

Energieforschung: Projekt: 101'289 Vertrag: 151'544	Geothermie	Im Auftrag des Bundesamt für Energie BFE
--	-------------------	--

Schlussbericht, 18. Juli 2007

**Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ
Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde“)
mit Laborbestimmungen als Grundlage für die
geothermische Kartierung des Kanton ZH und der
umliegenden Kantone**

ausgearbeitet durch

Ulrich Schärli

Dr. U. Schärli Geologie + Geophysik
Giblenstrasse 3
8049 Zürich

Ernst Rohner
Sarah Signorelli
Roland Wagner

GGEOWATT AG
Dohlenweg 28
8050 Zürich

ZUSAMMENFASSUNG

Schlüsselwörter: Temperaturlog, Wärmeleitfähigkeit, Porosität, Cuttings, Erdwärmesonden

Ziel der Untersuchung ist das Bereitstellen der Grundlagen wie Untergrundtemperaturen, Wärmeleitfähigkeit und Porosität der Gesteine sowie Wärmeflussberechnungen zur geothermischen Kartierung im Kanton Zürich und den angrenzenden Gebieten der Kantone AG, SZ und SG.

Mit einer von den Autoren entwickelten und bereits patentierten kabellosen Temperaturmesssonde, genannt NIMO-T (Non-wired Immersible Measuring Object for Temperature) (Figur 1) wurden im Kanton Zürich und angrenzenden Gebieten in Erdwärmesonden der Temperaturverlauf des Untergrundes bis rund 300 m Tiefe gemessen. Solche Messungen sind möglich, wenn die installierten Sonden hinterfüllt, noch nicht an die Wärmepumpe angeschlossen sind und das Wasser in den Sondenrohren während mindestens 7 Tagen nicht bewegt wird. Insgesamt wurden in 33 Bohrungen Temperaturmessungen gemacht (Figuren 12 – 40), davon in 24 auch Wärmeflussbestimmungen (Tabelle 9).

Die mit einem integrierten Minidatenlogger ausgestattete NIMO-T Messsonde (Gewicht 100 g, Länge 20 cm, Durchmesser 2 cm) sinkt durch das Eigengewicht mit einer Geschwindigkeit von ca. 7 m pro Minute in einem mit Wasser gefüllten U-förmigen Sondenrohr ab und registriert ungefähr alle 25 cm einen Temperatur- und einen Druckwert (Messtiefe). Die relative Messgenauigkeit der Temperatur liegt bei ± 0.0015 °K diejenige der Messtiefe bei ± 20 cm. Die Messsonde lässt sich nach Erreichen der Endtiefe mit einer Pumpe leicht bergen und die Messdaten werden an einem Laptop ausgelesen.

Für die Bestimmungen des geothermischen Wärmeflusses müssen die Wärmeleitfähigkeiten der Gesteinsschichten im Zustand vor deren Zerstörung (kompaktes, unter Druck stehendes wassergesättigtes Gestein) ermittelt werden können. Labormessungen an Bohrproben (Cuttings) können diese Bedingungen nur annähernd simulieren. Die Wärmeleitfähigkeit und die damit verbundene Porosität wurden durch Vergleichsmessungen an festen Gesteinen (Bohrkerne oder Handstücke) verglichen und kalibriert.

Die Zuverlässigkeit der Wärmeflussbestimmungen hängt von der Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeitsmessungen ab. Der Temperaturgradient kann in einem Tiefenabschnitt mit konstanter Temperaturzunahme leicht fixiert werden mit einer Genauigkeit von besser als 2 °K/km.

Die Temperaturen sind in den obersten 20 m von saisonalen Klimaschwankung geprägt, zwischen 20 und etwa 100 m von einer langfristigen Klimaerwärmung während der letzten 200 bis 300 Jahre (Figur 42). Unterhalb von 100 m ist die Zunahme mehr oder weniger linear; die zwischen 100 und 300 m gemittelten Gradienten variieren in den untersuchten Bohrungen zwischen 25 bis 40 °C/km. Die Temperaturen in 300 m Tiefe waren zwischen 18 und 22.5 °C (Figur 48). Es wurde eine allgemeine Zunahme der Untergrundtemperaturen in allen Tiefenlagen von Südosten nach Nordwesten festgestellt; die Zunahme in dieser Richtung beträgt über eine Distanz von 50 km 1 – 2 °K. Zudem wurden lokal erhöhte Temperaturen im Raum Niederweningen-Dielsdorf-Bülach gefunden, welche durch tiefliegende, aufwärtsgerichtete Wasserbewegungen entlang tektonischer Störungszonen in Zusammenhang mit der Lägern-Antiklinale und des Permokarbondrog verursacht werden könnten.

Die Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass nur bei Sandsteinen eine lineare Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten grösser als 0.9 besteht (Figuren 59 und 60). Die an Cuttings bestimmte ‚in-situ‘ Wärmeleitfähigkeit, abgeleitet aus der Matrixwärmeleitfähigkeit und der aus der Porosität bestimmten Wasseranteils, kann bis zu 20% gegenüber derjenigen von festen Bohrkerne aus derselben Tiefe abweichen (Figur 63). Im Allgemeinen liegt diese Abweichung aber zwischen 5 und 10%.

