boluston abgedichtet)																															
Reproduzierbarkeit:	gering - mittel																															
Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	flächig vorhanden aber nur lokale Strukturen, abhängig von Geologie & Platzbedarf → 2 – 6 Dubletten möglich																															
Therm. Kälteleistung total Kanton:	0 – max. 120 MW _{th} (grosse Unsicherheit, erste Nachweise notwendig)																															
Nutzbare Energie pro Jahr:	0 – max. 260 Mio. kWh/a																															
Reflexionsseismik:	2 – 8 Mio. CHF																															
Sondierbohrung inkl. Pumptest, Monitoring:	40 – 60 Mio. CHF																															
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	40 – 60 Mio. CHF																															
Vorgängige Planung, Bewilligungen:	6 – 12 Monate																															
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung	8 – 14 Monate																															
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung	14 – 24 Monate																															
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest	10 – 16 Monate																															

B Bruch- / Störzonen in Kalk- & Dolomitgestein des autochthonen Mesozoikums

Playtyp: Bruchzonen (Ab-, Auf- und Seitenverschiebungen) im Kreuzungsbereich mit Kreide-, Malmkalken oder Muschelkalk → geklüftete, z.T. verkarstete Karbonate (weitere kompetente Lithologien sind auch möglich)

Tektonik: Bruchzonen im autochthonen Mesozoikum und Sedimentbedeckung des Aar-Massivs



bevorzugte Projektorte: im autochthonen Mesozoikum: nördl. Linie Kaiserstuhl – Melchtal – Grafenort; im Aar-Massiv süd. davon



Chancen:

- Übliches Bohrziel in der Geothermie im Mittelland auch in Nid- und Obwalden vorhanden
- Mehrere Brüche bzw. verbogene u. versetzte Reflektoren (Schichten) sind auf Seismik erkennbar, sodass eine ausreichende Deformation mit geklüfteten Gesteinen erwartet werden darf (vgl. mit St. Gallen)
- Grosse Tiefe → hohe Temperaturen sicher
- Erhöhte Seismizität in der Zentralschweiz ausgelöst durch junge Bruchvorgänge → gewisse Durchlässigkeiten können vorhanden sein, welche noch nicht wieder verschlossen sind

Risiken:

- Keine Bruch-Störzonen mit grossen Versätzen von einigen 100 m auf bestehender Seismik erkennbar
- Seismik-Qualität oft ungenügend und erlaubt keine genaue Definition von Bohrzielen (evtl. mit Reprozessierung Verbesserungspotential vorhanden)
- Keine / kaum Korrelationen von Bruchstrukturen über benachbarte Seismiklinien möglich
- Orientierung von Bruchzonen unbekannt, somit auch ob diese günstig zum Spannungsfeld stehen, damit offene Klüfte erwartet werden können
- Grosse Tiefe → lassen sich nicht einfach und rasch erkunden und testen
- Grosse Tiefe → unsicher, inwiefern die Klüfte offen und somit ausreichend wasserführend sind
- Fehlende Nachweise funktionierender Dubletten entlang von solchen Bruchzonen in diesen Tiefen (unklar sind z. B. Ergiebigkeit, thermischer Kurzschluss, Breite der durchlässigen Zone, Fliesswege)
- Registrierte Erdbeben auch in den Tiefen der Bruchstrukturen → es muss angenommen werden, dass diese Strukturen vorgespannt sein können und durch Injektionen u./o. Pumpbetrieb spürbare Erdbeben getriggert werden können (vgl. mit Basel und St. Gallen) → eine seismische Risikoanalyse ist zwingend

Nachweise:

- Im Untersuchungsgebiet keine Bohrungen in das autochthone Mesozoikum vorhanden, Nachweise fehlen somit
- Nächster Nachweis: Bohrung Entlebuch-1 mit geklüfteten Malm-Kalken, welche von Brüchen durchzogen sind (siehe Play A Paläokarst, es wurde aber keine explizite grössere Bruchzone durchbohrt)
- Ähnliche geologische Situationen mit durchlässigen wasserführenden Brüchen im Mesozoikum vorhanden (Bsp. St. Gallen, Riehen, Yverdon, Vinzel)

Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur:	>140 °C
Förderrate:	7 – 20 l/s (realistisch; min./max. 1 – 50 l/s)
therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	2 – 6 MW_{th}
Fündigkeitschancen:	gering - mittel für obige Schüttungsraten
Reproduzierbarkeit:	gering - mittel
Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	2 – 6 (*Herleitung s. u.)
Therm. Kälteleistung total Kanton:	4 – max. 35 MW_{th}
Nutzbare Energie pro Jahr:	12 – max. 100 Mio. kWh/a (~ 1 – 10 Mio. Liter Heizöl)

**Annahme nur in Tälern, relevante Bruchstrukturen im km-Abstand, begrenzte Anzahl Bohrplätze, Berücksichtigung thermischer Kurzschluss*

Nutzungsart:

Strom, Direktwärmenutzung, evtl. kombiniert mit Nutzung bzw. Verstromung angetroffenes Erdgas

Erkundungsziele:

- Nachweis einer grösseren Bruchstruktur mittels 3D-Seismik
- Erbohren und Testen der Struktur
- Nachweis, dass die geklüfteten Karbonate entlang der Bruchzonen auch in grösserer Tiefe durchlässig, wasserführend und nachhaltig ergiebig sind
- Grundlagendaten erheben zu Zufluss, Infiltration, Geochemie, Alter, ...

Vorgehen für ein Pilotprojekt:

1. Kreuzungsbereich Kreide-, Malm-Kalke oder Muschelkalk mit Bruchzone mit Reflexionsseismik aufdecken (3D-Seismik wird notwendig sein)
2. Seismische Risikoanalyse bzgl. spürbarer Erdbebengefährdung & Erdgasführung
3. Sondierbohrung (Tiefe je nach Standort 4-6 km u. T.; im Aar-Massiv weniger tief; je nach Standort abgelenkt)
4. **Aufgrund hoher Fündigkeitsrisiken & Bohrkosten sollte zwingend auf eine Multiexploration mit verschiedenen Zielhorizonten gesetzt werden**
5. Pumptests, geochemische Messungen usw.
6. Stimulationsmassnahmen (Ansäuern) und Langzeitpumptest
7. Bei Erfolg Erstellen zweiten Brunnen der Dublette und Zirkulationstest

Kosten (je nach Lage, Fläche Seismik, Bohrtiefe 4-6 km u. T., Ausbau, Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen):

Reflexionsseismik:	2 – 8 Mio. CHF
Sondierbohrung inkl. Pumptest, Monitoring:	40 – 60 Mio. CHF
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	40 – 60 Mio. CHF

Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz).

Dauer (stark abhängig von Verfügbarkeit, deshalb grosse Bandbreite):

Vorgängige Planung, Bewilligungen:	6 – 12 Monate
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung	8 – 14 Monate
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung	14 – 24 Monate
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest	10 – 16 Monate

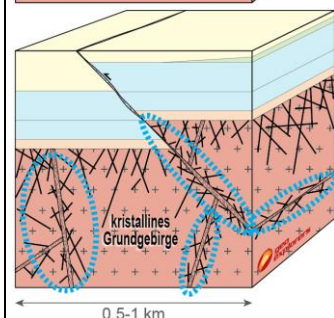
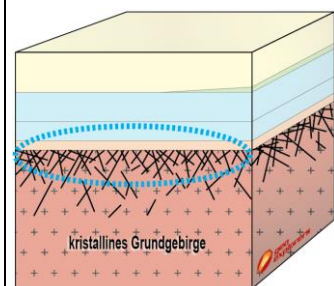
Wie die letzten Geothermieprojekte zeigen, muss im Fall von solch tiefen Bohrungen mit mehreren Jahren für die Entscheidungsfindung, Finanzierung, Planung, Bewilligungen, Ausschreibungsphase usw. gerechnet werden.

C + D Play geklüftetes Kristallin

Playtyp: ehemalige verwitterte und somit geklüftete Landoberfläche des kristallinen Grundgebirges, sowie geklüftetes Kristallin in & entlang von Bruchzonen im Grundgebirge, inkl. Buntsandstein

Tektonik:

kristallines Grundgebirge / Aar-Massiv



bevorzugte Projektorte:

bevorzugt nördl./südl. Permokarbon-Trog (unter Permokarbon zu tief)



Chancen:

- Insb. im Kt. AG bestehen einzelne Nachweise in Bohrungen, dass das Top Kristallin verwittert und bis ca. 150 – 200 m (z. T. bis 500 m) geklüftet und somit durchlässig sein kann, sowie dass durchlässige Bruchzonen und Klüfte im tieferen Kristallin vorliegen (z. B. Engerfeld, Schafisheim, Leuggern, Kaisten; siehe auch Nagra NTB 19-02)
- In der 5 km tiefen Bohrung Basel-1 gab es Indikationen für eine leicht erhöhte Durchlässigkeit am Top Kristallin (Klüfte, Verwitterungszone ca. 100 m mächtig, geringe Temperatur-Anomalien evtl. aufgrund konvektiven Grundwasserflusses). Es gab aber keine Spülverluste, Porenraum oder Zuflüsse.
- Gemittelte Durchlässigkeiten verwittertes Kristallin $k_f = 5 \times 10^{-8}$ m/s mit hoher Streuung; in Klüft - bzw. grossen Störzonen $k_f = 10^{-5}$ bzw. 2×10^{-7} m/s (in Signorelli & Kohl 2006), abnehmend mit der Tiefe
- Verwittertes Kristallin nicht an lokale Bruchstrukturen gebunden → Bohrstandort relativ standortunabhängig
- Falls Bruchzonen im Muschelkalk erfolgreich getestet werden und Anzeichen für aufsteigende Felsgrundwässer aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass die Verlängerung der Bruchzonen in die Tiefe, also im kristallinen Grundgebirge ebenfalls durchlässig und wasserführend sind.
- Aufgrund der grösseren Tiefe können sicher Temperaturen, ausreichend für die Stromproduktion erwartet werden.
- Geochemisch sind die Kristallinwässer oft weniger stark mineralisiert und somit weniger problematisch als in den anderen Plays (Nagra NTB 19-02).
- Eine potentielle bedeutende Bruch-/Störzone ist sicher vorhanden (Überschiebung Aar-Massiv auf autochthones Mesozoikum), angebohrt im Basis-Lötschbergtunnel. Dort aber nicht ausreichend wasserführend, evtl. weil nicht Kristallin-Kristallin sondern Kristallin-Permokarbon-Kontakt.

Risiken:

- Fehlende Nachweise und sehr geringer Kenntnisstand in Kantonen Nid- und Obwalden
- Unklar, ob in grösseren Tiefen >2 km noch ausreichende Durchlässigkeiten und Ergiebigkeiten vorliegen. Messwerte zeigen klar abnehmende Durchlässigkeiten und Klüftdichte mit der Tiefe sowie stark variierende Mächtigkeit der Verwitterungsschicht (z. B. in Signorelli & Kohl 2006). Die meisten Tiefbohrungen zeigen in den grossen Tiefen nicht ausreichende Durchlässigkeiten (z. B. Trienli-1, Otterbach-1, Basel-1). Auch die kürzlich erstellt Geothermiebohrung Lavey-1 mit Bohrziel Bruchzonen / Klüfte im Kristallin bestätigt dies mit zu geringen Wasserzutritten von <2 l/s.
- Es scheint, dass verwittertes Kristallin nur dort ausreichend durchlässig ist, wo kein bzw. kaum Permokarbon das Kristallin überlagert (im Untersuchungsgebiet Permokarbon aber weit verbreitet).
- Durchlässige Zonen im Kristallin lassen sich kaum geophysikalisch aufdecken.

Nachweise:

- Keine im Untersuchungsgebiet
- Einzelne weniger tiefe Nachweise im Kt. Aargau (z. B. Bad Zurzach 8.5 l/s & Engerfeld bei Rheinfelden 20 l/s)
- Tiefbohrungen mit zu geringen Durchlässigkeiten & Wasserzuflüssen überwiegen (siehe oben)
- Diverse Tiefbohrungen (z. B. Kaisten, Leuggern, Weiach, Nagra NTB 19 - 02) zeigen, dass die Matrixdurchlässigkeit bzw. undeformierte Kristallingesteine generell mit k_f - Werten von $<10^{-10}$ m/s undurchlässig sind. In permeablen Störzonen und im oberflächennah verwitterten Kristallin wurden aber Werte von 10^{-4} bis 10^{-8} m/s gemessen (in Signorelli & Kohl 2006). Auch in Tiefen bis >1'000 m wurden in wenigen Nagra Bohrungen entlang von einzelnen grösseren Störzonen k_f Werte von $>10^{-6}$ m/s ermittelt.

Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur / Förderrate: $>150^\circ\text{C}$ / 1 – 30 l/s (keine Referenzdaten, letztere in grossen Störzonen)
 therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen: **0.3 – 10 MW_{th}** (letztere sehr ungewiss)
 Fündigkeitschancen / Reproduzierbarkeit: **gering - mittel** (für hohe Schüttungsraten)
 Anzahl Dubletten ganzer Kanton: 2 – 4 (insb. geologisch + bohrplatztechnisch limitiert)
 Therm. Kälteleistung total Kanton: **<1 – max. 20 MW_{th}** (sicher nicht alle Brunnen mit max. Förderleistung)
 Nutzbare Energie pro Jahr: 2 – max. 60 Mio. kWh/a (~ 0.2 – 6 Mio. Liter Heizöl)

Erkundungsziele:

- Nachweis Top Kristallin, Grenzen Permokarbon & grösserer Bruchstrukturen mittels 3D-Seismik
- Erbohren & Testen der Struktur u./o. Klüftung im verwitterten Top Kristallin (wahrscheinlich angepasste Erschliessungsmethoden hinsichtlich Bohrpfad, Stimulationsmassnahmen usw. notwendig, damit möglichst grosses Reservoirvolumen angeschlossen werden kann)
- Nachweis, dass das geklüftete Kristallin entlang von Bruchzonen sowie in der Verwitterungszone auch in grösserer Tiefe durchlässig, wasserführend und nachhaltig ergiebig ist
- Grundlagendaten erheben zu Zufluss, Infiltration, Geochemie, Alter, ...

Vorgehen für ein Pilotprojekt:

1. Bruchzonen mit Reflexionsseismik aufdecken (3D-Seismik notwendig)
2. Risikoanalyse bzgl. spürbarer Erdbebengefährdung & Erdgasführung
3. Sondierbohrung (Tiefe je nach Standort >5-6 km u. T.; im Aar-Massiv weniger tief; je nach Standort abgelenkt)
4. **Aufgrund hoher Fündigkeitsrisiken & Bohrkosten sollte zwingend auf eine Multiexploration mit verschiedenen Zielhorizonten gesetzt werden**
5. Pumptests, geochemische Messungen usw.
6. Evtl. Stimulationsmassnahmen und Langzeitpumptest
7. Bei Erfolg Erstellen zweiten Brunnen der Dublette und Zirkulationstest

Kosten (je nach Lage, Fläche Seismik, Bohrtiefe >5-6 km u. T., Ausbau, Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen):

Reflexionsseismik:	2 – 8 Mio. CHF
Sondierbohrung inkl. Pumptest, Monitoring:	50 – 70 Mio. CHF
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	50 – 70 Mio. CHF

Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz).

Dauer (stark abhängig von Verfügbarkeit, deshalb grosse Bandbreite):

Vorgängige Planung, Bewilligungen:	6 – 12 Monate
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung	8 – 14 Monate
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung	16 – 30 Monate
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest	12 – 24 Monate

Wie die letzten Geothermieprojekte zeigen, muss im Fall von solch tiefen Bohrungen mit mehreren Jahren für die Entscheidungsfindung, Finanzierung, Planung, Bewilligungen, Ausschreibungsphase usw. gerechnet werden.

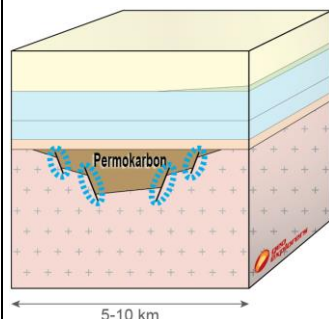
Nutzungsart:

Strom, Direktwärmenutzung

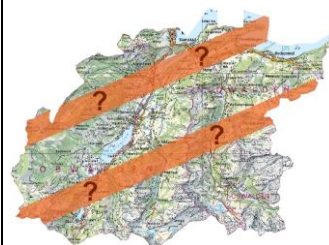
E Permokarbon-Trogrand

Playtyp: Grabenrand von grossen Permokarbon-Trögen (ehemalige grosse Bruchzone)

Tektonik: Permokarbon-Trog



bevorzugte Projektorte: genaue Lage unbekannt, vermuteter Verlauf auf nachfolgender Karte gemäss Indizien auf Seismik



Chancen:

- Ein breiter ca. E-W verlaufender Permokarbon-Trog ist auf der bestehenden Seismik erkennbar
- Die Trogränder stellen ehemalige grosse Bruchflächen dar, die potentiell geklüftet und somit durchlässig sein können. In Nagra NTB85-11 wird von Durchlässigkeiten $k_f = 10^{-5}$ m/s ausgegangen.
- In verschiedensten Publikationen wird vermutet, dass entlang vom Permokarbon - Trogrand im Kt. AG Thermalwässer zirkulieren (z. B. Signorelli & Kohl, 2006). Die dichten Permokarbonsedimente zwingen evtl. die Kristallinwässer am Permokarbon - Trogrand zum Aufstieg. Die Geochemie zeigt in Bad Schinznach und Baden, dass hydraulische Verbindungen zwischen Kristallin, Permokarbon bis in den Muschelkalk bestehen (Nagra NTB19-02)
- Einzelne Bohrungen (z. B. Engerfeld, Mumpf, Weiach) zeigen, dass Bruchzonen auch innerhalb vom Permokarbon wasserführend sein können.

Risiken:

- Die genaue Lage, Geometrie und Tiefe des eigentlichen Permokarbon-Troges im Untersuchungsgebiet kann nur vermutet werden. Auch die Ausbildung und Mächtigkeit der permokarbonischen Sockelbedeckung ist unbekannt. Entsprechend unsicher ist die Tiefe einer Sondierbohrung.
- Die Sedimente des Permokarbons in Tiefbohrungen sind aufgrund der grossen Versenkung diagenetisch verdichtet / zementiert und damit generell nicht bis gering durchlässig. Auch wenige diskrete geklüftete Bruchzonen, in denen Durchlässigkeiten von bis 10^{-7} m/s bestimmt wurden, sind eher ungeeignet (Nagra NTB19-02).
- Permokarbon kann zwar auf der Seismik erkannt werden, aber die Trogränder sind oft nicht eindeutig und bilden eine breite Zone von mehreren Bruchzonen, sodass ein Bohrziel durch die Randstörung nur mit Unsicherheiten definiert werden kann. Mit einer abgelenkten Bohrung durch die Zone können die Chancen einer Fündigkeit erhöht werden.

Nachweise:

- Bisher gibt es in der Schweiz keine Bohrung in den Permokarbon - Trogrand. Entsprechend können Durchlässigkeiten, mögliche Schüttungsraten usw. nur angenommen werden.

Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur:	>150 °C
Förderrate:	? 1 – 20 l/s (unbekannt, bisher kein Trogrand angebohrt)
therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	0.3 – 6 MW_{th}
Fündigkeitschancen:	gering (aufgrund vom derzeitigen Wissensstand)
Reproduzierbarkeit:	gering
Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	1 – 3 (insb. geologisch + bohrplatztechnisch limitiert)
Therm. Kälteleistung total Kanton:	<1 – max. 15 MW_{th} (sicher nicht alle Brunnen mit max. Förderleistung)
Nutzbare Energie pro Jahr:	1 – max. 45 Mio. kWh/a (~ 0.1 – 4.6 Mio. Liter Heizöl)

Nutzungsart:

Strom, Direktwärmenutzung

Erkundungsziele:

- Nachweis Trögränder des Permokarbons mit 3D-Seismik
- Erbohren & Testen der Trogränder
- Nachweis, ob Trogränder durchlässig und wasserführend sind
- Grundlagendaten erheben zu Zufluss, Infiltration, Geochemie, Alter, ...

Vorgehen für ein Pilotprojekt:

1. Trogrand mit Reflexionsseismik aufdecken
2. Risikoanalyse bzgl. spürbarer Erdbebengefährdung & Erdgasführung
3. Sondierbohrung in Trogrand-Struktur
4. Pumptest, geochemische Messungen usw.
5. Evtl. Stimulationsmassnahmen und Langzeitpumptest
6. Bei Erfolg Erstellen zweiten Brunnen der Dublette und Zirkulationstest

Kosten (je nach Lage, Fläche Seismik, Bohrtiefe >5-6 km u. T., Ausbau, Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen):

Reflexionsseismik:	2 – 8 Mio. CHF
Sondierbohrung inkl. Pumptest, Monitoring:	50 – 70 Mio. CHF
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	50 – 70 Mio. CHF

Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz).

Dauer (stark abhängig von Verfügbarkeit, deshalb grosse Bandbreite):

Vorgängige Planung, Bewilligungen:	6 – 12 Monate
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung:	8 – 14 Monate
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung:	16 – 30 Monate
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest:	12 – 24 Monate

Wie die letzten Geothermieprojekte zeigen, muss im Fall von solch tiefen Bohrungen mit mehreren Jahren für die Entscheidungsfindung, Finanzierung, Planung, Bewilligungen, Ausschreibungsphase usw. gerechnet werden.

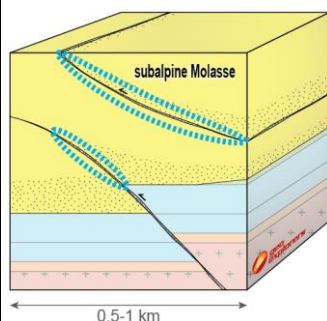
F Play Bruch- / Störzonen in Molasse-Sandsteinen

Playtyp:

Geklüftete kompetente Gesteinsschichten entlang von Bruchzonen in der subalpinen Molasse

Tektonik:

Störzonen / Überschiebungsbahnen in der subalpinen Molasse unter den helvetischen Decken



bevorzugte Projektorte:

nach derzeitigem Kenntnisstand: nördl. Linie Kaiserstuhl – Melchtal – Grafenort



Chancen:

- Aufgrund der bestehenden Kenntnisse liegen mächtige Sandstein- und Nagelfluhbänke vor, welche potentiell porös und folglich durchlässig sowie wasserführend sein können. Zudem werden grössere Bruch- und Störzonen (Überschiebungen) in der subalpinen Molasse vermutet. Kompetente Gesteine (z. B. Sandsteinbänke) die von diesen Bruchzonen geschnitten werden, können potentiell geklüftet und somit durchlässig sein. Gründe, warum die Geothermie-Bohrung Weggis-1 bis in eine Tiefe von 2'133 m erstellt wurde. In dieser wurde auch eine grössere Störzone durchbohrt.

Risiken:

- Während im nördlichen Mittelland Sandstein- und Konglomerat-Lagen ausreichend porös, durchlässig und wasserführend sein können (funktionierende Brunnen mit 5-8 l/s bestehen), nimmt die Porosität und Durchlässigkeit nach Süden deutlich ab. Dies zeigen verschiedenste Bohrungen. Die am nächst-gelegenen Bohrungen Weggis-1 und Entlebuch-1 weisen eine niedrige Matrix-Porosität von max. 10% auf. Selbst durchbohrte grössere Bruch- und Störzonen waren nicht bzw. ungenügend wasserführend (<1 l/s).
- Hinzu kommt, dass die potentiellen Sandstein- und Konglomeratlagen weniger stark zu einer intensiven Klüftung neigen, wie es die reinen Kalkstein- und Dolomitlagen zeigen. Zudem zeigt die Bohrung Weggis-1, dass möglicher Porenraum in den Bruchzonen durch sekundäre Ausfällungen verfüllt ist.
- Auf Basis des Kenntnisstands muss angenommen werden, dass in der Subalpinen Molasse, welche noch tiefer versenkt & stärker diagenetisch überprägt wurde, die Chance gering ist, ergiebige wasserführende Lagen zu erbohren.
- Hinzukommt, dass die bisherigen seismischen Vermessungen den internen Aufbau der subalpinen Molasse kaum abbilden konnten. Ob und wie gut mögliche Bohrziele (z. B. Kreuzungspunkt von kompetenten Lagen mit Störzonen) mit neuen Vermessungen aufgedeckt und lokalisiert werden können, ist fraglich & mit grossem Aufwand verbunden.
- Erdgas-Problematik muss bei der technischen Umsetzung berücksichtigt werden

Nachweise:

- Weggis-1 hat mächtige Sandstein- und Nagelfluh-Lagen sowie Bruchzonen erbohrt. Diese zeigten aber eine nicht verbundene Matrixporosität (bis max. $\pm 10\%$) und zu geringe Durchlässigkeiten auch in Bruchzonen. Während Pumptests von ca. 1 l/s wurde das Bohrloch innert Stunden leergepumpt.
- Entlebuch-1 hat in der Molasse ebenfalls eine nicht verbundene Matrixporosität (bis $\pm 10\%$) und keine nennenswerte Wasserführung angetroffen.

Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur:	20 – 140 °C (grosse Bandbreite, da Molasse alle Tiefen von 0-5km abdeckt)
Förderrate:	0.1 – 5 l/s (wahrscheinlich eher bei tiefen Werten)
therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	0 – 1.5 MW _{th}
Fündigkeitschancen:	gering – mittel
Reproduzierbarkeit:	mittel
Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	2 – 6 Dubletten
Therm. Kälteleistung total Kanton:	<1 – max. 5 MW _{th} (nicht jede Dublette wird die max. Leistung erbringen)
Nutzbare Energie pro Jahr:	<1 – max. 15 Mio. kWh/a (<0.1 – 1.5 Mio. Liter Heizöl)

Nutzungsart:

Direktwärmenutzung, Wärmeverbund, Thermalbäder

Erkundungsziele:

- Konzept, wie die lokalen Vorkommen vorgängig lokalisiert und bewertet werden können, damit eine risikoarme Erschliessung möglich wird
- Nachweis von geklüfteten und somit durchlässigen Molasse-Sandstein- bzw. Nagelfluhbänken im Kreuzungsbereich mit Bruchzonen
- Grundlagendaten erheben zu Fliesswegen, Infiltration, Geochemie, Alter, ...
- Testen, wie die Ergiebigkeit erhöht werden kann bzw. wie ein möglichst grosses Volumen angeschlossen werden kann (mit Hilfe von angepasster Bohrtechnik, Bohrfad oder Stimulationsmassnahmen)

Vorgehen für ein Pilotprojekt:

- Internen Aufbau der subalpinen Molasse mit Reflexionsseismik aufdecken
- Risikoanalyse bzgl. spürbarer Erdbebengefährdung & Erdgasführung
- Sondierbohrung in Kreuzungsbereich Bruch – Sandstein- / Nagelfluhbänke; Tiefe variiert je nach Standort und Tiefenlage der Bruchzone; von Vorteil werden mehrere Zonen angebohrt und getestet
- Pumptests, geochemische Messungen usw.
- Stimulationsmassnahmen (Ansäuern) und Langzeitpumptest
- Bei Erfolg Erstellen zweiten Brunnen der Dublette und Zirkulationstests

Kosten (je nach Lage, Seismik, Bohrtiefe 500 – 5'000 m u. T., Ausbau, Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen):

Reflexionsseismik:	2 – 8 Mio. CHF
Sondierbohrung inkl. Pumptest, Monitoring:	1 – 50 Mio. CHF
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	1 – 50 Mio. CHF

Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz).

Dauer (abhängig von Verfügbarkeit & Bohrtiefe, deshalb grosse Bandbreite):

Vorgängige Planung, Bewilligungen:	6 – 12 Monate
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung:	8 – 14 Monate
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung:	8 – 30 Monate
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest:	8 – 24 Monate

Wie die letzten Geothermieprojekte zeigen, muss im Fall von tiefen Bohrungen mit mehreren Jahren für die Entscheidungsfindung, Finanzierung, Planung, Bewilligungen, Ausschreibungsphase usw. gerechnet werden.

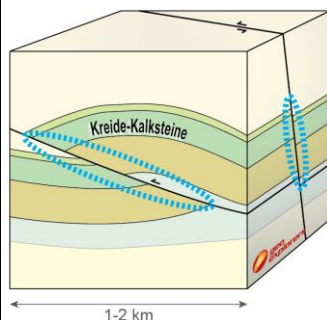
G Play Bruch- / Störzonen in Kalksteinen der helvetischen Decken

Playtyp:

Geklüftete und z. T. verkarstete Malm- und Kreide-Kalke entlang von Bruch- und Störzonen in den helvetischen Decken; von Vorteil dort, wo sich steil-stehende Bruchzonen mit Überschiebungen schneiden

Tektonik:

Verfaltete, verschuppte und von steilen Brüchen durchzogene Axen- und Drusberg-Decke



bevorzugte Projektorte:

nahezu ganzer Kanton; bevorzugt zw. Alpnach u. Lungern, sowie zw. Stans u. Grafenort bzw. zw. Samen u. Stans



Chancen:

- Während der Platznahme und Deformation der helvetischen Decken im Oligozän und Miozän wurden die mesozoischen Gesteinsschichten verfaultet, verschuppt und überschoben. Zudem wurden die Schichten von zahlreichen steilen Brüchen durchschlagen. Entlang von den Stör- und Bruchzonen sind die spröden Gesteine (insbesondere Kreide- und Malm-Kalke) geklüftet und teilweise sekundär verkarstet. Insbesondere in den Kreuzungsbereichen der Bruch- und Störzonen sind in den spröde-reagierenden Gesteinen hohe Durchlässigkeiten und Wasserführung zu erwarten. Wasserzutritte und Spülverluste in Bohrungen und Tunneln zeigen dies.
- Ermittelte max. Durchlässigkeiten von $k_f = 10^{-4}$ bis 10^{-6} m/s und Transmissivitäten bis 7×10^{-4} m²/s (Nagra NTB96-01)
- Angetroffene Erdgas-Vorkommen in Tunneln und EWS, sowie natürliche Entgasungen z. B. um Samen zeigen, dass Wegsamkeiten im tiefen Untergrund vorhanden sein müssen, entlang dieser das Erdgas nach oben gelangt (vermutet wird die Herkunft im Permokarbon).
- Potentielle Schichten sind z. B.: Öhrli-Kalke, Schrattenkalk-Fm., Quinten-Fm.

