



# VARIATION DER UNTERGRUNDTEMPERATUR IM KANTON BL UND DEREN EINFLUSS AUF DIE WÄRMENUTZUNG





Autoren:

Andreas Ebert & Eva Dörner, Geo Explorers AG

Dominik Bänninger, Amt für Umweltschutz und Energie, Kt. BL

Liestal, 26.09.2022

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	4
2	Messstandorte.....	5
3	Methodik .....	5
4	Resultate.....	7
4.1	Temperatur-Tiefenprofile und Temperatur-Histogramme.....	7
4.2	Ablenkungsmessungen .....	10
4.3	Isothermenkarte (Temperaturen in 100 m unter Terrain) .....	12
4.4	Temperaturtiefenkarten auf 200 und 300 m ü.M.....	15
4.5	Geothermischer Gradient .....	17
4.6	Wärmefluss und Wärmeleitfähigkeit .....	18
5	Fazit .....	19
6	Mögliche zukünftige Produkte.....	20

## 1 EINLEITUNG

Pro Jahr werden im Kanton Basel-Landschaft zirka 200 bis 300 neue Erdwärmesonden (EWS) erstellt. Je nach Geologie erreichen diese generell Bohrtiefen von 100 bis 250 m u.T.. Sie werden in unterschiedlichsten Lithologien und topographischen Gegebenheiten sowie Bebauungsdichten erstellt. Auch ändert sich der Wärmefluss innerhalb des Kantons. Es ist bekannt, dass diese Faktoren das Temperatur-Tiefenprofil beeinflussen und somit einen Einfluss auf die Dimensionierung von EWS haben.

Grundsätzlich sollen EWS sinnvoll dimensioniert sein, sodass nicht unnötige Bohrmeter gebohrt werden müssen oder umgekehrt auch Schäden z.B. durch Vereisung bei Unterdimensionierung vermieden werden. Zudem werden aus Sicht des Grundwasserschutzes und der zunehmenden Verdichtung von EWS nur so viele Bohrmeter wie unbedingt notwendig bevorzugt. Das «Erdwärmekonzept BL» bildet die Grundlage, auf derer Bohrgesuche für Erdwärme beurteilt werden. Im Kanton BL werden bereits nützliche Tools für die Planung von EWS bereitgestellt. Dies sind unter anderem das Bohrkataster mit allen Bohrstandorten, -längen, -profilen, der Erdwärmekarte inkl. dem Erdwärmebericht und der Erdwärmesonden-Dichtekarte. Grundlagen zu den Temperaturgradienten, Wärmeleitfähigkeiten, Anomalien usw. fehlen derzeit noch.

Aus diesen Gründen und da die grosse Anzahl von Bohrungen eine einmalige und kostengünstige Möglichkeit bietet, einfach Untergrunddaten zu erheben, werden seit 2016 in ausgewählten EWS die Untergrundtemperatur und der räumliche Verlauf der Sonden vermessen. Es ist in der Zwischenzeit ein umfangreicher Datensatz von 181 Messprofilen entstanden. Dieser erlaubt es zum einen Tiefentemperatur-Karten zu erstellen, zum anderen aber auch die wichtigsten Einflussparameter auf die Untergrundtemperatur zu definieren.

Die etwaige Durchführung der Messungen wird in jeder einzelnen Bewilligung für Erdwärmesonden verfügt: *"Der Kanton behält sich vor, den Bohrungsverlauf (Richtung und Neigung) sowie das Temperaturprofil dokumentieren zu lassen. Diese Bohrlochvermessung wird auf Kosten des Kantons durch ein von ihm zu bestimmendes Fachbüro durchgeführt. Die Resultate werden den Bewilligungsnehmern auf Wunsch ausgehändigt. Die Bohrlochvermessung wird stichprobenartig durchgeführt; es kann kein Anspruch darauf geltend gemacht werden. Den Vertretern des Fachbüros ist Zugang zum Bohrplatz zu gewähren."*



## 2 MESSTANDORTE

In der Messperiode von 2016 bis 2022 wurden an 181 verschiedenen Standorten im Kanton BL Messungen durchgeführt. Zur besseren Interpretation wurden nahegelegene Messwerte aus dem Kanton SO in die Temperatur-Karten integriert. Die Messstandorte sind in Abb. 1 ersichtlich.

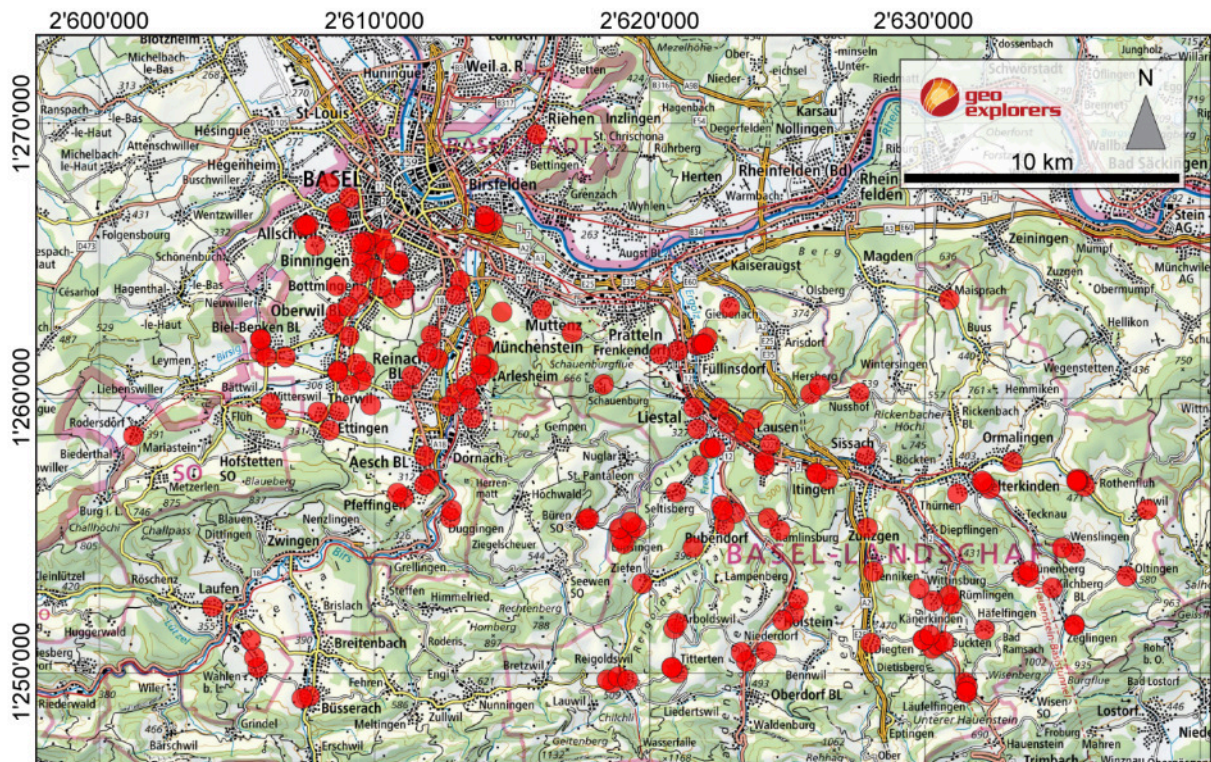


Abb. 1: Standorte der vermessenen Bohrungen

## 3 METHODIK

Nach erfolgter Erstellung der Erdwärmesonde wurde in den vollständig mit Wasser gefüllten Sondenrohren die Untergrundtemperatur gemessen. Auf Grund der Hydratationswärme beim Abbinden der Hinterfüllung wurde, wenn möglich, frühestens vier Tage nach dem Hinterfüllen gemessen. Somit konnte die Beeinflussung durch die Hydratationswärme ausgeschlossen werden, welche den Ringraum um einige Zehntel Grad erwärmt und nach wenigen Tagen abklingt. Auf Grund der Funktionalität des Messgerätes wurde auch der räumliche Verlauf der Sonden mitgemessen. Diese Daten generieren einen Mehrwert, denn oftmals korrelieren Ablenkungsanomalien mit geologischen Besonderheiten wie z.B. Bruchzonen, welche wiederum Wasserwegsamkeiten darstellen können. Letztere korrelieren oftmals entsprechend mit Temperaturanomalien.

Eingesetzt wurde der Geofish der Geo Explorers AG an einer eigens erbauten batteriebetriebenen Stahlseil-Winde (Abb. 2). Massgebend waren die Messwerte beim Absenken im Sondenrohr mit konstanter Geschwindigkeit von ca. 20-40 m pro Minute. Der Geofish misst die Temperatur, den



Druck (Wassersäule) und den 3D-Verlauf mittels neun Komponenten für Erdbeschleunigung, magnetisches Feld und Winkelgeschwindigkeit (Gyro / Kreisel sensor). Da sich der Temperatursensor aussen am Gehäuse befindet, ist die Messträgheit gering und es können Temperaturanomalien durch variierende Wärmeleitfähigkeiten oder Wasserzuflüsse detektiert werden. Die Messgenauigkeit liegt bei  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  bei einem Intervall von 25 Messungen pro Sekunde.

Die Bohrtiefen in den vermessenen Bohrungen im Kanton BL variieren zwischen 60 m und 270 m u.T.. Um auf den Temperaturkarten z.B. in 100 m, 150 m und 200 m möglichst viele Daten berücksichtigen zu können, wurden lineare Messkurven mathematisch um max. 15% ihrer Bohrtiefe interpoliert. Dabei wurde die Steigung der letzten 20 m berücksichtigt.