Es wurden insgesamt 69 Wärmeflussbestimmungen in verschiedenen Tiefenbereichen durchgeführt, d.h. 2 bis 4 pro Bohrung; in jeder Bohrung wurde der mittlere Wärmefluss

berechnet (Tabelle 8). Für die Berechnungen wurden nur Temperaturdaten verwendet, welche von Klimaeffekten oder Wasserkonvektionen unbeeinflusst sind. Trotzdem wurden vertikale Variationen des Wärmeflusses festgestellt. Nur in 6 Bohrungen zeigt sich ein konstanter Wärmefluss mit weniger als 5% Streuung. Die gefundenen Werte zeigen einen ähnlichen Trend (Zunahme gegen Nordwesten von 70 auf 100 mW/m²) (Figur 67) wie in der bestehenden Wärmeflusskarte der Nordschweiz.

In 6 von 24 untersuchten Bohrungen lässt sich das aus den gemessenen Temperaturlogs und dem berechneten lokalen Wärmefluss abgeleitete Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofil kalibrieren. Die Abweichungen zwischen den abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten und denjenigen an Bohrproben gemessenen sind nicht systematisch und betragen in etwa ±5% (Tabelle 16).

Es gibt gab keine Vorkommnisse, die einer Weiterverwendung der Ergebnisse entgegenstehen.

Die erzielten Resultate sind ein wesentlicher Beitrag für zur die Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen, und für die geothermische Detailkartierung; sowie darüber hinaus liefern sie Basisdaten für die Paläoklimaforschung der letzten Jahrhunderte.

ABSTRACT

Keywords: *Temperature log, cuttings, thermal conductivity, porosity, borehole heat exchangers*

The aim of these investigations is to create a first basic data set for geothermal mapping in Canton Zurich and adjacent regions. These data contains provide undisturbed ground temperatures, thermal conductivities and porosities of rocks as well as heat flow determinations.

The temperature profiles in the ground have been logged, to depths up to 300 m in several borehole heat exchangers, in the Canton Zurich and adjacent regions. A new, patented wireless instrument developed by the authors (*NIMO-T / Non-wired Immersible Measuring Object for Temperature*) (figure 1) was used to perform the measurements. Such measurements are possible in backfilled boreholes with installed double U-tube heat exchangers, not yet connected to the heat pump, filled with water standing since min. 7 days. A total of 33 boreholes have been measured (figures 12 – 40); 24 of them enabled heat flow determinations (table 9).

The NIMO-T probe (weight 100 g, length 20 cm, diameter 2 cm; with a built-in miniature datalogger) sinks through its own weight with about 7 m per minute in one of the water-filled U-tube limbs and records every 25 cm a temperature and pressure (=measuring depth) value. Relative temperature accuracy is ± 0.0015 °K, for depth ± 20 cm. After the probe has reached the U-tube bottom it can be easily flushed back to the surface by pumping, where data readout to a laptop computer follows.

For terrestrial heat flow determinations the rock thermal conductivities (of the undisturbed, water-saturated, compact rocks at in-situ pressure) would be needed. Laboratory measurements on rock samples (cores, cuttings) can only approximate these conditions. The thermal conductivities and related porosities of cuttings have been compared and calibrated by measurements on cores.

The ground temperatures are influenced in the uppermost 20 meters by seasonal surface temperature variations, between 20 and about 100 m depth by climatic warming in the past 200-300 years (figure 42). Below 100 m the temperature increase with depth is more or less uniform; the gradients, averaged between 100 and 300 m, varied in the investigated boreholes between 25 and 40 °K/km. The temperatures at 300 m were in the range 18.0 and 22.5 °C (figure 48). A general increase of ground temperatures at all depths from southeast towards northwest has been found; the increase in this direction amounts to 1 – 2 °K over 50 km. In addition, locally increased temperatures have been found in the area Niederweningen-Dielsdorf-Bülach, which could be caused by deep groundwater moving upward along tectonic fault zones, structurally related to the Lägern anticline and the Permocarboniferous trough.

The reliability of heat flow determinations depends on the accuracy of thermal conductivities; linear temperature gradients in a depth range can be easily fixed visually with an accuracy of < 2 °K/km.

The comparison between cores and cuttings show only for sandstones lithologies a linear correlations with $r^2 > 0.9$ (figures 59 and 60). The thermal conductivity determined on cuttings (calculated from matrix conductivity and water-filled porosity) can deviate up to 20 % from the measurement on a solid rock core taken at the same depth (figure 63). In general the deviations are within the range 5 – 10 %.

A total of 69 heat flow determinations at various depth intervals could be performed, about 2 – 4 values per borehole; from which the average heat flow of the borehole was calculated (table 8). For the calculation only temperature data uninfluenced by surface temperature changes or groundwater movements were taken. Nevertheless there have been vertical heat flow variations; only 6 boreholes exhibited constant heat flows. The values found exhibit also the increasing trend from SE to NW. (from 70 to 100 mW/m²) (figure 67), already indicated by the Heat Flow Map of Switzerland.

6 of 24 investigated boreholes enables enable an accurate calibration of the thermal conductivity profiles derived from the measured temperature logs and the calculated local heat flow value. The deviations between derived thermal conductivities and those measured on rock samples are randomly random with and amount to about 5 %.