Risiken:

- Die höchsten Durchlässigkeiten und Wasserführungen werden im Kreuzungsbereich von Kalkgesteinen entlang der Überschiebungen mit steilen Querbrüchen erwartet. Diese lokalen Zonen müssen entsprechend vorweg gut erkundet und punktgenau erbohrt werden.
- Abnehmende Durchlässigkeit mit der Tiefe (unter 400 m u.T. $k_f = <10^{-6}$ m/s, Transmissivität max. $10^{-6} - 10^{-7}$ m²/s, Nagra NTB96-01); in Störzonen sind aber höhere Werte nicht auszuschliessen.
- Erbohrte wasserführende Störzonen im Lötschberg-Basistunnel zeigen, dass die Abstände zwischen solch wasserführenden Zonen bei wenigen 100 m bis wenigen km liegen; je näher an der Oberfläche, desto häufiger werden aber Wasserzutritte angetroffen (Oberflächenprozesse wie rezenter Karst o. Exfoliations- / Entlastungsklüfte begünstigen eine höhere und häufigere Wasserführung)
- Karst generell nur bis ca. 100 – 300 m unterhalb heutigem bzw. ehemaligem Vorfluter-Niveau

Nachweise (Beispiele):

- Tunnelbauten und EWS-Bohrungen zeigen immer wieder starke und ergiebige Wasserzutritte
- Viele Bruchzonen sind an der Oberfläche kartierbar, welche auch in grösseren Tiefen erwartet werden dürfen
- Lötschberg-Basistunnel mit angebohrten Störzonen mit eingependelten Schüttungsraten von 300-1'000 l/min; dazwischen trockene Strecken in den Kalksteinen der helvetischen Decken
- Einige fundige Bohrungen in ähnlicher Situation im Jura: Bsp. Bad-Schinnznach mit 8 l/s, Bad Lostorf bis 100 l/s

Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur:	30 – 55 °C
Förderrate:	5 – 30 l/s
therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	0.3 – 3 MW _{th} (realistisch sind ca. 0.7-1 MW _{th})
Fündigkeitschancen:	mittel (Kreuzungsbereiche müssen genau lokalisierbar sein)
Reproduzierbarkeit:	mittel – hoch
Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	6 – 12
Therm. Kälteleistung total Kanton:	3 – max. 20 MW _{th} (nicht jede Dublette wird die max. Leistung erbringen)
Nutzbare Energie pro Jahr:	10 – max. 100 Mio. kWh/a (1 – 10 Mio. Liter Heizöl)

Nutzungsart:

Wärme mit Wärmepumpe für kleine Wärmeverbünde / grössere Überbauungen, Thermalbäder

Erkundungsziele:

- Grundsätzlich Duplizierung der Nutzungen am Jura-Südfuss in ähnlichem geol. Setting
- Definition von Bohrzielen (Abklärung, ob evtl. lokale 2D-Seismik o. schlanke Abtastbohrungen ausreichen)
- Nachweis von geklüfteten und somit durchlässigen Kalksteinen im Kreuzungsbereich mit Bruchzonen
- Grundlagendaten erheben zu Fließwegen, Infiltration, Geochemie, Alter, ...
- Testen, wie die Ergiebigkeit erhöht werden kann bzw. wie ein möglichst grosses Volumen angeschlossen werden kann (mit Hilfe von angepasster Bohrtechnik, Bohrfad oder Stimulationsmassnahmen)

Vorgehen für ein Pilotprojekt:

- Kreuzungsbereich Kalksteine mit Bruchzonen mit Reflexionsseismik aufdecken (das Kosten-Nutzen-Verhältnis, ob eine 2D o. 3D Seismik sinnvoll ist, ist je nach Standort zu klären)
- Sondierbohrung (je nach Standort 0.5-1.5 km u. T., evtl. abgelenkt) in Kreuzungsbereich; von Vorteil werden mehrere Zonen angebohrt & getestet
- Pumptests, geochemische Messungen usw.
- Stimulationsmassnahmen (Ansäuern) und Langzeitpumptest
- Bei Erfolg Erstellen zweiten Brunnen der Dublette und Zirkulationstest

Kosten (je nach Lage, Bohrtiefe 0.5-1.5 km u. T., Bohrfad, Ausbau,

Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen):

Reflexionsseismik (2D / 3D):	0.2-0.4 / 0.7-1.5 Mio. CHF
Sondierbohrung inkl. Pumptest, Stimulation:	2 – 6 Mio. CHF
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	2 – 6 Mio. CHF

Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz).

Dauer (abhängig von Verfügbarkeit & Bohrtiefe, deshalb grosse Bandbreite):

Vorgängige Planung, Bewilligungen:	4 – 10 Monate
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung	4 – 12 Monate
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung	8 – 16 Monate
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest	8 – 16 Monate

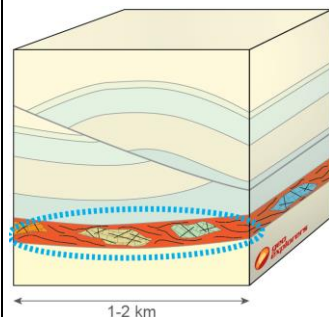
H Play Basis Helvetische Decken (Mélange / Abscherhorizont)

Playtyp:

Zerschertes & geklüftetes Gestein an der Basis der helvetischen Decken

Tektonik:

Basis bzw. basaler Abscherhorizont der Axen- und Drusberg-Decke



bevorzugte Projektorte:

nahezu ganzer Kanton; bevorzugt zw. Alpnach u. Lungern, sowie zw. Stans u. Grafenort bzw. zw. Samen u. Stans



Chancen:

- Deckenkontakte bzw. der Abscherhorizont von Decken sind generell die am stärksten deformierten Gesteine. Handelt es sich um spröde reagierende Gesteine entlang der Störzone, so können diese stark zerklüftet oder komplett zertrümmert (z. B. tektonische Brekzien o. Kakirite) sein. Solche Abscherhorizonte sind dm- bis mehrere 10er Metermächtig und wären somit bevorzugte geothermische Bohrziele. Ein solcher Abscherhorizont bildet die Basis der Axen- und Drusberg-Decke.
- In den Nagra-Bohrungen am Wellenberg wurden erhöhte Durchlässigkeiten & Transmissivitäten in der Mélange festgestellt. Zudem erfolgten Erdgas- und artesisches Wasserzutritte.
- Eine abweichende geochemische Signatur der Grundwässer deutet auf einen eigenen Grundwasser-Leiter hin.
- Kann zusammen mit Play G erkundet werden.

Risiken:

- Der genaue Aufbau der Mélange über den ganzen Abscherhorizont hinweg ist unbekannt. Generell erfolgt ein Abscheren von Decken in «weichen» Gesteinsschichten, z. B. tonigen Lagen, Salz oder Gips/Anhydrit-reichen Schichten. Im vorliegenden Fall wird vermutet, dass die Abscherung in schiefrig, tonig-mergeligen Lagen erfolgt ist. In diesem Fall sind die Gesteine zwar auch stark deformiert, aber die Durchlässigkeit wird nicht so stark erhöht, wie z. B. im Fall von Kalksteinen. Zwar werden sicher spröde und somit geklüftete Kalk- o. Dolomitgesteine in der tonig-mergeligen Matrix schwimmen, aber diese Gesteinsblöcke weisen zu kleine Volumen auf und liegen isoliert von einander in der Matrix, sodass keine ergiebigen Wasserzutritte zu erwarten sind.
- Die Nagra-Bohrungen am Wellenberg haben in der Mélange Transmissivitäten bis 10^{-6} m²/s und kf-Werte bis 10^{-8} m/s ergeben. Diese Werte weisen eher auf eine ungenügende Durchlässigkeit und Wasserführung hin.
- Evtl. wird der basale Abscherhorizont von grösseren steil-stehenden Brüchen gekreuzt (wie in den Talachsen vermutet wird), so könnten im Kreuzungsbereich eine höhere Durchlässigkeit und Wasserführung erwartet werden. Diese lokalen Zonen müssen entsprechend vorweg gut erkundet und punktgenau erbohrt werden.

Nachweise (Beispiele):

- Bohrungen Wellenberg SB1 & SB3 mit erhöhten Durchlässigkeiten, Wasser- und Erdgaszutritten. Angetroffenen Gesteine (schiefrig, tonig-mergelig) und ermittelten Werte für Durchlässigkeit und Transmissivität zu gering für eine ergiebige geothermische Nutzung (Nagra NTB96-01).

Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur:	40 – 70 °C
Förderrate:	0 – 20 l/s (unbekannt, stark variierend in Lithologie, Strukturierung, Mächtigkeit, wahrscheinlich eher gering durchlässig / ergiebig, weil tonig-mergelig)
therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	0 – 2 MW _{th}
Fündigkeitschancen:	gering – mittel
Reproduzierbarkeit:	mittel
Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	4 – 10
Therm. Kälteleistung total Kanton:	0 – max. 20 MW _{th}
Nutzbare Energie pro Jahr:	0 – max. 60 Mio. kWh/a (0 – 6 Mio. Liter Heizöl)

Nutzungsart:

Wärme mit Wärmepumpe, evtl. Direktwärme für kleine Wärmeverbünde / grössere Überbauungen, Thermalbäder

Erkundungsziele:

- Definition von Bohrzielen, von Vorteil mit Play G erkunden
- Nachweis von geklüfteten und somit durchlässigen Gesteinen in Mélange
- Grundlagendaten erheben zu Fließwegen, Infiltration, Geochemie, Alter, ...
- Testen, wie die Ergiebigkeit erhöht werden kann bzw. wie ein möglichst grosses Volumen angeschlossen werden kann (mit Hilfe von angepasster Bohrtechnik, Bohrfad oder Stimulationsmassnahmen)

Vorgehen für ein Pilotprojekt:

1. Tiefe & Geometrie Mélange / Abscherhorizont definieren (wahrscheinlich reicht eine 2D-Seismik, evtl. sogar nur schlanke Abtastbohrungen)
2. Sondierbohrung (je nach Standort 1-2.5 km u. T.) in Mélange; von Vorteil wird die Mélange mit Play G getestet
3. Pumptest, geochemische Messungen usw.
4. Stimulationsmassnahmen (Ansäuern) und Langzeitpumptest
5. Bei Erfolg Erstellen zweiten Brunnen der Dublette und Zirkulationstest

Kosten (je nach Lage, Bohrtiefe 1-2.5 km u. T., Bohrfad, Ausbau, Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen):

Reflexionsseismik (2D):	0.2 – 1 Mio. CHF
Sondierbohrung inkl. Pumptest, Stimulation:	3 – 9 Mio. CHF
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	3 – 9 Mio. CHF

Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz).

Dauer (abhängig von Verfügbarkeit & Bohrtiefe, deshalb grosse Bandbreite):

Vorgänge Planung, Bewilligungen:	6 – 10 Monate
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung	4 – 12 Monate
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung	12 – 20 Monate
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest	12 – 20 Monate

Wie die letzten Geothermieprojekte zeigen, muss im Fall von tiefen Bohrungen mit mehreren Jahren für die Entscheidungsfindung, Finanzierung, Planung, Bewilligungen, Ausschreibungsphase usw. gerechnet werden.

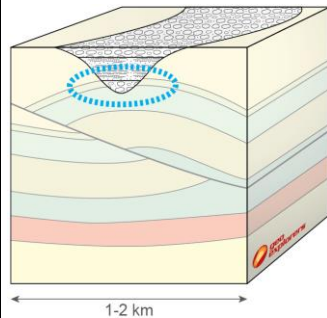
I Play Basale Schotter in Rinnen

Playtyp:

Basale Kieslagen in übertieften eiszeitlichen Rinnen (Lockergestein)

Genese:

Bis 400m tiefe Rinnen, die sich während den Eiszeiten unter dem Eis gebildet haben und an der Basis mit kiesigen Lagen und darüber meist mit Stillwasser-Sedimenten verfüllt wurden.



bevorzugte Projektorte:

nach derzeitigem Kenntnisstand bevorzugt zw. Alpnachstad u. Sarnen & zw. Stans u. Buochs



Chancen:

- In diversen eiszeitlichen Rinnen (Bern, Muri b. B., Münsingen, Biel, Kloten, Baar, Seon) wurden an deren Basis mehrere 10er Meter mächtige durchlässige, wasserführende Kiese bzw. glaziofluviale Schotter erbohrt. Es handelt sich um alte, sauerstoff-arme und gering mineralisierte Grundwässer. Diese eignen sich gut für eine Wärmenutzung. Zwischen Stans und Buochs sowie zwischen Sarnen und Alpnachstad dürfen basierend auf den bestehenden seismischen Erkundungen ebenfalls tiefe Rinnen angenommen werden (Bodmer 1996). Insbesondere zwischen Stans und Buochs werden Rinnentiefen von >300 m angenommen.
- Das Grossprojekt am Flughafen Zürich bestätigt nach diversen Sondierbohrungen und Testbrunnen, dass mit Cluster-Lösungen thermische Leistungen von 5-10 MW_{th} möglich sind. Zudem hat sich gezeigt, dass es sich bei diesen tiefen Grundwasserleitern um zusammenhängende und geschlossene Aquifere mit geringen Grundwasser-Fliessraten handelt. Pumpversuche und Nutzungen ohne Rückgabe des geförderten Grundwassers offenbaren zudem, dass sich die Aquifere nur sehr langsam regenerieren und somit ein dauerhafter Entzug ohne ausgeglichene Bilanz (z. B. im Fall der Trinkwassernutzung) nicht nachhaltig ist, weil der Grundwasser-Spiegel konstant sinken würde. Entsprechend geeignet sind die basalen Schotterlagen für Aquiferspeicherlösungen für Wärme und Kälte.
- Aufgrund der geringen Tiefe rasch und günstig zu erkunden. Nachweise sind innerhalb eines Jahres möglich.
- Hohe Schüttungsraten von 3'000 bis 5'000 l/min pro Brunnen wurden nachgewiesen.

Risiken:

- In den Kantonen Nid- und Obwalden sind zwar solche Rinnen vorhanden, aber es wurden die tiefen Rinnenbereiche noch nie erbohrt. Auch wurden diese noch nicht speziell z. B. geophysikalisch untersucht. Entsprechend vage sind die Rinnentiefe, Rinnengeometrie und interne Aufbau. Es kann somit derzeit nur auf Basis von anderen Rinnen angenommen werden, dass sich diese Rinnen auch eignen.
- Bevor ein Testbrunnen geplant und erstellt werden könnte, muss die Rinne vorweg mit einer Reflexionsseismik und einfachen Sondierbohrungen erkundet werden. Aufgrund der geringen Tiefe ist aber eine solche Erkundung rasch und vergleichbar günstig ausführbar.
- Geringes Temperaturniveau (ca. 15 bis 25 °C), was sich aber umgekehrt gut für die Aquiferspeicherung eignet.

Nachweise (Beispiele):

- Flughafen Zürich: Nachweis dass sicher >3'000 l/min pro Brunnen möglich ist; 2x Brunnen-Cluster mit je 7.5 MW_{th} in Planung (erste Dublette im Bau); 40-50m basale Schotter
- Muri b. Bern: Nachweis dass pro Brunnen ca. 5'000 l/min möglich sind; 1x Brunnen-Cluster mit 9 MW_{th} in Planung; >100 m mächtige Wechselfolge von glaziofluvialen Kiesen und verschwemmten Moränen
- Seon bei Lenzburg: seit 1988 in Betrieb; Singlette mit bis 1650 l/min für Trinkwasser & Wärmenutzung 1.35 MW; 38m basale Schotter; da nur Entzug sinkt GW-Spiegel konstant um ca. 75 cm/a

Potential (pro Brunnen und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur:	15 – 25 °C
Förderrate:	20 – 80 l/s (Annahme: basale Schotter wie in anderen Rinnen vorliegend)
therm. Kälteleistung pro Förderbrunnen:	0.5 – 3 MW _{th}
Fündigkeitschancen:	mittel – hoch
Reproduzierbarkeit:	mittel – hoch
Anzahl Dubletten ganzer Kanton:	10 – 20
Therm. Kälteleistung total Kanton:	5 – 50 MW_{th}
Nutzbare Energie pro Jahr:	15 – 150 Mio. kWh/a (1.5 – 15 Mio. Liter Heizöl)

Nutzungsart:

Wärme mit Wärmepumpe, Kältenutzung, Aquiferspeicher

Erkundungsziele:

- Definition Rinnentiefe, -geometrie, -aufbau
- Nachweis basale durchlässige, wasserführende Schotter
- Grundlagendaten erheben zu Grundwassergefälle, Geochemie, Alter, ...
- Ermittlung Brunnenleistung, Aquifereigenschaften
- Bewirtschaftungskonzept

Vorgehen für ein Pilotprojekt:

1. Rinnengeometrie mit Reflexionsseismik (2D-Linien) ermitteln
2. 1-3x Sondierbohrungen in Rinnenbasis → Definition lithologischer Aufbau Rinne und Nachweis Schotterlagen, Bestimmung Durchlässigkeit, Wasserführung, Wassertemperatur
3. Erstellung Testbrunnen mit Pumptests und Erhebung Aquifereigenschaften
4. Simulationen, Bewirtschaftungskonzept, Definition Standorte Brunnen
5. Erstellung weiterer Brunnen für Zirkulationstest
6. Bei Erfolg Konzessionsantrag und Erschliessung Aquifer

Kosten (je nach Bohrtiefe 0.3 km u. T., Anzahl Bohrungen, Ausbau, Testumfang, Verfügbarkeit Bohrfirmen, Linienanzahl, -länge):

Reflexionsseismik (2D):	0.1 – 0.4 Mio. CHF
Sondierbohrung(en) ausgebaut für Monitoring:	0.1 – 0.3 Mio. CHF
Testbrunnen inkl. Pumptest, Stimulationen:	0.6 – 0.9 Mio. CHF
Zweiter Brunnen inkl. Zirkulationstest:	0.6 – 0.9 Mio. CHF

Mit zunehmender Duplizierbarkeit verringern sich wie bei den EWS die Kosten (Standardvorgehen, Konkurrenz).

Dauer (abhängig von Verfügbarkeit, deshalb grosse Bandbreite):

Vorgängige Planung, Bewilligungen:	3 – 8 Monate
Reflexionsseismik inkl. Ausschreibung, Auswertung:	4 – 8 Monate
Sondierbohrung inkl. Ausschreibung, Tests, Auswertung:	6 – 12 Monate
Ausbau zur Dublette mit Zirkulationstest:	6 – 12 Monate

Wie die letzten Rinnenprojekte zeigen, hängt die Dauer der Erschliessung stark von der Verfügbarkeit der Seismik- und Bohrfirmen ab, aber auch davon wie das Projekt aufgelegt wird (in einzelnen Phasen oder als ein Paket) und wie lange die Entscheidungsfindung bzw. Finanzierung dauert. Grundsätzlich sind erste Nachweise innerhalb von einem Jahr möglich.

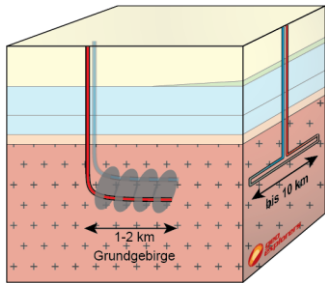
J Petrothermale Geothermie (EGS / AGS)

Playtyp:

i. W. künstlich generierte Wärmetauscher im kristallinen Grundgebirge

Tektonik:

Vorwiegend Grundgebirge



bevorzugte Projektorte:

ganzer Kanton, von Vorteil nicht im Bereich des tiefen Permokarbon-Troges und im Bereich tiefgreifender Bruch- und Störzonen bis ins Kristallin



Chancen:

- Mit EGS (Enhanced Geothermal System) oder petrothermaler Geothermie werden in grossen Tiefen typischerweise undichte Gesteine durch Einpressen von Wasser mit hohem Druck künstlich durchlässig gemacht und somit ein geothermisches Reservoir generiert. Im Fall AGS (Advanced Geothermal System) werden ähnlich zu den Erdwärmesonden kilometerlange horizontale Bohrlöcher zu Closed-Loops zusammengeschlossen. Der Vorteil ist, dass damit undurchlässige Gesteinsbereiche nutzbar gemacht werden, die sich hydrothermal nicht eignen, aber welche sehr heiss sind ($>100^{\circ}\text{C}$) und somit eine Strom- und Wärmeproduktion ermöglichen.
- Da solche geothermischen Reservoirs künstlich generiert werden, sind EGS- und AGS-Projekte eher standortunabhängig als die hydrothermalen Systeme, welche z. B. an Bruchzonen gebunden sind. Das Potential wäre somit sehr gross.
- Einige Pilotanlagen konnten zeigen, dass durch die hydraulische Stimulation meist von kristallinem Gestein die Gebirgsdurchlässigkeit deutlich erhöht werden konnte. Es gibt funktionierende Pilotanlagen, siehe unter Nachweise. Eines der ersten funktionierenden Forschungsprojekte ist Soultz-sous-forêts in Frankreich, welches erfolgreich eine Zirkulation erzeugen konnte, aber auch mit technischen Problemen und Ausfällungen aufgrund der Wasserchemie zu kämpfen hat.

Risiken:

- EGS und AGS werden zwar als standortunabhängig betrachtet, aber tiefe Permokarbon-Vorkommen oder tiefe Vorkommen von Sedimentgesteinen im Molassebecken im Alpenvorland bedingen sehr tiefe ($>5\text{ km}$) und teure Bohrungen. Auch sollten durchlässige Bruchzonen gemieden werden, um therm. Kurzschlüsse zu vermeiden.
- Die weltweiten EGS-Systeme ähneln per se nicht: die Geologie, Chemie des Fluids, Spannungszustände im Untergrund (z. B. kompressiv oder extensiv), das Vorgehen (z. B. mit oder ohne Proppants (Stützmittel wie Quarzsand) bzw. ein- oder mehrstufige Stimulation) usw. variieren und somit muss das eine Projekt an einem anderen Ort nicht zwingend auch funktionieren.
- In der Vergangenheit gab es eine Reihe von Rückschlägen mit Schäden und Projektabbrüchen: z. B. Basel (Erdbeben bis Magnitude 3.4), Pohang in Süd-Korea (Erdbeben bis Magnitude 5.5), siehe unter Nachweise.
- Bisher fehlen die Nachweise für einen dauerhaft nachhaltigen Durchfluss im Reservoir. Auch muss sich zeigen, wie lange eine Anlage ohne Probleme wie Auskühlung, Ausfällungen, Erdbeben usw. rentabel betrieben werden kann. Zudem sind die Vorlaufzeiten bis zur Realisierung derzeit sehr lang (mehrere Jahre bis Jahrzehnte).
- Bis jetzt steckt EGS / AGS noch im Forschungsstadium und eine Reihe von Projekten werden als Pilotprojekte umgesetzt. Eine kommerzielle Serienreife ist noch nicht erreicht, bei der die Erdbeben, die Geometrie und Volumen des Wärmetauschers im Untergrund, die nachhaltige Wärmenutzung ohne Kurzschlüsse usw. kontrolliert werden können. In den USA laufen derzeit EGS-Projekte, die in Richtung Serienreife gehen und erste Erfolge aufweisen können.
- AGS-Projekte sind derzeit im Pilot-Stadium und aufgrund der hohen Bohrkosten noch nicht wirtschaftlich.
- Die Erdbeben-Problematik muss im Untersuchungsgebiet besonders beachtet werden und eine vorgängige Risikoanalyse ist notwendig.
- Ohne Subventionen derzeit nicht wirtschaftlich

Nachweise / Projektauswahl:

- **Soultz-sous-forêts** in Frankreich seit 1988, Forschung – heute kommerzielle Nutzung: mehrere Bohrungen bis 5 km Tiefe, genutzt werden aus einer Triplette 35 l/s mit $150\text{--}160^{\circ}\text{C}$, Leistung elektrisch ca. $1.4\text{ MW}_{\text{el}}$, thermisch 50 MW_{th} , 2 EGS-Dubletten stillgelegt, induzierte Seismizität bei grösseren Injektionsraten
- **Basel** in Schweiz 2006, Ziel 5 MW_{el} Strom: 5 km tiefe Bohrung ins Kristallin, 174°C , Durchlässigkeit um Faktor 2-3 im Kristallin erhöht, aber Abbruch aufgrund von Schaden-Erdbeben bis Magnitude 3.4, Schäden ca. 9 Mio. CHF
- **Gross Schönebeck** in Deutschland 2007, Forschung: bis 4.4 km tiefe Bohrungen, 150°C , hohe Salinität, mit Stimulation von primär porösem Sedimentgestein (Perm), ausreichender nachhaltiger Wasserfluss aufgrund von Ausfällungen nicht möglich
- **Habanero und Paralana** in Australien 2003-2018: mehrere Bohrungen bis 4.9 km, bis 250°C , aufgrund technischer und wirtschaftlicher Probleme gestoppt
- **Pohang** in Süd-Korea 2010-2019: 4.2 km tiefe Bohrung, 140°C , Erdbeben bis Magnitude 5.5 im Jahr 2017 nach der Stimulation mit 52 Mio. USD Schäden und Verletzten → Projekt gestoppt
- **Espoo** in Finnland 2014-2021, Ziel Wärme: mehrere mit bis 6.4 km tiefsten Geothermie-Bohrungen, 121°C , erfolgreiche Stimulation mit Erdbeben "nur" bis max. Magnitude 1.9, kein ausreichender Wasserfluss erreicht → angestrebte 40 MW_{th} nicht erreicht → unrentabel → Projekt gestoppt
- **Fervo Energy** in Nevada 2023: erste Tests mit 63 l/s 191°C aus 2x2.3 km tiefen Brunnen mit ca. 1 km horiz. Bohrabschnitten erfolgreich → $3.5\text{ MW}_{\text{el}}$ möglich → die gewonnenen Erkenntnisse sollen in Utah in eine Grossanlage mit dem Ziel von $400\text{ MW}_{\text{el}}$ transferiert werden (erste Bohrungen wurden begonnen)
- **Haute-Sorne** in Schweiz seit 2012: Start Sondierbohrung im Jahr 2024, das neue Multi-Etappen-Verfahren soll dort erstmals in der Schweiz getestet werden; im Kleinmassstab und in geringerer Tiefe wurden mit einem Forschungsprojekt im Bedretto-Felslabor wichtige Erkenntnisse zur Stimulation gesammelt, welche in Haute-Sorne angewendet werden sollen

Potential (pro Anlage und total in Kantonen Nid- und Obwalden):

Aquifer-Temperatur:	abhängig von Bohrtiefe, von Vorteil $>140^{\circ}\text{C}$
Förderrate:	abhängig von erzeugter Durchlässigkeit, Widerstand im Reservoir, Reservoirvolumen usw., angestrebt werden 50 l/s
Leistung elektrisch:	angestrebt min. 5 MW_{el} (bisher mit einer Dublette noch nicht erreicht)
Fündigkeitschance:	theoretisch hoch, da standortunabhängig (abgesehen von Permokarbon, tiefliegenden Sedimenten oder grösseren Bruch- bzw. Störzonen)
Reproduzierbarkeit:	derzeit noch im Forschungs- / Pilotstadium, die Reproduzierbarkeit muss sich mit den derzeitigen und anstehenden Projekten zeigen

	Anzahl Anlagen ganzer Kanton: massgeblich bestimmt durch Akzeptanz, Grösse Bohrplatz / Anlage, Einbindung in bestehende Infrastruktur, Risikobereitschaft bzgl. Erdbebengefährdung,.....; derzeit sind Anlagen in dicht besiedelten Gebieten aufgrund der fehlenden Akzeptanz unrealistisch; falls die Akzeptanz mit funktionierender Technik insbesondere ohne spürbarer Erdbeben steigt, wären mehrere Anlagen im Kanton denkbar; ein grosses Hemmnis wird die sehr grosse Bohrtiefe von >6 km sein, da dies zu sehr hohen Bohrkosten führt und die Wirtschaftlichkeit in Frage stellt; <u>Nutzungsart, Erkundung und Kosten:</u> • Kraftwerk für Strom und Wärme • Bevor in der Schweiz ein weiteres Pilotprojekt aufgelegt wird, sollte gewartet werden, wie sich das Projekt Haute-Savoie entwickelt. Dieses sollte erst die Nachweise für die Machbarkeit erbringen. Erst mit den gewonnenen Erkenntnissen sollte eine weitere Anlage geplant werden und kann auch die Versicherungsfrage geklärt werden. • Grundsätzlich muss mit Kosten in der groben Grössenordnung von >100 Mio. CHF für eine Anlage gerechnet werden.
--	---

6.4 EWS und oberflächennahes Grundwasser

Abgesehen von den genannten Nutzungen und Plays sind auch oberflächennahe Grundwassernutzungen oder Erdwärmesonden (-felder) ausserhalb der Grundwasservorkommen möglich. Diese werden aber in dieser Studie nicht behandelt. Beide Nutzungen sind in den Kantonen Nid- und Obwalden weit verbreitet. In einzelnen Gemeinden wie Hergiswil oder Kerns ist die Dichte der Erdwärmesonden (Abb. 46) und Grundwasserwärmennutzungen (Abb. 47) bereits sehr hoch. Die hohe Dichte verunmöglicht z. T. weitere grosse Anlagen. Selbst neue kleinere Anlagen sind vereinzelt kaum mehr möglich bzw. würden bestehende Nachbarnutzungen stark beeinflussen. Hier muss fallspezifisch untersucht werden, ob eine weitere Nutzung noch Platz findet. Solche Abklärungen erfolgen mit Simulationen mit speziellen Programmen wie z. B. FEFLOW oder «EWS». Erdwärmesonden sind in einigen Teilbereichen der Kantone zum Schutz der oberflächennahen Grundwasserleiter wie z. B. zwischen Stans und Buochs nicht erlaubt.

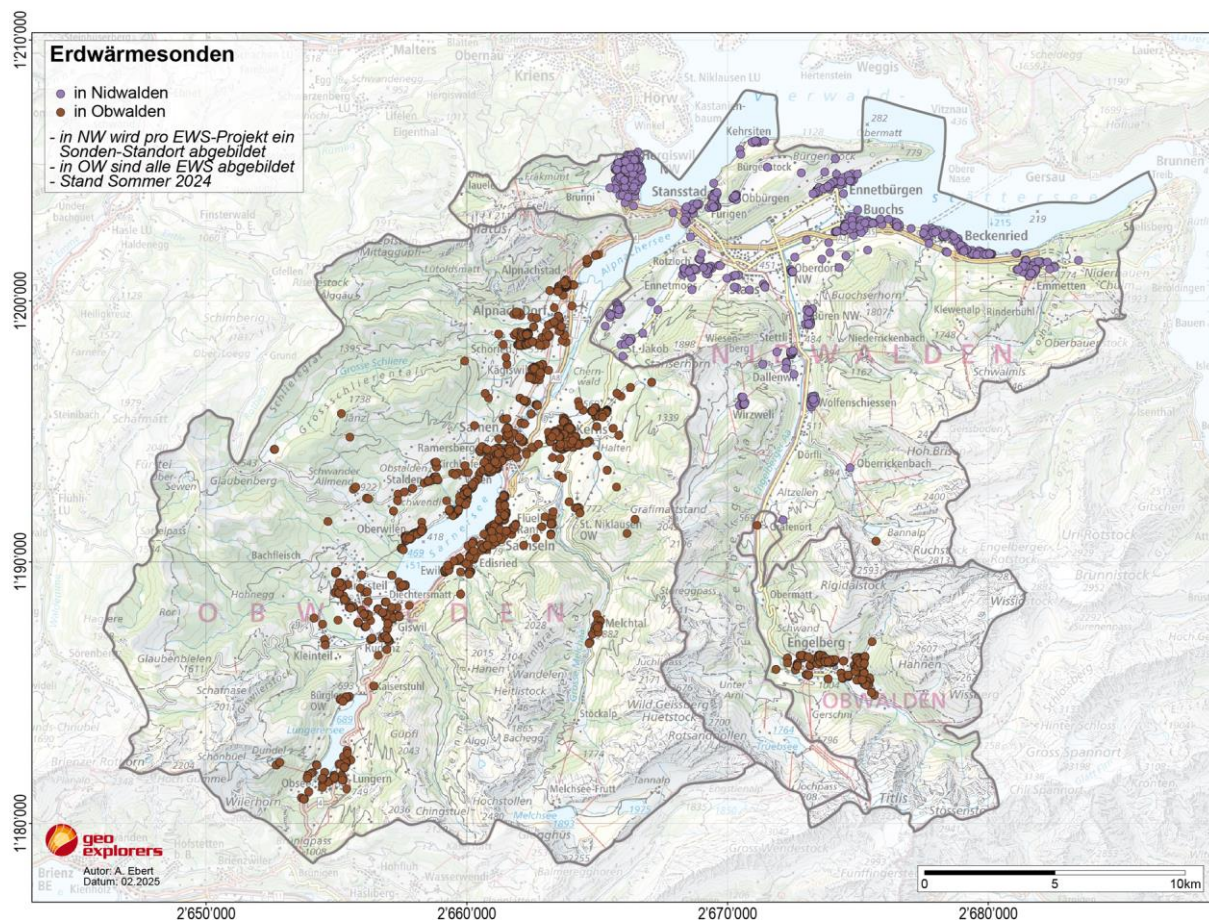


Abb. 46 Bestehende Erdwärmesonden

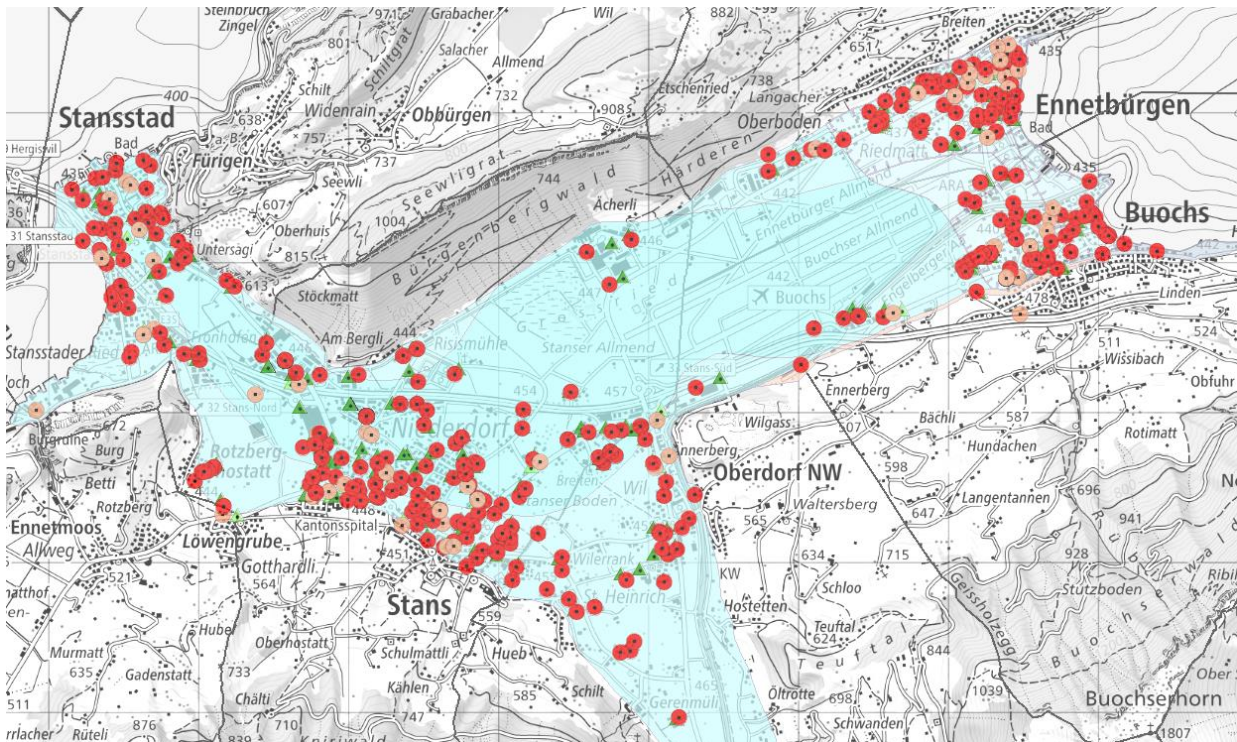


Abb. 47 Grundwasserwärmenutzungen in Nidwalden

In Blau der oberflächennahe Grundwasserleiter, rot = Grundwasserbrunnen Entnahme, grün = Rückgabe, orange und hellgrün = ausser Betrieb oder in Planung

6.5 Vergleich Wärmenachfrage und geothermisches Potential

Abb. 48 zeigt die Wärmenachfragedichte in den Kantonen Nid- und Obwalden. Die Nachfrage konzentriert sich auf die grossen Tallagen, sowie Hergiswil und Engelberg und erreicht vereinzelt Nachfragewerte von über 1'000 MWh pro Jahr und Hektar (z. B. in Sarnen, Alpnach Dorf, Hergiswil, Stans oder Engelberg). Diese Gebiete überlagern sich mit den meisten Play-Typen (siehe Kartenausschnitte auf den Faktenblätter). Insbesondere die untiefen Plays G, H und I (Bruchzonen in Kalksteinen der Helvetischen Decken, Basis Helvetische Decken und basale Kieslagen der übertieften eiszeitlichen Rinnen), welche sich besonders für Areal-Lösungen oder grössere Gebäude eignen, korrelieren mit den meisten Gebieten mit einer hohen Nachfrage wie in Sarnen, Kerns, Alpnach Dorf, Stans, Ennetbürgen und Buochs. Die Geothermie kann entsprechend einen Beitrag zum Ausbau der Wärmenutzung leisten.