Abb. 2: Geofish mit Sondenrohr (PN16,  $\varnothing$  40 mm) zum Vergleich

## 4 RESULTATE

### 4.1 TEMPERATUR-TIEFENPROFILE UND TEMPERATUR-HISTOGRAMME

In Abb. 3 sind die gemessenen Temperaturen in einem Temperatur-Tiefen-Diagramm dargestellt. Die obersten rund 10 - 20 m werden stark von der Aussentemperatur bzw. Jahreszeit beeinflusst und variieren daher nach Messdatum und Lage (Höhe/ Hanglage/ Stadt/ Land/ Wald etc.). Die Daten in Abb. 3 zeigen eindrücklich die grosse Variation der Untergrundtemperaturen sowie des geothermischen Gradienten im Kanton BL. In einer Tiefe von 150 m beträgt die Variationsbreite rund 7°C. Insbesondere die Lithologie, der Wärme- und Grundwasserfluss sind dafür verantwortlich. Der gemittelte geothermische Gradient unter ca. 100 m u.T. variiert zwischen 2.2 und 7.6°C/100 m.

Das in Abb. 4 dargestellte Histogramm gibt einen Überblick über die Häufigkeit aller gemessenen Temperaturen in einer bestimmten Tiefe. Mit der Tiefe nimmt die Anzahl der Messwerte auf Grund der variierenden Bohrteufen ab. Gleichzeitig nimmt die Bandbreite der gemessenen Temperaturen zu. In Abb. 4 sind die durchschnittlichen Temperaturen pro Teufe angegeben. In 50 m Tiefe wurde meist eine Temperatur zwischen 11 und 13.5°C angetroffen. In 100 m Tiefe liegt die Bandbreite bei 11.5 bis 16°C. Auf 150 m Tiefe liegt die Variation bei 13 bis 20°C.

Die Temperatur-Tiefen Gradienten in Abb. 5 wurden aus einem linearen Fit in der jeweiligen Tiefe über einen Tiefenbereich von  $\pm 20$  m berechnet. Die Gradienten variieren auf Grund der unterschiedlich durchbohrten Lithologien mit variierenden Wärmeleitfähigkeiten stark. Hierbei muss beachtet werden, dass oberhalb von ca. 100 m Tiefe die Temperatur-Tiefen-Kurven auf Grund der Klimaerwärmung einen "Bauch" zeigen (siehe Abb. 4). Entsprechend zeigen die Gradienten in 50 und 80 m Tiefe auch negative Werte oder Werte um 0°C / 100 m. Nur die Histogramme für Tiefen >100 m zeigen somit die ungestörten geothermischen Gradienten. Der gemittelte Gradient für 150 m, 200 m und 250 m Tiefe liegt bei 4.4°C / 100 m. Die Streuung und Ausreisser können auf einzelne, nicht-lineare Temperatur-Tiefen-Kurven zurückgeführt werden (siehe Abb. 4). Diese lassen sich meist mit geologischen Einflüssen oder Wasserzuflüssen erklären. In wenigen Fällen können technische Einflüsse wie z.B. ein Druckluft-Durchschlag beim Bohren von Nachbarsonden nicht ausgeschlossen werden.

In Abb. 6 wird dargestellt, wie geradlinig bzw. unruhig / gekrümmt die Messkurven sind. Berechnet wurden nur die Kurvenabschnitte tiefer als 80 m u.T.. Es wurde die horizontale Variation im Verhältnis zu einer geglätteten Kurve mit einem Glättungsfenster von 10 m berechnet. Je höher die Werte, desto mehr Anomalien und Schwankungen weist die Messkurve auf. Einstellige Werte sind ein Anzeichen für lineare Temperatur-Tiefen-Verläufe. Damit können Ausreisser wie z.B. mögliche Grundwasserflüsse erkannt werden. Zudem helfen die Werte, mögliche Temperatúrausreisser auf den Temperaturkarten erklären zu können (siehe Abb. 10).



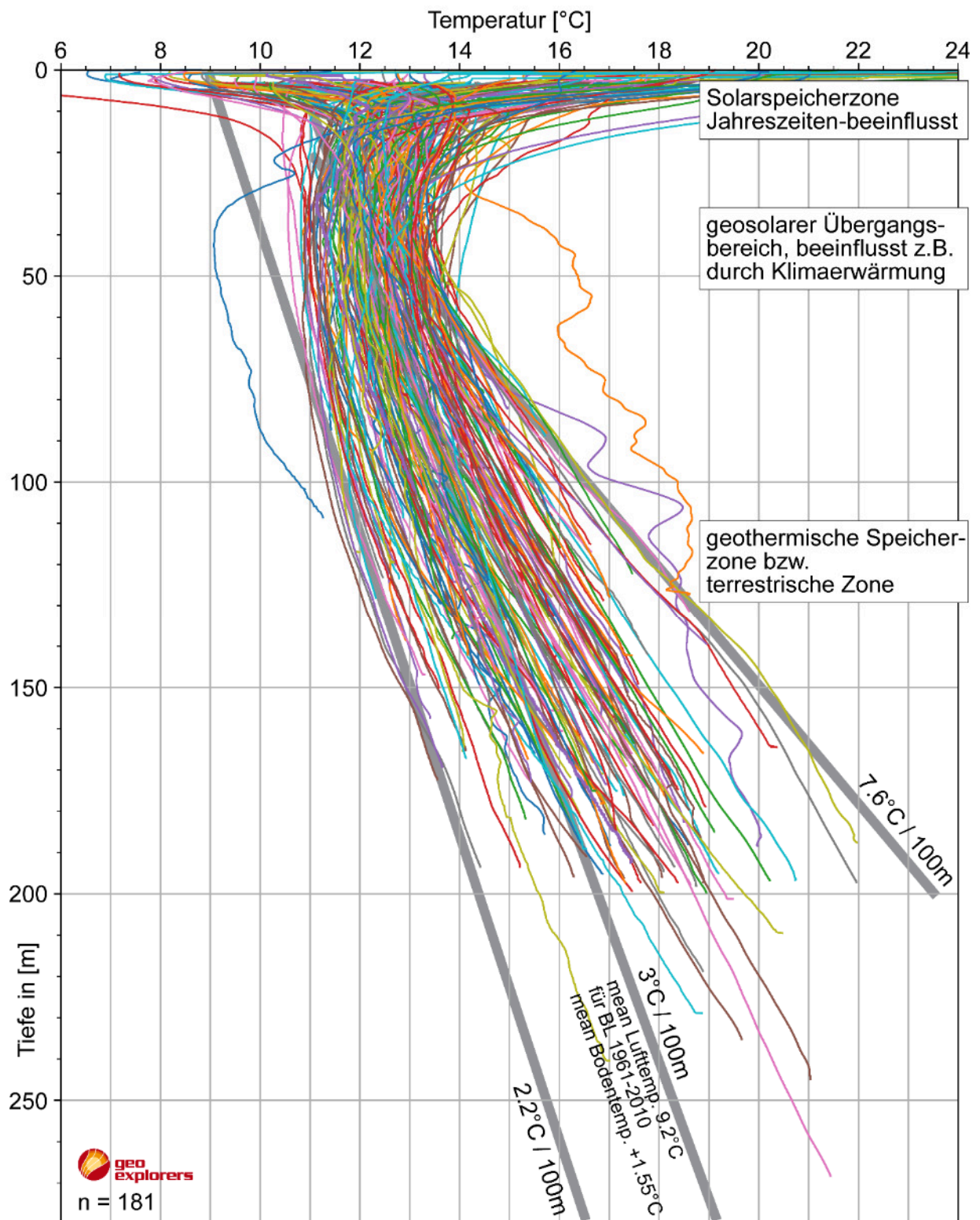


Abb. 3: Gemessene Temperatur-Tiefenprofile

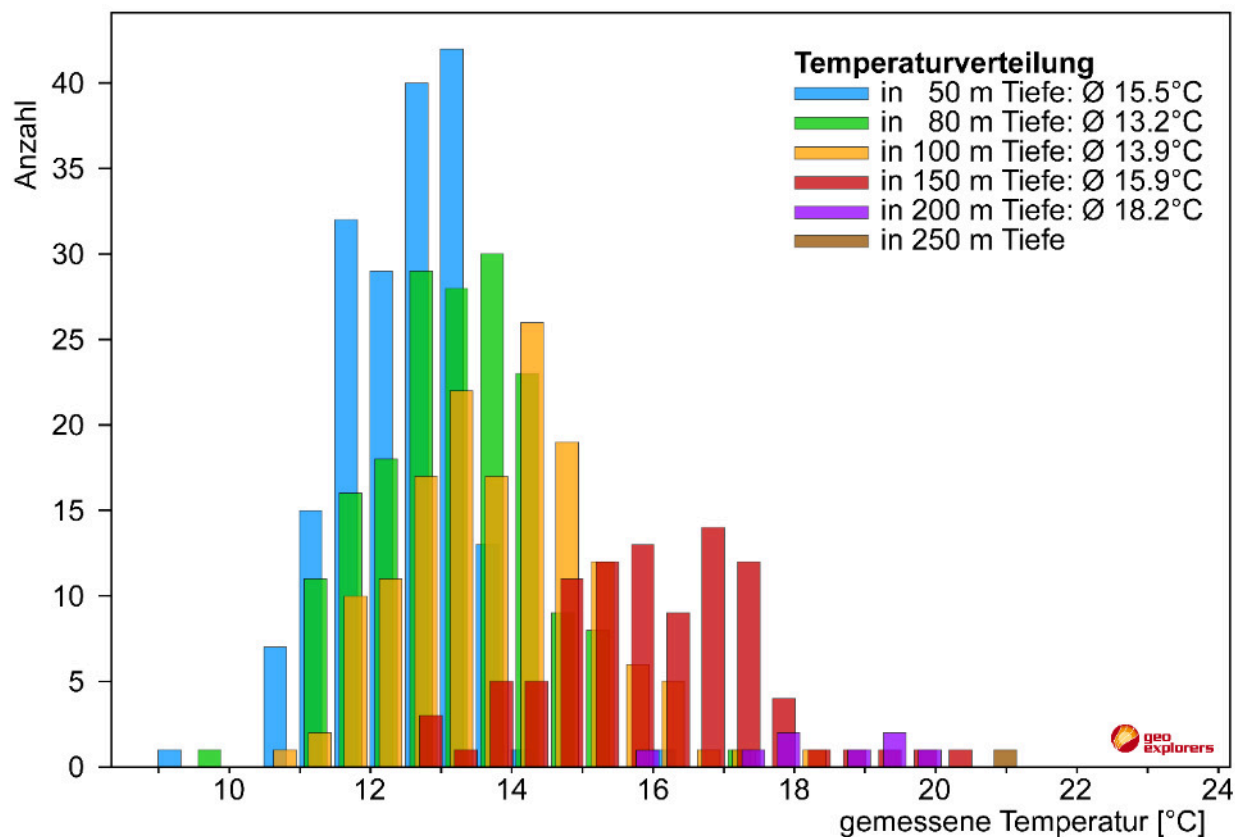


Abb. 4: Temperatur-Histogramme für verschiedene Messtiefen (Intervall 0.5°C)