There are not any occurrences which are against the futural usabilitywere no incidents that would limit the future applicability of the results.

The obtained results are provide an essential contribution for to the dimensioning of vertical borehole heat exchanger systems, the to detailed geothermal mapping and theto current paleoclimate developmentsresearch.

RESUMÉ

Mots clés: *log de température, cuttings, conductivité thermique, porosité, sonde géothermique*

Le but des expériences décrites est de créer un premier ensemble de données dans le but d'une cartographie géothermique du Kanton de Zürich et des régions adjacentes. Ces données sont constituées des températures du sol à l'équilibre, des conductivités thermiques et des porosités des roches ainsi que des flux thermiques.

Les profils thermiques dans le sol ont été mesurés jusqu'à des profondeurs de 300 m dans différentes sondes géothermiques, dans le Canton de Zürich et différentes régions adjacentes. Un nouvel instrument breveté développé par les auteurs (NIMO-T / Non-wired Immersible Measuring Object for Temperature) (figure 1) a été utilisé pour réaliser les mesures. Ces mesures sont possibles dans des forages dans lesquels le double U de la sonde a été installé, mais pas encore relié à la pompe à chaleur, et rempli avec de l'eau immobile depuis au moins 7 jours. Au total, 33 forages ont été mesurés (figures 12 - 40), et 24 d'entre eux ont autorisé une détermination du flux thermique (tableau 9).

L'instrument NIMO-T (poids 100g, longueur 20 cm, diamètre 2 cm, comprenant un enregistreur miniature) descend grâce à son propre poids dans l'un des tubes en U de la sonde à la vitesse de 7 m par minute et enregistre tout les 25 cm la température et la pression (ce qui revient à la profondeur). La précision de la mesure de température est de ± 0.0015 °K, et de ± 20 cm pour la profondeur. Une fois que le NIMO-T a atteint le fond du tube, il peut être facilement ramené à la surface en injectant de l'eau dans l'autre moitié du tube. Les données sont ensuite lues sur un ordinateur.

Dans le but de déterminer le flux thermique terrestre, les conductivités thermiques des roches (non dérangées, saturées en eau, compactées à la pression in-situ) sont nécessaires. Les mesures sur échantillon en laboratoire peuvent seulement approcher ces conditions. La conductivité thermique et la porosité des cuttings ont été comparées et calibrées avec des mesures sur des carottes.

La température du sol est influencée dans les premiers 20 mètres par les variations saisonnières de température de la surface, et entre 20 et 100 m de profondeur par le réchauffement climatique des dernières 200 à 300 années. Au-delà de 100 m, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus uniforme; les gradients, moyennés entre 100 et 300 m, ont varié dans les forages entre 25 et 40 °K/km. Les températures à 300 m étaient comprises entre 18 et 22.5 °C. Une augmentation générale des températures de l'ordre de 1 à 2 °K du sud-est au nord-ouest a été mise en évidence. D'autre part, des anomalies locales ont été rencontrées dans la zone de Niederweningen-Dielsdorf-Bülach. Ces anomalies locales pourraient être causées par des remontées d'eaux chaudes profondes le long de failles, structurellement reliées à l'anticlinal de Lägern et au fossé Permocarbone.

La fiabilité des déterminations du flux thermique dépend de la précision des conductivités thermiques; les gradients de température linéaires dans un intervalle de profondeur donné peuvent être facilement déterminés avec une précision de 2 °K/km.

Des corrélations linéaires avec $r^2 > 0.9$ ont été trouvées pour les lithologies gréseuses. La conductivité thermique déterminée sur des cuttings (calculée à partir de la conductivité de la matrice et des pores remplis d'eau) peut s'éloigner de 20 % des mesures sur une carotte solide prise à la même profondeur. En général, les écarts sont de l'ordre de 5 – 10 %.

Au total, 69 déterminations de flux thermique à différents intervalles de profondeurs ont pu être réalisées, soit environ 2 à 4 par forage, à partir desquels le flux thermique moyen pour le puits a été calculé. Pour ce calcul, uniquement les données de température non influencées par les variations surfaciques ou des mouvements d'eaux souterraines ont été pris en compte. Néanmoins, certaines variations verticales du flux thermique ont été calculées; seulement 6 forages ont montré un flux constant. Les valeurs calculées mettent également en évidence une augmentation du flux du SE en direction du NO (de 70 à 100 mW/m², figure 67), ce qui confirme les informations de la carte du flux géothermique en Suisse.

Ces 6 forages ont autorisé la calibration des profils de conductivité thermique dérivés des logs de température mesurés et de la valeur du flux thermique local calculé. L'écart entre la conductivité thermique déduite et celle mesurée sur les échantillons est aléatoire et est estimé en moyenne à 5 %.

Aucun incident ne devrait limiter les possibilités d'application futures de ces résultats.

Les résultats fournissent une contribution essentielle pour le dimensionnement des sondes géothermiques, la cartographie géothermique et pour les recherches actuelles sur le paléoclimat.