Nur bezogen auf die beiden attraktivsten Plays G (Bruchzonen in den Kalksteinen der Helvetischen Decken) und I (basale Schotter in den eiszeitlichen Rinnen) könnten im Untersuchungsgebiet rund 10 bis 30 Dubletten mit je einer thermischen Leistung von rund 0.5 bis 3 MW_{th} erstellt werden. Damit wäre ein jährlicher totaler Energiebezug von gemittelt ca. 100 GWh möglich⁸ (Annahme: 20 Dubletten mit 1.5 MW_{th} und 3'000

⁸ Es wird darauf hingewiesen, dass aufgrund fehlender Bohrungen Nachweise im Untersuchungsgebiet bisher fehlen und Erkenntnisse aus ähnlichen geologischen Situationen auf das Untersuchungsgebiet übertragen wurden. Die genannten Werte sind konservative Schätzungen unter Annahme, dass durchlässige Bruchzonen (Play G) bzw. Schotterlagen (Play I) vorhanden sind.

Laststunden). Zudem könnte im Fall des Plays I mit einem Aquifer-Speicherpotential von einigen Dutzend GWh gerechnet werden (Voraussetzung, dass basale Schotter nachgewiesen werden).

Der geschätzte Energiebezug aus dem Untergrund könnte einen Anteil von über 10% am Gesamtbedarf für Raumwärme und Warmwasser der beiden Kantone von 800 GWh abdecken.

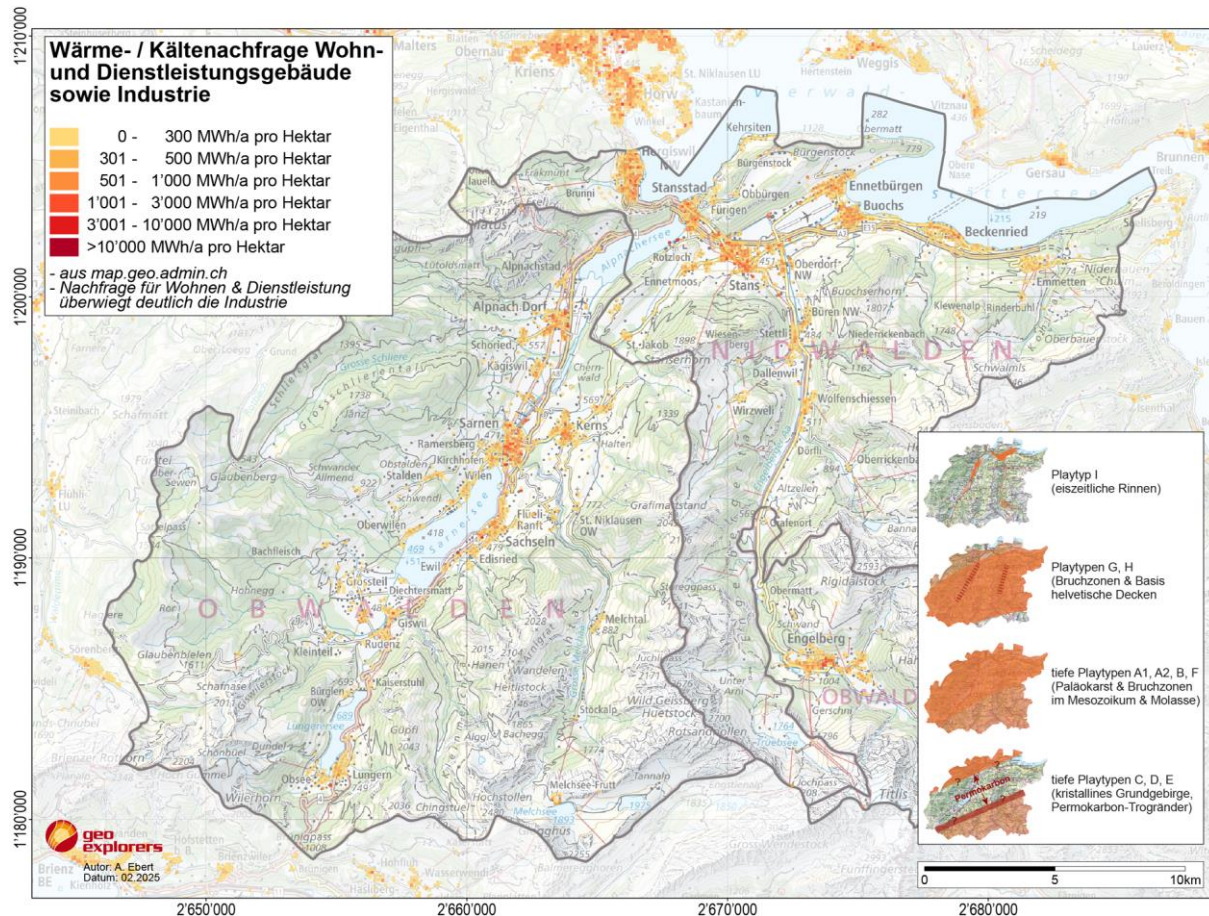


Abb. 48 Wärmenachfragedichte

Dort, wo eine grosse Nachfrage nach Wärme (gelb-orangene Flächen) besteht, sind verschiedene Plays vorhanden (siehe orangene Flächen im rechten Kasten).

7 Synergie im Rahmen einer geothermischen Nutzung

7.1 Begleitende oder alternative Nutzungen

Poröse Zonen können auch grundsätzlich für die Speicherung angedacht werden. Dies kann die Speicherung von warmem oder kaltem Wasser sein, aber auch von Erdgas, CO₂ oder Wasserstoff. Im Fall der Speicherung ist wichtig, dass das zu speichernde Medium «gefangen» bleibt und nicht weg migriert. Auch müssen das Lösungsverhalten, Aggregatzustands-Veränderungen oder sekundäre Risiken beispielsweise von induzierten Erdbeben beachtet werden. Der BFE-Schlussbericht mit Anhängen und begleitenden Berichten «Studie zur Abschätzung des Potentials für CO₂-Sequestrierung in der Schweiz» von Diamond et al., 2010 bildet eine gute Grundlage zur Bewertung der Möglichkeiten, des Potentials und der Risiken einer Gasspeicherung in der Schweiz.

Im Untersuchungsgebiet wird das grösste geothermische Potential in Bruch- und Störzonen vermutet. Diese stellen offene und diskrete Zonen dar, welche sich über mehrere Schichten ausbreiten und bilden generell keine nach oben dichte und abgeschlossene Fallenstrukturen, wie dies im Fall einer Gasspeicherung erwünscht wäre. Auch ist das Speichervolumen in diskreten Bruchzonen im Vergleich zu mächtigen und ausgedehnten Porenspeichern gering. Von daher ist das Potential für die Speicherung, insbesondere im Vergleich zu den Erschliessungskosten und Risiken eher als nachteilig einzustufen. Die oben genannte Studie bestätigt, dass die Festgesteine der Alpen für die CO₂-Speicherung ungeeignet sind.

Es muss aber zwischen klassischen Erdgasreservoirs (z. B. poröse Sandsteine) und geothermischen Zielhorizonten (z. B. Bruchzonen) unterschieden werden; siehe dazu das nachfolgende Kapitel.

7.2 Erdgasvorkommen

Im Untersuchungsgebiet ist bekannt, dass sich im Untergrund Erdgas befindet. Mit der Ressourcenexploration der GVM AG in den Jahren 2009 - 2012 wurden potentielle Erdgasreservoirs gesucht. Es wurden mögliche Prospekte an der Basis der helvetischen Decken sowie im Top des autochthonen Malms mit möglichen Gasvolumen von 400 bis 900 Mio. Nm³ definiert. Diese können bei der geothermischen Erkundung ebenfalls mit ergänzenden Erkundungen oder Side-Tracks eingeschlossen werden. Sollten grössere Erdgasvorkommen angetroffen werden (wie die produzierten 74 Mio. m³ Erdgas in der Bohrung Entlebuch-1 oder die angetroffenen Vorkommen in der Geothermiebohrung St. Gallen), so können begleitende Nutzungen angedacht werden, wie die Verstromung des geförderten Erdgases oder das Anheben des Temperaturniveaus des geförderten Warmwassers.

Eine kombinierte Erkundung nach Heisswasser und Erdgas würde die Wirtschaftlichkeit verbessern und die Fündigkeitsrisiken minimieren. Allerdings sind die Anforderungen für Erdgasreservoirs höher als für die Geothermie. So sind z. B. nach oben dichte und abgeschlossene Fallenstrukturen, ein Muttergestein mit entsprechender thermischer Reifung und Wegsamkeiten für die Migration von Erdgas in die Fallen notwendig. Für Details wird auf bestehende Berichte aus der Explorations-Kampagne der GVM AG verwiesen.

7.3 Lithiumgewinnung⁹

Nicht-thermische Nutzungsarten, welche geothermische Potentiale begleiten, sind beispielsweise in Solen (hoch mineralisierte Tiefengrundwässern) mitgeführte Stoffe wie Lithium (Li). Sofern es gelingt, Lithium aus Solen zu extrahieren, kann die Wirtschaftlichkeit geothermischer Projekte verbessert werden. Jedoch findet weltweit noch keine industrielle Förderung von Lithium aus einer Sole statt (Goldberg et al. 2022 a & b). In Deutschland und Frankreich sind erste privatwirtschaftliche Extraktionsprojekte aus Solen mit einem Lithiumgehalt von über 150 mg/l geplant. Die vorgesehenen Standorte, z. B. im nördlichen Oberrheingraben, verfügen im Vergleich zur Schweiz über deutlich höhere Lithiumgehalte (Abb. 50). Messdaten zu Lithiumgehalten in Grundwässern der Schweiz sind nur vereinzelt vorhanden und konzentrieren sich in erster Linie auf die Nordschweiz zwischen Bodensee und Basel (Abb. 49, Heuberger & Morgenthaler 2023). Hier finden sich maximale Lithiumgehalte im oberen Muschelkalk (144 mg/l in Berglingen; Biehler et al. 1993). Die höchsten Durchschnittswerte (15.7 mg/l) stammen von Grundwässern aus Gesteinen des Permokarbons der NW-Schweiz (Tab. 1).

Für die Zentralschweiz liegen aktuell keine Lithium-Messwerte aus grösseren Tiefen vor. Die aus der Nordschweiz bekannten Messwerte (Biehler et al. 1993) stammen aus Formationen, die generell auch in den Gebieten von Nid- und Obwalden bekannt sind. Insofern kann man in entsprechenden Tiefen vereinfacht auch von vergleichbaren Lithiumkonzentrationen ausgehen. Gleichwohl, kann nicht ausgeschlossen werden, dass Lithium-angereicherte Fluide aus dem Grundgebirge (Pegmatite) aufstossen und zu erhöhten Werten auch in den darüberliegenden Formationen führen.

Aufgrund der mangelhaften Datenlage lässt sich kein abschliessendes Fazit zu einem möglichen Potential für Lithiumvorkommen im Untersuchungsgebiet ziehen. Lithium sollte bei Untersuchungen an Tiefengrundwässern verstärkt im Fokus stehen. Ob Lithium in Zukunft wirtschaftlich aus Solen extrahiert werden kann und welche Konzentrationen dafür nötig sind, ist aktuell noch unklar. Da der Bedarf an Lithium aber weltweit steigt, ist anzunehmen, dass die technische Entwicklung zur Extraktion aus Solen grosse Fortschritte machen wird.

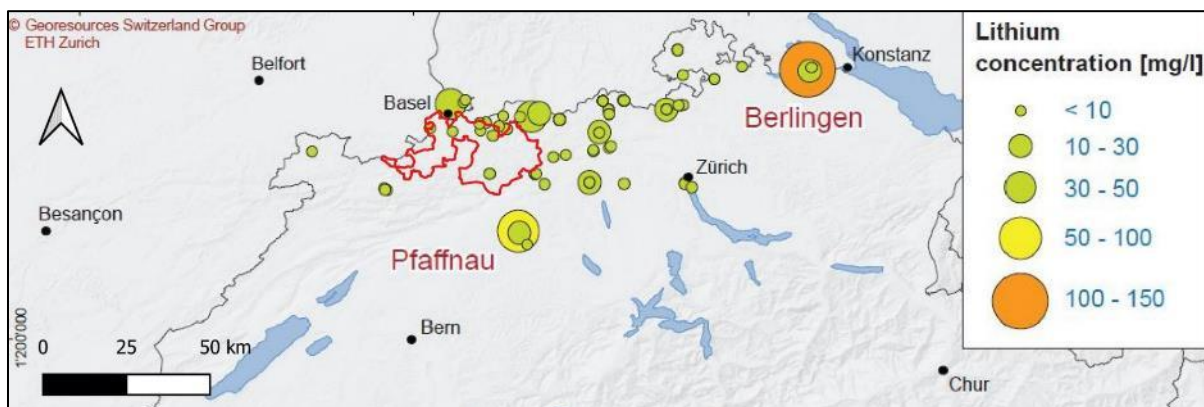


Abb. 49 Lithium-Vorkommen in der Nordschweiz

(nach Heuberger & Morgenthaler 2023).

⁹ Dieses Kapitel ist eine auf das Untersuchungsgebiet angepasste Kopie aus der Geothermie-Studie für den Kanton BL und wurde von Horst Dresmann aus der Gruppe "Angewandte Geologie & Umwelt" der Universität Basel geschrieben.

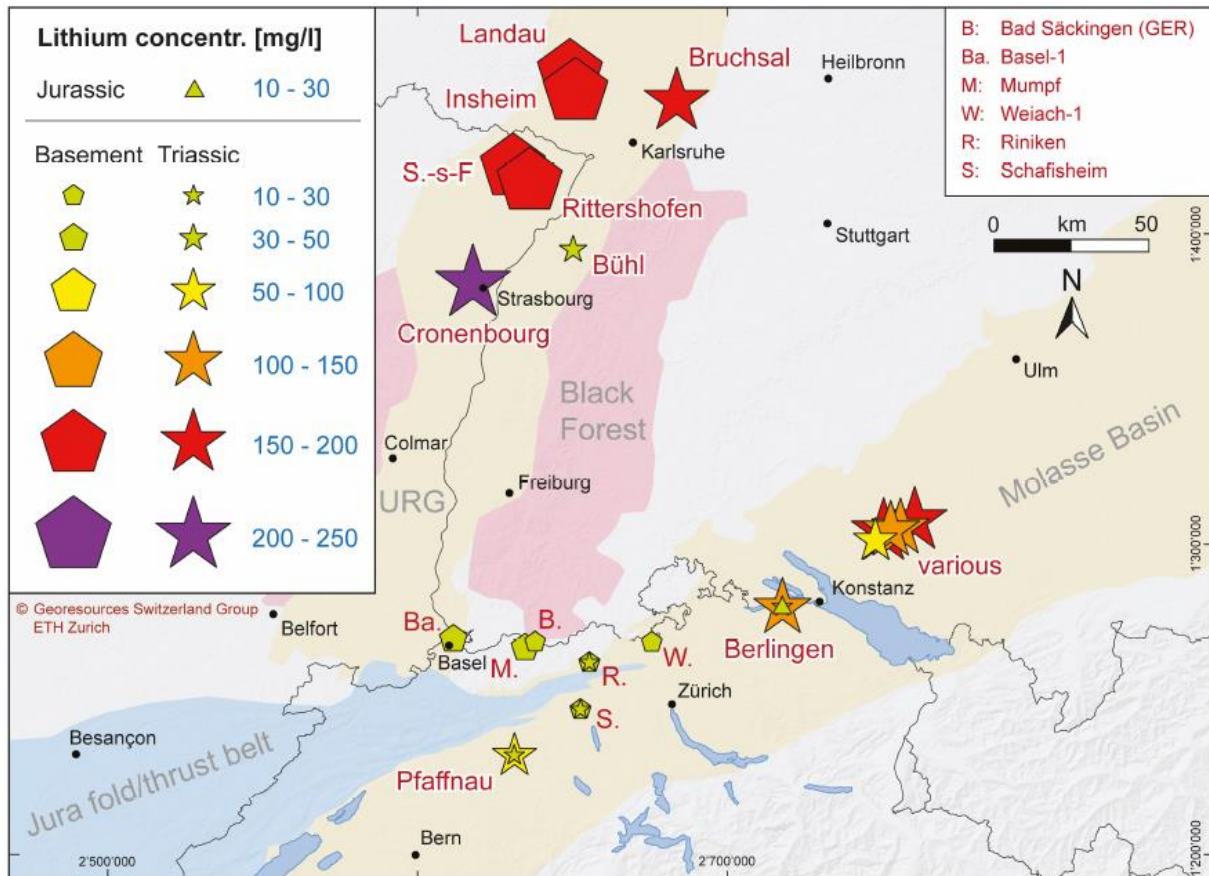


Abb. 50 Lithium-Konzentrationen in Aquiferen

Dargestellt sind die Lithiumkonzentration der Schweiz und des angrenzenden Auslands. Es werden nur Konzentrationen über 10 mg/l dargestellt (aus: Heuberger & Morgenthaler 2023).

Tabelle 3 Zusammenstellung Lithium-Messwerte aus Bohrungen tiefer 100 m

Verfügbare Werte gesamte Schweiz (aus Heuberger & Morgenthaler 2023).

Tectonic area	Aquifer Formation	Era	n	max. [mg/l]	median [mg/l]	average [mg/l]
Molasse Basin & Jura	OMM (Miocene)	Cenozoic	2	0.11	0.07	0.07
Molasse Basin & Jura	USM (Oligocene-Miocene)	Cenozoic	6	1.9	0.6	0.8
Molasse Basin & Jura	Upper Jurassic (Malm)	Mesozoic	2	1.2		1.0
Molasse Basin & Jura	Lower Jurassic (Liassic)	Mesozoic	1	12	12.0	12.0
Molasse Basin & Jura	Upper Muschelkalk	Mesozoic	35	144	0.1	7.0
Molasse Basin & Jura	Keuper	Mesozoic	5	28	1.8	9.4
Molasse Basin & Jura	Buntsandstein	Mesozoic	11	14.4	4.0	4.7
Molasse Basin & Jura	Permian	Paleozoic	6	32.3	15.5	15.7
Molasse Basin & Jura	Crystalline Basement		32	14.5	1.4	2.3
Alps & Southalpine	various	various	24	3.7	0.4	0.8

8 Risiken / Konflikte / Anforderungen

Im Fall der Exploration bestehen gewisse Risiken, welche zu Extrakosten oder im Extremfall zu Bohrabbrüchen führen können. Dazu gehören bohrtechnische Probleme, Fündigkeits- oder Schadensrisiken. Das Schadensrisiko bezieht sich auf denkbare Unfälle. Das können artesisch gespannte Grundwässer sein, welche an der Oberfläche frei auslaufen oder das Anbohren von Gastaschen, aber auch weniger gefährliche Komplikationen, wie das Steckenbleiben des Bohrkopfes, können als Bohrrisiken gewertet werden. Im Extremfall können abhängig von der geothermischen Nutzung auch Erdbeben getriggert werden. Auf jeden Fall hat jeder Schaden eine negative Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit und je nach Ausmass auf die Akzeptanz des Projekts. Die Risiken sind zu benennen, deren Eintretenswahrscheinlichkeit und Schadensausmass zu beurteilen und entsprechende Massnahmen umzusetzen.

8.1 Fündigkeitsrisiken

Die Fündigkeitsrisiken betreffen das Auffinden einer ergiebigen Heisswasserquelle. Geologische Faktoren bestimmen, wie hoch die Erfolgswahrscheinlichkeit ist, eine ausreichende bzw. vorhergesagte Menge anzutreffen. Im Wesentlichen betrifft dies die Schüttungsrate und die Aquifertemperatur. Die Temperatur ist eher unkritisch und kann vergleichsweise gut vorhergesagt werden und unterliegt deutlich geringeren Variationen (Abb. 33) als die Schüttungsrate, die von der Durchlässigkeit abhängt (Abb. 40). Eine unzureichende Ergiebigkeit bzw. zu geringe Durchlässigkeit der Aquifergesteine und somit eine ungenügende Schüttungsrate sind das grösste Risiko bei Geothermieprojekten in der Schweiz.

Mögliche Fündigkeitsrisiken sind eine unzureichende Porosität und Durchlässigkeit, verschlossene Klüfte, stark variierende laterale und vertikale Gesteinseigenschaften oder das nicht Vorhandensein von angenommenen Schichten oder Bruchzonen. Im Fall der Bruchzonen können die Risiken mit einer angepassten Vorerkundung stark reduziert werden. Grundsätzlich ist es wichtig, Abbruchkriterien sowie einen Plan B einzuplanen (z. B. Erkundung verschiedener Zielhorizonte entlang einer Bruchzone). Ein etappenweises Vorgehen bei der Erkundung hilft das Risikokapital zu minimieren. Es sollte immer erst erkundet und sondiert werden, bevor mit dem teuersten und risikoreichsten Bauwerk (Produktionsbohrung oder Brunnen) begonnen wird. Es macht wenig Sinn, blindlings zu bohren oder erst nach dem erstellten Brunnen zu hinterfragen, warum der Wasserfluss zu gering ist. Zu Beginn der Untergrunderkundung sollte nicht der Oberflächenstandort den Bohrstandort definieren, sondern die beste Quelle im Untergrund. Dies kann sonst dazu führen, dass nicht die beste Quelle angebohrt wird, was die Fündigkeitsrisiken erhöht. Mit der Erkundung und jeder Sondierung nimmt das Fündigkeitsrisiko ab und es können die bestmöglichen Standorte gewählt werden.

8.2 Seismische Risiken

Seit den spürbaren Erdbeben im Zusammenhang mit den Tiefengeothermieprojekten in Basel 2006 und St. Gallen 2013 (Tabelle 1 und nachfolgend) werden Geothermieprojekte in der Schweiz immer auch mit einer Erdbebengefährdung in Verbindung gebracht. Entsprechend wichtig ist es, seismische Risiken zu beachten und Vorkehrungen zu treffen. Werden die Spannungs- oder Festigkeitszustände im Untergrund zu stark oder zu schnell geändert (z. B. durch das Einpressen von Wasser mit hohem Druck geändert), kann das Gestein brechen, was sich in induzierten Erdbeben äussert. In der Regel sind dies Mikrobeben, die nicht spürbar sind.

Die Erdbeben­tätigkeit hängt von der Tiefe, dem Verfahren und den bestehenden Spannungszuständen im Untergrund ab. Insbesondere bei der Tiefengeothermie werden deshalb vorgängig Risikoabklärungen und ein Monitoring gefordert, sodass eine geothermische Erschliessung und Nutzung möglichst risikoarm ermöglicht wird. Der Schweizer Erdbebedienst hat dazu einen Good Practice Guide erstellt (Kraft et al., 2020).

Im Fall von EGS sind die Mikrobeben gewollt, denn der Untergrund wird künstlich aufgebrochen, damit ein Wärmetauscher im dichten Untergrund entsteht. Allerdings muss das Aufbrechen des Untergrundes so sanft sein, dass keine spürbaren Erdbeben entstehen können. Zudem wird mit einem seismischen Monitoring und einem Überwachungskonzept eine Stimulation so gesteuert, dass keine spürbaren Erdbeben ausgelöst werden. Des Weiteren können Spannungsdifferenzen während der Nutzung durch das Rückverpressen des geförderten Thermalwassers in grösserer Tiefe (erhöhte Porenwasserdrücke in vorgespannten Trennflächen) oder durch Temperaturdifferenzen durch die hohen Unterschiede von Förder- und Rückgabetemperaturen entstehen. Auch hier müssen mit vorgängigen Analysen die seismische Gefährdung und das seismische Risiko bewertet werden, sodass eine risikoarme Erschliessung und Nutzung gewährleistet werden können. Ampelsysteme als Kontrollsystem helfen frühzeitig, mögliche stärkere induzierte Erdbeben rechtzeitig zu erkennen und entsprechend die Betriebsparameter zu ändern. Aufgrund der Geothermieprojekte in Basel und St. Gallen ist der Wissensstand heute viel grösser.

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass eine gewisse seismische Aktivität im tiefen Untergrund sowohl während der Stimulationsphase als auch während des Betriebs nie ganz ausgeschlossen werden kann. Bekannt sind die Erdbeben während der hydraulischen Stimulation vom EGS-Projekt in Basel im Jahr 2006, bei dem ein Beben mit der Magnitude $ML = 3.4$ registriert wurde. Dabei wurden in eine 5 km tiefe Bohrung während 6 Tagen ca. 12'000 m³ Wasser mit einem Kopfdruck von bis zu 300 bar injiziert, was zu ungewollt starken Erdbeben führte. Beim Tiefengeothermieprojekt in St. Gallen mit einer 4'450 m tiefen Bohrung drohte im Jahr 2013 während dem Pumpversuch ein unkontrollierter Erdgasausbruch. Während dem Rückverpressen des Erdgases mit einer schweren Bohrspülung wurden in der angebohrten und unter natürlicher Spannung stehenden Bruchzone Erdbeben mit einer Magnitude ML von 3.5 generiert. Auch während dem Betrieb wurden schon spürbare Erdbeben gemessen. Z. B. wurden in Landau (Rheinland-Pfalz) im Jahr 2009 (Betriebsstart im Jahr 2007) in rund 2.8 km Tiefe zwei Erdbeben mit Magnituden von 2.4 und 2.7 festgestellt.

Allerdings gibt es auch viele geothermische Projekte ohne spürbare Erdbeben. Z. B. wurden in der mehr als 25-jährigen geothermischen Nutzung in Riehen keine Erdbeben detektiert, ebenso wenig in Bad Schinznach oder Yverdon-les-Bains.

Tendenziell gilt ein höheres Risiko für eine induzierte Erdbeben­tätigkeit in folgenden Fällen (siehe auch Kraft et al., 2020):

- Grössere Tiefe des Reservoirs ($\leftrightarrow$ sehr gering falls unter 1 km)
- Kristallines kompaktes Gestein ($\leftrightarrow$ Sedimentgesteine)
- Grösseres Injektions- oder Fördervolumen
- Stimulationsmassnahmen (u.a. höhere Injektionsdrücke)
- Injektion nahe von oder in Bruchzonen

8.3 Erdbeben und begleitende Risiken in Nid- und Obwalden

Im Untersuchungsgebiet wurden in der jüngeren Vergangenheit immer wieder Erdbeben detektiert. Unter anderem wurden 1964 um Sarnen während Monaten hunderte Erdbeben registriert. Diese erreichten Magnituden von bis $M_w = 5.3$ und führten zu vielen Gebäudeschäden, zu einem Bergsturz am Bürgenstock und Tsunamis im Vierwaldstättersee. Weitere Erdbebenserien in Nid- und Obwalden sind auch aus den Jahren 1601 mit Magnitude bis $M_w = 5.9$ (zählt in den letzten 1'000 Jahren zu den acht stärksten Erdbeben in der Schweiz), 1777 mit Magnitude bis $M_w = 5.1$ und 1917 mit Magnitude bis $M_w = 3.9$ bekannt. Alle detektierten und lokalisierten Erdbeben sind in Abb. 52 abgebildet. Im Vergleich zu umliegenden Gebieten wie der Kanton Luzern sind die Seismizität bzw. die Erdbebengefährdung im Untersuchungsgebiet erhöht (vgl. mit Abb. 51).

Die meisten Erdbeben lokalisieren im Untersuchungsgebiet in Tiefenbereichen von 0 bis 12 km unter Meereshöhe (Abb. 53 und Abb. 54). Sie sind nicht auf einzelne Schichten limitiert. Es sei angemerkt, dass die Tiefenlokalisierung im Gegensatz zur horizontalen Lokalisierung grosse Fehler von bis zu einigen Kilometern aufweisen kann und somit eine eindeutige Korrelation mit Bruchzonen mit dem bestehenden Messnetz kaum möglich ist. Gleichwohl kann nicht ausgeschlossen werden, dass einige entlang der grösseren Störzonen (vertikale Bruchzonen oder Basis der Helvetischen Decken) lokalisieren. Die letzten starken Beben beim Urnerboden von 2017 mit einer maximalen Magnitude von $M_w = 4.1$ und einer Tiefe von ca. 4 km u. M. wurden einem steilen ca. 0.6 km langen Bruch (sinistrale Seitenverschiebung) im Aare-Massiv zugeordnet (Diehl et al., 2021). Gemäss Nagra NAB 14-26 bestehen Erdbebenhäufungen im Aar-Massiv, in den helvetischen Decken und im tieferen Autochthon. Aber auch diese Autoren weisen darauf hin, dass eine genaue Zuordnung nicht möglich ist.