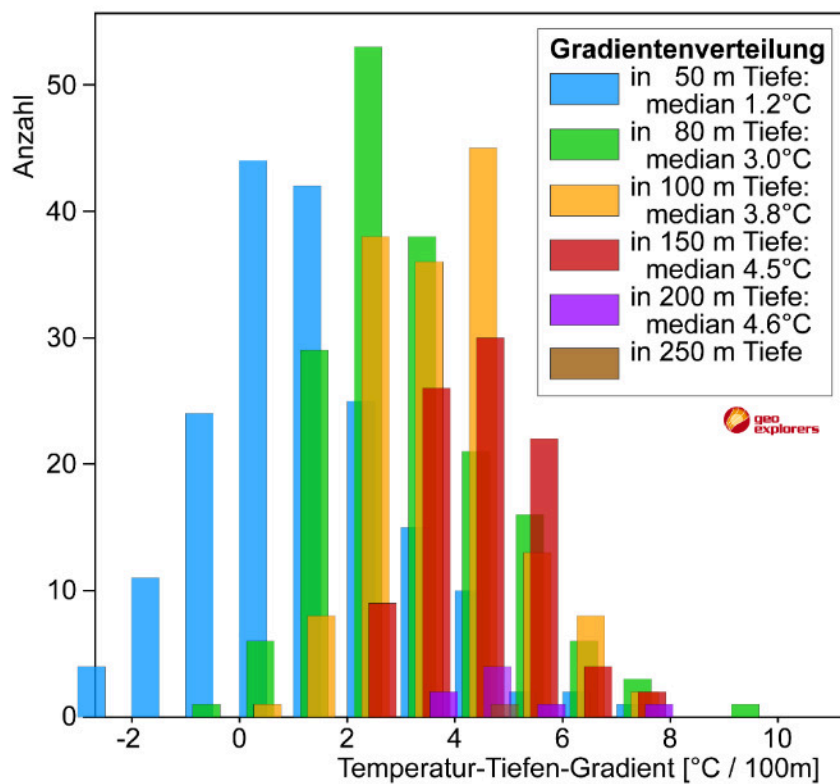


Abb. 5: Histogramme der Temperatur-Gradienten für verschiedene Messtiefen (Intervall 1°C/100m)



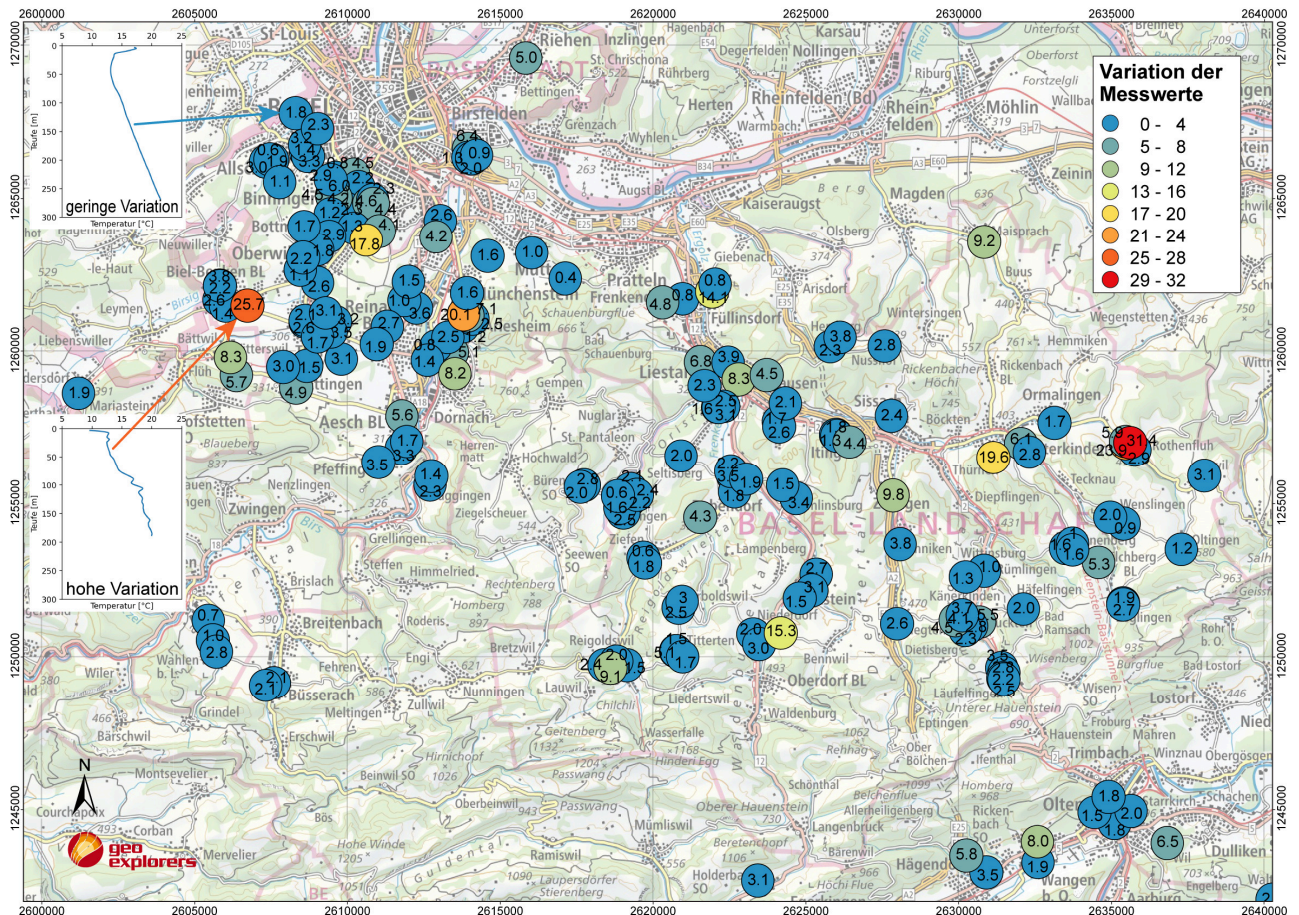


Abb. 6: Kurvenanalyse – Geradlinigkeit bzw. Krümmungsverhalten der Messkurven. Dargestellt wird der hundertfache-quadratische Mittelwert der Differenz der Rohdaten zur geglätteten Kurve für Daten tiefer 80m mit einem Glättungsfenster von 10m.

## 4.2 ABLENKUNGSMESSUNGEN

67% aller gemessenen Sonden weisen eine Abweichung auf Bohrlochsohle von maximal 5% auf. Eine maximale Abweichung von >10% weisen nur noch 13% aller Messungen auf (Abb. 7). Die maximalen Abweichungen liegen bei 30-40 m bei Sondenlängen von 150-200 m. Die generelle Ablenkung zeigt in Richtung NW. Dies verwundert nicht, da sich Bohrungen generell zur Schichtung ausrichten. Die Schichten fallen regional mit wenigen Grad in Richtung SE ein. Es sei aber angemerkt, dass auf Grund der vielen Horst- und Grabenstrukturen insbesondere im Bereich von Bruchzonen eine grosse Variation im Schichteinfallen vorliegt. Häufig bleibt das Streichen jedoch  $\pm$ NE-SW ausgerichtet, was in den Ablenkungsdaten widerspiegelt wird.

Abb. 8 zeigt, ob und wie sich die Geologie und mögliche Bohrprobleme auf die Ablenkung auswirken. Je homogener die Lithologie, wie z.B. in massigen Kalksteinen, homogenen Tonsteinen / Mergeln oder flachlagernden Schichten wie im Tertiär um Basel, desto geringer sind die Abweichungen ( $\emptyset$  ca. 4-5% Abweichung im Verhältnis zur Sondenlänge). In diesen Lithologien scheinen die Ablenkungen auch nicht mit der Bohrtiefe zuzunehmen. Bei Wechselfolgen im oberen Baselbiet, wo Schichten häufig auch geneigt sind, ist die Variation grösser und sind die Ablenkungen



tendenziell grösser ( $\varnothing$  ca. 7%). Wurden strukturelle Anomalien, wie z.B. Bruchzonen, (Paleo-) Karst oder Bohrprobleme, wie z.B. Einbauprobleme oder Arteser beobachtet, so wurden tendenziell unabhängig von der Geologie die grössten Ablenkungen auf Bohrsohle gemessen ( $\varnothing$  ca. 10%, in Abb. 8 rot hinterlegte Punkte). Ein Beispiel für die Korrelation von Bohrlochablenkung, Temperaturanomalie und dem Vorhandensein einer Störzzone ist in Abb. 9 gegeben.