Zusammenfassung	i
1 Projektziel und Durchführung	1
2 Temperaturmessungen in Erdwärmesonden	2
2.1 Messprinzip	2
2.1.1 Messsonde NIMO-T	2
2.1.2 Versuchsdurchführung	4
2.1.3 Datenauswertung	6
2.2 Gemessene Temperaturprofile in Erdwärmesonden und deren Interpretation	8
2.3 Kartierung der Temperaturverhältnisse im Untergrund und Interpretation	42
3 Thermische Labormessungen und Wärmefluss-bestimmung	47
3.1 Petrophysikalische Vergleichsmessungen.....	47
3.1.1 Wärmeleitfähigkeit.....	47
3.1.1.1 Messmethode für feste Gesteine.....	47
3.1.1.2 Messmethode für Cuttings.....	48
3.1.1.3 Probenvorbereitung	49
3.1.1.3.1 Feste Proben	49
3.1.1.3.2 Cuttings	49
3.1.1.4 Messungen	49
3.1.1.4.1 Feste Gesteine.....	49
3.1.1.5 Messergebnisse.....	49
3.1.2 Dichte- und Porositätsbestimmung	51
3.1.2.1 Messmethode	51
3.1.2.1.1 Feste Gesteine.....	51
3.1.2.1.2 Cuttings	52
3.1.2.2 Messergebnisse.....	53
3.1.3 Vergleich der Messungen an festen Gesteinen und Cuttings.....	54
3.2 Bestimmung des geothermischen Wärmeflusses.....	59
3.2.1 Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Cuttings	59
3.2.2 Berechnung des geothermischen Wärmeflusses.....	60
3.2.3 Interpretation der Ergebnisse	63
3.2.4 Indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.....	64
4 Schlussfolgerungen	68
5 Ausblick.....	69
6 Literatur	70
7 Anhang A: Angaben zu den Bohrungen und Temperaturmessungen.....	71
8 Anhang B: Wärmeleitfähigkeitsmessungen.....	74
9 Anhang C: Dichte- und Porositätsmessungen.....	78
10 Anhang D: Temperaturmessungen	85

1 PROJEKTZIEL UND DURCHFÜHRUNG

Ziel der Untersuchung ist das Bereitstellen der Grundlagen zur geothermischen Kartierung im Kanton Zürich und den angrenzenden Gebieten der Kantone AG, SZ und SG.

Konkret soll der Temperaturverlauf im Untergrund (0 bis ca. 300 m Tiefe) in mindestens 24 installierten, noch nicht angeschlossenen Erdwärmesonden gemessen werden sowie Wärmeleitfähigkeits- und Dichte-/Porositätsmessungen an Cuttings aus diesen Erdwärmesondenbohrungen im Labor unter Berücksichtigung der in-situ Bedingungen durchgeführt werden.

Die Temperaturmessungen werden mit einer von den Projektbeauftragten entwickelten kabellosen Temperaturmesssonde ausgeführt (Rybach et al, 2003). Diese soll während der geplanten Messungen weiter entwickelt werden. Es ist vorgesehen, zwei neue Exemplare dieser Messsonde herzustellen und während des Projektes einzusetzen. Während der Messung sinkt die Messsonde in den mit Wasser gefüllten Erdwärmesonden ab und registriert die Temperatur und die Tiefe mit einem Temperatur- bez. Drucksensor. Aus den Daten wird ein detailliertes Temperatur-Tiefenprofil erstellt, welches die ungestörten Temperaturverhältnisse im Untergrund widerspiegelt. Zudem können sich Hinweise auf die Lage von Wasser führenden Zonen sowie die Tiefenlage von typischen Gesteinsschichten mit kontrastreichen Wärmeleitfähigkeiten, wie z.B. Mergel und Sandstein, ergeben.

In den Bohrungen wird in mehreren Tiefenbereichen der geothermische Wärmefluss aus dem entsprechenden Temperaturgradienten und der im Labor bestimmten Wärmeleitfähigkeit der dazugehörigen Gesteinsformation berechnet. Die Ergebnisse sollen, wenn möglich, in einer Wärmeflusskarte dargestellt werden. Zur Berechnung des geothermischen Wärmeflusses sind verlässliche Labormessungen der Wärmeleitfähigkeit und der Dichte bez. der Porosität notwendig, welche die in-situ Bedingungen so gut als möglich berücksichtigen. Da aus den Erdwärmesondenbohrungen aber nur Bohr-Cuttings für die Labormessungen zur Verfügung stehen und keine kompakten Bohrkerne, werden Vergleichsmessungen der erwähnten petrophysikalischen Parametern zwischen Kernen oder Handstücken und aus diesen hergestellten Cuttings durchgeführt, um mögliche systematische Differenzen zwischen den ermittelten Werten messen und entsprechend korrigieren zu können.

Zudem sollen Wärmeleitfähigkeits-Profile in den Bohrungen aus deren ermittelten mittleren Wärmeflusswerten und den entsprechenden Temperaturlogs bestimmt werden. Diese Profile werden mit den im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten verglichen (kalibriert) und auch mit dem geologischen Profil, um zu überprüfen, ob die indirekt bestimmten Wärmeleitfähigkeiten Gesteinstypen mit typischer homogener Lithologie zugeordnet werden können, d.h. eine stratigrafische Gliederung des Untergrundes mit dem Temperaturlog erreicht werden kann.