Die Erdbebenproblematik wird im Detail in einem 55-seitigen Nagra-Bericht (Nagra NAB 14-26) sowie die Neotektonik und Erdbebensituation in Nid- und Obwalden im Nagra-Bericht NTB 96-01 (Seiten 140 – 154) beschrieben und diskutiert. Einzelne Herdflächenlösungen zeigen, dass Erdbeben unter dehrenden aber auch aufschiebenden Zuständen entstanden. Auch das Auftreten von Erdbebenschwärmen wird als Indiz gesehen, dass evtl. Grundwässer oder Erdgas diese auslösen lassen.

Folglich wäre im Untersuchungsgebiet das seismische Risiko für ein tiefes hydrothermales oder EGS-Projekt erhöht, wohingegen eine hydrothermale Nutzung in den bestehenden Bruchzonen ohne Stimulation in untiefen Sedimentgesteinen der Drusberg- und Axen-Decke gering wäre. Wird ein bereits natürlich zerbrochener und durchlässiger Untergrund genutzt, so sind keine Stimulationsmassnahmen mit Mikrobeben notwendig, da keine neuen Brüche erzeugt werden. Je untiefer sich ein Reservoir befindet, desto weniger kritisch sind die Spannungszustände bzgl. einer ungewollten spürbaren Seismizität. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Nutzung der empfohlenen untiefen Plays nur ein geringes bis kein Erdbebenrisiko besteht. Bestehende Nutzungen in der Schweiz in erdbebenreichen Gebieten (z. B. Basel und Wallis) bestätigen dies. Im Fall der Nutzung der tieferen Stockwerke oder EGS muss eine seismische Risikoanalyse durchgeführt werden. Zur Überwachung und Beweissicherung wird ein mikroseismisches Monitoring empfohlen und häufig im Rahmen der Bewilligungen gefordert. Ebenfalls sollte die Absicherung durch eine Versicherung geklärt werden.

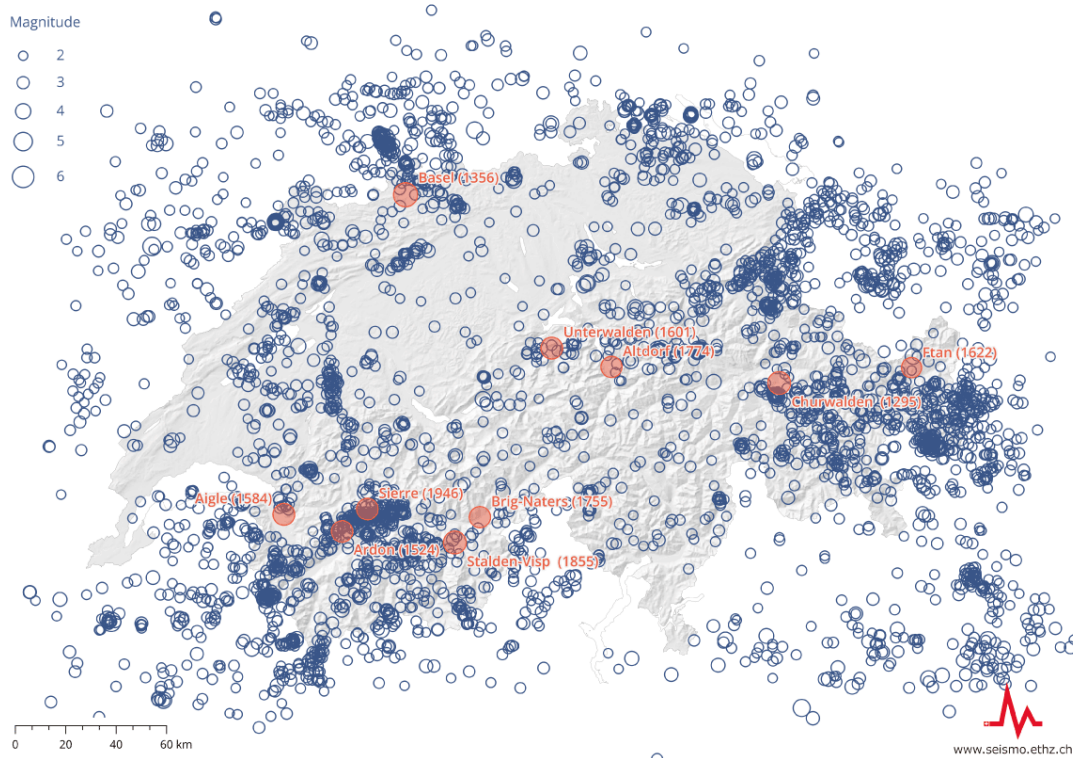


Abb. 51 Alle aufgezeichneten Erdbeben von 1975-2024, inkl. historischer Beben

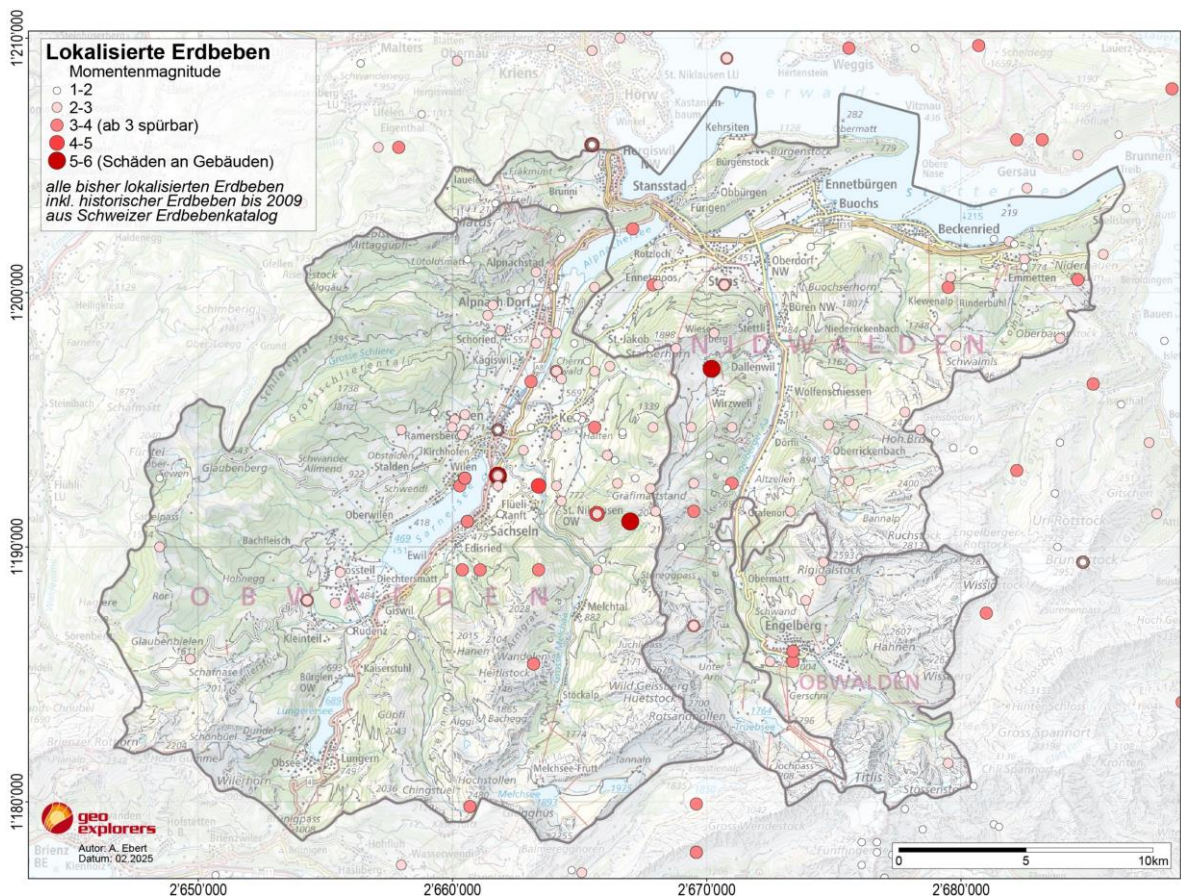


Abb. 52 Epizentren der Erdbeben in Nid- und Obwalden

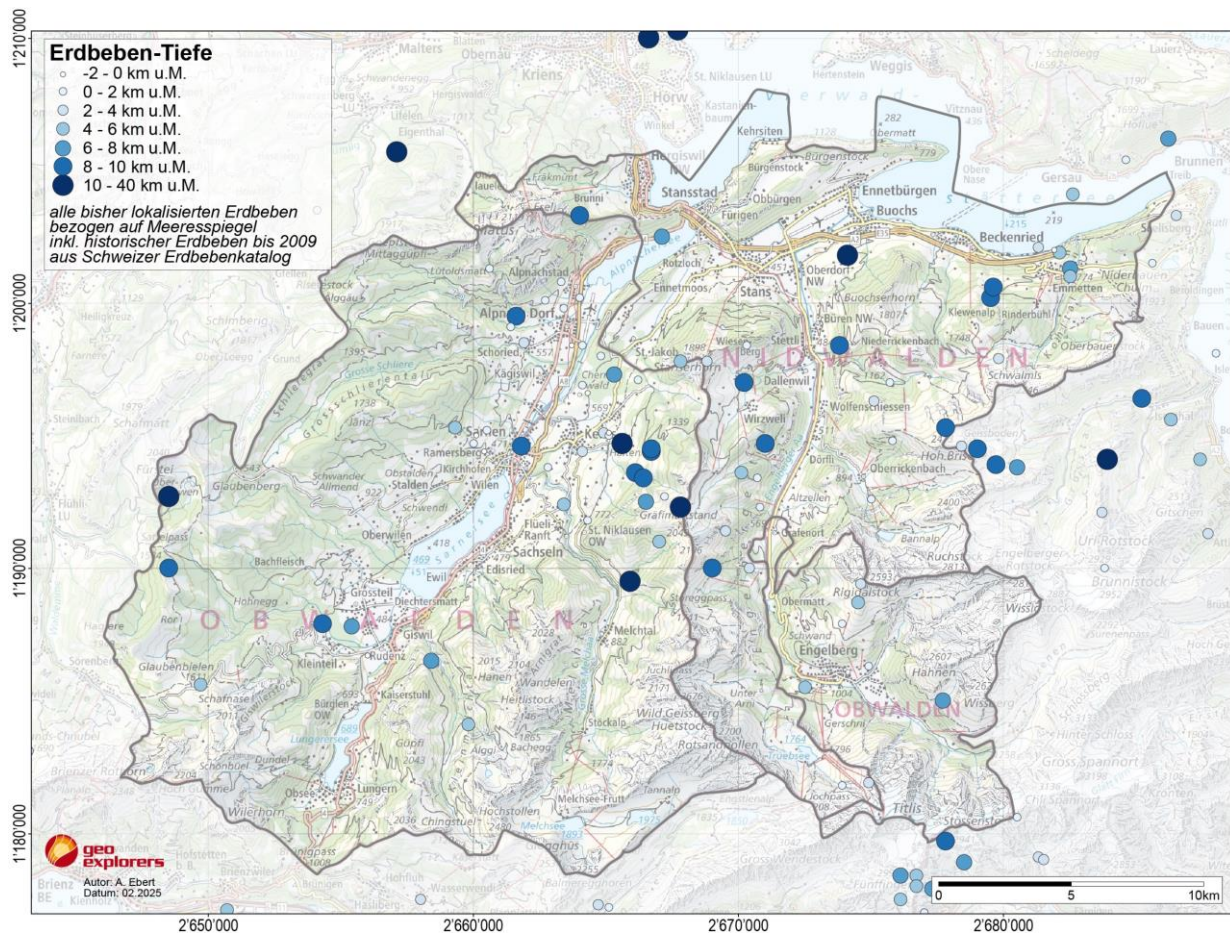


Abb. 53 Tiefenlage der Erdbeben in Nid- und Obwalden

Projizierte Erdbeben im Umkreis von 30 km um Sarnen

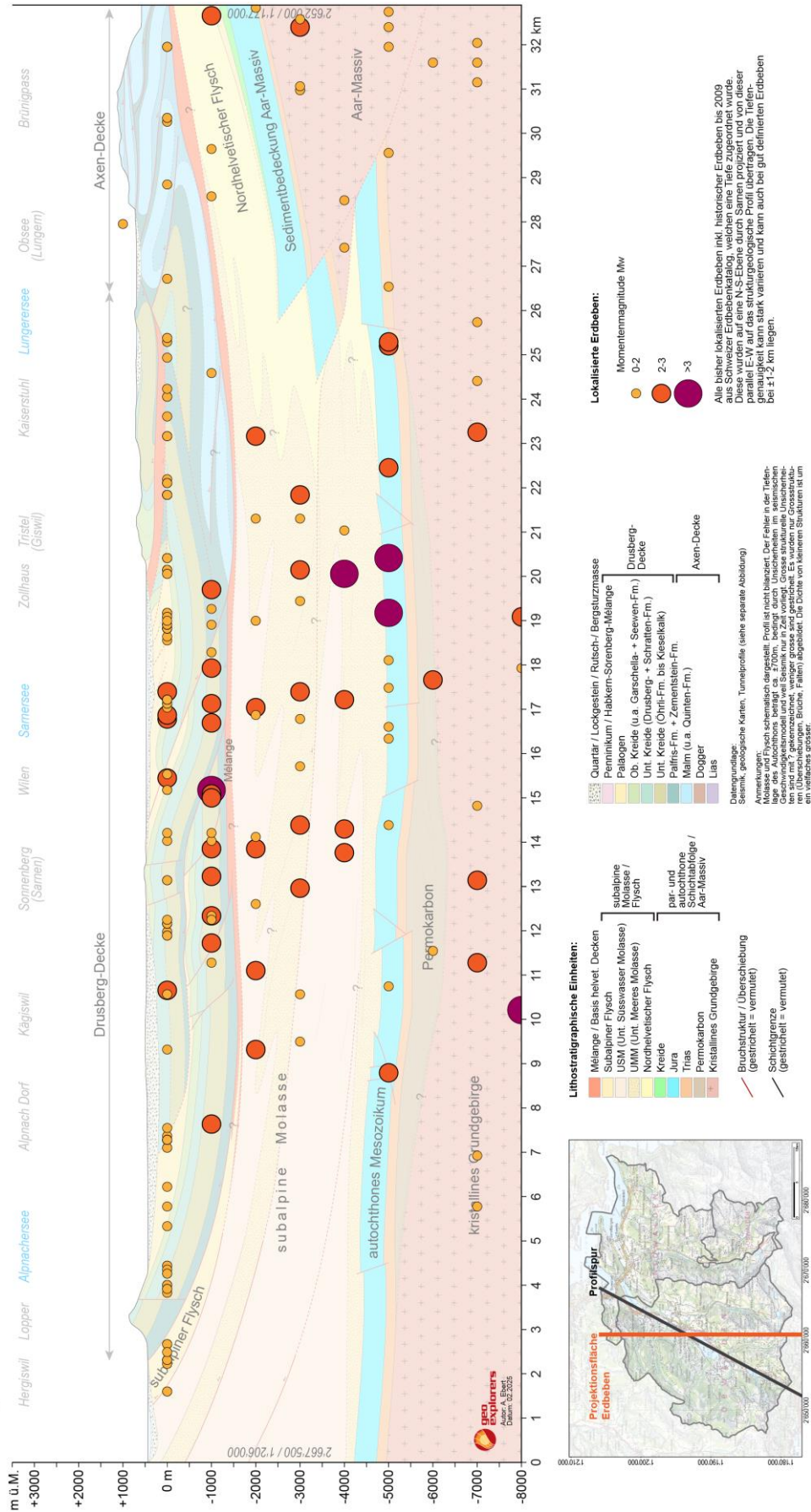


Abb. 54 Tiefenlage Erdbeben in Nid- und Obwalden

8.4 Bohrtechnische und geologische Risiken

Generell nehmen die bohrtechnischen Risiken mit der Bohrtiefe zu, insbesondere weil mit zunehmender Tiefe die Drücke und Spannungsdifferenzen höher sind. Zudem gilt, dass bei einem wenig erkundeten Untergrund aufgrund der fehlenden Erfahrung und Referenzen die Risiken grundsätzlich höher eingestuft werden müssen.

Die häufigsten bohrtechnischen und geologischen Risiken bei Tiefbohrungen sind das Anbohren von artesisch gespannten Grundwässern, kleineren Gasvorkommen, Bohrlochinstabilitäten, Steckenbleiben des Bohrgestänges oder der nicht vollständige Einbau der Verrohrung bis auf die geplante Tiefe, welche Zusatzmassnahmen erfordern können und je nach Ausmass und Tiefe kostspielig sein können.

Die genannten Risiken können selbst bei untielen Erdwärmesonden auftreten und können mit Standardmassnahmen begegnet werden. Die grossen Bohranlagen sind für diese Fälle gewappnet und es besteht ausreichend Erfahrung, mit dem Spülungsgewicht entgegenzuwirken. Bei geothermischen Projekten wurden in der Vergangenheit wiederholt Arteser angebohrt und nutzbar gemacht. Wichtig ist, dass basierend auf einer geologischen Prognose das Risiko vorweg analysiert und bewertet wird, sodass die Bohrfirma auf dem Bohrplatz entsprechend vorbereitet ist (z. B. Zusätze für eine Schwerespülung, Preventer). Auch bei der Planung der Bohrungen (Absetztiefe der Verrohrung, Bohrspülung) sind die geologischen Risiken bereits zu berücksichtigen.

8.5 Gesellschaftliche Risiken

Es muss unterschieden werden zwischen Tiefbohranlagen und kleinen Bohrgeräten für Erdwärmesonden oder Tiefbrunnen bis ca. 1'000 m. Letztere kommen häufig und reibungslos zum Einsatz und sind aufgrund ihrer geringen Auswirkungen in der Bevölkerung meist akzeptiert. Entsprechend bestehen dabei kaum Risiken bezüglich Einwendungen oder geforderten Einschränkungen bzw. Auflagen. Tiefbohranlagen hingegen operieren in der Regel im 24-h-Betrieb, auch am Wochenende und bis zu einigen Monaten. Die Bohrtürme, die dafür aufgestellt werden, haben eine Masthöhe von teilweise über 60 m und sind mit Lichtemissionen, Baustellenlärm, LKW-Transporten usw. verbunden. Aus diesem Grund wird versucht, Tiefbohranlagen wenn immer möglich in der Industriezone zu platzieren, um die Einflüsse auf die Bevölkerung und die Zusatzkosten für Schutzmassnahmen, Bohrplatzbau usw. möglichst gering zu halten. Zusätzlich sind die notwendigen Zufahrten, Strom, grössere asphaltierte Flächen, Wasser- und Abwasserleitungen usw. in Industriezonen gegeben. Ansonsten können Anwohner mit entsprechenden Schutzmassnahmen gegen Lärm, Licht usw. geschützt werden.

Wie vergangene und derzeitige Projekte zeigen, liegen im Fall der Tiefengeothermie die grössten Ängste und Befürchtungen in der Bevölkerung bei den induzierten Erdbeben, welche zu Einwendungen und einer Gegnerschaft führen können (vgl. mit Haute-Sorne). Hier sind entsprechende Risikoanalysen und entsprechend angepasste Vorgehensweisen zwingend, welche frühzeitig und offen kommuniziert werden. Zudem muss insbesondere das bevorstehende Projekt in Haute-Sorne zeigen, dass auch EGS-Projekte heutzutage so umgesetzt werden können, dass keine spürbaren Erdbeben entstehen. Dies schafft Vertrauen. Zudem hat sich gezeigt, dass im Fall von Geothermieprojekten, welche durch lokale Unternehmen umgesetzt werden, die Akzeptanz deutlich höher ist. So war in St. Gallen dank der guten Kommunikation und der Volksabstimmung selbst nach den Erdbeben die Akzeptanz für das Projekt weiterhin hoch. Klar ist, dass Tiefengeothermieprojekte die politische

Unterstützung der lokalen Regierung und Behörden benötigen. Eine Kommunikationsstrategie und gut geplante Kommunikationsmassnahmen sind für die Umsetzung entscheidend.

8.6 Finanzielle Risiken

Aufgrund der Marktsituation und der oben genannten Unsicherheiten bestehen finanzielle Risiken. Wird den oben genannten Risiken in der Planung und mit geeigneten Massnahmen begegnet, so können die potentiellen Mehrkosten geringgehalten werden.

Grundsätzlich gilt, dass die Bohrkosten mit der Tiefe exponentiell zunehmen. Somit steigen auch die finanziellen Risiken, was bei der Exploration berücksichtigt werden sollte. Dies ist ein Grund, warum ein top-down-Vorgehen zu bevorzugen ist (erst untief erkunden und sukzessiv mit Erfolg tiefere Plays testen), weil so das Verhältnis von raschem Erfolg und Kenntniserfolg zu eingesetztem Risikokapital deutlich vorteilhafter ist. Hinzu kommt, dass sich untiefe Projekte rascher, günstiger und eher duplizieren lassen.

Die Marktlage, also die Nachfrage nach Tiefbohrungen, sowie der begrenzte Markt von Experten und Planerfirmen beeinflussen die Bohr-, Ausbau- und Planungskosten stark. Die Nachfrage war früher insbesondere abhängig vom Öl- und Gaspreis, heute zusätzlich von der verstärkten Nachfrage nach Geothermiebohrungen.

Bei Bohrprojekten kommt es nicht selten zu unerwarteten Ereignissen (siehe oben), was zu Mehrkosten führen kann. Es empfiehlt sich, für solche unerwarteten Ereignisse Reserven einzuplanen. Insbesondere bei den ersten Explorationsbohrungen sollte eine Reserve auf die budgetierten Bohrkosten von 30-50 % dazugerechnet werden. Folgen weitere Bohrungen nach demselben Bohrkonzzept und mit demselben Bohrteam, ist dieser Zuschlag meist nicht mehr nötig.

8.7 Risiken während der Nutzung

Neben dem erfolgreichen Auffinden einer ergiebigen Warmwasserquelle ist auch ein dauerhaft wirtschaftlicher Betrieb für den Gesamterfolg entscheidend. Während der Nutzung kann es je nach Wasserchemie allmählich zu Ausfällungen von Eisensulfiden und Karbonaten im Filterbereich, in den Rohren und in den Wärmetauschern kommen, was zu Sanierungsmassnahmen führen kann. Die Analyse der Wasserchemie, die Überwachung und Vermeidung der Ausfällungen mittels geeigneter baulicher Massnahmen und angepasster Nutzung muss bereits in der Bohrplanung und dem Nutzungskonzept berücksichtigt werden, damit Folgeproblemen bereits von Beginn an entgegengewirkt werden kann.

Im Betrieb gibt es Möglichkeiten zur Verhinderung von Ausfällungen, beispielsweise indem das geothermische System unter einem bestimmten Systemdruck gefahren wird oder mit dem Einsatz von Inhibitoren. Mit dem Vermeiden von Ausfällungen werden die Wartungsarbeiten und -kosten (u.a. mechanische und chemische Brunnensanierung) deutlich verringert und die Pumpenwechselintervalle deutlich verlängert.

Ein weiteres Risiko kann sein, dass im Untergrund kein genügend grosses Austauschvolumen zwischen der Förder- und Rückgabeböhrung angeschlossen ist. In diesem Fall ist das «Wärmetauscher-Volumen» im Untergrund zu klein und kühlt entsprechend rasch aus. Die Fördertemperatur sinkt im Betrieb kontinuierlich. Dies kann der Fall sein, wenn die

geothermische Nutzung beispielsweise nur entlang einer Störzone stattfindet. Im Extremfall handelt es sich dann um einen thermischen Kurzschluss, bei welchem das Wasser aufgrund der kurzen Verweilzeit im Untergrund nicht ausreichend Zeit hat, sich zu erhitzen, bzw. sich das thermisch aktive Untergrundvolumen schnell auskühlt. Diesem Problem kann entgegnet werden, indem Nutzungskonzepte entsprechend angepasst werden. Dafür sollten der Untergrund möglichst genau bekannt sein und mit Pumptests und Simulationen die Wechselwirkungen gemessen bzw. simuliert werden.

Bei der Wärme- bzw. Kältespeicherung im Untergrund besteht das Risiko der Verluste im Reservoir. Generell erhofft man sich eine Rückgewinnungsrate von 50 bis 70%. Dies hängt in grossem Masse damit zusammen, wie die Anordnung der Förder- und Rückgabeborungen ist, wie schnell das Felsgrundwasser fliesst und wie gross das nutzbare Volumen des Untergrundspeichers ist. Wie oben können die Risiken entsprechend reduziert werden, wenn der Untergrund gut bekannt ist und mit Pumptests und Simulationen eine angepasste Nutzung angestrebt wird. Zudem sollte mit einem Monitoring der Untergrund geeignet überwacht werden (z. B. Druck- und Temperaturmessungen in Monitoring-Borungen), damit die Speicherung optimal angepasst werden kann.

8.8 Anforderungen an den Bohrstandort

8.8.1 Allgemeine Anforderungen

Die Bohrphase umfasst die Einrichtung des Bohrplatzes sowie den Antransport und die Bereitstellung des Bohrgeräts, die Durchführung der Bohrung, den Rückbau und Abtransport des Bohrgeräts, den Ausbau des Bohrlochansatzes für den Dauerbetrieb sowie den Bau der Wärmezentrale.

Idealerweise befinden sich der Bohrplatz und die Wärmezentrale am selben Standort. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig, wie verschiedene Beispiele zeigen (z. B. Riehen). In diesem Fall müsste der Geothermiekreis um eine Verbindungsleitung von der Bohrung mit dem Bohrkeller bis zur Wärmezentrale ergänzt werden. Dies ist zwar mit zusätzlichem Aufwand und Kosten verbunden, erhöht jedoch die Flexibilität bei der Standortwahl.

Baugrund

Der Baugrund sollte insbesondere bei grossen Bohranlagen möglichst stabil sein. Standorte mit Belastungen im Untergrund ("Altlasten") sind zu meiden, da Schadstoffe durch die Bau- und Bohrtätigkeit mobilisiert werden können und die Entsorgung von kontaminiertem Untergrund Mehrkosten verursacht.

Grundwasser

Idealerweise wird die Bohrung in einem Gebiet ohne Schottergrundwasser und fernab von Quellen und Grundwasserfassungen abgeteuft. Bohrungen in Grundwasser-gebieten sind aber nicht ausgeschlossen, da das Risiko einer Kontamination des Grundwassers durch ein bis in den Stauer reichendes Standrohr minimiert werden kann. Zudem sollte ein genügender Abstand

zu Trinkwassernutzungen eingehalten werden. Bohrungen im Bereich nutzbarer Grundwasservorkommen bedürfen einer speziellen Bewilligung.

Bodendenkmäler, Natur- und Heimatschutz

Konflikte mit unter- und oberirdischen Kultur- und Naturdenkmälern wie auch mit Wald, Ortsbild- und Landschaftsschutzgebieten sollen nach Möglichkeit vermieden werden. Entsprechende Schutzabstände sind einzuhalten.

Naturgefahren

Gebiete, die erheblich durch Naturgefahren, insbesondere Hochwasser potentiell betroffen sind, sollen nach Möglichkeit gemieden werden.

8.8.2 Spezifische Anforderungen an Sondierbohrungen und untiefe Bohranlagen

Es muss zwischen einfachen, kleinen und günstigen Sondierbohrungen und den finalen Produktionsbohrungen mit grossen Durchmessern unterschieden werden. Erstere sind im Fall untiefer Plays bis rund 300 bis 400 m Tiefe ähnlich oder leicht grösser als die herkömmlichen Erdwärmesonden-Bohrgeräte und haben ähnliche Anforderungen an den Bohrstandort und Zufahrten. Diese Bohrgeräte können in einigen Tagen bis wenigen Wochen die Sondierbohrungen abteufen. Normalerweise braucht es keine grossen speziellen Vorarbeiten. Evtl. muss ein unbefestigter Bohrplatz temporär mit Kies befestigt werden und von Vorteil ein temporärer Strom- und Wasseranschluss zur Verfügung gestellt werden. Allerdings können diese Bohrungen auch mit Wassertanks und Stromgeneratoren autark betrieben werden. Je nach Lage zu Anwohnern werden Bauzäune mit Lärmschutzmatten aufgestellt. Grundsätzlich erfolgt bei diesen Bohrungen der Betrieb nur tagsüber und werktags. Für die Erstellung eines Brunnens reicht ein Bohrplatz mit einer Fläche von ca. 300-500 m². Die nachfolgenden Fotos geben eine Übersicht, wie ein solcher Bohrplatz und das notwendige Bohrgerät aussehen können.



Abb. 55 Bohrplatz und -anlage für Tiefen bis ca. 400 m

Bsp. Sondierbohrung Flughafen Zürich bis in eine Tiefe von 346 m u.T. im Jahr 2023.



Abb. 56 Erschliessungsbohrung in Itingen

Schrägbohrung für das Geothermieprojekt SolarOne in Itingen BL mit einer Bohrlänge von 360 m im Jahr 1998.

8.8.3 Spezifische Anforderungen für tiefe Produktionsbohrungen

Bei Tiefbohrungen oder Brunnen mit grossen Durchmessern braucht es grössere Bohranlagen und Bohrplätze und entsprechend mehr Gerätschaften und Material. Nachfolgend sind Bohranlagen für die Tiefen von über 1'000 bis 5'000 m abgebildet.



Abb. 57 Bsp. für eine Bohranlage für grosse Tiefen

Abgebildet ist der Bohrplatz und der Bohrturm für das Tiefengeothermieprojekt in Basel 2006 auf dem IWB-Gelände, mit dem bis auf eine Tiefe von 5'000 m u.T. gebohrt wurde. Hinter der Bohranlage ist die temporäre Lärmschutzwand zu den Wohnhäusern erkennbar.



Abb. 58 Bsp. für eine Bohranlage für mittlere Tiefen

Abgebildet ist der Bohrplatz für die Tiefenbohrung Stadel-3 der Nagra, welche im Jahr 2020/21 bis auf 1'280 m u.T. gebohrt hat. Hierbei handelt es sich um einen sehr komfortablen und grosszügigen Bohrplatz.

Platzbedarf

Der Bohrplatz wird in einen «inneren Bohrplatz» und einen «äusseren Bohrplatz» unterteilt. Der äussere Bohrplatz wird dabei lediglich für die Bohrphase benötigt und kann nach Abschluss der Bohrphase wieder zurückgebaut werden. Wie die Fotos zeigen, wird dieser für die Lagerung der Bohrgestänge, Rohrtouren, Container usw. benötigt. Der «innere Bohrplatz» wird für zukünftige Wartungs- und Reparaturarbeiten an der Bohrung auch während des Betriebs benötigt. Der Platzbedarf für Bohrungen über 1'000 m Tiefe beträgt für den äusseren Bohrplatz etwa 2'500 m² bis 10'000 m² und für den inneren Bohrplatz maximal 1'000 m². Der Platzbedarf für den äusseren Bohrplatz hängt stark davon ab, ob alle Verrohrungen bereits auf dem Bohrplatz gelagert werden und wieviel Auffangvolumen bzw. Absetzbecken für das anfallende Wasser während der Hydrotests benötigt werden.

An- und Abtransport des Bohrgeräts

Im Fall von tieferen Bohrungen (bis rund 2'000 m Tiefe) ist das Bohrgerät mitsamt Selbstfahrlaffette bis maximal 100 t schwer. Für An- und Abtransport können bestehende Brücken, Durchlässe usw. vorübergehend verstärkt und enge Kurven durch temporäre Demontage von Signalen, Leiteinrichtungen usw. der Schleppkurve der Selbstfahrlaffette angepasst werden. Die damit verbundenen Aufwendungen fallen in Anbetracht der geringen Kosten eines Sondertransports nicht weiter ins Gewicht. Unterführungen müssen aber zwingend eine lichte Höhe von 4 m haben. Das Aufstellen, Abbauen und der Betrieb des Bohrgeräts dürfen nicht durch Hochspannungsleitungen oder andere Einrichtungen behindert oder gefährdet werden.