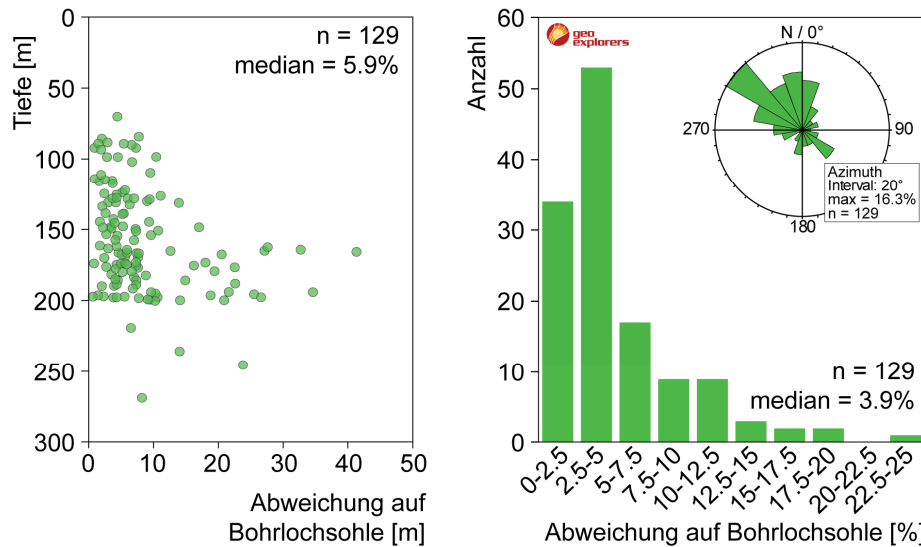


Abb. 7: Abweichung auf Bohrlochsohle in m (links) und in % (rechts). Rechts oben Rosendiagramm der Ablenkungsrichtungen.

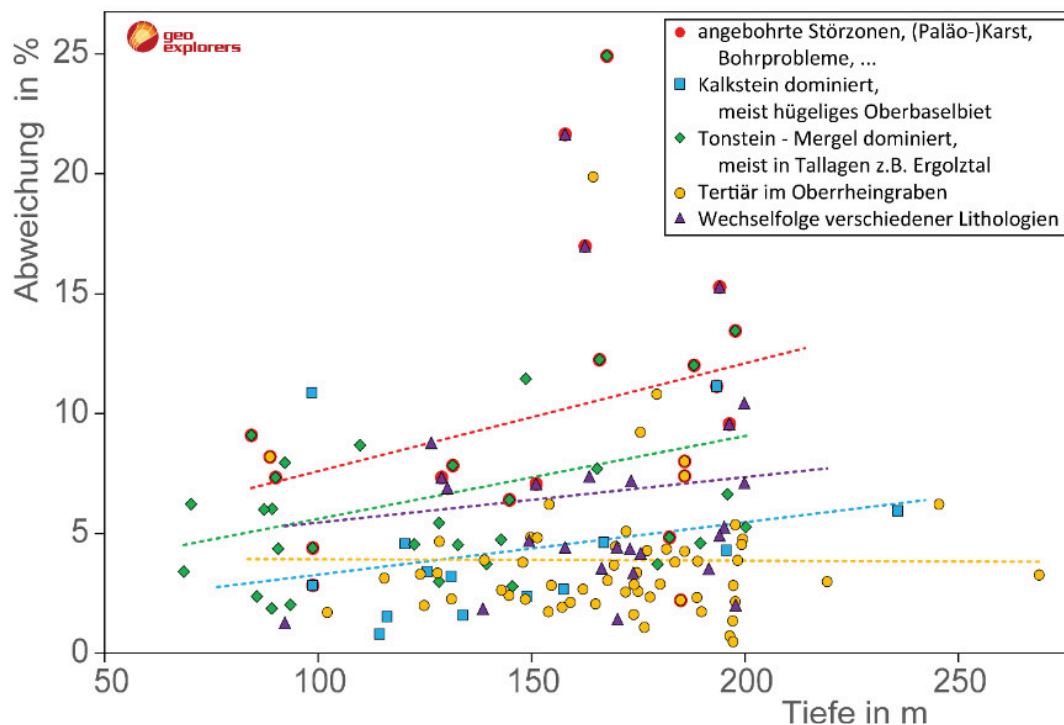
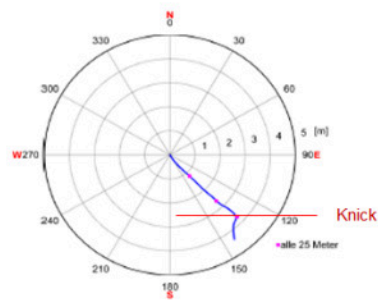
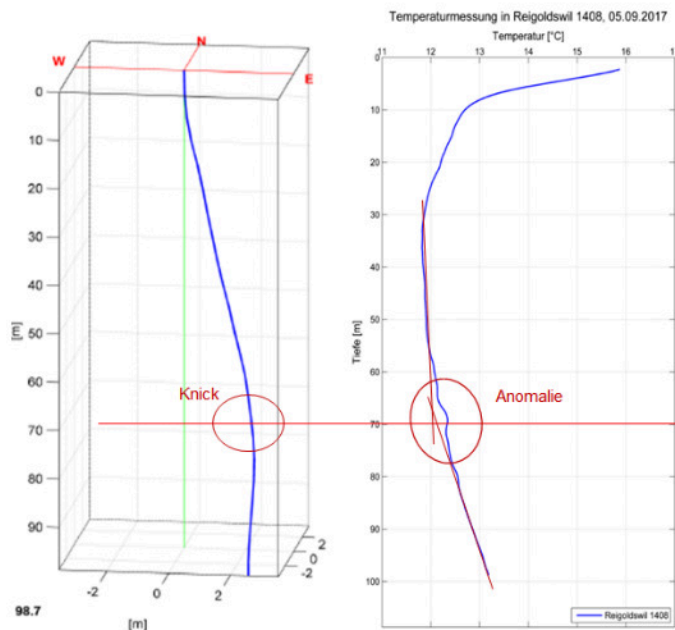
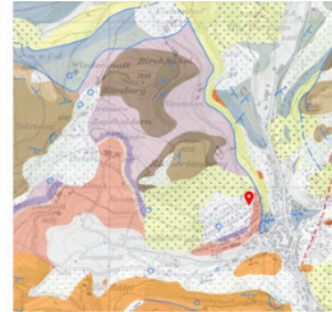


Abb. 8: Korrelation der max. Abweichung am Sondenfuss in Relation zur Sondenlänge. Farblich dargestellt sind die unterschiedlichen Lithologien. Rot hinterlegt sind Abweichungen bei denen entweder Bruchzonen, Karsthohlräume und / oder Bohrprobleme beobachtet wurden. In homogenen Gesteinen wie im Tertiär im Oberrheingraben (gelb), in homogenen Kalksteinen (blau) oder Tonsteinen (grün) sind die Abweichungen mit wenigen Prozent am geringsten.



## Reigoldswil 1408

Zusammenhänge zw.  
Geologie, AM und Temp.



Bauer	Bohrung	tiefe [m]	Libologische Beschreibung	Stratigraphische Zuordnung	Grundwasser	Ausbau
109		0				
		5	ausseigee allige Tonstene mit Glimmer, beborstet	Stoffage Aa (s.s. F. 10.0.0.0) (=Obduca-Gebirge)		temperale Schutzverandung bis 14 m
		10	ausseigee Mergel	Stoffage Aa (s.s. F. 10.0.0.0) (=Obduca-Gebirge)		
		20				
		30				
		40				
		50				
		60				
		70				
		70				
		80				
		90				
		100				

Abb. 9: Korrelation Störzone (rechts) mit Bohrverlauf (links) und Temperaturprofil (mittig). Die auf dem Bohrprofil definierte Störzone ist als Knick auf dem Azimuth- und Tiefenverlaufdiagramm, sowie auch als Anomalie auf dem Temperatur-Tiefenprofil gut erkennbar.

### 4.3 ISOTHERMENKARTE (TEMPERATUREN IN 100 M UNTER TERRAIN)

In der Abb. 10 wird die Isothermenkarte der gemessenen Temperaturen in 100 m u.T. dargestellt. Der geosolare Übergangsbereich endet bei ca. 100 m u.T. (s. Abb. 3). Somit stellen die Temperaturdaten ab 100 m u.T. den durch Jahreszeiten und Klima unbeeinflussten Tiefenbereich dar. Aufgrund gebietsweiser Bohrtiefenbeschränkungen im Kt. BL (z.B. wg. Gipskeuper) liegen in 100 m u.T. die meisten Temperaturdaten zur Interpretation vor.

Tendenziell weisen die erhöhten hügeligen Lagen im Baselbiet um bis zu 5°C tiefere Temperaturen auf, als die Tallagen wie z.B. im Ergolzthal, Homburgertal, Diegttertal oder Reigoldswilertal. Die Messwerte zwischen benachbarten Standorten unterscheiden sich z.T. innerhalb kurzer Distanzen. Dies ist z.B. bei Rothenfluh im östlichen BL ersichtlich. Im Dorf Rothenfluh wurden in 100 m u.T. rund 16-17°C und in den benachbarten Höhenlagen von Anwil oder Wenslingen, welche nur 100 m höher gelegenen sind, rund 12°C gemessen. Die topographischen Höhenunterschiede, Einstrahlungseffekte, Stadt-Land-Einflüsse oder ein variierender regionaler Wärmefluss

alleine können diese deutlichen Temperaturunterschiede nicht verursachen. Vielmehr korrelieren diese gut mit der Geologie bzw. lithologischen Unterschieden.

Dort, wo Kalksteinserien vorherrschen, wurden deutlich kühlere Temperaturen gemessen; im Gegensatz zu den Tallagen, wo Tonsteine und Mergel mit geringeren Wärmeleitfähigkeiten anstehen. Möglicherweise wird dieser Effekt durch eine stärkeren Klüftung in Kalksteinserien verstärkt, in welcher kühle Oberflächenwässer rasch in die Tiefe abfliessen, womit ein Abkühlungseffekt eintritt.