Diese von Dr. U. Schärli Geologie + Geophysik und GEOWATT AG durchgeführten Untersuchungen wurden sollen etwa so aufgeteilt werden, dass die Labormessungen der Gesteinsparameter und deren Interpretation sowie die Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden von Dr. U. Schärli Geologie + Geophysik durchgeführt werden und die Entwicklung der Temperaturmesssonde, die Temperaturkartierung in verschiedenen Tiefen sowie die Analyse von Klimaeffekten in den Temperaturprofilen durch die Geowatt AG.

2 TEMPERATURMESSUNGEN IN ERDWÄRMESONDEN

Zwischen April 2005 und Dezember 2006 wurden Temperaturmessungen in 33 Erdwärmesonden im Kanton Zürich und den angrenzenden Kantone Aargau, Schwyz und St. Gallen durchgeführt. Für die Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden wurde von der GEOWATT AG die kabellose Temperaturmesssonde NIMO-T, basierend auf einem gemeinsamen Patent mit Dr. U. Schärli Geologie + Geophysik (Patent EP 1 600 749), entwickelt. Diese Messsonde erlaubt eine Registrierung des ungestörten Temperaturfeldes des Untergrundes über die ganze Sondentiefe (0 bis 340 m). Temperaturmessungen sind möglich, wenn die mit Wasser gefüllten Sondenrohre noch nicht an die Horizontalverbindungen zur Wärmepumpe angeschlossen sind und mindestens ca. 7 Tage in Ruhe bleiben, um sich an das ungestörte Temperaturfeld des Untergrundes anzupassen. 24 der 33 untersuchten Erdwärmesonden gehören zu Anlagen der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ). Die EKZ wie auch die übrigen in Tabelle A-1 aufgeführten Bauherren erlaubten uns auch die Benützung der geologischen Bohrprofile. Detaillierte Angaben zu Bohrstandorten, Bauherren und Messungen sind in Tabelle A-1 im Anhang A aufgeführt.

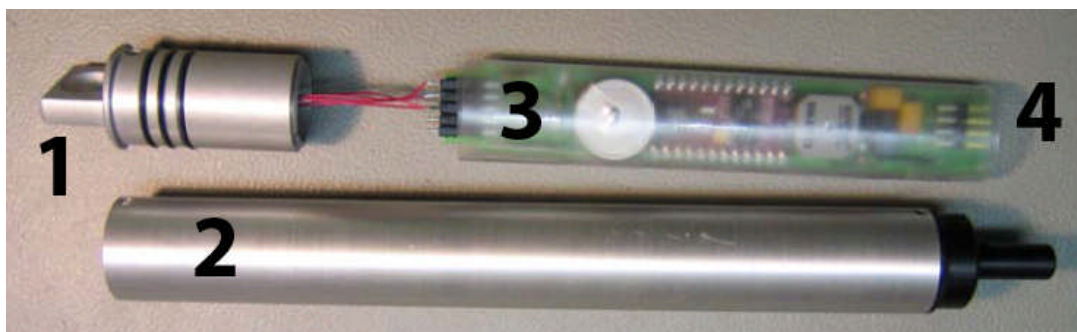
In diesem Kapitel werden das Messprinzip und die Messsonde beschrieben. Es werden weiter die gemessenen Temperaturen in den Erdwärmesonden dargestellt und interpretiert. Abschliessend wird die Temperaturverteilung in unterschiedlichen Tiefen für den Kanton Zürich und die angrenzenden Gebiete basierend auf den Messungen bestimmt.

2.1 Messprinzip

2.1.1 Messsonde NIMO-T

Für Temperatur- und Druckmessungen in Bohrungen werden üblicherweise Messsonden an Kabeln verwendet. In den U-Rohren von Erdwärmesonden sind Messungen mit Kabelsonden nicht möglich: Die Bohrungen für Erdwärmesonden werden aus Kostengründen nicht notwendig senkrecht abgeteuft. Ausserdem können die U-Rohre einer Erdwärmesonde beim Einbringen in die Bohrung verdreht werden. Im Falle einer Kabelsonde entsteht so eine sehr hohe Reibung zwischen der Innenoberfläche der Sondenrohre und dem Sondenkabel, sodass die Sonde ab einer bestimmten Tiefe nicht mehr an die Oberfläche gezogen werden kann.

Aus diesem Grund können in Erdwärmesonden nur kabellose Messsonden eingesetzt werden. Ein geeignetes Messgerät hierfür ist das Temperaturmessgerät NIMO-T (**N**on-wired **I**mmersible **M**easuring **O**bject for **T**emperature) der GEOWATT AG. (Patent EP 1 600 749). Für das hier beschriebene Projekt wurden die ersten Prototypen von NIMO-T (F--35, F-62, F-66 und F-C0) verwendet. Figur 1 zeigt den Prototypen der Messsonde. NIMO-T besitzt zwei Messfühler für Druck und Temperatur, die im Kopf des Gerätes installiert sind. Der integrierte Datenlogger sitzt auf einer Platine, die fest mit dem Kopf verbunden ist. Die Stromversorgung erfolgt durch einen wieder aufladbaren Akku, der auf einem Stecker am Ende der Platine aufgesetzt wird.