Erschliessung des Bohrplatzes

Der Bohrplatz muss vor allem während der Bauphase mit den notwendigen Medien wie Wasser (Trinkwasser/Grauwasser), Anschluss an die Kanalisation, elektrischer Energie auf Mittelspannungsniveau und Kommunikation erschlossen werden. Diese Medien werden später bei Instandhaltungsarbeiten teilweise wieder benötigt.

Bedienung der Bohrstelle während der Bohrung

Die Bohrung dauert mindestens 4 Monate und wird in dieser Zeit mit Zu- und Abtransport, darunter auch 40 t-Fahrzeuge, bedient. Brücken und Durchlässe sollten dieser Belastung widerstehen. Dabei sind aus Lärm-, Erschütterungs- und Sicherheitsgründen Wohnquartiere, Erholungszonen, verkehrsberuhigte Strassen, Velo- und Wanderrouten etc. nach Möglichkeit zu meiden.

Lärmemissionen während der Bohrung

Ohne spezielle Lärmschutzmassnahmen beträgt die Lärmimmission 100 m von der Bohrstelle rund 60 dB(A) und in 400 m Entfernung rund 45 dB(A). Die Bohrstelle sollte deshalb

idealerweise 400 m von lärmempfindlichen Bauten und Anlagen entfernt liegen oder mit entsprechenden Lärmschutzwänden umgeben werden.

8.9 Konflikte bzw. konkurrenzierende Nutzungen im Untergrund

Derzeit gilt noch "First come – first served!". Die Dichte von Nutzungen und Bauwerken sowie die Ansprüche im Untergrund nehmen kontinuierlich zu. An der Oberfläche sind in manchen Gebieten kaum noch Nutzungen im Untergrund möglich. Konkurrenzierende Nutzungen sind Trinkwasser, untiefe und tiefe Geothermie (EWS, Grundwasser, hydrothermal usw.), Wärme-Kälte-Speicher, Gewinnung von Rohstoffen (Kohlenwasserstoffe, Lithium aus Heisswasser, Salz, Kies usw.), CO₂-Speicherung, Tiefenlager für Abfälle und Infrastrukturbauten (z. B. Tunnel, Cargo sous Terrain). Hinzu kommt, dass es auch an der Oberfläche zunehmend schwieriger wird, grössere Bohranlagen aufzubauen oder andere Konflikte einen Bohrplatz verunmöglichen (z. B. Schutzzonen, Wald, Auflagen usw.). Auch die gegenseitige Beeinflussung von bestehenden oder zukünftigen Nutzungen grenzen weitere Nutzungen ein. Z. B. beeinflussen sich die beiden geothermischen Singletten in Kloten und Bassersdorf, obwohl diese über 3 km voneinander entfernt liegen und nur wenige l/s fördern, allerdings ohne Rückgabe. Mit zunehmender Nutzung der Geothermie werden konkurrenzierende Nutzungen entsprechend immer wichtiger. Dies ist aus der oberflächennahen Grundwassernutzung bekannt.

In 100 m Entfernung vom Rückgabeort darf jegliches Grundwasser durch die Nutzung nur um 3 °C verändert werden. Theoretisch schränkt dies jede geothermische Nutzung ein. Es wird aber akzeptiert, dass tiefe Grundwässer, welche nicht für die Trinkwassernutzung in Frage kommen (z. B. saline, hoch mineralisierte Grundwässer), mit einer höheren Temperaturspreizung genutzt werden dürfen. Derzeit werden diesbezüglich auf Bundesebene neue Regelungen gesucht, die dem Grundwasserschutz sowie der Wärme- bzw. Kältenutzung des Untergrundes besser Rechnung tragen (Motion 22.3702 Energiezukunft durch sichere Nutzung des Untergrunds zur Speicherung).

Wichtig ist, dass bei einer Planung von neuen Anlagen bestehende und mögliche weitere Bohrungen in Nutzungskonzepten berücksichtigt werden. Dabei hilft, wenn Ausbau-, Mess- und Nutzungsdaten von bestehenden Anlagen zentral (z. B. beim Kanton) gesammelt werden, damit diese für die Planung zukünftiger Anlagen berücksichtigt werden können. Unter anderem sollte die hydraulische Reichweite einer Nutzung bekannt und «abgesteckt» sein (ähnlich wie dies bei Trinkwasserfassungen bekannt und üblich ist), um in geschützten Bereichen weitere Nutzungen zu regulieren oder zu verhindern. Dies erfolgte z. B. im Fall der geothermischen Nutzung in Bad Schinznach mit einer dreidimensionalen geothermischen Schutzzone (https://gesetzessammlungen.ag.ch/app/de/texts_of_law/713.170). Diese regelt u. a. wie gross der Einzugsradius des geförderten Wassers ist, in welchen Gebieten wie tief gebohrt werden darf und welche umgebenden Nutzungen erlaubt werden können.

9 Erschliessungstechniken

Bereits im Kapitel 2.5 werden die verschiedenen geothermischen Nutzungsarten beschrieben. Jede Quelle dieser Nutzungsarten wird unterschiedlich erschlossen. Diese werden in den nachfolgenden Tabellen beschrieben.

Tabelle 4 Erschliessungstechniken für oberflächennahe/untiefe Geothermie

	Erdwärmesonden (EWS)	oberflächennahe Grundwassernutzung	Grundwassernutzung in tiefen Stockwerken der quartären Rinnen
Technik	Duplex- / Koaxialsonden	Brunnen	
System	geschlossen / konduktiv	Offen / konvektiv	
Nutzungsart	Wärme mit Wärmepumpe, Speicherung Kälte / Wärme (ATES)		
übliche Tiefe	50-400 m	Bis 100 m	100-400 m
Temperaturen	0-20°C	10-15°C	15-25°C
Potential	20-40 W/m je nach Gestein + Nachbarsonden, Felder bis 1 MW	Zehner kW bis wenige MW je nach Filterstrecke, Durchlässigkeit,...	
Reifegrad	ausgereift, ab Stange	Ausgereift, ab Stange	Technisch möglich, aber noch wenig Erfahrung
Fündigkeitsrisiken	keine	keine ausreichend mächtigen, durchlässigen und wasserführenden Schichten vorhanden	
Standortabhängigkeit	unabhängig	Gebunden an Aquifere	
Gesteinsdurchlässigkeit	keine notwendig	Durchlässige Schichten notwendig (z. B. Kies)	
Risiken	Arteser, Erdgas, Anhydrit, Karst, Störzonen	Bohrlochinstabilitäten, ungeeignete Wasserchemie, Altlasten	
Konflikte	Tiefenbegrenzung, Platzbedarf, Dichte bestehende EWS, Nachbarbeeinflussung, nicht in GW-Leitern / Schutzzonen	Nachbarfassungen, 3 K Regelung, Trinkwasser	
Innovation / Entwicklung	Textile EWS von TTS Inova AG, 2SOL, tiefe EWS bis 800 m	Horizontalbohrungen	In Entwicklung
Bohrkosten	50-100 CHF/m mit Anschlüssen		1 Mio. CHF pro Brunnen + Erkundung einige 100'000,-
Möglichkeiten	vorhanden, aber zunehmende Dichte, nicht in GW-Leitern	entlang der Täler	entlang glazial übertiefer Tunneltäler

Kollektoren, Körbe, Register, Pfähle sind aufgrund der geringen Leistung nicht berücksichtigt

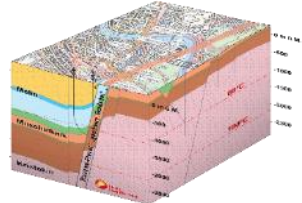
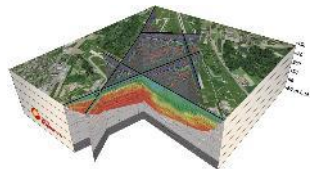
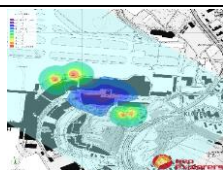
Tabelle 5 Erschliessungstechniken für «mitteltiefe» und «tiefe» Geothermie

	«Mitteltiefe» Geothermie	«Tiefe» Geothermie (hydrothermal)	Enhanced geothermal system (EGS, petrothermal)
Technik	Bohrungen Dublette / Singlette Tiefe Koaxialsonde	Tiefbohrungen / Dubletten	Tiefbohrungen mit künstlich aufgebrochenem Gestein
System	Offen / konvektiv geschlossen / konduktiv	Offen / konvektiv	
Nutzungsart	Wärme mit Wärmepumpe / Wärmedirektnutzung, Thermal- / Heilbäder	Wärmedirektnutzung / Strom	
übliche Tiefe	400 (500) - 2000 m	2000 – 5000 m	3000 – 6000 m
Temperaturen	25 – 60 °C	60 – 180 °C	120 – 200 °C
Potential	1 – 10 MWth	1 – 5 MWel (>120°C) 1 – 40 MWth	1 – 5 MWel Einige 10er MWth
Reifegrad	Wenige funktionierende Beispiele in Schweiz, Erkundung und Erschliessung sind ausgereift	In der Schweiz noch keine Marktreife wie z. B. in Bayern (geophysikalische Erkundung zwingend)	Nur wenige funktionierende Pilotprojekte weltweit, viele Projektabbrüche, noch im Entwicklungsstadium, Seismizität wird noch nicht beherrscht
Fündigkeitsrisiken	Je nach Lage + Kenntnisstand gering (z. B. nachgewiesener Porenaquifer) bis hoch (z. B. unbekannte Bruchzone)	In der Schweiz hoch, da durchlässige / ergiebige Bruchzonen notwendig	Falls Kristallin vorhanden gering
Standortabhängigkeit	Im Fall Porenaquifer (z. B. Tertiär) geringe Abhängigkeit, im Fall von Bruchzonen standortabhängig	Generell in der Schweiz standortabhängig	Tiefe Permokarbontröge o. tiefes Kristallin im Alpenvorland können Projektstandorte eingrenzen
Gesteinsdurchlässigkeit	Durchlässige Schichten (z. B. Tertiäre Sandsteine) o. Bruch- zonen notwendig	In der Schweiz generell Fokus auf Bruchzonen	Dichtes Gestein wird aufgebrochen und künstlich durchlässig gemacht
Risiken	Keine ausreichende Porosität, Klüftung, Durchlässigkeit und somit zu geringe Schüttungsraten, ungeeignete Wasserchemie die zu Ausfällungen / Verockerung führt, in grösseren Tiefen seismisches Risiko mit Schadensforderungen, bohrtechnische Risiken, 3°C- Regelung, thermische Kurzschlüsse, hohe Auflagen von Seiten Bewilligungsbehörden und Einsprachen		tiefes Permokarbon / Bruchzonen vorhanden, ungewollte spürbare Erdbeben mit Schadens- forderungen, Generierung ungenügend grosses Reservoir und somit rasche Auskühlung des Reservoirs, rascher thermischer Kurzschluss, fehlende Akzeptanz, Einsprachen
Konflikte	Aufgrund der grossen Tiefe und wenigen oder nicht vorliegenden Nutzungen derzeit kaum Konflikte (abgesehen an der Oberfläche)		
Innovation / Entwicklung	Reproduzierbarkeit fehlt derzeit noch, geringere Bohr- und Erschliessungskosten, geeignete Stimulationsmassnahmen, mehr Erfahrung und Wissen hinsichtlich Erschliessung und Bewirtschaftung insbesondere bei der Wärme-Kälte-Speicherung, Anpassung 3°C-Regelung (grössere Temperaturspreizungen sollten erlaubt werden), Versicherungslösungen, generell Unterstützung und Förderung von Seiten BFE und z.T. Kanton Entwicklung rascher Verfahren zur Projektumsetzung		Generation grosser Reservoirs bei gleichzeitiger Beherrschung der Seismizität, günstigere Bohrtechnik, Versicherungen
Bohrkosten	800 – 4'000 CHF / Bohrmeter	3'000 – 12'000 CHF / Bohrmeter	Mehrere 10er Mio. CHF
Möglichkeiten in NW OW	Viele Bruchzonen in allen Schichten	Tiefe Bruchzonen	Abwarten Projekt Haute-Sorne

10 Typisches Vorgehen der Erkundung und Erschliessung

Eine zielführende Erkundung von geothermischen Plays würde wie folgt erfolgen:

Tabelle 6 Phasen der Erkundung und Erschliessung eines geothermischen Reservoirs

Phasen	Wichtigste Arbeitsschritte und Ziele pro Phase	
Phase 1 Vorprojekt	- Definition und Bewertung geothermische Plays - Auswahl geeignetes Play für die geforderte Nutzungsart - Detaillierte geologische Prognose vom Untergrund am ausgewählten Standort mit bestehenden Daten - Explorationskonzept - Wirtschaftlichkeit, Finanzierung, Fördergelder, Geschäftsmodell	
Phase 2 geophysikalische Erkundung	- Planung, Ausschreibung, Bewilligungen, Permitting - Durchführung geophysikalische Vermessung (z. B. 2D o. 3D-Seismik) - Processing der Daten - Interpretation der Daten - Erstellung geol. Modell - Definition Bohrziel - Finanzierung Phase 3 Sondierbohrung(en) Ziele: - Visualisierung Aufbau Untergrund - Nachweis & Lokalisierung Play (z. B. Bruchzone, Rinne) - Schliessen von Wissenslücken - Grundlagen für Bohrplanung - Definition Bohrziel & Bohrstandort Exit, falls Bohrziel (z. B. Bruchzone) nicht vorhanden	 
Phase 3a Sondierbohrung(en)	Je nach Wissensstand, Bohrtiefe und Kosten-Nutzen werden vor einem ersten Testbrunnen / einer Produktionsbohrung einfache, rasch durchführbare & günstige Sondierbohrungen erstellt - Planung, Ausschreibung, Bewilligungen - Ausführung einer o. mehrerer Sondierbohrungen - Logging / Messungen in Sondierbohrung - Definition geol. Aufbau Untergrund - Hydrogeol. Bewertung Aquifer Ziele: - Definition geol. Aufbau Untergrund (Lithologien) - Nachweis von gesuchten Horizonten, Lagen o. Bruchstrukturen - Messen / Abschätzen von Temperatur, Wasserführung, Durchlässigkeiten - Grundlagen für Planung Testbrunnen - im Fall mehrerer Sondierbohrungen Definition bester Bohrstandort für Testbrunnen / Produktionsbohrung Exit, falls ungenügende Durchlässigkeit o. nicht angetroffene Horizonte / Strukturen	
Phase 3b Testbrunnen / Produktionsbohrung	- Planung, Ausschreibung, Bewilligungen - Ausführung Testbrunnen (vollwertige Produktions- o. Rückgabeböhrung) - Entwicklung Testbrunnen (z. B. Stimulationsmassnahmen) - Pump- bzw. Fördertests - Logging / Messungen in Brunnen - Hydrogeol. Bewertung Aquifer - Finanzierung Phase 4 Ziele: - Definition Aquifereigenschaften (Wasserchemie, Alter, Durchlässigkeit, Temperatur, Fauna usw.) - Nachweis Brunnenleistung, Ergiebigkeit, Speichereigenschaft,... Exit, falls ungenügende Brunnenleistung bzw. Ergiebigkeit	
Phase 4 Konzepte	- Erstellung hydrogeol. 3D-Modell - Simulationen für verschiedene Nutzungen / Bewirtschaftungskonzepte - Wirtschaftlichkeitsberechnungen - Konzepte zu Nutzung, Erschliessung, Monitoring - Konzessionsantrag	

Phase 5 Erschliessung	• Erschliessung geothermisches Reservoir mit weiteren Brunnen / Produktions- und Rückgabeborungen • Leitungsbau • Bau- o. Anpassung Energiezentrale
	• Nach einer erfolgreichen Erschliessung erfolgt mit Phase 6 der Betrieb und das Monitoring und mit Phase 7 der Rückbau

11 Gesetzesgrundlagen und Verordnungen

Nachfolgend werden die wichtigsten Gesetzesgrundlagen für die geothermische Nutzung in den Kantonen Nid- und Obwalden zitiert.

11.1 Kanton Nidwalden

NG 111 Verfassung des Kantons Nidwalden

...

Art. 52

Der obligatorischen Abstimmung unterliegen: ...

*6. die Genehmigung von Verleihungen zur Benützung des Untergrundes für Ausbeutung, Produktion und Lagerung sowie deren vorbereitende Handlungen mit Ausnahme der **Grundwasser- und Erdwärmenutzung**.*

NG 211.1 Gesetz über die Einführung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches (Einführungsgesetz zum Zivilgesetzbuch, EG ZGB)

...

3.6.1a Herrenloses Land und Untergrund

Art. 83a Hoheit

1 Das herrenlose Land sowie der Untergrund stehen dem Kanton zur ausschliesslichen Verfügung zu. ...

Art. 83b Übertrag auf Dritte

1 Die Benützung von herrenlosem Land oder des Untergrundes durch Dritte bedarf im Rahmen von Art. 83c einer Verleihung. ...

Zugehörige Verordnung:

NG 211.15 - Vollziehungsverordnung zum Gesetz über die Einführung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches betreffend das herrenlose Land und den Untergrund (Vollziehungsverordnung 2 zum EG ZGB)

*Die **Geothermie fällt nicht unter das Bergregalgesetz** (NG 852.1 Gesetz über die Gewinnung mineralischer Rohstoffe). Es bedarf somit für die Erkundung auch keiner Schürfbewilligung.*

*Explizit ausgenommen in NG 852.12 – Vollziehungsverordnung zum Gesetz über die Gewinnung mineralischer Rohstoffe: § 1 Stimmberechtigte: Verleihungen zur Benützung des Untergrundes für Ausbeutung, Produktion und Lagerung sowie deren vorbereitende Handlungen **mit Ausnahme der Grundwasser- und Erdwärmenutzung** bedürfen gemäss Art. 52 Ziff. 6 der Kantonsverfassung der Genehmigung der Stimmberechtigten.*

Die **Geothermie fällt unter das Gewässergesetz** (NG 631.1 – Gesetz über die Gewässer vom 12.02.2020, aktuelle Version in Kraft seit 01.09.2024)

Art. 71 Bewilligungen

...Der Kanton erteilt gewässerschutzrechtliche Bewilligungen für die Erstellung und Änderung: ...

*4. von Anlagen zur **Nutzung von Erdwärme**;*

Art. 98 Grundsatz

*...Die Nutzung der Gewässer zur Kraft-, Wärme- oder Kältegewinnung ist **nicht frei**.*

Art. 100 Grundsätze

*...Die Nutzung öffentlicher Gewässer bedarf einer **Konzession**, soweit sie nicht gemäss Art. 98 frei ist («bis 50 Liter pro Minute zum privaten Eigengebrauch»); der Regierungsrat kann in einer Verordnung Ausnahmen von der Konzessionspflicht vorsehen.*

Art. 106-126: Konzessionsverfahren und Konzession

u.a. Art. 118 Dauer... Der Regierungsrat kann in einer Verordnung für Konzessionen, deren Investitionskosten in der Regel nicht binnen 20 Jahren amortisiert werden können, längere **Konzessionsdauern** von höchstens 40 Jahren vorsehen.

Art. 131: Konzessionsgebühren

Zusätzlich zu den amtlichen Kosten werden in Konzessionsverfahren erhoben: einmalige Konzessionsgebühren für die Erteilung des Nutzungsrechtes; und jährlich wiederkehrende Konzessionsgebühren für die Nutzung des Rechts, wie Wasserzinsen oder Nutzungsentschädigungen...

Massgebliches Verfahren gemäss NG 721.11 – Vollzugsverordnung zum kantonalen Umweltschutzgesetz:

Prüfung der Umweltverträglichkeit bei Anlagen zur Nutzung der Erdwärme (einschliesslich der Wärme von Grundwasser) mit mehr als 5 MWth →: Baubewilligungsverfahren (Art. 141 ff. PBG); Bei der Nutzung der Wärme von Grundwasser das Konzessionsverfahren (Art. 106 ff. GewG)

11.2 Kanton Obwalden

GBD 101 Verfassung des Kantons Obwalden

...

Art. 37 Wälder, Gewässer, Strassen

Dem Kanton steht die Aufsicht über die Waldungen sowie innerhalb der Schranken der Gesetzgebung die Hoheit über die Gewässer und Verkehrswege zu. Er regelt durch Gesetz **Gewässernutzung**, Gewässerkorrekturen und Strassenwesen.

Gemäss Art. 38 der Kantonsverfassung vom 19. Mai 1968 (KV; GDB 101) ist der Kanton Obwalden Inhaber des Bergbauregals (Gewinnung von Bodenschätzen). Eine präzisierende Gesetzgebung des Kantons zur Nutzung des Bergregals gibt es derzeit aber noch nicht. Für andere Nutzungen des Untergrunds (z. B. Nutzung der tiefen Erdwärme, gewerbsmässige Nutzung von Höhlen, Einlagerung von Stoffen in unterirdischen Lagerinfrastrukturen, Gasspeicherung etc.) existiert weder eine Grundlage in der Verfassung noch in einem Gesetz. Da der Nutzung des Untergrunds eine stetig wachsende Bedeutung zukommt, ist die Schaffung einer entsprechenden Gesetzgebung daher angezeigt. ...

Aktuell bestehen Vorschriften betreffend:

- Wärmenutzung mittels Erdsonden, Erdregistern und Energiepfählen bzw. sog. „untiefe“ Geothermie (vgl. Ausführungsbestimmungen über die Wärmenutzung aus dem Untergrund vom 13. Mai 2008 [GDB 750.211]),
- Abbau von Steinen und Erden sowie Materialentnahmen aus Gewässern (Baugesetz vom 12. Juni 1994 [BauG; GDB 710.1]), Gesetz über den Wasserbau und die Wassernutzung vom 31. Mai 2001 [Wasserbaugesetz; WBG; GDB 740.1] und Wasserbauverordnung vom 31. Mai 2001 [WBV; GDB 740.11]),
- Entnahme von Wasser oder Wärme aus Gewässern oder Zuführung von Wasser oder Wärme in Gewässer zu Trink- oder Gebrauchszwecken (WBG und WBV),
- Ausnützung der Wasserkraft (WBG und WBV).

12 Förderbeiträge

Die nachfolgenden Ausführungen gelten zum Zeitpunkt der Publikation dieses Berichts. Aufgrund der Sparbemühungen des Bundes muss davon ausgegangen werden, dass die Förderbeiträge aus der CO₂-Gesetzgebung und die Innovationsbeiträge ab dem Jahr 2027 gestrichen werden.

Energiegesetzgebung

Die Prospektion und Erschliessung von geothermischen Ressourcen sowie die Erstellung neuer Geothermieranlagen wird gemäss Art. 27b des Energiegesetzes mit einem Investitionsbeitrag von höchstens 60% der anrechenbaren Kosten unterstützt. Auch die Projektierung neuer Geothermieranlagen wird gemäss Art. 27b Abs. 3 mit höchstens 40% der anrechenbaren Kosten unterstützt, wobei dieser Betrag von einem allfälligen Investitionsbeitrag abgezogen wird.

Gemäss Art. 33 kann bei Geothermieranlagen zur Stromproduktion anstelle des Investitionsbeitrags eine Geothermie-Garantie zur Risikoabsicherung von Investitionen im Rahmen der Prospektion und der Erschliessung von geothermischen Ressourcen sowie der Errichtung von Geothermieranlagen beantragt werden. Gemäss Art. 26 der Energieverordnung wird die Garantie bei Misserfolg vollständig und bei Teilerfolg anteilmässig ausbezahlt.

CO₂-Gesetzgebung

Für Geothermieprojekte für die Wärmebereitstellung werden gemäss Art. 34a Abs. 1 Bst. a und b des CO₂-Gesetzes und Art. 112 Abs. 2 der CO₂-Verordnung Beiträge von bis zu 60% der anrechenbaren Investitionskosten gewährt. Die anrechenbaren Investitionskosten werden detailliert im Anhang 12 der CO₂-Verordnung aufgeführt.

Innovation

Weiter besteht die Möglichkeit, über die Sektion Energieforschung und Cleantech des Bundesamts für Energie Finanzhilfen für Energieforschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte zu beantragen. Das Projekt muss ein entscheidendes Anwendungspotential und einen hohen Innovationsgehalt aufweisen sowie einen Mehrwert für die Allgemeinheit schaffen. Der Beitrag liegt bei 40 % der nicht amortisierbaren Mehrkosten.

13 Schlussfolgerungen & empfohlenes Erkundungskonzept

13.1 Wissensstand

Dank der vielen untiefen Untergrunddaten von Erdwärmesonden und der gut bekannten Oberflächengeologie kann der oberflächennahe Untergrund in den Kantonen Nid- und Obwalden recht gut prognostiziert werden. Die Tiefenlage der Helvetischen Schichten kann somit lokalisiert werden. Tiefergreifende Bruchzonen können vermutet werden, aber der genaue Verlauf ist unbekannt. Mit der Tiefe nimmt der Kenntnisstand deutlich ab, da es kaum Tiefbohrungen (nur drei Bohrung tiefer 1'000 m: Wellenberg SB-1/2/3 bis max. Tiefe von 1'865 m) und nur eine 2D seismische Vermessung des Untergrundes gibt (z. T. veraltete Seismik mit ungenügender Qualität und mit Fokus auf tiefes autochthones Mesozoikum). Entsprechend können Bohrziele in Bruchzonen insbesondere mit zunehmender Tiefe nicht genau prognostiziert werden. Gleichwohl reicht die Seismik aus, die Tiefenlage und den Verlauf der tiefen Schichten grob zu definieren. Auch kann die Aussage gemacht werden, dass Bruchstrukturen und Permokarbon vorhanden sind.

Die Vorkommen und Tiefenlage von potentiellen Plays können dank dem bestehenden Kenntnisstand vergleichsweise gut bestimmt werden. Somit lassen sich zu erwartende Aquifer-Temperaturen gut abschätzen. Hingegen können aufgrund der fehlenden Bohrungen die tatsächlichen Durchlässigkeiten, Ergiebigkeiten, möglichen Schüttungsraten und somit das tatsächliche geothermische Potential eines Brunnens nur abgeschätzt werden.

13.2 Geothermische Plays

Die erfolgversprechendsten Plays¹⁰ sind generell an Bruch- und Störzonen gebunden. Die stärkste Wasserführung wird in Kreuzungsbereichen verschiedener Bruchzonen innerhalb von kompetenten Schichten, welche zur Klüftung neigen erwartet. Diese Plays kommen im Untersuchungsgebiet flächendeckend und häufig vor. Mögliche Nutzungen können mehrfach entlang gleicher km-langer und paralleler Bruchzonen reproduziert werden. Entsprechend gross ist das damit verbundene theoretische geothermische Potential. Die verschiedenen Plays werden in Form von Faktenblättern im Kapitel 6.3.2 beschrieben und bewertet.

Die Kantone Nid- und Obwalden gehören geologisch zu den vielfältigsten Kantonen mit Schichten aus allen Zeitepochen und vielen Bruch- und Störzonen im Untergrund. Dort wo kompetente Gesteine von Störzonen durchzogen sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Gesteine geklüftet und somit durchlässig und wasserführend sind. Dies betrifft insbesondere die reinen Kalksteine der Helvetischen Decken. Solche Zonen eignen sich für die geothermische Nutzung. Zudem waren in der Vergangenheit das Top Kristallin und das Top Malm der Verwitterung ausgesetzt. Die dabei entstandenen Verwitterungshorizonte wurden in der Schweiz bereits öfters angebohrt und haben teils erhöhte Durchlässigkeiten und eine Wasserführung gezeigt. Die nahe gelegene Tiefbohrung Entlebuch-1 hat am Top Malm eine solche durchlässige und geklüftete Zone erbohrt.

Während der Eiszeiten entstanden 200 bis 400 m tiefe Rinnen, die an der Basis meist durchlässige und wasserführende Schotter aufweisen. Diese eignen sich gut als Aquiferspeicher aber auch für die reine Wärmenutzung. Es fehlen aber die Nachweise mittels Bohrungen.

¹⁰ geeignete geologische Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung, Abb. 2

13.3 Geothermisches Potential

13.3.1 Wärmenutzung

Die zu erwartenden Schüttungsraten liegen bei den attraktivsten Plays zwischen 5 bis 30 l/s (im besten Fall vielleicht auch 50 l/s). Im Fall der basalen Schotter in den eiszeitlichen Rinnen darf auf Basis der bisherigen Projekte mit 20-80 l/s gerechnet werden (vorausgesetzt, dass basale Schotter nachgewiesen werden).

Da diese Plays in verschiedensten Tiefenlagen angetroffen werden, variieren die zu erwartenden Felstemperaturen zwischen rund 30 bis über 140 °C (15 bis 25 °C in den basalen Schottern der Rinnen, Abb. 35 und Abb. 36). Die erfolgversprechendsten Plays, welche zudem rasch und im Vergleich zu Tiefbohrungen über 4 km «günstig» erkundet werden können (z. B. Bruchzonen in den Kalksteinen der Helvetischen Decken oder die basalen Schotter in den eiszeitlichen Rinnen) liegen in Tiefen, welche nur für eine Wärmenutzung mit Wärmepumpe geeignet sind. Letztere lassen sich auch als Aquiferspeicher nutzen. Die tieferen Plays im autochthonen Mesozoikum, Permokarbon oder kristallinen Grundgebirge weisen deutlich höhere Temperaturen auf und sind für eine Direktwärmenutzung oder für die Stromgeneration geeignet.

Die thermischen Entzugsleistungen können je nach Schüttungsrate und Temperatur rund 0.5 bis 10 MW_{th} pro Brunnen erreichen (Abb. 45). Die Bandbreite wird im Wesentlichen durch die Schüttungsrate definiert, da diese die grösste Unsicherheit aufweist. Konservative Werte sollten eher bei 0.5 bis 3 MW_{th} angesetzt werden. Die Fündigkeitschancen für die erwarteten Schüttungsraten müssen je nach Play, dessen Tiefe, Erkundungs- und Wissensstand mit gering bis mittel (alle tiefen Plays A bis F und H) sowie mittel bis hoch (untiefe Plays G und I) eingeschätzt werden.

Aufgrund der Vorkommen unzähliger Bruchzonen sind pro Play mehrere Förderbrunnen bzw. Brunnendubletten möglich (Abb. 5 und Abb. 6). Nur bezogen auf die beiden attraktivsten Plays (Bruchzonen in den Kalksteinen der Helvetischen Decken und basale Schotter in den eiszeitlichen Rinnen) könnten in den Kantonen Nid- und Obwalden rund 10 bis 30 Dubletten mit je einer thermischen Leistung von rund 0.5 bis 3 MW_{th} erstellt werden. Zudem kann mit einem Aquiferspeicherpotential in den eiszeitlichen Rinnen von einigen Dutzend GWh gerechnet werden.

Die grossen Variationen bzw. Unsicherheiten pro Play in Abb. 2 beruhen darauf, dass mit dem derzeitigen Kenntnisstand insbesondere die totale Anzahl Brunnen, aber auch die Aquifertemperatur und die Schüttungsrate und folglich die daraus abgeleitete Leistung pro Brunnen nur abgeschätzt werden können.

Der geschätzte jährliche Energiebezug von gemittelt ca. 100 GWh aus dem Untergrund (Annahme: 20 Dubletten mit 1.5 MW_{th} und 3'000 Laststunden) könnte einen Anteil von über 10% am Gesamtbedarf für Raumwärme und Warmwasser der beiden Kantone von 800 GWh decken.

13.3.2 Stromproduktion

Für die Stromgewinnung kommen in den Kantonen Nid- und Obwalden entweder der Paläokarst, durchlässige Bruchzonen im autochthonen Mesozoikum, im kristallinen Grundgebirge, entlang der Permokarbon-Trogränder, die Überschiebungszone des Aar-Massivs sowie weitere Bruch- und Störzonen im Aar-Massiv inklusive deren

Sedimentbedeckung oder künstlich erzeugte Reservoirs in Frage (EGS = Enhanced geothermal system, AGS = advanced geothermal system, siehe z. B. Abb. 44 und Abb. 45). Dass tiefe Bruchzonen vorkommen, kann auf Basis der Seismik sicher angenommen werden. Dass solche Bruchzonen auch durchlässig sein können, zeigen verschiedene Tiefbohrungen in der Schweiz. Ob diese aber in grossen Tiefen von über 4 km Tiefe ausreichend ergiebig und nachhaltig wasserführend sind, ist nicht gesichert (vergleiche mit Abb. 37 und Abb. 38). Die Bandbreite der Leistung wird ebenfalls von der Schüttungsrate kontrolliert und liegt bei den hydrothermalen Plays im Bereich von 5 bis 10 MW_{th} oder von 0.5 bis 2 MW_{el} bei gleichzeitig hohen Fündigkeitsrisiken.