Weitere Wärmeanomalien wurden um Biel-Benken und Basel festgestellt. Wenige Anomalien können mit Artefakten wie z.B. Arteser oder starken Kurvenschwankungen erklärt werden.

Mit dem bestehenden Datensatz lassen sich Bereiche mit ähnlichen Untergrundtemperaturen unterscheiden, sodass eine Isothermen-Karte der gemessenen Temperaturen in 100 m u.T. erstellt wurde (siehe Abb. 10). Die Isothermen wurden entsprechend den anstehenden Lithologien in 100 m Tiefe und der Topographie angepasst. Wo grössere Messlücken bestehen, weisen die gemachten Interpretationen zum Verlauf der Isothermen entsprechend einen grösseren Fehler auf (z.B. Bereiche nördlich Sissach und Gelterkinden, aber auch das Laufental). Die beschriebenen Zusammenhänge bleiben auch in grösseren Tiefen bestehen. Die Temperaturen hingegen scheinen sich mit zunehmender Tiefe mehr anzugleichen (vgl. Abb. 10 - Abb. 12).

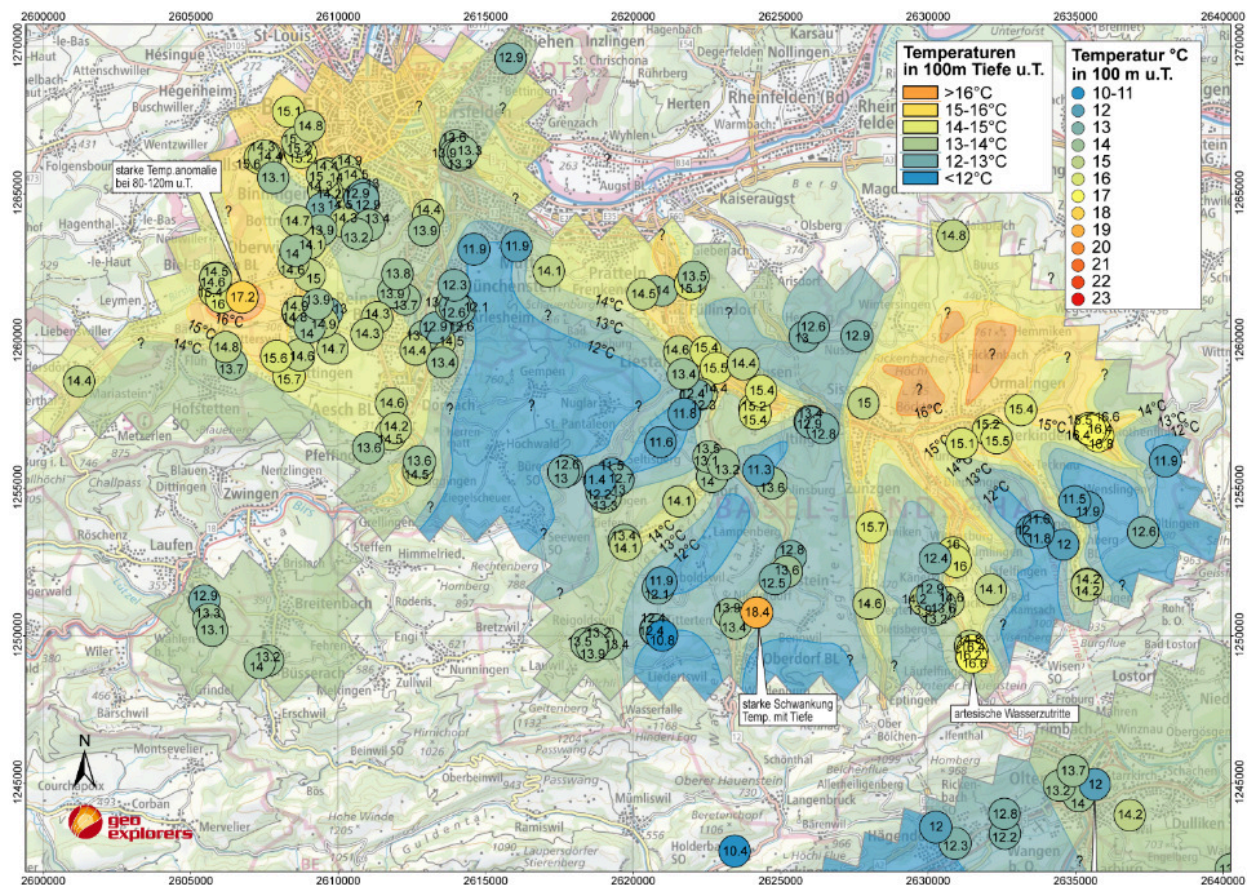


Abb. 10: Isothermenkarte mit Angabe der gemessenen Temperaturen in 100 m unter Terrain. Die linke Legende steht für die Flächen und die rechte Legende mit den farblichen Kreisen für die Messpunkte auf der Karte.