Figur 1: NIMO-T Prototyp. 1: Sondenkopf mit Messfühler und O-Dichtungsringen; 2: abziehbares Druckgehäuse; 3: Datenlogger; 4: Stecker für Batterie und Datentransfer-Kabel.

In der folgenden Tabelle 1 sind die technischen Spezifikationen von NIMO-T zusammengefasst.

Tabelle 1: Technische Spezifikationen von NIMO-T

Durchmesser	23	mm
Länge	179, 219, 247	mm
Spezifisches Gewicht ¹⁾	1.16, 1.02, 0.95	g/cm ³
	120	g
Messbereich Temperatur	-5 bis +50	°C
Messbereich Druck	0 – 40	bar
Max. Messtiefe	400	m
Prüfdruck Gehäuse	110	bar
Messgenauigkeit Temperatur	+/- 0.0015	°C relativ
	+/- 0.1	°C absolut
Messgenauigkeit Druck	+/- 0.02	bar relativ
	+/- 0.1	bar absolut
	± 0.2 m	m H ₂ O relativ
	± 1.0 m	m H ₂ O absolut
Programmierbare Messintervalle	2, 4, 6, 8	s
Speichergrösse	16348	Werte
Minimale Messdauer/Batterieladung	3	Stunden

1) Angaben beziehen sich auf die Serienversion

Vor Beginn einer neuen Messung muss das zylinderförmige Druckgehäuse mit Hilfe eines Abziehers entfernt und das Schnittstellenkabel auf die Platine gesteckt werden. Mit Hilfe einer speziellen Software (Figur 2) wird die Messsonde initiiert und der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Messungen definiert. Die Messfühler werden durch Definition von insgesamt 6 Koeffizienten kalibriert. Diese Koeffizienten ermöglichen die Berechnung realer Druck- und Temperaturwerte (p, T) aus den Rohdaten (p_M, T_M):

$$p = p_0 + p_1 p_M + p_2 p_M^2$$

$$T = p_0 + p_1 T_M + p_2 T_M^2$$

Die Software hat folgende Funktionen:

Port: Nummer der seriellen Schnittstelle (RS 232 oder USB)

Baud: Übertragungsrate

Rec. Frequency: Messintervall (2 – 8 Sekunden)

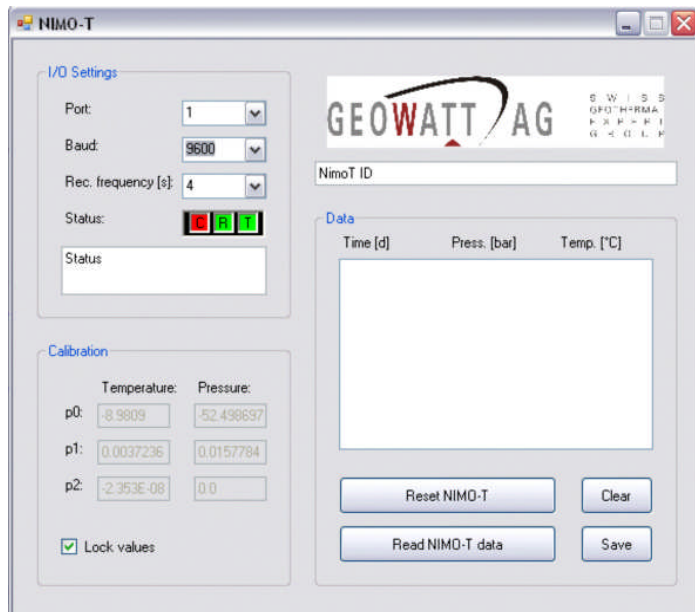
Calibration: Definition der Kalibrierungs-Koeffizienten

Reset NIMO-T: Löschen des NIMO-T Speichers, Übertragung der PC-Systemzeit auf die Messsonde und Programmierung des Messintervalls.

Read NIMO-T data: Auslesen der gespeicherten Messdaten

Clear: Software-Reset

Save: Speichern der ausgelesenen Daten in eine ASCII-Datei.



Figur 2: Software zur Programmierung der Messsonde und zum Auslesen der Messdaten.

Nach der Programmierung der Sonde wird die Batterie anstelle des Kabels auf die Platine gesteckt. Anschliessend wird das Druckgehäuse wieder über den Messkopf geschoben. In der neuen Version von NIMO-T (Serieversion) ist die Batterie in einem abschraubbaren druckdichten Kopfgehäuse untergebracht (Figur 3). Das neue Design verhindert, dass die Sonde beim Batteriewechsel und bei der Datenauslesung zerlegt werden muss.



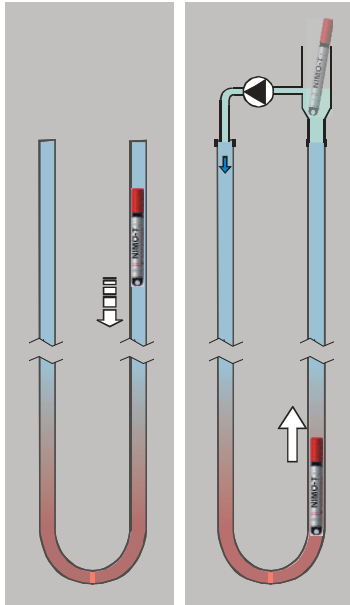
Figur 3: NIMO-T Serienversion. Im Unterschied zum Prototypen wird das Druckgehäuse zur Datenauslese nicht zerlegt. Schnittstelle und Batterie sind durch Abschrauben des druckfesten roten Kopfgehäuses zugänglich.