EGS und AGS haben beide noch einen Pilotcharakter, werden generell in Europa aufgrund der hohen Bohrkosten als noch nicht wirtschaftlich betrachtet und die Akzeptanz ist aufgrund der Erdbebenrisiken gering. Die meisten bisherigen weltweiten EGS-Projekte wurden abgebrochen (Gründe: Schaden-Erdbeben, unzureichender Wasserfluss, Ausfällungen, fehlende Wirtschaftlichkeit usw.). Allerdings werden derzeit in den USA grosse EGS-Projekte mit ersten deutlich günstigeren Bohrungen und erfolgsversprechenden künstlich erschaffenen Reservoirs umgesetzt. Der Langzeitbetrieb muss aber auch bei diesen die Tauglichkeit erst noch beweisen. Ob in naher Zukunft ein ähnlich günstiges Bohren in der Schweiz möglich sein wird, ist aufgrund weiterer Rahmenbedingungen fraglich (höhere Auflagen an Umwelt und Bohrplatz, wenige Bohrgeräte und Bohrfirmen usw.).

Bevor in den Kantonen Nid- und Obwalden auf solche Projekte gesetzt werden kann, sollte der Erfolg vom EGS-Projekt Haute-Sorne im Kanton Jura abgewartet und auf dessen Erkenntnissen aufgebaut werden. Mit einem Erfolg in Haute-Sorne würde die Akzeptanz in diese Technologie steigen und eine Umsetzung beschleunigen. Derzeit werden für EGS-Projekte in der Schweiz möglichst kristalline Grundgebirgseinheiten ohne Bruch- und Störzonen bevorzugt. Im Untersuchungsgebiet erschweren aber tiefe Permokarbon-Tröge, die alpine Deformation mit reichlich Bruch- und Störzonen sowie die erhöhte Erdbebengefährdung eine Vorhersage, wo und ob EGS-Reservoirs erfolgreich und schadenfrei generiert werden könnten. Die grosse Tiefe des Kristallins von über 5 bis 6 km ist hinsichtlich der Bohrkosten nicht dienlich.

13.3.3 Aquiferspeicher / Wärmenutzung eiszeitliche Rinnen

Mit den kürzlich erfolgten Erkundungen am Flughafen Zürich, in Biel, in Zug und in Muri, sowie älteren bestehenden Brunnen in ähnlichen Rinnen (z. B. Seon bei Lenzburg oder Münsingen im Aaretal) kann davon ausgegangen werden, dass sich auch in den tiefen eiszeitlichen Rinnen in Nid- und Obwalden durchlässige Schotterlagen befinden. In jeder bisher erkundeten Rinne wurden tiefe bisher ungenutzte und wasserführende Schotterlagen angetroffen. Pro Brunnen kann mit Schüttungsraten von einigen 1'000 l/min ausgegangen werden. Die thermischen Leistungen pro Brunnen würden bei ca. 1 bis 3 MW_{th} liegen (mit Temperaturspreizung von rund 4 bis 10 °C). Das Speicherpotential pro Brunnen ohne Verluste liegt bei 1 bis 5 GWh. Die Verluste sind ohne Wissen der Rahmenbedingungen schwer abzuschätzen, aber können basierend auf wenig publizierten Werten im Grössenbereich von 20 bis 40 % angenommen werden. Im bekannten Fall des Aquiferspeichers vom Reichstag in Berlin liegen die Verhältnisse von genutzter zu eingelagerter Kälte bzw. Wärme je nach Bewirtschaftung zwischen rund 50 und 80 % (gespeicherte Wärmemengen ca. 2.6 und 4.2 GWh/a).

Es können mehrere Brunnen erstellt werden. Welche Abstände zwischen den Brunnen notwendig sind, ist besonders von der Fliessgeschwindigkeit und dem Nutzungskonzept

abhängig. Aufgrund der Form der «beckenartigen» Rinnen und der Tatsache, dass die bisher datierten Grundwässer sehr alt sind und in bestehenden Nutzungen die Neubildung des Grundwassers gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass das Grundwasser in den basalen Schottern eine Art stehendes Gewässer darstellt, also dass das Grundwasser kaum fließt bzw. einen geringen hydraulischen Gradient aufweist, zumindest deutlich weniger als in den bekannten oberflächennahen Grundwässern. Dies wäre ein grosser Vorteil für eine Energiespeicherung, da die Verluste gering wären und die Bewirtschaftung einfacher zu gestalten wäre. Die bisher analysierten Grundwässer waren gering mineralisiert und sauerstoffarm.

Bisher bestehen keine Aquiferspeicher in diesem Play-Typ, entsprechend gibt es auch keine Erfahrungswerte. Zudem kann die Anlage in Konkurrenz zur Trinkwasserversorgung stehen und Nutzungen unterliegen je nach Sichtweise der 3 °C-Regelung in 100 m Entfernung (letztere wird aber derzeit vom BAFU neu behandelt, mit dem Ziel einer grösseren erlaubten Temperaturspreizung). Da die Grundwässer generell mit ca. 20 °C zu warm sind und eine sehr geringe Grundwasserneubildung aufweisen (vgl. mit Trinkwasserfassung in Seon oder Flughafen Zürich), sind Trinkwassernutzungen aus diesen basalen Schottern nicht nachhaltig und somit wären diese Aquifere wiederum gut für eine Wärme-Kälte-Speicherung geeignet.

13.4 Wirtschaftlichkeit und Risiken

Je tiefer gebohrt wird, desto mehr nehmen die Bohrkosten, die technischen Risiken und Fündigkeitsrisiken zu. Während Bohrungen bis in 1 km Tiefe je nach Ausführung rund 1 bis 3 Mio. CHF kosten, zeigen vergangene Projekte in der Schweiz, dass die gesamten Bohrkosten umgerechnet auf den Bohrmeter bei tiefen Bohrungen über 2 km im Bereich von 7'000 bis 12'000 CHF/m liegen und in den letzten Jahren tendenziell zugenommen haben.

Derzeit reichen die Untergrunddaten nicht aus, um insbesondere tiefe Bohrziele und Untergrundparameter genau zu definieren. Dafür sind ergänzende seismische Erkundungen sowie tiefe Bohrungen notwendig. Insbesondere die Grenzen und Geometrie der Permokarbon-Tröge sowie der Verlauf von tiefgreifenden Bruchzonen können derzeit nur sehr vage prognostiziert werden. Aufgrund des geringen Kenntnisstandes vom tiefen Untergrund und der fehlenden Nachweise in den Kantonen Nid- und Obwalden müssen die Fündigkeitschancen insbesondere für die tiefen und bisher nicht angebohrten Plays häufig mit gering eingeschätzt werden (siehe Abb. 45). Umgekehrt können einige untiefe Plays (z. B. Play-Typ G, Bruchzonen in Kreidekalken der helvetischen Decken und Play-Typ I, basale Schotter der eiszeitlichen Rinnen) dank bestehender Seismik als sicher vorliegend und mit mittleren bis hohen Fündigkeitschancen bewertet werden. Nachfolgend werden zum Vergleich die Wärmekosten der sehr tiefen Plays den flachsten Plays gegenübergestellt.

Die Kosten, die Risiken und das mögliche geothermische Potential definieren, welche Plays zu empfehlen sind. Ein **Tiefengeothermieprojekt in das Top des autochthonen Malms** (Play-Typ A2 oder B) benötigt eine vorgängige seismische Erkundung und eine Tiefbohrung von rund 5 km Tiefe. Für einen ersten Nachweis von ergiebigem Heisswasser ist ein **Risikokapital von rund 50 bis 70 Mio. CHF** für die Planung, seismische Erkundung und erste Bohrung inkl. Tests und Monitoring notwendig. Nicht berücksichtigt sind allfällige Förder- oder Risikobeiträge vom Bund (siehe Kapitel 0). Die Gesamtkosten für eine Dublette und Erschliessung liegen bei über 100 Mio. CHF. Im besten Fall ist mit einer Dublette eine thermische Leistung von rund 5 bis 10 MW_{th} oder 0.5 bis 2 MW_{el} bei gleichzeitig hohen Fündigkeitsrisiken möglich. Die

Wärmekosten (Betriebskosten und Kapitalkosten für Erkundung, Dublette 2x5 km, Zentrale usw. mit Annuität 20 Jahre, Zins 2.5%, ohne Leitungsbau, ohne Förder- bzw. Risikobeiträge) liegen im Fall 5 MW_{th} bei ca. **36 Rp/kWh** und im Fall 10 MW_{th} bei ca. **18 Rp/kWh**. Es sollte vorweg evaluiert werden, welches Verhältnis von Risiken und Kosten zu Ertrag noch tragbar sind.

Ein **Aquiferspeicher in den basalen Schottern der eiszeitlichen Rinnen** zeigt ein deutlich attraktiveres Verhältnis von Kosten zu Risiken und Ertrag. Allerdings ist das Temperaturniveau viel tiefer, was den Einsatz von Wärmepumpen nötig macht. Wirtschaftlichkeitsberechnungen von ähnlichen Projekten zeigen, dass mit einem Brunnencluster Wärme oder Kälte von 10 bis 16 GWh mit Leistungen von 5 bis 8 MW_{th} alternierend eingespeichert bzw. entzogen werden können. Dafür sind je nach Brunnenabständen, Temperaturspreizung und Schüttungsrate rund 6 bis 10 Brunnen notwendig, welche sich rund hälftig auf Förder- und Rückgabebrunnen aufteilen. Die Kosten pro kWh (inkl. Abschreibung, Unterhalt, Leitungsbau, Anpassung Energiezentrale, Monitoring) liegen je nach Anzahl Brunnen und Leitungsbau bei rund **14 bis 18 Rappen pro kWh**. Selbstverständlich sind auch nur einzelne Dubletten mit einem Förder- und einem Rückgabebrunnen mit Leistungen von rund 1 bis 3 MW_{th} möglich. Für eine Dublette mit vorgängiger Erkundung muss je nach Tiefe mit Kosten von rund 1 bis 2 Mio. CHF gerechnet werden. Das **Risikokapital** bis zu einem ersten Nachweis, ob durchlässige und wasserführende Schotter vorliegen, mit 1 bis 3 einfachen Sondierbohrungen und einer vorgängigen geophysikalischen Erkundung liegt bei rund **150'000 bis 300'000 CHF**.

Die Zentralschweiz ist ein aktives Erdbebengebiet. Die Erdbeben werden in Tiefen lokalisiert, welche auch für die geothermische Nutzung interessant sind. Das bedeutet, dass durch die rezente Erdbebentätigkeit entweder neue Bruchzonen entstehen oder alte bestehende Bruchzonen reaktiviert werden. Dies wiederum kann positiv aber auch problematisch für die Geothermie gedeutet werden; positiv, weil durch die Bruchvorgänge neue Wegsamkeiten für Grundwässer geschaffen werden oder alte erneut aufgebrochen werden und somit ihre Durchlässigkeit behalten können; negativ, weil eine Erdbebengefährdung in der Geothermie problematisch ist, da das Triggern von Erdbeben schwer kontrollierbar ist. Spürbare Erdbeben wurden in der Vergangenheit durch Geothermieprojekte ausgelöst und führten teils zu Schäden und Projektabbrüchen (siehe Kapitel 8.3). Spürbare Erdbeben gilt es zwingend zu vermeiden.

13.5 Empfehlungen

Hinsichtlich Fündigkeitschancen, Kosten, Risikokapital, Erkenntnisgewinn und Reproduzierbarkeit empfehlen wir, mit der Erkundung und der Erschliessung der weniger tiefen Plays zu starten (Abb. 45: Play-Typen G und I, siehe nachfolgende Beispiele). Hier kann für geringe Kosten ein hoher Mehrwert für Folgeprojekte sowie Akzeptanz geschaffen werden. Der Wissensstand im Fall der untiefen Plays ist meist hoch, es gibt vergleichbare und erfolgreiche Nachweise in ähnlicher Geologie und diese untiefen Plays lassen sich einfach und rasch erkunden, testen und duplizieren. Können mehrere Projekte in den gleichen Plays und Tiefenlage umgesetzt werden, sinken auch die Erkundungs- und Bohrkosten, was die Wirtschaftlichkeit der Projekte erhöht, ähnlich wie in den Anfängen der Erdwärmesonden.

Im Gegensatz dazu stehen die tiefen hydrothermalen Plays, welche für eine Direktnutzung oder Stromgewinnung geeignet wären (Abb. 45 Play-Typen A bis F). Solche Projekte haben derzeit in der Schweiz immer noch Pilotcharakter und die Erfolgchancen sind derzeit meist kaum prognostizierbar, so auch im Untersuchungsgebiet. Zudem bedingen die grossen Bohrtiefen ein

hohes Risikokapital von über 50 Mio. CHF bei eher hohen Fündigkeitsrisiken und erwarteten thermischen Leistungen von wenigen MW_{th}. Die vergangenen Misserfolge in der Schweiz können auf die fehlende Erfahrung und den geringen Kenntnisstand vom Untergrund zurückgeführt werden, nicht unbedingt darauf, dass in grösseren Tiefen keine wasserführenden Zonen vorhanden sind. Um die Erfolgchancen zu erhöhen, sollte zu Beginn versucht werden, erfolgreiche Projekte wie in Riehen, Yverdon-les-Bains oder Bad Schinznach in ähnlichen geologischen Situationen zu duplizieren.

Es wird empfohlen, die grossen Tiefen erst nach Erfolgen und gewonnenen Erkenntnissen im untiefen Bereich anzugehen (top-down-approach). Wenn die untiefen Plays erfolgreich sind und Indizien bestehen, dass Grundwässer aus grösseren Tiefen entlang von Bruchzonen aufsteigen, so können in einem zweiten Schritt die gleichen oder ähnlichen Bruchzonen in grösseren Tiefen getestet werden.

Aufgrund des geringen Kenntnisstands und weniger Nachweise sollte zu Beginn der Erkundung nicht nur auf ein Play bzw. eine Bruchzone gesetzt werden. Stattdessen empfehlen wir, den Untergrund systematisch zu erkunden und den Erfolg weniger projektbezogen zu suchen. Wenn eine erste Erkundungsbohrung zu geringe Durchlässigkeiten bzw. Schüttungsraten aufweist, sollte daraus nicht geschlossen werden, dass das Play allgemein ungenügend ist. Entsprechend sollte auf eine systematische Erkundung mit mehreren Sondierbohrungen in verschiedenen Brüchen und Zielhorizonten gesetzt werden, sodass ein Erkenntnisgewinn für Folgeprojekte möglich ist, die besten Plays und Standorte ausgeschieden werden können und somit eine bisher in der Schweiz fehlende Reproduzierbarkeit mit hohen Fündigkeitschancen möglich wird. Auch sollten mit den gleichen Zielen verschiedene bohrtechnische Vorgehensweisen und Stimulationsmassnahmen getestet und angepasst werden. Eine solche Multiplay-Exploration benötigt zwar ein grösseres Budget, da aber von oben nach unten exploriert wird, sind die Kosten im Vergleich zu den hohen Projektkosten und Risiken einer Tiefbohrung gesamthaft immer noch deutlich günstiger, der Erkenntnisgewinn ist grösser und die geothermische Entwicklung des Untergrunds nachhaltiger.

13.6 Beispiele für empfohlene Erkundungsstandorte

13.6.1 Beispiel eiszeitliche Rinne zwischen Stans und Buochs

Wie im vorgängigen Kapitel beschrieben, wird empfohlen, mit einer top-down-Erkundung zu beginnen und von Vorteil auf Plays zu setzen, welche in ähnlicher geologischer Situation Erfolge aufweisen. Von Vorteil werden Standorte gesucht, welche sich einfach und rasch erkunden lassen und wo bereits erfolgsversprechende Indizien vorliegen. Im Fall der eiszeitlichen Rinnen ist basierend auf den alten seismischen Untersuchungen bekannt, dass zwischen Stans und Buochs eine solche rund 350 m tiefe Rinne besteht (Abb. 59). Der interne Aufbau und ob tatsächlich basale Schotter vorliegen, ist unbekannt. Der Vergleich mit verschiedenen ähnlichen Rinnen im Schweizer Mittelland und Alpenvorland lässt aber vermuten, dass basale Schotter vorhanden sind.

Abb. 60 zeigt ein schematisches Blockbild der eiszeitlichen Rinne östlich von Stans und wie die Rinnengeometrie und deren interne Aufbau sowie eine allfällige Bewirtschaftung mit Brunnen aussehen könnte. Wie in Kapitel 13.4 diskutiert, sind Brunnendubletten mit einer Leistung von ca. 1 bis 3 MW_{th} realistisch. Mittels Brunnenclustern kann jährlich Wärme oder Kälte in der Grössenordnung von 10 bis 16 GWh eingespeichert bzw. entzogen werden.



Abb. 59 Basis Lockergestein bzw. Rinne in m ü.M.

Die Basis der eiszeitlichen Rinne wird zwischen Stans und Buochs basierend auf Seismiklinien auf einer Tiefe von ca. 350 m u. T. vermutet. Kartenausschnitt aus Bodmer et al., 1996. Der lithologische Aufbau der tieferen Rinnenbereiche ist unbekannt.

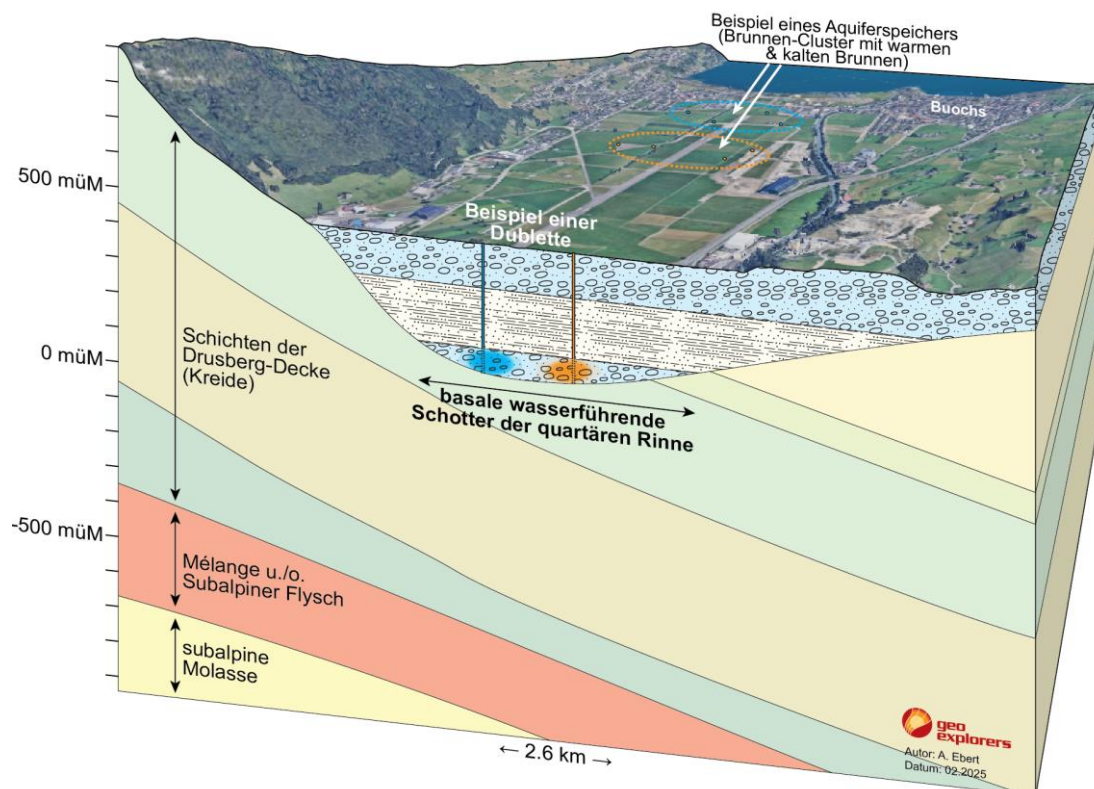


Abb. 60 Schematischer Aufbau der eiszeitlichen Rinne mit Erschliessung

Dargestellt ist die eiszeitliche Rinne mit vermuteten basalen Schottern, welche über Brunnen bewirtschaftet werden können. Darunter folgt der Fels bzw. die Kreide-Schichten der Helvetischen

Decken. Im Hintergrund ist beispielhaft ein Brunnencluster mit warmen und kalten Brunnen für eine Aquiferspeicherung abgebildet. Die Frontseite des Blockbildes stellt ein N-S-Profil vom Bürgenstock nach Oberdorf, östlich von Stans, dar.

Da die Geometrie, die tatsächliche Tiefe sowie der interne Aufbau der Rinne derzeit unbekannt sind, muss die Rinne vorgängig geophysikalisch erkundet werden. Wie kürzliche Erkundungen in Bern, Muri bei Bern, Biel und beim Flughafen Zürich gezeigt haben, lassen sich die Rinnen gut mit einer 2D Reflexionsseismik aufdecken. Je nach Fragestellung wären ein bis fünf seismische Linien notwendig. Diese lassen sich auf dem Flughafengelände zwischen Stans und Buochs einfach ausführen, wie die Seismikkampagne von 2011 gezeigt hat. Basierend darauf können Standorte für ein bis drei Sondierbohrungen definiert werden. Mit diesen lassen sich die basalen Schotterlagen nachweisen und deren Durchlässigkeit und Wasserführung abschätzen. Solche Sondierbohrungen können rasch und günstig mit ähnlichen Bohrgeräten wie für Erdwärmesonden erstellt werden. Zudem lassen sich diese einfach zu einem Piezometer für ein allfälliges Monitoring des tiefen Grundwassers ausbauen.

Ein mögliches Vorgehen mit Erkundungszielen sieht wie folgt aus:

Erkundungsschritte quartäre bzw. eiszeitliche Rinne zwischen Stans und Buochs:



Abb. 61 Konzept Erkundung und Erschliessung quartäre Rinne in Nidwalden

Basierend auf der alten Seismik, wird auch in Obwalden zwischen Giswil und Alpnachersee eine solch tiefe eiszeitliche Rinne mit einer Schwelle bei Sarnen interpretiert. Auch diese ist mit Lockergestein gefüllt und es werden in den tiefen Bereichen der Rinne ebenfalls durchlässige Kieslagen erwartet.

13.6.2 Bruchzonen in Helvetischen Decken, Beispiel Kerns

Analog zum vorgängigen Kapitel ist das Play G (Bruch- und Störzonen in den Kalksteinen der Helvetischen Decken) eine weitere Option für eine top-down-Erkundung. Von Vorteil werden

Standorte gesucht, welche die gleichzeitige Erkundung von mehreren Schichten oder Brüchen erlauben. Evtl. macht es Sinn, gleichzeitig das wenig tiefere Play H, die Mélange bzw. die Basis der Helvetischen Decken, zu testen. Auf den Seismikprofilen von 2011 wurden Bruchzonen erkannt. Abb. 62 zeigt ein Beispiel bei Kerns. Ähnliche Bruchzonen wurden entlang mehrerer seismischer Linien in Nid- und Obwalden erkannt.

Das Beispiel Kerns zeigt, wie die Bruchzonen in den Kalksteinen der Helvetischen Decken in verschiedenen Tiefen von einem Standort aus erkundet und getestet werden könnten. Auf der Abb. 62 ist abgebildet, wie mit möglichen Bohrpfeilen (blaue Linien) verschiedene Bohrziele (hellblaue Flächen) von einem Standort aus angebohrt und getestet werden könnten. Wichtig ist, dass der Verschnitt der Bruch- bzw. Störzonen mit reinen/kompetenten Kalksteinen durchbohrt wird. Der Vorteil an diesem Standort ist, dass mehrere, bereits recht gut definierte Bruchzonen vorliegen. Von Vorteil würden in einem ersten Schritt die untiefen Bohrziele entlang der Bruchflächen getestet. Sollten diese eine ausreichende Durchlässigkeit und Wasserführung sowie Indizien aufweisen, dass warme Grundwässer entlang den Bruchzonen aufsteigen, so könnten auch die tieferen Bereiche entlang dieser Bruchzonen getestet werden.

Es kann je nach tatsächlicher Schüttungsrate und Temperaturspreizung mit Leistungen pro Dublette mit rund 0.3 bis 3 MW_{th} gerechnet werden.

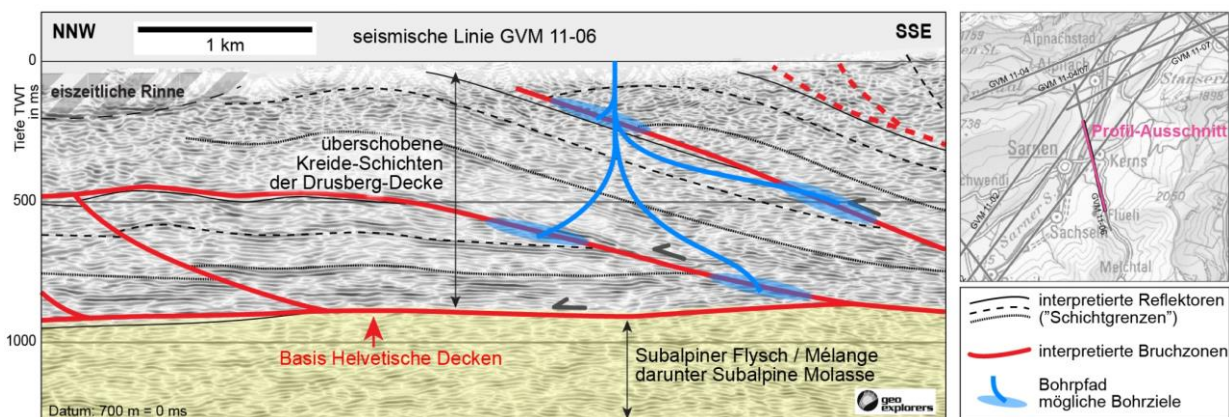


Abb. 62 Mögliche Erschließung der Bruchstrukturen in Helvetischen Decken

Es wird in einem ersten Erkundungsschritt empfohlen, Plays/Lokalitäten zu erkunden,

- welche die Chance zu einer hohen Reproduzierbarkeit aufweisen
- welche hohe Fündigkeitschancen aufweisen
- welche die Chance bieten, mehrere Plays gleichzeitig zu testen
- für welche bereits Nachweise in ähnlicher Geologie bestehen
- welche einfach, rasch und günstig getestet werden können
- wo Energiebedarf besteht

Die Erkundungsziele wären wie folgt:

- Nachweis ausreichende/nachhaltige Schüttung
- Erkenntnisse zu Klüftung, Durchlässigkeit, Breite Bruchzone usw.
- Bestimmung Herkunft der Grundwässer
- Ermittlung geochemische Zusammensetzung der Grundwässer

- Bewertung Playtyp und Brunnenleistung
- Testen wie Ergiebigkeit z. B. mittels Stimulationsmassnahmen erhöht werden kann
- Übertragung der Erkenntnisse auf andere Bruchzonen
- Optimale Erschliessung der Bruchzonen

Ein mögliches Vorgehen würde wie folgt aussehen (siehe auch Faktenblätter zu den verschiedenen Plays in Kapitel 6.3.2):

- Geophysikalische Erkundung (Reflexionsseismik) für die genaue Definition der Bohrziele und der Planung der Bohrung
- Sondierbohrung in Kreuzungspunkt geklüfteter reiner Kalksteine mit Bruchzone (evtl. abgelenkt/gerichtet)
- Pumptest, Messungen
- Stimulationsmassnahmen und Langzeitpumptest
- bei Erfolg Erstellung 2. Brunnen und Zirkulationstests oder Vertiefung Bohrloch zu tieferen Bohrzielen

Im Fallbeispiel der Erkundung im Gebiet Kerns müssten für die Erkundung des untiefen Play-Typs G (Kreuzungsbereich Kalksteine mit Bruchzone in der Drusberg-Decke) mit Kosten für eine erste, möglichst nicht abgelenkte, ca. 500 bis 700 m lange Sondierbohrung inkl. Seismik von ca. 1.5 bis 3 Mio. CHF gerechnet werden. Würden die tieferen Bohrziele getestet (Abb. 62), so müsste mit Kosten von bis zu 7 Mio. CHF (ca. 1'500 m lange abgelenkte Bohrung) gerechnet werden. Die Abb. 60 zeigt, dass auch weitere tiefere Plays (Play F und H) erkundet werden könnten.

Aufgrund der bestehenden Risiken und zur Erhöhung der Akzeptanz ist eine gute und frühzeitige Kommunikationsstrategie für die erfolgreiche Umsetzung aller Projekte entscheidend.

14 Literaturliste

- Bentz, F., 1948. Geologie des Sarnersee-Gebietes (Kt. Obwalden). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 41/1, 1-77.
- Biehler, D., Schmassmann, H., Schneemann, K. & Sillanpää, J. (1993) Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper und Muschelkalk-Aquifere. NTB 92-08, Technical report, Nagra
- Bodmer, P.H., Gunzenhauser, B., Iseli, B.-F., Manser, M., 1996. Quartärmächtigkeiten in den Haupttälern der Zentralschweiz. *Bulletin für angewandte Geologie*, 1/1, 37-53.
- Bodmer, P.H., Gunzenhauser, B., 1992. TGK Hydrocarbon Exploration in Central Switzerland: Experience with Alpine Reflexion Seismics. *Bull. Swiss Assoc. of Petroleum Geol. and Eng.*, 59/135, 15-22.
- Bögli, A., 1987. Der Karst in der Innerschweiz. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern*, Band 29, 225-235.
- Diamond, L.W. et al., 2010: Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂-Sequestrierung in der Schweiz. BFE-Schlussbericht, 23 Seiten mit Anhängen und begleitenden Berichten.
- Diehl, T., Clinton, J., Cauzzi, C., Kraft, T., Kästli, P., Deichmann, N., Massin, F., Grigoli, F., Molinari, I., Böse, M., Hobiger, M., Florian Haslinger¹, Fäh, D., Wiemer, S., 2021. Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2017 and 2018. *Swiss Journal of Geosciences*, 114/4, S. 29.
- Ebert, A., Dörner, E. & Bänninger, D., 2022. Variation der Untergrundtemperatur im Kanton BL und deren Einfluss auf die Wärmenutzung. 20 Seiten.
- Ebert, A., Genoni, O., Häring, M., 2013. Structural geology of Central Switzerland - results of seismic campaign in 2011 in cantons Nid- and Obwalden. *Swiss Bull. angew. Geol.*, 18/1, 51-59.
- Egli, D., Baumann, R., Küng, S., Berger, A., Baron, L., Herwegh, M., 2018. Structural characteristics, bulk porosity and evolution of an exhumed longlived hydrothermal system. *Tectonophysics*, 747-748, 239-258.
- European Geothermal Energy Council, EGEC Geothermal Market Report 2023. https://www.egec.org/wp-content/uploads/2024/07/EGEC_2022-Key-Findings_Market-Report.pdf
- Etioppe, G., C. Zwahlen, F.S. Anselmetti, R. Kipfer, C.J. Schubert, 2010. Origin and flux of a gas seep in the Northern Alps (Giswil, Switzerland), *Geofluids*, Draft.
- Funk, H., Pfiffner, O.A., Menkveld-Gfeller, U., Kempf, O., 2013. Erläuterungen Nr. 137 zu Blatt 1170 Alpnach – Geologischer Atlas der Schweiz 1: 25 000.
- Föllmi, K.B., Bodin, S., Godet, A., Linder, P., Van de Schootbrugge, B., 2007. Unlocking paleo-environmental information from Early Cretaceous shelf sediments in the Helvetic Alps: stratigraphy is the key! *Swiss. J. geosci.*, 100, 349-369.
- Greber, E., Grünenfelder, T., Keller, B., Wyss, R., 1994. Die Geothermie-Bohrung Weggis, Kanton Luzern. *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. – Ing.*, 61, 138, 17-43.
- Goldberg, V., Nitschke, F. & Kluge, T. (2022a) Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland - Teil 1: Literaturvergleich bestehender Extraktionstechnologien. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 27, 239-259
- Goldberg, V., Nitschke, F. & Kluge, T. (2022b) Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland - Teil 2: Potenziale und Produktionsszenarien in Deutschland. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 27, 261-275
- Gubler, T., 1997. Karst- und Höhlengebiete in Ob- und Nidwalden. *Naturforschende Gesellschaft Ob- und Nidwalden*, 1, 8-19.
- Hänni, R., Möri, A., Pfiffner, A., 1997. Die Helvetischen Decken zwischen Melchtal und Brünig. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern*, 35, 197-207.
- Hantke, R., 1961: Tektonik der helvetischen Kalkalpen zwischen Obwalden und dem St. Galler Rheintal. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich*, 106, p. 211.
- Häuselmann, P., Siegenthaler, R., 2015. Erde von unten: Karsteinblicke. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern*. Band 72, 99-107.
- Herwegh, M. and Pfiffner, O.A., 2005. Tectono-metamorphic evolution of a nappe stack: A case study of the Swiss Alps. *Tectonophysics*, 404, 55-76.
- Heuberger, S. & Morgenthaler, J. (2023) Lithium in geothermal brines – Status report on the current situation in Switzerland and in neighbouring countries. Technical report, Georesources Switzerland Group, ETH Zurich, 43 Seiten.
- Jeannin, P.Y., Malard, A., Eichenberg, U., 2015. Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene – Expertenbericht zuhanden des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI. 45 Seiten.