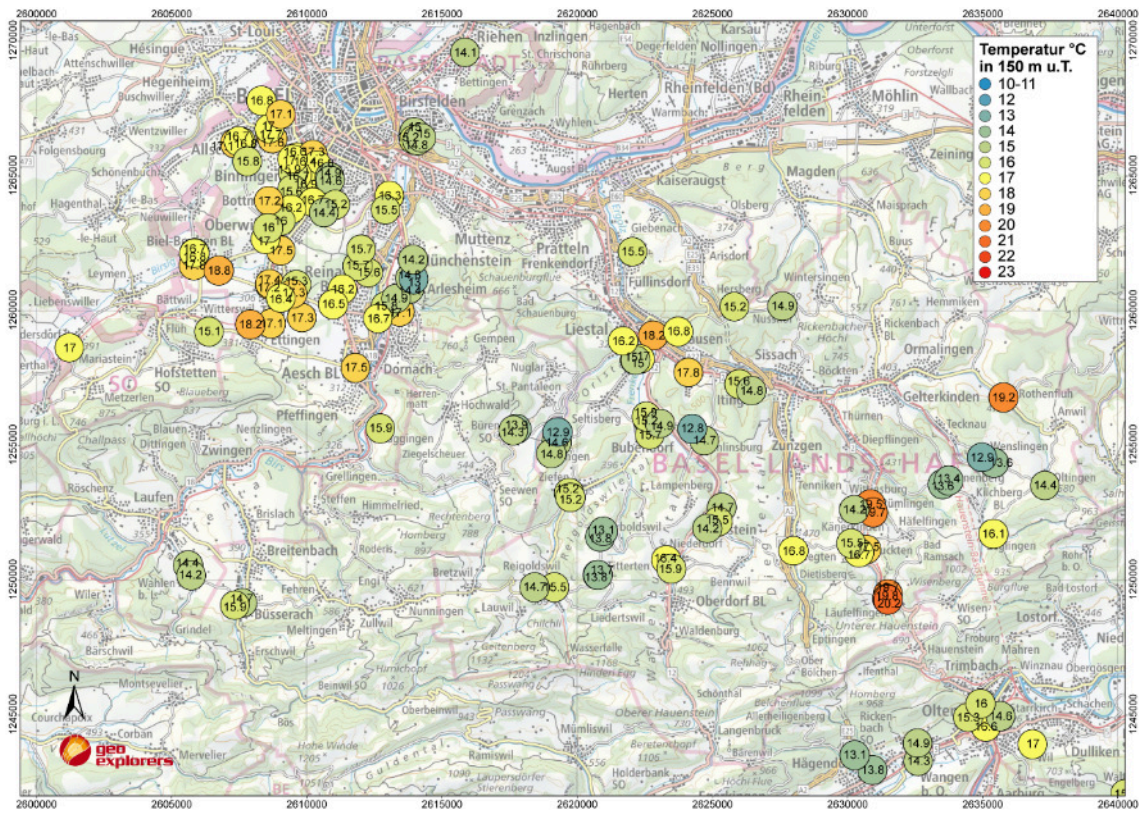


Abb. 11: Isothermenkarte in 150 m unter Terrain

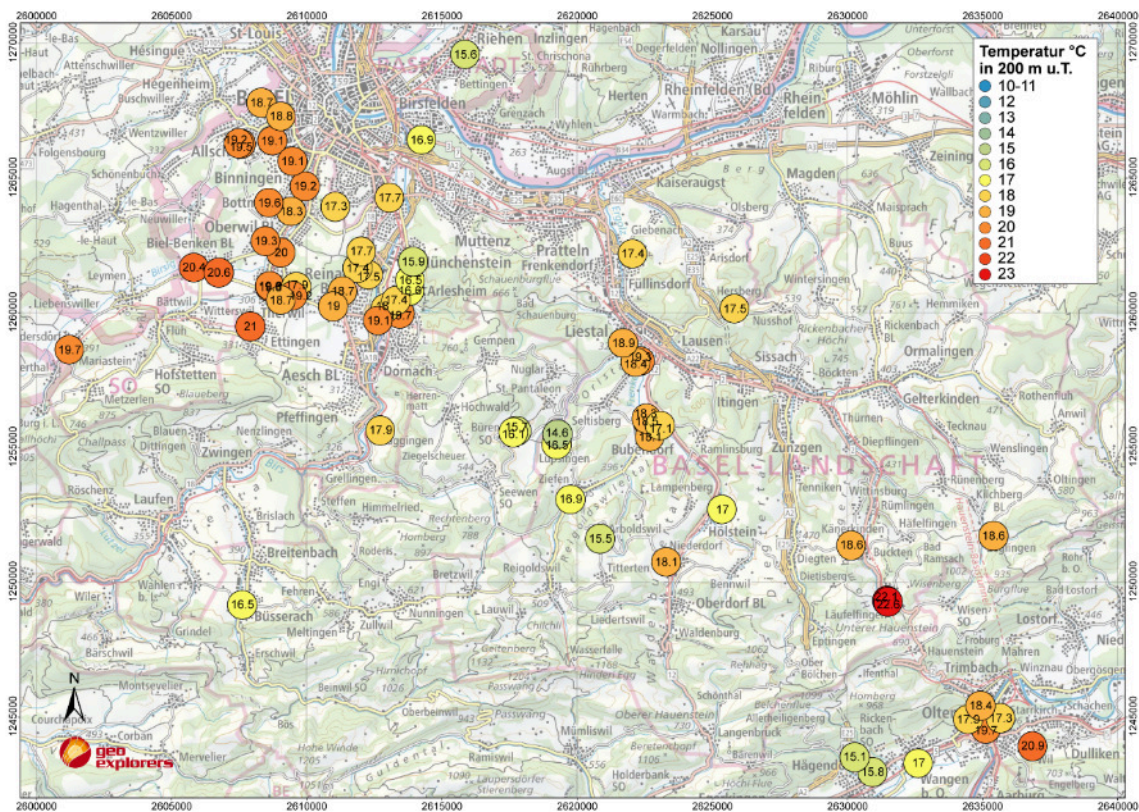


Abb. 12: Isothermenkarte in 200 m unter Terrain

#### 4.4 TEMPERATURTIEFENKARTEN AUF 200 UND 300 M Ü.M.

Eine Temperaturtiefenkarte auf gleichbleibender Höhe über Meer kann z.B. regionale Anomalien im Wärmefluss aufzeigen. Abb. 13 und Abb. 14 zeigen die Messwerte auf 200 m ü.M. und 300 m ü.M.. Auf Grund der tieferen topographischen Lage und der tiefen Bohrungen liegen im Gebiet um Basel mehr Messwerte vor.

Die Temperaturen auf gleicher Höhe über Meer sind im Gebiet um Basel am tiefsten und nehmen nach Süden und insbesondere nach Osten hin zu. Auf 300 m ü.M. liegen die Temperaturen um Basel bei ca. 11-13°C. Im östlichen Baselbiet wiederum liegen die Werte bei ca. 17-20°C. Dabei darf jedoch nicht ausser Acht gelassen werden, dass auf Grund der höheren topographischen Lagen die Temperaturen im östlichen Baselbiet höher sein müssen. Die Höhenunterschiede betragen 100 m für Tallagen und ca. 300 m für die Höhenlagen. Vergleicht man z.B. die Gebiete Binningen / Bottmingen (ca. 12°C auf 300 m ü.M.) mit Gelterkinden (ca. 17°C auf 300 m ü.M.) bei einem topographischen Höhenunterschied von 100 m, so kann man die Temperaturunterschiede nur mit einem erhöhten geothermischen Gradienten und / oder Anomalien im Wärmefluss erklären. Berücksichtigt man, dass das Klima in Basel wärmer ist und die Bebauung die Untergrundtemperaturen zusätzlich erhöht, müssten die Temperaturunterschiede noch ausgeprägter sein. Evtl. lassen sich die kühleren Temperaturen um Basel mit einer Kombination folgender Einflussparameter, ähnlich wie man dies vom südlichen Molassebecken im Alpenvorland kennt, erklären: (a) rasche Ablagerung von kühlen mächtigen tertiären Sedimenten im sich senkenden Oberrheingraben, (b) tiefere Lage des kristallinen Grundgebirges als Wärmequelle als im umliegenden Baselbiet, (c) in wie weit die isolierende Wirkung der sehr mächtigen tertiären Schichten (wie z.B. Meletta-Schichten) mit tiefen Wärmeleitfähigkeiten von  $<2 \text{ W/mK}$  und dem damit verbundenen höheren Temperaturgradienten (siehe Abb. 16) der beschriebenen kühleren Temperaturen auf 100 m u.T. entgegenwirkt, ist unklar, (d) eindringende kühlere Niederschläge können eher ausgeschlossen werden, da zumindest vertikal betrachtet, die tertiären Sedimente gering durchlässig sind. .

Auffallend ist auch, dass auf 200 m ü.M., insbesondere entlang der Rheintal-Flexur, die kühlfsten aber auch um ca. 2°C kühlere Temperaturen als angrenzend gemessen wurden. Warum entlang der Rheintal-Flexur die Temperaturen nochmals kühler sind, kann nur spekulativ beantwortet werden. Evtl. führen hier zirkulierende Oberflächenwässer in den durchlässigen Bruchzonen zu gestörten Untergrundtemperaturen.

Die noch höheren Temperaturen in Richtung Aargau von ca. 22-30°C könnten mit dem höheren Wärmefluss im Kanton Aargau erklärt werden. Unklar ist aber auch, inwieweit die lithologischen Eigenschaften mit geringeren Wärmeleitfähigkeiten und die Tallagen mit gestauchten Temperatur-Tiefenisothermen für die höheren Temperaturen mitverantwortlich sind.



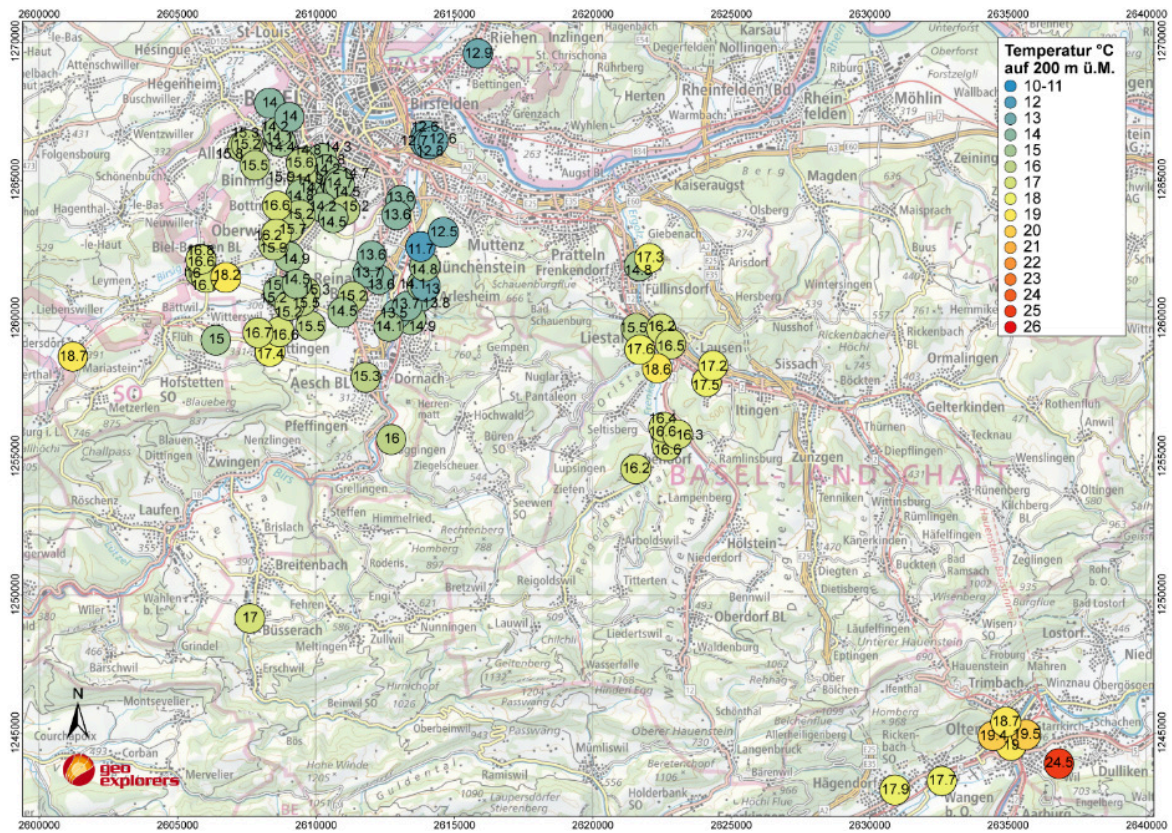


Abb. 13: Temperaturen auf 200 m ü.M.