2.1.2 Versuchsdurchführung

Die Messsonde wird mit einem starken Permanentmagneten eingeschaltet und in ein Ende eines U-Rohres einer Erdwärmesonde eingeführt (Figur 4). Vorher muss die Sonde ggf. bis zum Rand mit Wasser nachgefüllt werden. Um Temperaturstörungen zu vermeiden, müssen beide Enden des U-Rohres abwechselnd mit kleinen Wassermengen aufgefüllt werden.

Die Sonde sinkt mit einer Geschwindigkeit von etwa 0.1 m/s bis zum Boden der Sonde. Temperatur und Druck werden in programmierbaren Intervallen von 2 bis 8 Sekunden gemessen und im Datenlogger gespeichert.

Nachdem die Sonde im tiefsten Punkt des U-Rohres angekommen ist, wird sie durch leichtes Einpumpen in das andere Ende des U-Rohrs wieder an die Oberfläche gespült. Hierzu kann eine spezielle Fangvorrichtung verwendet werden (Figur 4). Die Datenaufzeichnung wird mit einem Magneten gestoppt. Mit Hilfe einer speziellen Software werden die Messdaten auf einen PC gespeichert und können dort weiter prozessiert werden.



Figur 4: Funktionsbeschreibung. Links: Die Messsonde wird in ein U-Rohr einer Erdwärmesonde eingeführt. Rechts: Die Messsonde wird durch Einpumpen in das zweite Ende der Sonde herausgespült.

Die folgende Bilderserie dokumentiert den Ablauf einer typischen Temperaturmessung. In diesem Fall wurden zu Vergleichszwecken zwei Messsonden miteinander verbunden.



Figur 5: Kopplung von zwei Messsonden



Figur 6: Auffüllen der EWS Rohre mit Wasser



Figur 7: Einschieben der Messsonden



Figur 8: Ausgespülte Messsonde in der Fangvorrichtung



Figur 9: Füllen der Fangvorrichtung.



Figur 10: Entnahme der Messsonde aus dem Fänger.

2.1.3 Datenauswertung

Die Messsonde NIMO-T wird an einem Ende geöffnet. Anstelle der Batterie wird ein Kabel angeschlossen. Der Datentransfer erfolgt über die serielle Schnittstelle eines PC's (RS 232 oder USB). Mit Hilfe der Auslesesoftware (Figur 2) werden die in der Messsonde gespeicherten Druck- und Temperaturwerte als Zeitreihen im Rohformat (Integer) auf den PC gespeichert.

Die weitere Auswertung muss mit Hilfe von EXCEL oder einem anderen Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen. Dabei werden aus den Rohdaten reale Temperatur- und Druckwerte berechnet. Aus den Druckdaten wiederum kann die Tiefe berechnet werden. Wenn der Abstand Δz zwischen Wasserspiegel in den Rohren der Erdwärmesonde und der Geländeoberkante bekannt ist, kann mit Hilfe der Dichte des Erdwärmesondenfluids ρ_f aus dem Druck p die Tiefe z berechnet werden (1):

$$z = \frac{p}{\rho_f \cdot g} - \Delta z \quad (1)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann die Temperatur gegen die Tiefe der Erdwärmesonde aufgetragen werden.

Tabelle 2 zeigt ein Datenbeispiel, wobei die Messsonde NIMO-T konstantem Druck und Temperatur am Boden einer etwa 250 m tiefen Erdwärmesonde ausgesetzt war. Die für diese Messung verwendete Messsonde zeigt eine sehr präzise Temperaturmessung ohne Drift. Die Drucksensoren besitzen jedoch ein sehr hohes Rauschen, was zu schwankenden Tiefenwerten führt, obwohl die Messsonde am Boden der EWS auflag. Die berechneten Teufenwerte schwanken um einen Mittelwert von 248.128 m mit einer Standardabweichung von 0.233 m. Der Vergleich mit anderen NIMO-T Messsonden zeigt, dass die Druckfühler einer Serie unterschiedlich stark rauschen können. Zur Vermeidung dieses Rauschens ist eine zusätzliche Kontrolle der Messfühler nach ihrem Einbau in die Sonde unbedingt erforderlich.