- Kaufmann, F. J. 1867: Der Pilatus. - Beitr. Geol.Karte Schweiz 5.
- Kraft, T., Roth P., & S. Wiemer, 2020. Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland. Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes, 68 Seiten.
- Lahusen, P.H. and Wyss, R., 1995. Erdöl- und Erdgasexploration in der Schweiz: Ein Rückblick. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., 62/141, 43-72.
- Liniger, M. Die Hinterlassenschaft der letzten Eiszeit. Publiziert unter www.kulturlandschaft-ow.ch.
- Menkveld, J. W. 1995: Der geologische Bau des Helvetikums der Innerschweiz. PhD thesis, Universität Bern, p. 165.
- Menkveld-Gfeller, U., Kempf, O., Funk, H., 2016 Lithostratigraphic units of the Helvetic Palaeogene: review, new definition, new classification. Swiss Journal of Geosciences, 109, 171-199.
- Nagra Arbeitsbericht NAB 13-23: Gmünder, C., Malaguerra, F., Nusch, S., Traber, D., 2014: Regional Hydrogeological Model of Northern Switzerland, 360 Seiten.
- Nagra Arbeitsbericht NAB 13-43: Nusch, S., Gmünder, C., Traber, D., 2013: Hydrogeologische Daten der Tiefenaquifere als Grundlage für die hydrogeologischen Modelle SGT Etappe 2. 42 Seiten.
- Nagra Arbeitsbericht NAB 14-26, 2014. Seismotektonik der Zentralschweiz. 65 Seiten.
- Nagra Technischer Bericht NTB 19-02: Waber, H. N. & Traber, D., 2022: - Die Tiefengrundwässer in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland: Beschaffenheit, Herkunft und unterirdische Verweilzeit, 751 Seiten.
- Nagra Technischer Bericht NTB 93-38, 1994. Hydraulic Packer Testing in the Wellenberg Boreholes SB1 and SB2 Methods and Field Results. 148 Seiten.
- Nagra Technischer Bericht NTB 96-01, 1997. Geosynthese Wellenberg 1996 - Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. 511 Seiten.
- Pfiffner, O.A., 2009. Geologie der Alpen. Haupt Verlag Bern, 359 S.
- Pfiffner, O. A., 2011: Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France). Geological Special Map 1:100'000, Swiss Geological Survey, 128, Federal Office of Topography swisstopo, Wabern.
- Pfiffner, O.A., Sähli, S., Stäubli, M., 1997. Compression and uplift of the external massifs in the Helvetic zone. In: Pfiffner, A.O., Lehner, P., Heitzmann, P., Mueller, St., Steck, A. (Eds.): Deep Structure of the Swiss Alps – Results from the National Research Program 20 (NRP20). Birkhäuser, Basel, 139-153.
- Schlunegger, F., Jost, J., Grünig, A., Trüssel, M., 2016. Erläuterungen Nr. 148 zu Blatt 1169 Schüpfheim – Geologischer Atlas der Schweiz 1: 25 000.
- Signorelli, S. & Kohl, T., 2006: Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz in Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 39, 106 Seiten.
- Sommaruga, A., Eichenberger, U., Marillier, F., 2012: Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. Edited by the Swiss Geophysical Commission. - Matér. Géol. Suisse, Géophys. 44.
- Stober I., 2013. Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland. – Grundwasser, Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 18, 259–269.
- TGK, 1997. Project no. 422, Non-conventional deep gas project in the Central Swiss Alps. In: Grälicher, H.: NEFF 1977-97 Förderung der Energieforschung – Allgemeiner Rechenschaftsbericht zum Abschluss der Tätigkeit des NEFF, Bedeutung der NEFF-Förderung, Zwanzig ausgewählte Forschungsprojekte. Nationaler Energie Forschungs-Fond, vdf-Hochschulverlag AG, ETH Zürich.
- Trüssel, P., 1997. Bedeutung und Schutzwürdigkeit von Karst und Höhlen - eine Bilanz für Ob- und Nidwalden. Naturforschende Gesellschaft Ob- und Nidwalden, Band 1, 150-163.
- Vollmayr, T., 1983: Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und Ingenieure, 49/116, 15-17.
- Vollmayr, T., Wendt, A., 1987. Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpennordrand, Bull- Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., Vol. 53, No 125, 67 - 79.
- Wyss, R., 2001: Der Gasausbruch aus einer Erdsondenbohrung in Wilen (OW), Bull. angew. Geol., Vol. 6, No. 1, 25 - 40.
- Wyss, R., Link, K., Blum, K., 2014. Erdgas und Tiefengeothermie für die Kantone Nid- und Obwalden. p. 49.
- Ziegler, H-J., Isler A., 2013. Lötschberg-Basistunnel – zusammenfassender geologischer Schlussbericht. Berichte der Landesgeologie, swisstopo, 92 S.
- Sowie nicht öffentliche Bohrberichte, Berichte und Profile zu Tunnelbauten, seismische Profile

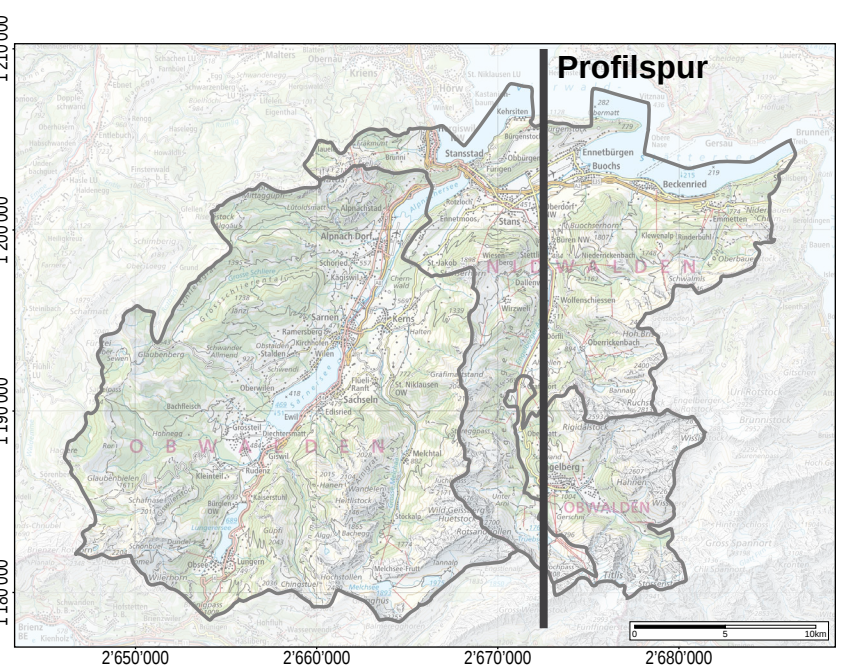
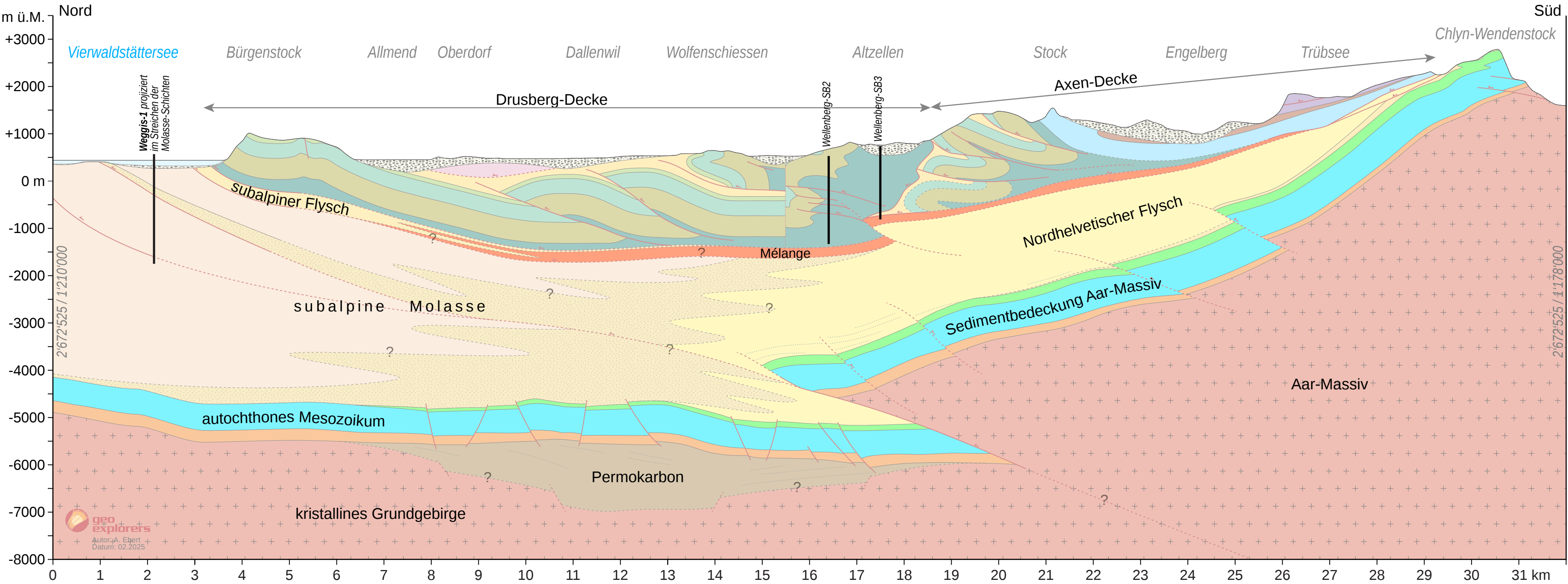
15 Glossar

3 °C-Regelung	Gemäss Gewässerschutzverordnung gilt: Die Temperatur des Grundwassers darf durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand in 100m Entfernung um höchstens 3 °C verändert werden; vorbehalten sind örtlich eng begrenzte Temperaturveränderungen.
AGS	AGS (Advanced Geothermal System) ist ein geschlossenes geothermisches System im tiefen Untergrund. Es werden kilometerlange horizontale Bohrlöcher gebohrt, sodass Closed-Loops entstehen, in welchen ein Wärmeträgermedium fliesst und ähnlich wie bei einer Erdwärmesonde die Wärme an die Oberfläche bringt. Bisher ist AGS im Pilot-Stadium und aufgrund der hohen Bohrkosten noch nicht wirtschaftlich.
Aar-Massiv	Das Aar-Massiv ist ein alter kristalliner Grundgebirgskörper, welcher während der Alpenbildung in die Gebirgsbildung einbezogen wurde und entsprechend deformiert wurde. Typische Gesteine sind rund 300 Mio. Jahre alte Granite, welche in ältere Gneise intrudiert sind.
Aquifer	Grundwasserleiter oder grundwasserführende Gesteinsschicht mit einer gewissen Porosität und Durchlässigkeit. Die Porosität ermöglicht, dass das Gestein Wasser speichern und weiterleiten kann und somit eine geothermische Nutzung ermöglichen kann.
Arteser	Wasseraustritt z. B. aus einer Bohrung, bei der der Druckspiegel des Grundwassers über Terrain liegt und somit ein freier Wasserausfluss aus der Bohrung erfolgt.
Autochthon	Eine autochthone geologische Einheit ist eine Gesteinseinheit, welche sich nicht durch tektonische Prozesse (z. B. Gebirgsbildung) abgelöst hat, also an Ort und Stelle gebildet wurde und ortsfest geblieben ist. Dies steht im Gegensatz zu allochthonen Einheiten (z. B. Decken), welche abgelöst und bewegt wurden.
Axen-Decke	Die Axen-Decke ist eine Helvetische Decke, die grösstenteils aus Jura-Gesteinen aufgebaut ist. Siehe Helvetikum.
Bruch/Störzone	Fläche, an der sich zwei Gesteinsblöcke gegeneinander verschoben haben (Verwerfung); je nach Lage der Fläche wird in Abschiebung, Aufschiebung, Überschiebung oder Seitenverschiebung unterschieden. Besteht der Bruch aus einer Zone von gestörtem Gestein mit mehreren Bruchflächen und geklüftetem Gestein, meist, wenn grössere Verschiebungsversätze vorliegen, so spricht man von einer Bruch- bzw. Störzone.
Brunnen	Ein Brunnen ist ein für die Wassergewinnung ausgebautes Loch bzw. eine Bohrung im Untergrund. Der Brunnen ermöglicht es, Wasser zu fördern oder in den Aquifer zurückzugeben.
Drusberg-Decke	Die Drusberg-Decke ist eine Helvetische Decke, die aus kretazischen und tertiären Sedimenten besteht und von der Axen-Decke nach Norden abgeschert wurde. Siehe Axen-Decke und Helvetikum.
Dublette	Wird das Grundwasser mit zwei Bohrungen erschlossen, so spricht man von einer Dublette. Das warme oder heisse Wasser wird über die Produktions- / Förderbohrung gefördert und über die Rückgabe- / Injektionsbohrung nach der Nutzung in den Aquifer zurückgegeben. Dubletten haben gegenüber Singletten den Vorteil, dass die Grundwasserbilanz erhalten bleibt.
Durchlässigkeitsbeiwert k_f	Er ist das Mass für die Durchlässigkeit bzw. Permeabilität (hydraulische Leitfähigkeit). Die Masseinheit ist m/s und gibt somit an, wie schnell ein bestimmtes Gesteinspaket bei einem vorliegenden Druckgefälle durchflossen wird.
EGS	Enhanced geothermal systems (auch als Deep Heat Mining oder Hot Dry Rock bezeichnet) sind künstlich erstellte Wärmetauscher in grosser Tiefe von rund 4 - 5 km. Dafür wird das tiefe und heisse kristalline Grundgebirge, welches generell gering durchlässig ist, mit Wasser, das in das Bohrloch gepumpt wird, aufgebrochen. Mit EGS wird in der Regel primär Strom produziert.
Erdwärmesonde	Eine Erdwärmesonde ist ein U-Rohr in einem Bohrloch, in welcher eine Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert. Durch die Zirkulation des Fluids in der Sonde wird dem Untergrund Wärme entzogen oder zugeführt. Es sind auch koaxiale Sonden möglich.
Exploration	Exploration bedeutet die Erkundung von Lagerstätten und Rohstoffvorkommen im Untergrund. Die Erkundung wird mit Hilfe von geologischen, geophysikalischen und geochemischen Methoden durchgeführt. Im Fall der Geothermie zielt die geophysikalische Erkundung besonders auf den Schichtaufbau und die Lokalisierung von Bruchstrukturen ab.
Flysch	Flysch bezeichnet gutgebankte Gesteinsabfolgen welche tonig, mergelig, sandig oder grobklastisch sind und in einem marinen Vorlandbecken abgelagert wurden. Durch die voranrückende Gebirgsfront wird viel Material an sich übersteilenden Meereshängen eines sich vertiefenden Beckens abgelagert. Die Ablagerungen werden instabil und durch Trübestrome (Turbiditströme) in das Becken verfrachtet und abgelagert. Meist werden diese Ablagerungen später in die Gebirgsbildung einbezogen und deformiert.
Geothermie	Nutzung und Erschliessung der gespeicherten Wärmeenergie im Untergrund
Geothermischer Gradient	Temperaturzunahme im Untergrund mit der Tiefe, angegeben in Grad pro Meter. Typischerweise liegt der bei rund 3 °C pro 100 m.
Grundwasser	Grundwasser ist Wasser im Untergrund (Fels oder Lockergestein), welches sich in Poren, Hohlräumen, Klüften usw. ansammelt und fliesst. Grundwasser ist eine wichtige Ressource für die Trinkwassergewinnung sowie für die Wärme-Kälte-Nutzung.
Grundgebirge	Alte Gesteinskörper, welche aus kristallinen (magmatischen bzw. metamorphen) Gesteinen bestehen und von jüngeren Sedimentgesteinen (z. B. Mesozoikum) überlagert werden.

Helvetikum	Das Helvetikum besteht aus ehemaligen Sedimenten des ehemaligen nördlichen europäischen Schelfbereiches / Kontinentalrands, der vor der Alpenbildung bestand. Durch die Alpenbildung wurde das Helvetikum intern strukturiert und es entstanden verschiedene Decken. Die Helvetischen Decken im Untersuchungsgebiet (Axen- und Drusberg-Decke) stehen für mesozoische Schichten, die von südlich dem Aar-Massiv entlang einer basalen Überschiebungsbahn mehrere Zehner von Kilometern nach Norden transportiert wurden.
Hydrothermal	Wird tiefes heisses und natürlich vorkommendes Felsgrundwasser geothermisch genutzt, so spricht man von hydrothermalen Geothermie. Es handelt sich um ein offenes System, bei dem das Heisswasser z. B. aus einem Kluft- oder Porenaquifer über eine Bohrung gefördert und das abgekühlte Wasser wieder in den Aquifer zurückgegeben wird.
Jura	Geologischer Zeitraum vor ca. 201 – 145 Mio. Jahre.
Kluft-, Karstaquifer	Im dichten Festgestein gibt es Kluft- und Karstgrundwasserleiter. Klüfte sind μm bis cm offene Spalten im Gestein, welche durch Bruchvorgänge im spröden Gestein entstehen. Karst entsteht durch Verwitterungs- bzw. Lösungsprozesse in Karbonatgesteinen und bildet mm bis Meter-grosse Hohlräume. Siehe auch Aquifer.
Koaxialsonde	Es handelt sich um einen speziellen Erdwärmesondentyp. In der Koaxialsonde fliesst das Wärmeträgerfluid im Ringraum des Aussenrohrs nach unten und das erwärmte Wasser im häufig thermisch getrennten Innenrohr wieder nach oben.
Konglomerat	Ein grobkörniges klastisches Sedimentgestein das aus gerundeten Komponenten mit typischen Durchmessern von einigen mm bis mehreren cm besteht. Häufig werden diese als Nagelfluh bezeichnet.
Kreide	Geologischer Zeitraum vor ca. 145 – 66 Mio. Jahre.
Malm	Geologischer Zeitraum vor ca. 161 – 145 Mio. Jahre. Die abgelagerten Schichten im Malm bestehen überwiegend aus Kalksteinen bzw. Meeresablagerungen, welche auf dem nördlichen Schelfbereich des Tethys-Meeres abgelagert wurden.
Mélange	Eine Mélange ist ein Gestein, welches keine erkennbare Schichtung mehr aufweist, ein chaotisches Gemenge von verschiedensten Gesteinsfragmenten in allen Grössen darstellt und durch Deformationsprozesse entstanden und geprägt ist. Häufig findet man eine Mélange an der Basis einer Decke bzw. entlang einer Überschiebungsbahn.
Mesozoikum	Bezeichnet eine zeitliche Ära in der geologischen Zeit (252 – 66 Mio. Jahre). Wird aber häufig auch als Begriff für die während des Mesozoikums abgelagerten Schichtreihen verwendet.
Molasse	Beckenablagerungen im Vor- und Rückland der entstehenden Alpen, welches mit dem Abtragungsschutt des Gebirges gefüllt wurde; bestehend aus Konglomeraten (Nagelfluh), Sandsteinen, Mergel, Tonstein. Je nach Ablagerung unter oder über dem Meeresspiegel unterscheidet man in Meeres- oder Süsswassermolasse. Die Molassesedimente weisen ein Alter von ca. 35 – 10 Mio. Jahren auf.
Muschelkalk	Geologischer Zeitraum vor ca. 247 – 237 Mio. Jahre. Die für die Geothermie relevanten abgelagerten Schichten im Oberen Muschelkalk (Schinz nach Formation) bestehen überwiegend aus Dolomitgestein und Kalksteinen.
Paläokarst	Paläokarst sind alte Karstreliekt, welche in der erdgeschichtlichen Vergangenheit entstanden sind. Oftmals handelt es sich dabei um ehemalige verkarstete Landoberflächen. In der Schweiz findet man diese häufig am Top der Malm-Kalke in Form von Spalten und Klüften, welche mit einem Residium (z. B. rote eisenschüssige Bolustone, Siderolithikum oder Quarzsand) gefüllt sind. Der Paläokarst kann eine erhöhte Durchlässigkeit aufweisen.
Permeabilität/Durchlässigkeit	Die Permeabilität ist das Mass für das Fliessvermögen von Flüssigkeiten im Gestein. Notwendig sind verbundene Hohlräume (Poren, Klüfte). Das Mass für die Durchlässigkeit ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f .
Permokarbon Tröge	Im frühen Karbon und Perm (360 – 252 Mio. Jahren) entstandene Gräben, die mit Sedimenten (Silt- und Sandsteinen, Kohleablagerungen) und Vulkanoklastika gefüllt wurden. Im alpinen Raum wurden diese Gräben während der Gebirgsbildung deformiert.
Play	Das Fachwort Play kommt aus dem Englischen und beschreibt eine Gruppe von geothermischen Ressourcen bzw. eine geologische Situation im Untergrund in einer Region, die sich durch ähnliche lithologische, tektonische und hydrogeologische Voraussetzungen auszeichnet. Für ein gutes Play bzw. die Wahrscheinlichkeit ein nutzbares Heisswasser-Vorkommen im Untergrund anzutreffen, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Dies sind z. B. das Vorhandensein von permeablen und porösen Gesteinen, welche in Tiefen liegen, wo die Temperaturen ausreichend hoch sind und das Heisswasserreservoir gross und ergiebig genug ist.
Porenaquifer	Porengrundwasserleiter bestehen aus porösen und permeablen Locker- oder Festgestein, deren Porenraum von Grundwasser durchflossen wird.
Porosität	Die Porosität bezeichnet das Verhältnis des Volumens aller Hohlräume im Gestein zu dessen Gesamtvolumen.
Reflexionsseismik	Die Reflexionsseismik ist ein Verfahren, das zur Bestimmung von geologischen Schichtgrenzen im Untergrund eingesetzt wird. Das Verfahren beruht auf der Reflexion von Schallwellen an geologischen Schichtgrenzen und liefert eine indirekte Abbildung des Untergrundes. Man unterscheidet zwischen 2D-Seismik und 3D-Seismik. Aus der 2D-Seismik erhält man eine Profilinie des Untergrundes, während die aufwändigere 3D-Seismik den Untergrund räumlich abbildet.

Reservoir	Poröses/permeables Gestein. Typische Speichergesteine sind Sandsteine und geklüftete oder verkarstete Kalksteine.
Seismik	Künstlich, an der Oberfläche erzeugte „Schallwellen“ werden im Untergrund an Schichtgrenzen reflektiert und die zurückkommenden Wellen werden an der Oberfläche von Geophonen gemessen.
Sidetrack	Seitenarm, der aus einem bestehenden Bohrloch herausgebohrt wird, um ein anderes Bohrziel anbohren zu können oder falls eine Blockade ein Weiterbohren verunmöglicht.
Singlette	Wird Thermalwasser aus einer Bohrung / Brunnen gefördert, ohne, dass das Wasser zurück in den Aquifer gegeben wird, so spricht man von einer Singlette. Deshalb ist die Grundwasserabsenkung im Pumpbetrieb in Singletten generell grösser als im Vergleich zu Dubletten, was entsprechend zu geringeren Leistungen führt.
Subalpine Molasse	Es handelt sich um Molasse-Sedimente (siehe Molasse), welche in die Gebirgsbildung einbezogen wurden und somit steil gestellt wurden, verfaltet und von Störzonen durchsetzt sind.
Thermische Leistung	Die Wärmeleistung bzw. das Wärmepotential in Watt, das aus einem Aquifer bzw. tiefen Felsgrundwasser entnommen wird, ist das Produkt aus Förderrate in l/s, der Dichte des Fluids in kg/m ³ (vereinfacht 1 kg/l), der Wärmekapazität des Fluids in J/kg*K (vereinfacht 4200 J/kg*K) und der Temperaturspreizung in K (ΔT zwischen Produktions- und Rückgabebohrung). Anzustrebende Förderraten in der hydrothermalen Geothermie liegen bei 50-150 l/s.
Trias	Geologischer Zeitraum vor ca. 252 – 201 Mio. Jahre.
Überschiebung	Wenn Gesteinseinheiten durch tektonische Prozesse (z. B. während einer Gebirgsbildung) zerbrechen und entlang einer Bruch- bzw. Störzone übereinander geschoben werden, so spricht man von einer Überschiebung. Generell liegen dann ältere Schichten über jüngeren.

Strukturgeologisches N-S-Querprofil



Lithostratigraphische Einheiten:

- Mélange / Basis helvet. Decken
- Subalpiner Flysch
- USM (Unt. Süsswasser Molasse)
- UMM (Unt. Meeres Molasse)
- Nordhelvetischer Flysch
- Kreide
- Jura
- Trias
- Permokarbon
- Kristallines Grundgebirge*

subalpine Molasse / Flysch

par- und autochthone Schichtabfolge / Aar-Massiv

- Quartär / Lockgestein / Rutsch-/ Bergsturzmasse
- Penninikum / Habkern-Sörenberg-Mélange
- Paläogen
- Ob. Kreide (u.a. Garschella- + Seewen-Fm.)
- Unt. Kreide (Drusberg- + Schratzen-Fm.)
- Unt. Kreide (Öhrli-Fm. bis Kieselkalk)
- Palfris-Fm. + Zementstein-Fm.
- Malm (u.a. Quinten-Fm.)
- Dogger
- Lias

Drusberg-Decke

Axen-Decke

- Bruchstruktur / Überschiebung (gestrichelt = vermutet)
- Schichtgrenze (gestrichelt = vermutet)

Datengrundlage:
Seismik, geologische Karten, Tunnelprofile (siehe separate Abbildung)

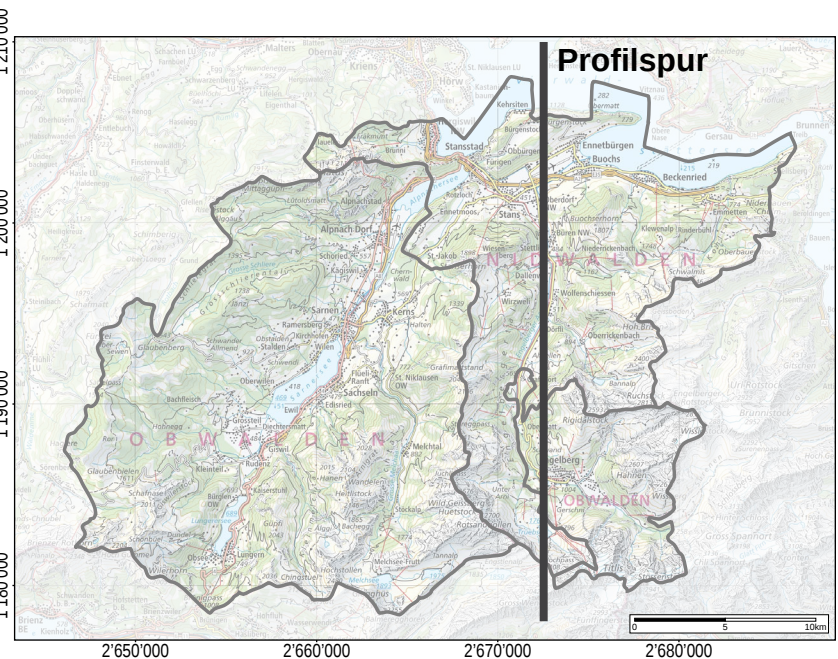
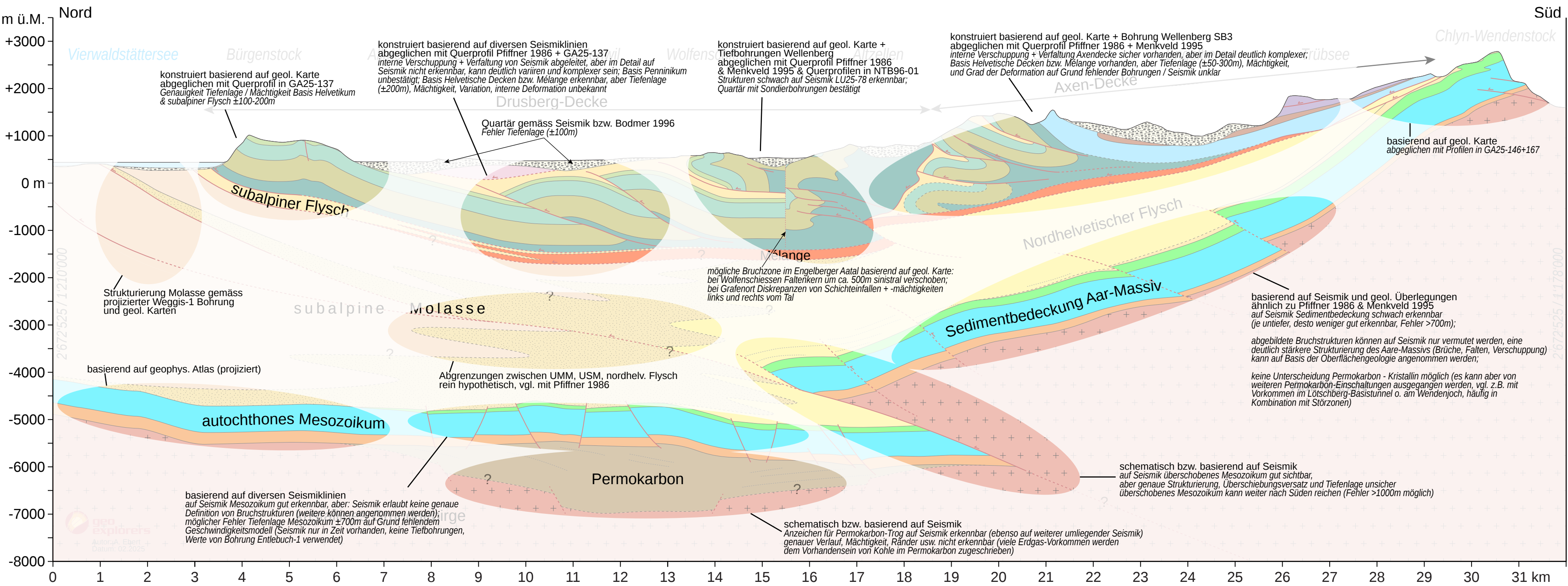
Anmerkungen:
Molasse und Flysch schematisch dargestellt. Profil ist nicht bilanziert. Der Fehler in der Tiefenlage des Autochthons beträgt ca. ±700m, bedingt durch Unsicherheiten im seismischen Geschwindigkeitsmodell und weil Seismik nur in Zeit vorliegt. Grosse strukturelle Unsicherheiten sind mit ? gekennzeichnet, weniger grosse sind gestrichelt. Es wurden nur Grossstrukturen (Überschiebungen, Brüche, Falten) abgebildet. Die Dichte von kleineren Strukturen ist um ein vielfaches grösser.