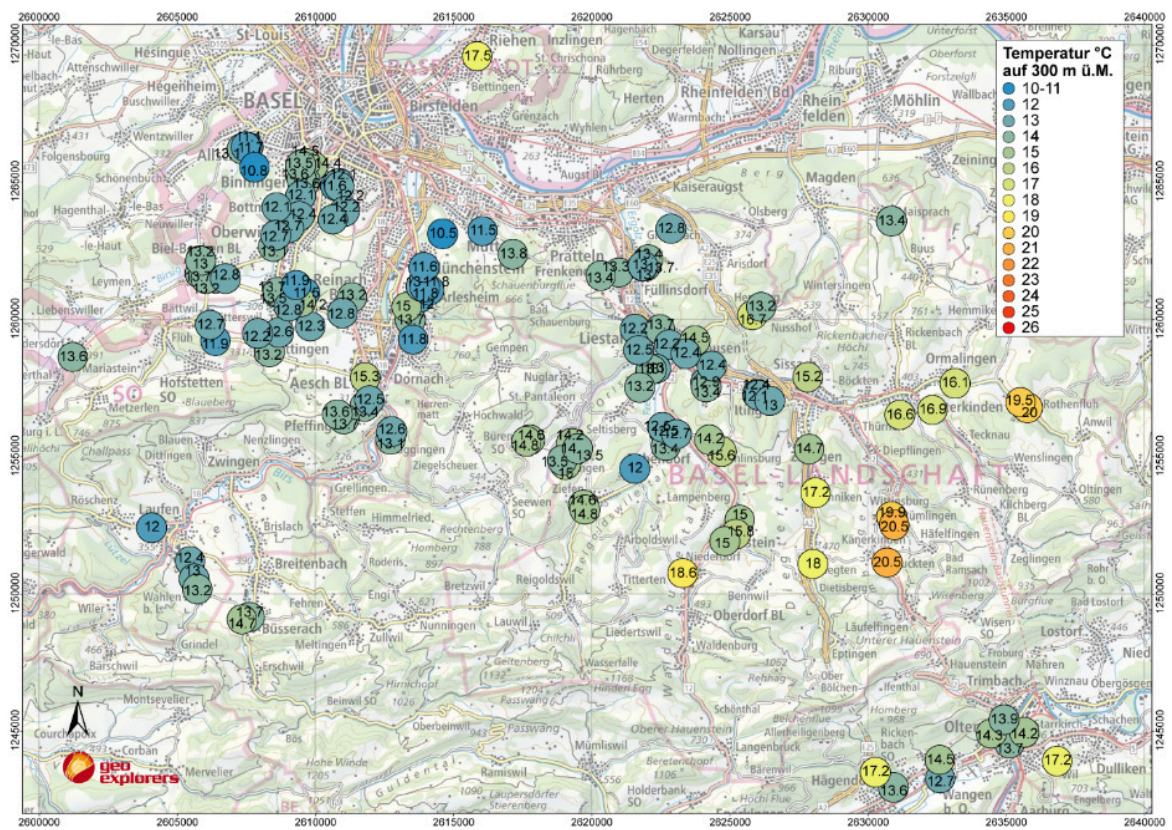


Abb. 14: Temperaturen auf 300 m ü.M.



## 4.5 GEOTHERMISCHER GRADIENT

Die Variation des geothermischen Gradienten wurde bereits in Abb. 5 dargestellt und der Mittelwert aller Daten >150 m u.T. mit  $4.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  beziffert. In Abb. 15 wird der Gradient auf 150 m u.T. in seiner räumlichen Verteilung gezeigt. Ähnlich der geologischen Karte variieren die Gradienten lokal stark. Da die Lithologie die Wärmeleitfähigkeit definiert, wird der geothermische Gradient dementsprechend durch die Lithologie, aber auch durch hydrogeologische Parameter wie z.B. dem Grundwasserfluss beeinflusst. Gebiete mit ähnlicher Geologie zeigen ähnliche Gradienten. In den Tallagen im östlichen Baselbiet, wo tonige und mergelige Gesteine in der Tiefe dominieren, sind die Gradienten deutlich höher ( $5\text{-}7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ) als in den umliegenden Höhenlagen ( $2\text{-}5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ), wo meist kalkige Gesteine mit höheren Wärmeleitfähigkeiten erbohrt wurden. In den tertiären Sedimenten südlich von Basel sind die Gradienten homogener und liegen grösstenteils zwischen  $3\text{-}5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . Gemittelt liegen die Werte für die Bohrstrecken >100 m u.T. für das Tertiär südlich von Basel bei  $4.5\pm 0.7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  und das restliche Baselbiet bei  $4.1\pm 1.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ .

Einzelne Abweichungen können z.B. mit Einflüssen durch Felsgrundwässer, einzelnen diskreten lithologischen Schichten wie z.B. Sandsteinlagen, Wasserfluss entlang nicht lückenlos hinterfüllter EWS, noch nicht vollständig abgebundener Hinterfüllung oder noch nicht abgeklungenen Beeinträchtigungen durch das Bohren erklärt werden. Ein nicht-linearer Temperatur-Tiefen-Verlauf kann ebenfalls zu Anomalien führen.

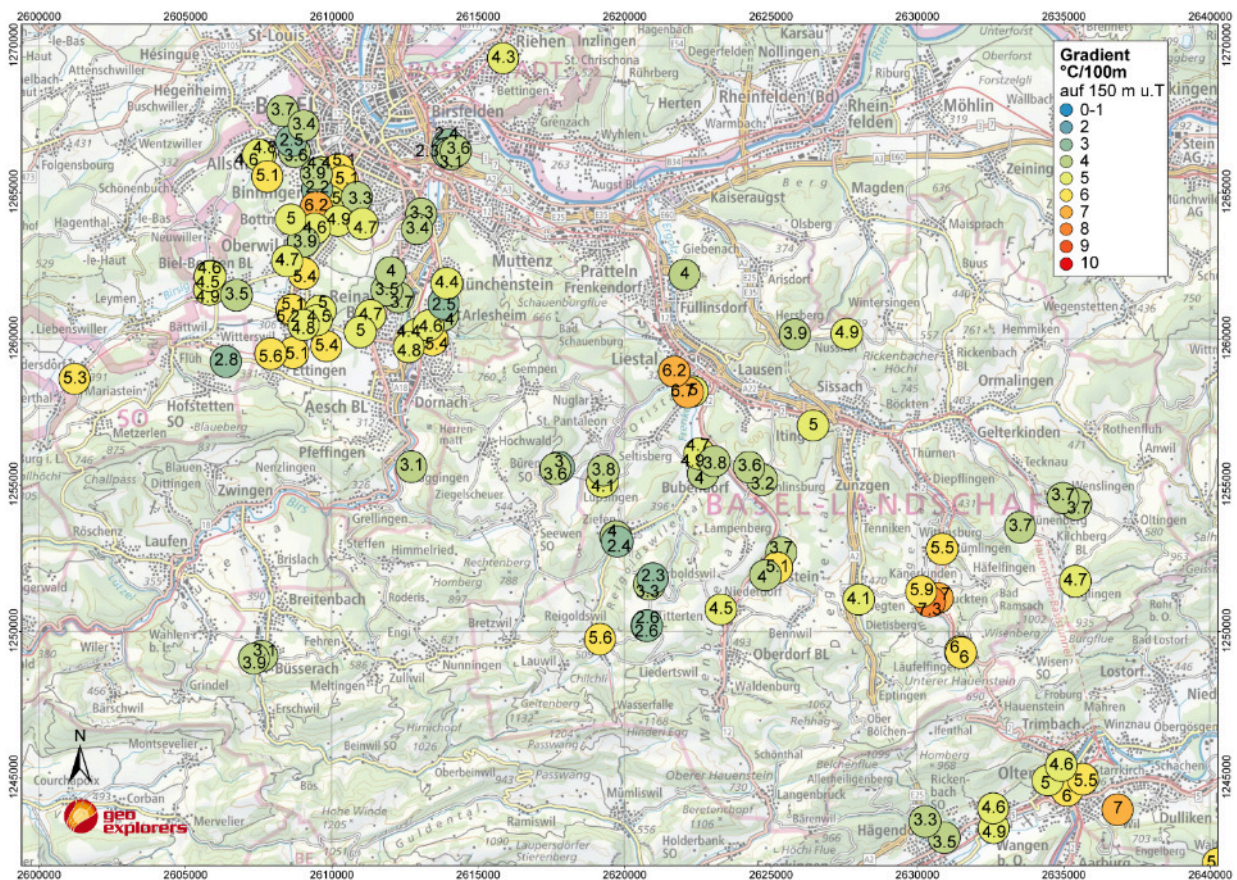


Abb. 15: Geothermische Gradienten in 150 m u.T.

In Abb. 16 werden die geothermischen Gradienten in Abhängigkeit von der Geologie bzw. Lithostratigraphie dargestellt. Die Temperaturgradienten wurden in einer Tiefe von >100 m u.T. ermittelt. Kalksteine (Malm und Hauptrogenstein) zeigen grundsätzlich die tiefsten geothermischen Gradienten. Die tonigen, siltigen und mergeligen Gesteine der Unteren Meeresmolasse, weisen mittlere Werte auf. Die höchsten geothermischen Gradienten wurden im Opalinuston gemessen.

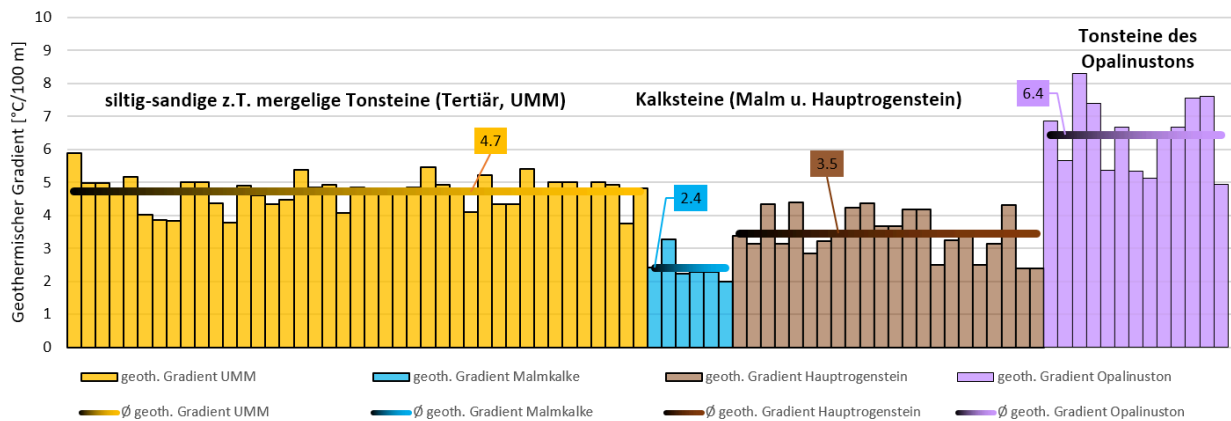


Abb. 16: Geothermischer Gradient in Abhängigkeit von der Lithostratigraphie. Es wurden Daten bis April 2022 berücksichtigt, welche nicht durch Störzonen, Artesern usw. beeinflusst sind und möglichst weite Tiefenintervalle abdecken. Die waagerechten Linien mit Werten spiegeln den mittleren Gradienten in °C/100m pro Formation wider.