*im Aar-Massiv keine Unterscheidung zw. Permokarbon & Kristallin

Strukturgeologisches N-S-Querprofil

Datengrundlage und Zuverlässigkeit

es sind nur dominante Brüche und Faltenstrukturen abgebildet (Kleinstrukturen oder sekundäre Strukturen wurden nicht berücksichtigt)



Lithostratigraphische Einheiten:

- Mélange / Basis helvet. Decken
- Subalpiner Flysch
- USM (Unt. Süsswasser Molasse)
- UMM (Unt. Meeres Molasse)
- Nordhelvetischer Flysch
- Kreide
- Jura
- Trias
- Permokarbon
- Kristallines Grundgebirge*

subalpine Molasse / Flysch

par- und autochthone Schichtabfolge / Aar-Massiv

- Quartär / Lockgestein / Rutsch-/ Bergsturzmasse
- Penninikum / Habkern-Sörenberg-Mélange
- Paläogen
- Ob. Kreide (u.a. Garschella- + Seewen-Fm.)
- Unt. Kreide (Drusberg- + Schratten-Fm.)
- Unt. Kreide (Öhrli-Fm. bis Kieselkalk)
- Palfris-Fm. + Zementstein-Fm.
- Malm (u.a. Quinten-Fm.)
- Dogger
- Lias

Drusberg-Decke

Axen-Decke

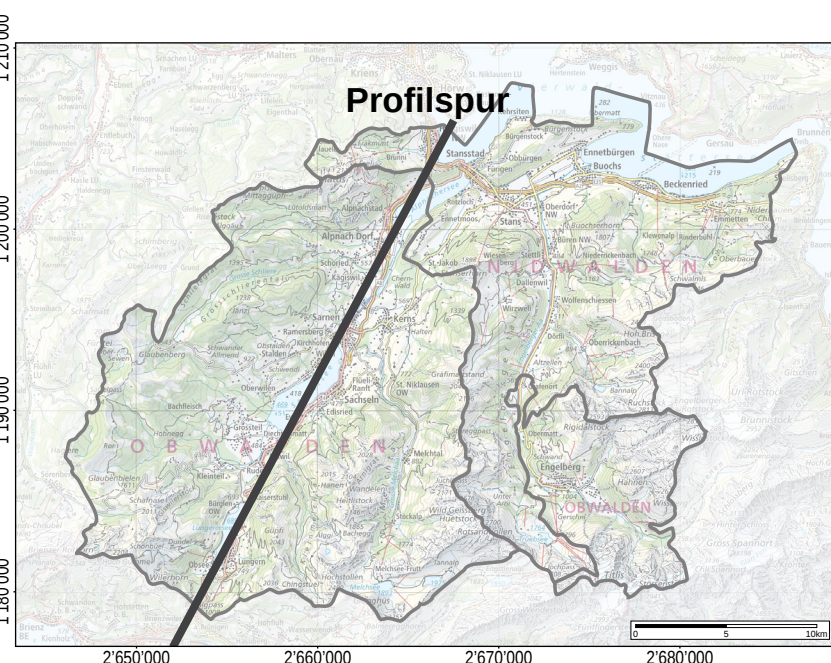
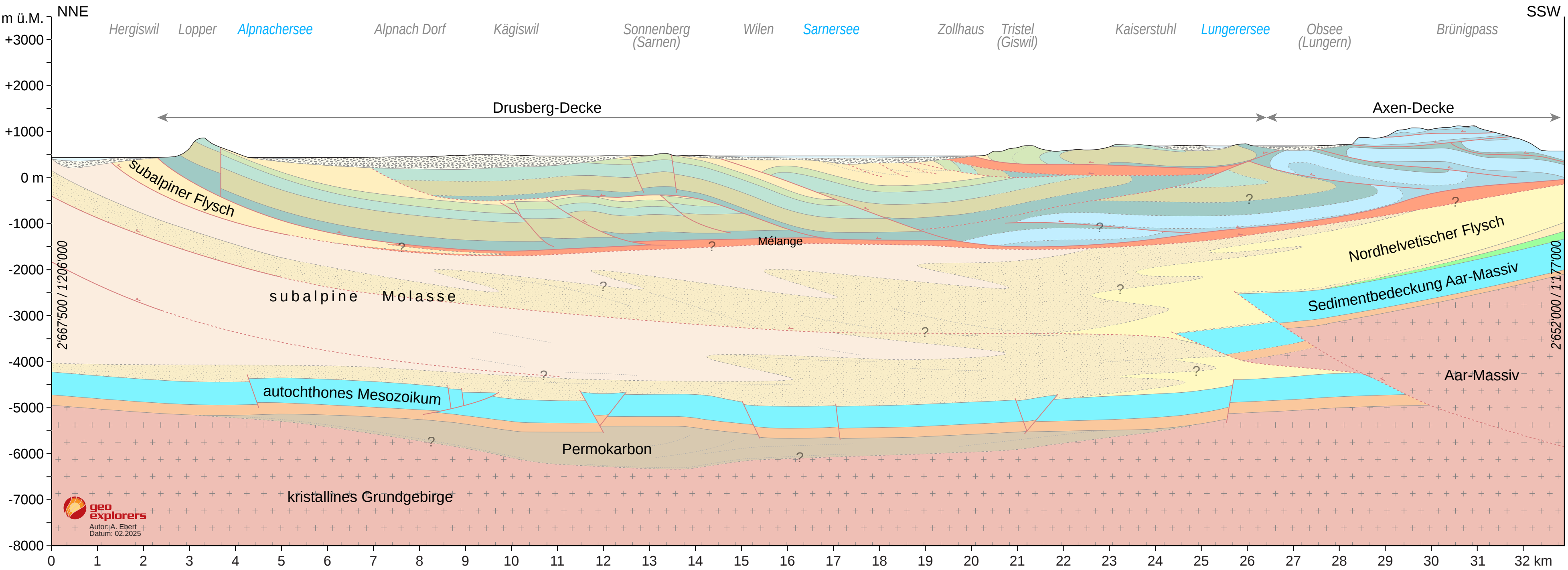
- Bruchstruktur / Überschiebung (gestrichelt = vermutet)
- Schichtgrenze (gestrichelt = vermutet)

Datengrundlage: Seismik, geologische Karten, Tunnelprofile (siehe separate Abbildung)

Anmerkungen: Molasse und Flysch schematisch dargestellt. Profil ist nicht bilanziert. Der Fehler in der Tiefenlage des Autochthons beträgt ca. $\pm 700m$, bedingt durch Unsicherheiten im seismischen Geschwindigkeitsmodell und weil Seismik nur in Zeit vorliegt. Grosse strukturelle Unsicherheiten sind mit ? gekennzeichnet, weniger grosse sind gestrichelt. Es wurden nur Grossstrukturen (Überschiebungen, Brüche, Falten) abgebildet. Die Dichte von kleineren Strukturen ist um ein vielfaches grösser.

*im Aar-Massiv keine Unterscheidung zw. Permokarbon & Kristallin

Strukturgeologisches N-S-Querprofil



Lithostratigraphische Einheiten:

- Mélange / Basis helvet. Decken
- Subalpiner Flysch
- USM (Unt. Süsswasser Molasse)
- UMM (Unt. Meeres Molasse)
- Nordhelvetischer Flysch
- Kreide
- Jura
- Trias
- Permokarbon
- Kristallines Grundgebirge

subalpine
Molasse /
Flysch

par- und
autochthone
Schichtabfolge /
Aar-Massiv

- Quartär / Lockgestein / Rutsch-/ Bergsturzmasse
- Penninikum / Habkern-Sörenberg-Mélange
- Paläogen
- Ob. Kreide (u.a. Garschella- + Seewen-Fm.)
- Unt. Kreide (Drusberg- + Schratten-Fm.)
- Unt. Kreide (Öhrli-Fm. bis Kieselkalk)
- Palfris-Fm. + Zementstein-Fm.
- Malm (u.a. Quinten-Fm.)
- Dogger
- Lias

Drusberg-
Decke

Axen-Decke

- Bruchstruktur / Überschiebung
(gestrichelt = vermutet)
- Schichtgrenze
(gestrichelt = vermutet)

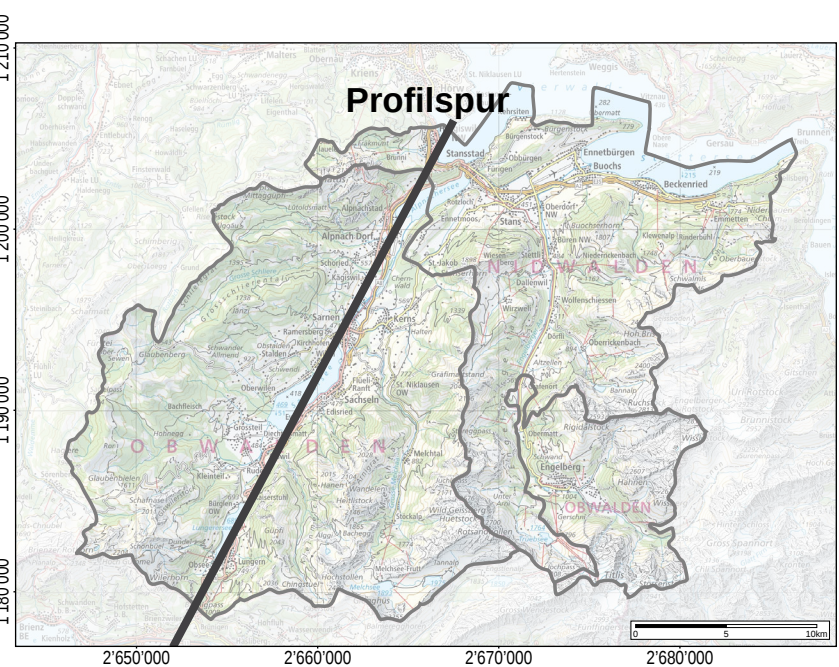
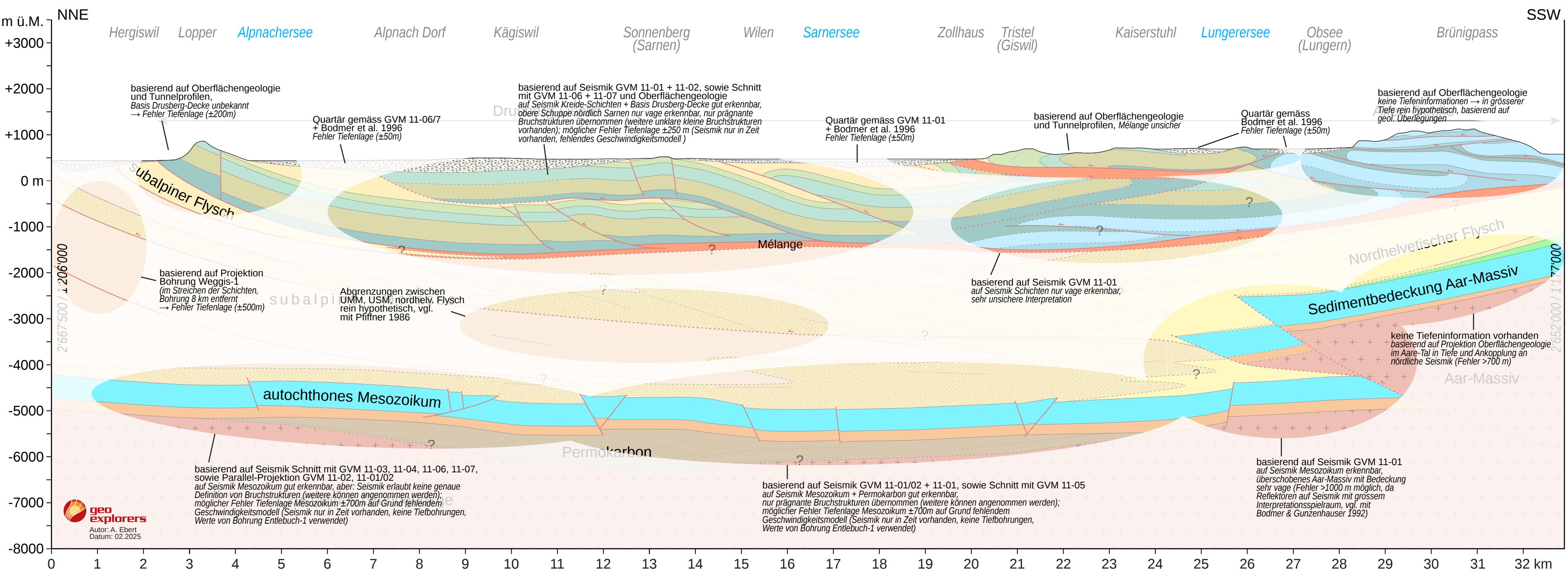
Datengrundlage:
Seismik, geologische Karten, Tunnelprofile (siehe separate
Abbildung)

Anmerkungen:
Molasse und Flysch schematisch dargestellt. Profil ist nicht
bilanziert. Der Fehler in der Tiefenlage des Autochthons beträgt
ca. ±700m, bedingt durch Unsicherheiten im seismischen
Geschwindigkeitsmodell und weil Seismik nur in Zeit vorliegt.
Grosse strukturelle Unsicherheiten sind mit ? gekennzeichnet,
weniger grosse sind gestrichelt. Es wurden nur Grossstrukturen
(Überschiebungen, Brüche, Falten) abgebildet. Die Dichte von
kleineren Strukturen ist um ein vielfaches grösser.

Strukturgeologisches N-S-Querprofil

Datengrundlage und Zuverlässigkeit

es sind nur dominante Brüche und Faltenstrukturen abgebildet
(Kleinstrukturen oder sekundäre Strukturen wurden nicht berücksichtigt)



Lithostratigraphische Einheiten:

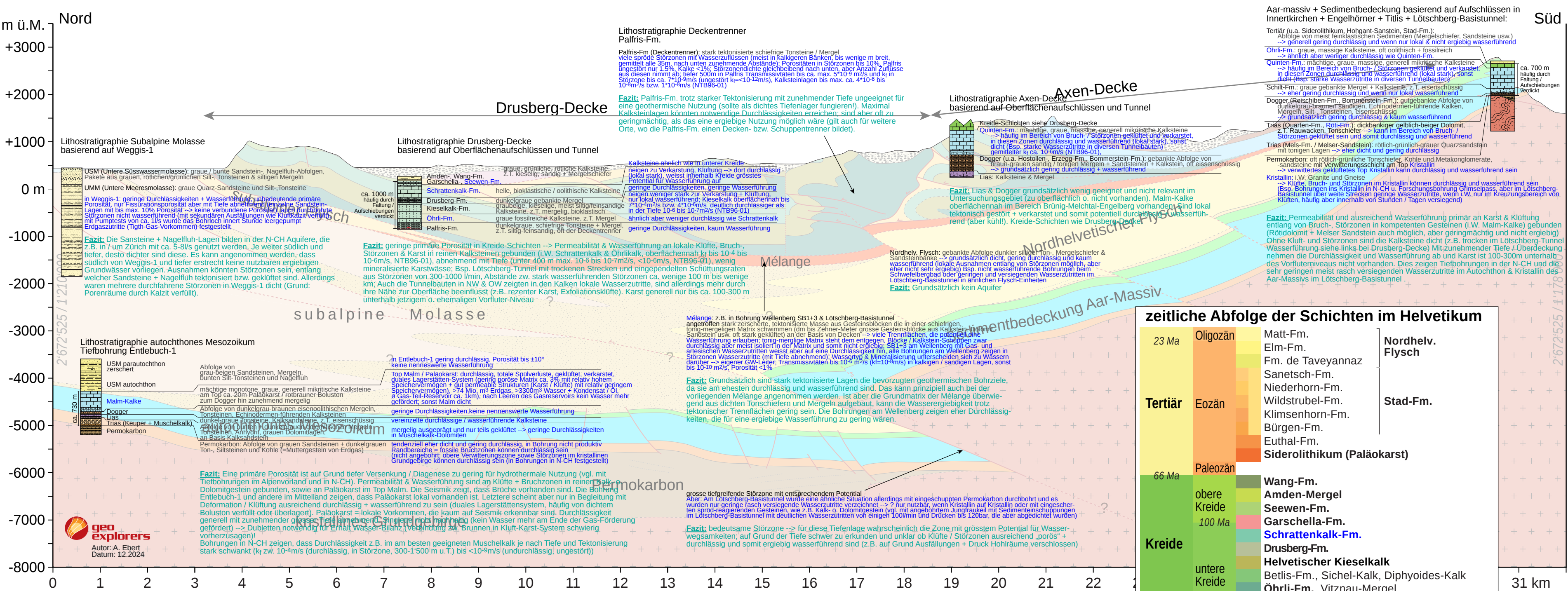
- | | | |
|--|--------------------------------|--|
| | Mélange / Basis helvet. Decken | |
| | Subalpiner Flysch | |
| | USM (Unt. Süsswasser Molasse) | subalpine Molasse / Flysch |
| | UMM (Unt. Meeres Molasse) | |
| | Nordhelvetischer Flysch | |
| | Kreide | |
| | Jura | par- und autochthone Schichtabfolge / Aar-Massiv |
| | Trias | |
| | Permokarbon | |
| | Kristallines Grundgebirge | |
| | | |

- | | | |
|--|---|----------------|
| | Quartär / Lockgestein / Rutsch-/ Bergsturzmasse | |
| | Penninikum / Habkern-Sörenberg-Mélange | Drusberg-Decke |
| | Paläogen | |
| | Ob. Kreide (u.a. Garschella- + Seewen-Fm.) | |
| | Unt. Kreide (Drusberg- + Schratten-Fm.) | Axen-Decke |
| | Unt. Kreide (Öhrli-Fm. bis Kieselkalk) | |
| | Palfris-Fm. + Zementstein-Fm. | |
| | Malm (u.a. Quinten-Fm.) | |
| | Dogger | |
| | Lias | |

- Bruchstruktur / Überschiebung (gestrichelt = vermutet)
- Schichtgrenze (gestrichelt = vermutet)

Datengrundlage:
Seismik, geologische Karten, Tunnelprofile (siehe separate Abbildung)

Anmerkungen:
Molasse und Flysch schematisch dargestellt. Profil ist nicht bilanziert. Der Fehler in der Tiefenlage des Autochthons beträgt ca. ±700m, bedingt durch Unsicherheiten im seismischen Geschwindigkeitsmodell und weil Seismik nur in Zeit vorliegt. Grosse strukturelle Unsicherheiten sind mit ? gekennzeichnet, weniger grosse sind gestrichelt. Es wurden nur Grossstrukturen (Überschiebungen, Brüche, Falten) abgebildet. Die Dichte von kleineren Strukturen ist um ein vielfaches grösser.



Lithostratigraphische Haupteinheiten und Gesteineigenschaften bzgl. Durchlässigkeit & Wasserführung

Stratigraphie	Lithologie	Angaben zu Durchlässigkeit / Wasserführung
Malm-Kalke	graue mikritische Kalksteine	durchlässig, wasserführend, verkarstet

wichtigsten Formationen, die bedeutend wasserführend sein können, sind blau eingefärbt

Daten aus Bohrberichten (z.B. Greber et al., 1994; Nagra NTB96-01; Vollmayr & Wendt, 1987) & Tunnelberichten (z.B. Ziegler & Isler, 2013)

zeitliche Abfolge der Schichten im Helvetikum

23 Ma	Oligozän	Matt-Fm.	Nordhelv. Flysch
		Elm-Fm.	
		Fm. de Taveyannaz	
		Sanetsch-Fm.	
	Tertiär	Eozän	
			Niederhorn-Fm.
			Wildstrubel-Fm.
			Klimsenhorn-Fm.
		Bürgen-Fm.	
		Euthal-Fm.	
		Siderolithikum (Paläokarst)	
66 Ma	Paleozän	Wang-Fm.	
		Amden-Mergel	
		Seewen-Fm.	
		Garschella-Fm.	
	Kreide	Schratenkalk-Fm.	
		Drusberg-Fm.	
		Helvetischer Kieselkalk	
		Betlis-Fm., Sichel-Kalk, Diphyoides-Kalk	
		Öhrli-Fm., Vitznau-Mergel	
		Palfris-Fm.	
		Zementstein-Fm.	
	Jura	Quinten-Fm.	
		Schilt-Fm.	
		Reischiben-Fm., Hochstollen-Fm., Erzegg-Fm.	
		Bommerstein-Fm.	
		Sexmor-Fm., Brunnistock-Fm.	
		Spitzmeilen-Fm.	
		Prodkamm-Fm.	
201 Ma	Trias	Quarten-Fm.	
		Röti-Fm.	
		Mels-Fm.	
		Verrucano-Gr.	
252 Ma		Variszische Sedimente und Vulkanite	

Playregister bzw. Übersicht potentieller Plays in Kantonen Nid- und Obwalden

A1 Paläokarst in (Kreide-) Malm-Kalken mit Boluston gefüllt / überlagert

Tiefe u.T.: ca. 4-5 km (im Aar-Massiv ca. 3-5 km)
Temperatur Aquifer: >140°C (70-140°C)

0.5-1 km

autochthones Mesozoikum

Sedimentbedeckung Aar-Massiv

Strom und Direktwärme
Förderrate: 0 - 3 l/s
Kälteleistung: 0 - 1 MW_{th}
Fündigkeitschancen: mittel
Reproduzierbarkeit: mittel
Potential ganzer Kanton: ? 2 - 6 Dubletten
0 - 16 Mio. kWh/a

Nachweise: Bohrungen Triemli, Küsnacht-1, Linden-1, Thun-1 (alle gering bis nicht durchlässig)
>5 km tief
50 - 70 Mio. CHF
3 - 5 Jahre

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)

A2 durchlässiger Paläokarst in (Kreide-) Malm-Kalken mit Klüften

Tiefe u.T.: ca. 4-5 km (im Aar-Massiv ca. 3-5 km)
Temperatur Aquifer: >140°C (70-140°C)

0.5-1 km

autochthones Mesozoikum

Sedimentbedeckung Aar-Massiv

Strom und Direktwärme
Förderrate: ? 5 - 50 l/s (min/max 1-100 l/s)
Kälteleistung: 1.5 - 20 MW_{th}
Fündigkeitschancen: gering - mittel
Reproduzierbarkeit: gering - mittel
Potential ganzer Kanton: ? 2 - 6 Dubletten
9 - 260 Mio. kWh/a

Nachweise: Bohrungen Entlebuch-1, Altihsen-1

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)
>5 km tief
50 - 70 Mio. CHF
3 - 5 Jahre

B Bruch- / Störzonen in Kalk- & Dolomitgestein (autochthones Mesozoikum) *

Tiefe u.T.: ca. 4-6 km (im Aar-Massiv ca. 3-5 km)
Temperatur Aquifer: >140°C (70-140°C)

0.5-1 km

autochthones Mesozoikum

Sedimentbedeckung Aar-Massiv

Strom und Direktwärme
Förderrate: 7 - 20 l/s (min/max 1-50 l/s)
Kälteleistung: 2 - 6 MW_{th}
Fündigkeitschancen: gering - mittel
Reproduzierbarkeit: gering - mittel
Potential ganzer Kanton: ? 2 - 6 Dubletten
12 - 100 Mio. kWh/a

Nachweise: Bsp. Riehen, Bad Schinznach, Yverdon, St. Gallen (aber z.T. weniger tief + andere o. grössere Bruchstrukturen)
>5 km tief
50 - 70 Mio. CHF
3 - 5 Jahre

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)

C Top verwittertes / geklüftetes Kristallin (ausserhalb Permokarbondrog)

Tiefe u.T.: ca. 5-6 km (im Aar-Massiv ca. >3-5 km)
Temperatur Aquifer: >150°C (>80-150°C)

0.5-1 km

autochthones Mesozoikum

Sedimentbedeckung Aar-Massiv

Strom und Direktwärme
Förderrate: ? 1 - 10 l/s
Kälteleistung: ca. 0.3 - 3 MW_{th}
Fündigkeitschancen: gering - mittel
Reproduzierbarkeit: gering - mittel
Potential ganzer Kanton: ? 2 - 4 Dubletten
2 - 35 Mio. kWh/a

Nachweise: einzelne Nachweise im AG (z.B. Bad Zurzach), aber z.B. Triemli, Basel-1 + Otterbach-2 gering durchlässig
>5 km tief
60 - 80 Mio. CHF
3 - 5 Jahre

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)

D Bruch- / Störzonen im kristallinen Grundgebirge *

Tiefe u.T.: >5-6 km (im Aar-Massiv ca. >3-5 km)
Temperatur Aquifer: >150°C (>80-150°C)

0.5-1 km

autochthones Mesozoikum

Sedimentbedeckung Aar-Massiv

Strom und Direktwärme
Förderrate: 1 - 30 l/s
Kälteleistung: 0.3 - 10 MW_{th}
Fündigkeitschancen: mittel (Überschiebung Aar-Massiv)
Reproduzierbarkeit: gering - mittel
Potential ganzer Kanton: 1 - 4 Dubletten
0.5 - 40 Mio. kWh/a

Nachweise: z.B. Lavey-les-Bains, Engerfeld, Schafisheim

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)
>5 km tief
60 - 80 Mio. CHF
3 - 5 Jahre

E Permokarbon-Trogränder (alte Bruch- / Störzonen)

Tiefe u.T.: >5-6 km
Temperatur Aquifer: >150°C

5-10 km

autochthones Mesozoikum

Sedimentbedeckung Aar-Massiv

Strom und Direktwärme
Förderrate: ? 1 - 20 l/s
Kälteleistung: 0.3 - 6 MW_{th}
Fündigkeitschancen: gering (unbekannt)
Reproduzierbarkeit: gering
Potential ganzer Kanton: ca. 2 - 4 Dubletten
2 - 80 Mio. kWh/a

Nachweise: nur Indizien, z.B. unter Bad-Schinznach & Baden

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)
>5 km tief
60 - 80 Mio. CHF
3 - 5 Jahre

F Bruch- / Störzonen in Molasse-Sandsteinen *

Tiefe u.T.: 0 - 5 km
Temperatur Aquifer: 20 - 140°C

0.5-1 km

autochthones Mesozoikum

Sandsteine / Nagelfluh sind generell gering porös & durchlässig, zusätzliche Klüftung in / um Störzonen notwendig

Wärme mit Wärmepumpe bis Direktwärmenutzung
Förderrate: 0.1 - 5 l/s
Kälteleistung: 0 - 1.5 MW_{th}
Fündigkeitschancen: gering - mittel
Reproduzierbarkeit: mittel
Potential ganzer Kanton: ca. 2 - 6 Dubletten
0.2 - 26 Mio. kWh/a

Nachweise: Weggis-1 <1l/s, auch in Bruchzonen gering durchlässig (um Zürich bis 5-8 l/s)
2 - 5 km tief
5 - 60 Mio. CHF
2 - 4 Jahre

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)

G Bruch- / Störzonen in Kalksteinen der Helvetischen Decken *

Tiefe u.T.: 0.5 - 1.5 km
Temperatur Aquifer: 30 - 55°C

1-2 km

autochthones Mesozoikum

Annahme: steile Querbrüche entlang Talachsen (aufsteigendes Erdgas, strukturgeol. Anomalie)

Wärme mit Wärmepumpe
Förderrate: 5 - 30 l/s
Kälteleistung: 0.3 - 3 MW_{th}
Fündigkeitschancen: mittel
Reproduzierbarkeit: mittel - hoch
Potential ganzer Kanton: ca. 6 - 12 Dubletten
10 - 100 Mio. kWh/a

Nachweise: Tunnelbauten, z.B. Lössberg-basistunnel 5-16 l/s; Lostorf bis 100 l/s, Schinznach 8 l/s
ca. 0.5 - 1.5 km tief
1.5 - 7 Mio. CHF
2.5 - 3 Jahre

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)

H Basis Helvetische Decken (Mélange / Abscherhorizont) *

Tiefe u.T.: 1 - 2.5 km
Temperatur Aquifer: 40 - 70°C

1-2 km

autochthones Mesozoikum

sehr variierend in Mächtigkeit, Ausföhrung, Lithologie, Strukturierung; wahrscheinlich eher tonig-schiefer Matrix mit geklüfteten Blöcken aus Kalkstein, Dolomit,...
→ Ergiebigkeit wahrscheinlich gering

Wärme mit Wärmepumpe, evtl. Direktwärmenutzung
Förderrate: ? 0 - 20 l/s
Kälteleistung: 0 - 2 MW_{th}
Fündigkeitschancen: gering - mittel
Reproduzierbarkeit: mittel
Potential ganzer Kanton: ca. 4 - 10 Dubletten
0 - 60 Mio. kWh/a

Nachweise: Bohrungen SB1&3 Wellenberg mit Gas- & Wasserzutritten, aber zu geringer Ergiebigkeit
ca. 2 km tief
6 - 9 Mio. CHF
2 - 3.5 Jahre

Explorationskosten: (Seismik + Sondierbohrung + Pumptest)

I basale Kieslagen in übertieften eiszeitlichen Rinnen (Lockergestein)

Tiefe u.T.: 200 - 400 m
Temperatur Aquifer: 15 - 25°C

1-2 km

autochthones Mesozoikum

rasch & einfach zu erkunden und Nachweis möglich

Wärme mit Wärmepumpe, Aquiferspeicher
Förderrate: 20 - 80 l/s
Kälteleistung: 0.5 - 3 MW_{th}
Fündigkeitschancen: mittel - hoch
Reproduzierbarkeit: mittel - hoch
Potential ganzer Kanton: ca. 10 - 20 Dubletten
15 - 150 Mio. kWh/a

Nachweise: in Rinnen z.B. in Bern, Biel, Kloten nachgewiesen (3'000-5'000 l/min)
ca. 200-400 m tief
1 - 2 Mio. CHF (eine Dublette)
1.5 - 2 Jahre

Explorationskosten: (Seismik + Testbrunnen + Pumptest)

J petrothermale Geothermie (EGS, AGS) vorzugsweise im kristallinen Grundgeb.

Tiefe u.T.: >6 km
Temperatur Aquifer: >170°C

1-2 km

autochthones Mesozoikum

nicht an Bruchzonen gebunden

Strom und Direktwärme
Förderrate: angestrebt 50 l/s
Kälteleistung: angestrebt 5 MW_{th} + >50 MW_{th}
Nachweise: Basel-1 u.a. haben gezeigt, dass Untergrund künstlich durchlässig gemacht werden kann, aber viele Rückschläge / Schäden & geringe Wirtschaftlichkeit in Vergangenheit; derzeitige Schlüssel-Grossprojekte in Utah (USA) mit Erfolgen
grob 100 Mio. CHF
je nach Erfolg des Projekts Heute
Some in einigen Jahren kann erst ein weiteres Projekt starten

Explorationskosten:

* höhere Fündigkeitschancen im Kreuzungsbereich mit steil stehenden Brüchen, die quer zu den Verwerfungen stehen; Bruchstruktur sollte gut erkundet sein und möglichst gross sein

Explorationskosten nicht nur abhängig von Bohrtiefe, sondern auch von Vorerkundung (z.B. Seismik), Bohrpfad, Ausbau, Verfügbarkeit, Stimulationsmassnahmen, Stahlpreis, seismisches Monitoring usw. → deshalb grosse Bandbreite (im Fall Play I Kosten für Produktions- und Rückgabeburgen, sonst nur für erste bzw. eine Sondierbohrung inkl. Seismik und Pumptest)

→ entsprechend variiert auch Ausführungsdauer

Potential ganzer Kanton auf Basis min. / max. Brunnenleistung und 3'000 Laststunden

grün = empfehlenswert: Verhältnis angestrebte Förderleistung und Reproduzierbarkeit zu Fündigkeitschancen, Erkundungsdauer und -kosten am erfolgsversprechendsten

orange, gelbgrün liegen zwischen rot und grün

rot = hinsichtlich Fündigkeitschancen grosse Schüttungsraten zu erreichen, sowie Reproduzierbarkeit und derzeitigen Explorationskosten bzw. Dauer nicht empfehlenswert

geo explorers

Autor: A. Ebert
Datum: 02.2025