## 4.6 WÄRMEFLUSS UND WÄRMELEITFÄHIGKEIT

Entweder kann mit den ermittelten geothermischen Gradienten der Wärmefluss oder die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins bestimmt werden. Mit den uns vorliegenden Wärmeleitfähigkeiten aus TRTs wurde mit nachfolgender Formel die mittlere Wärmeflussdichte berechnet.

$$\lambda = \frac{Q * s}{A * \Delta T}$$

$Q/A$  = Wärmestromdichte,  $s/\Delta T$  = inverser vertikaler Temperaturgradient

Mit dem gemittelten geothermischen Gradienten von 4.4°C/100 m (s.o.) und einer mittleren Wärmeleitfähigkeit von 2.2 W/mK ergibt sich eine gemittelte Wärmeflussdichte von ca. 100 mW/m<sup>2</sup>. Diese stimmt gut mit den Werten überein, die auf map.geo.admin.ch publiziert werden (100 bis 110 mW/m<sup>2</sup>). Differenziert man aber in Gebiete, so ergibt sich für das Tertiär (Wärmeleitfähigkeit 1.9 W/mK, Gradient 4.7°C/100 m) südlich von Basel eine Wärmestromdichte von ca. 90 mW/m<sup>2</sup>, für die Tallagen im Baselbiet ein Wert von 115mW/m<sup>2</sup> (Wärmeleitfähigkeit 2.1 W/mK, Gradient 5.5°C/100 m) und die erhöhten Lagen im Baselbiet ein Wert von ca. 95 mW/m<sup>2</sup> (Wärmeleitfähigkeit 2.7 W/mK, Gradient 3.5°C/100 m).



## 5 FAZIT

Die Temperaturmessungen haben wesentliche neue Erkenntnisse zu den thermischen Eigenschaften im Untergrund im Kanton Basel-Landschaft gebracht. Die gemessenen grossen Variationen der Untergrundtemperatur und der geothermischen Gradienten waren vorweg in diesem Masse nicht erwartet worden. Trotz der grossen Unterschiede von bis zu 7°C in einer Tiefe von 150 m u.T. und geothermischen Gradienten von ca. 2.2 bis 7.6°C/100 m konnten Gebiete mit ähnlichen Untergrundtemperaturen ermittelt werden. Dies ist entscheidend für die Erstellung einer nutzbaren Isothermen-Tiefenkarte.

Im untersuchten Tiefenbereich von ca. 100 bis 250 m weist die Lithologie (regional und lokal) den grössten Einfluss auf die Untergrundtemperatur auf (bis zu  $\Delta=7^\circ\text{C}$ ). Die Höhenlage, Hanglage, Bebauung und Vegetation, welche v.a. bei Messungen in ähnlicher Geologie erkennbar sind, spielen in Relation zum lithologischen Einfluss nur eine untergeordnete Rolle (total bis ca. 1°C; nur auf den Kanton BL bezogen). Sie kommen hauptsächlich bei der lokalen Betrachtung zu tragen. Grundwasserzuflüsse, Arteser und Störzonen etc. sind Anomalien, welche bei Interpretationen und Berechnungen berücksichtigt werden müssen. Besonders eindrücklich ist der lithologische Einfluss im östlichen Baselbiet zu erkennen. In Rothenfluh wurden in Tallage in den tonigen Serien des Opalinustons und Lias in 100 m Tiefe mehr als 5°C höhere Temperaturen gemessen als in den umliegenden kalkigen Serien in Anwil oder Wenslingen, welche nur rund 100 m höher liegen.

Trotz noch bestehender Lücken können regionale und lokale Temperaturunterschiede in der Tiefe ausgeschieden werden. Mit weiteren ausstehenden Messungen werden immer genauere Isothermen-Karten erstellt, welche wichtige Grundlagen für die Dimensionierung von EWS darstellen. Auch lassen sich Anomalien erkennen, welche evtl. bei der Erkundung nach hydrothermalen Zielen hilfreich sein können.

Die Karte mit Temperaturen auf 300 m ü.M. zeigt regionale Unterschiede. Auf 300 m ü.M. liegen die Temperaturen um Basel bei ca. 11-13°C. Im östlichen Baselbiet wiederum liegen die Werte bei ca. 17-20°C. Die Unterschiede lassen sich evtl. mit den Tertiär-Schichten im Oberrheingraben (wärmestauende Effekte u./o. rasche Ablagerung mächtiger kalter Sedimente ähnlich im Alpenvorland) und / oder der bekannten Wärmeanomalie mit höheren Wärmestromdichten (wie im Kanton Aargau) erklären.

Die deutlichen Unterschiede in der Untergrundtemperatur haben einen wesentlichen Einfluss auf die Dimensionierung von Erdwärmesonden. Je nach getroffenen Annahmen bei der Dimensionierung werden entsprechend zu wenige oder zu viele Sondenmeter verbaut. Dies hat bei einer Überdimensionierung unnötige Kosten auf Grund von unnötigen Sondenmetern zur Folge. Ebenso steigt das Risiko von Bohrerschwernissen (z.B. Anbohren von Artesern, Klüften und dergleichen). Wird die Sondenlänge unterdimensioniert besteht die Gefahr, dass auf Grund fehlender Sondenmeter der Untergrund zu rasch auskühlt und es zu Vereisungen kommt. Berücksichtigt man die oben beschriebenen Variationen in der Untergrundtemperatur bei der Dimensionierung so hat dies einen bedeutenden Einfluss auf die Sondenlängen. Bei einem Einfamilienhaus-Neubau kann dies bei den beobachteten Unterschieden im Kanton Basel-Landschaft Unterschiede bei der Sondenlänge von bis zu 45 m bei einer Gesamtlänge mit Reserve von 207 m bzw. 162 m bewirken (Annahme 10 kW Heizleistung, 15'000 kWh Heizen, 2'500 kWh WW, geotherm. Gradient 2.2 bzw.

7.6°C/100 m). Die Unterschiede liegen somit im Bereich von ca. 25%, was sich entsprechend auch bei den Kosten durchschlägt.

Ein weiterer Mehrgewinn ist, dass aus den Datensätzen weitere Stoffkennwerte abgeleitet werden können, im Wesentlichen die Wärmeleitfähigkeit. Hierzu müsste aber der Wärmefluss genauer definiert sein. Dies würde es auch bei Kleinprojekten, bei welchen TRTs verhältnismässig zu teuer sind, ermöglichen, Stoffwerte in die Dimensionierung einzubeziehen.

## 6 MÖGLICHE ZUKÜNFTIGE PRODUKTE

Die bisher erhobenen und interpretierten Daten können in Zukunft - je nach Art der Darstellung - in unterschiedlichen Stadien der Planung (z.B. Grobkostenanalyse, Simulationen) sowie der schlussendlichen Erstellung der Erdwärmesonden(-feldern) den Geologen, Heizungsplanern, Bohrfirmen, Energieingenieuren etc. von grossem Nutzen sein. Das Format der Ausgabedaten ist hierbei abhängig vom Nutzen, welchen sie erbringen sollen.

Am einfachsten umzusetzen ist hierbei das Hinterlegen der Rohdaten (Temperaturtiefenprofile) auf dem GIS BL (Datenbank und Abfrage ähnlich der geologischen Bohrprofile). Die Umsetzung ist einfach, schnell und günstig, jedoch liegen die Daten ohne jegliche Hintergrundinformationen und Interpretationen vor. Sie können nur von Fachpersonen wie z.B. Geologen verwendet werden, denen der Einfluss von anderen Faktoren wie z.B. Grundwasserzuflüssen, Artesern, Störzonen etc. bekannt ist. Zudem müssen die Untergrundtemperaturen zwischen unterschiedlichen Standorten selbstständig interpoliert werden. Hierbei müssen u.a. auch die Topographie, der Stadt-Land-Einfluss sowie die Geologie betrachtet werden, was den Aufwand des Nutzers um ein Vielfaches erhöht.

Ein in der Erstellung etwas aufwändigeres Produkt ist die Isothermenkarte auf unterschiedlichen spezifischen Bohrteufen (z.B. auf 100 und 200 m u.T.). Das Produkt ähnelt der 60°C-Isothermen auf [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch). Wird ein Geocover der Isothermenkarte eingebunden, so kann eine gezielte 2D-Abfrage zu einem spezifischen Teufenwert erfolgen. Die Isothermenkarten sind einfach, günstig und interpretativ. Für Heizungsplaner sind sie dennoch nicht geeignet, da diese ein Temperatur-Tiefen-Profil oder besser noch einen eindeutigen Wert, wie z.B. die gemittelte Sondentemperatur für ihre geplante Sondenlänge benötigen.

Ausgabedaten, wie die gemittelte Temperatur für spezifische Sondenlängen oder ein automatisch generiertes Temperatur-Tiefenprofil können nur auf Grundlage eines 3D-Temperaturmodells (ähnlich einem geologischem 3D-Modell, eigenständig oder abgeleitet vom geologischen 3D-Modell) generiert werden. Das 3D-Modell ist ähnlich dem geologischen Modell aufwändig und teuer, dafür jedoch anwenderfreundlich und detaillierter. So können u.a. Einflüsse wie die Topographie, Geologie, Grundwasser und Stadt-Land-Effekte etc. berücksichtigt werden. Auch kann die Abfrage für beliebig lange Sonden erfolgen. Dies bedeutet jedoch im Gegenzug, dass wesentlich mehr Daten notwendig sind. Neben der Oberflächentemperatur werden Korrekturfaktoren für die Topographie, Stadt-Land und das Grundwasser aber auch für die Temperaturgradienten, den Schichtaufbau bzw. das geologische 3D-Modell und abgeleitete Stoffparameter pro Einheit sowie regionale Änderungen der Temperatur und des Wärmeflusses benötigt. Dieser Schritt wird innerhalb einer Masterarbeit an der Universität Basel in ausgewählten Bereichen im Kanton BL getestet.