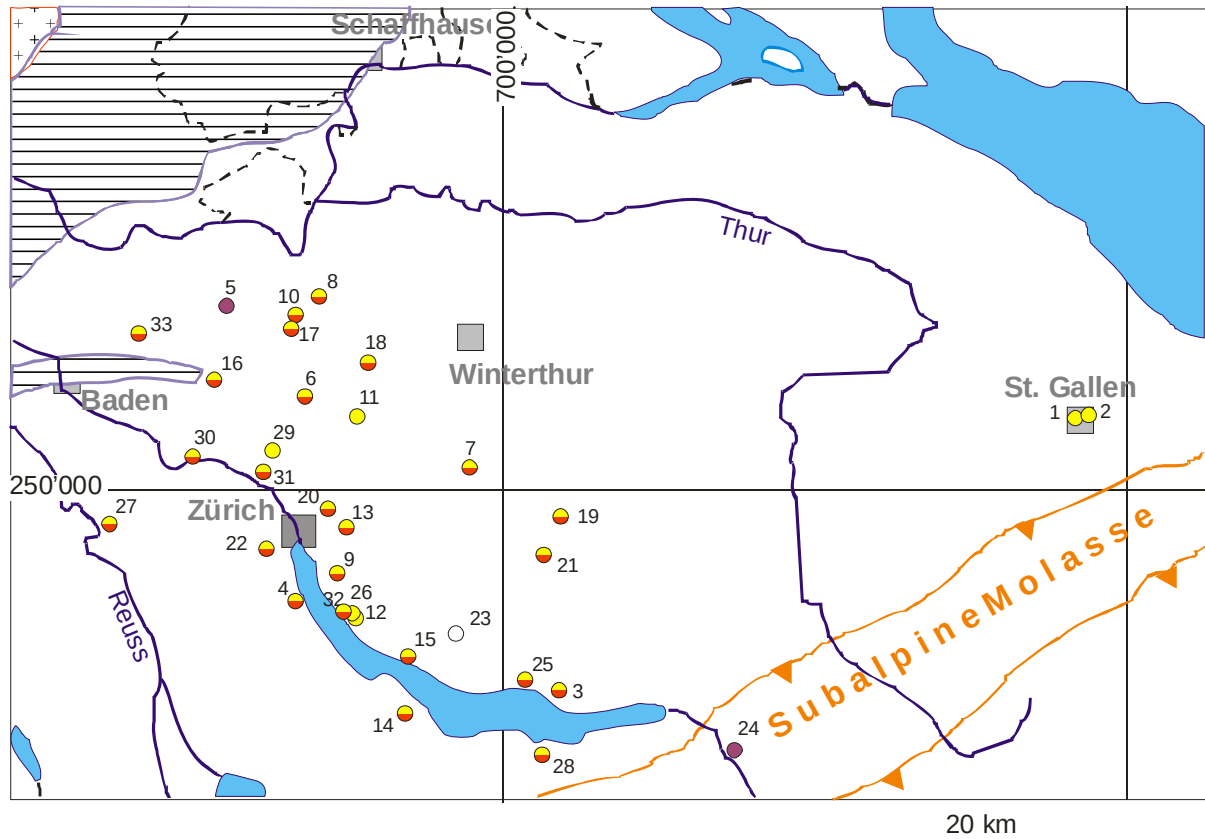
Tabelle 2: Datenbeispiel. Die Zeit in der ersten Spalte entspricht der absoluten Messzeit. Die Werte in der zweiten und dritten Spalte zeigen die Rohdaten für Druck- und Temperatur an, die vierte und fünfte Spalte die aus den Druckdaten berechnete Tiefe in m und die

Datum	Druck [Rohdaten]	Temperatur [Rohdaten]	Tiefe [m]	Temperatur [°C]
17.11.2006 14:17:12.74	19005	7561	248.24 m	17.828 °C
17.11.2006 14:17:18.90	19004	7561	248.23 m	17.828 °C
17.11.2006 14:17:25.06	18969	7561	247.67 m	17.828 °C
17.11.2006 14:17:31.22	19004	7561	248.23 m	17.828 °C
17.11.2006 14:17:37.38	19002	7561	248.19 m	17.828 °C
17.11.2006 14:17:43.54	19002	7561	248.19 m	17.828 °C
17.11.2006 14:17:49.70	19003	7561	248.21 m	17.828 °C
17.11.2006 14:17:55.87	19009	7561	248.30 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:02.03	19008	7561	248.29 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:08.20	18971	7561	247.70 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:14.36	19010	7561	248.32 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:20.52	19007	7561	248.27 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:26.69	18978	7561	247.81 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:32.86	19007	7561	248.27 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:39.03	19006	7561	248.26 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:45.20	19005	7561	248.24 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:51.36	19006	7561	248.26 m	17.828 °C
17.11.2006 14:18:57.54	18980	7561	247.85 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:03.70	18974	7561	247.75 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:09.88	19008	7561	248.29 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:16.04	19004	7561	248.23 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:22.21	19005	7561	248.24 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:28.39	19009	7561	248.30 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:34.56	19008	7561	248.29 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:40.73	19006	7561	248.26 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:46.90	19007	7562	248.27 m	17.832 °C
17.11.2006 14:19:53.08	19004	7561	248.23 m	17.828 °C
17.11.2006 14:19:59.25	19007	7561	248.27 m	17.828 °C
17.11.2006 14:20:05.42	18977	7561	247.80 m	17.828 °C
17.11.2006 14:20:11.60	18978	7561	247.81 m	17.828 °C
17.11.2006 14:20:17.77	18965	7561	247.61 m	17.828 °C
17.11.2006 14:20:23.95	19006	7561	248.26 m	17.828 °C
17.11.2006 14:20:30.12	19011	7561	248.34 m	17.828 °C
17.11.2006 14:20:36.29	19006	7561	248.26 m	17.828 °C
17.11.2006 14:20:42.47	18968	7562	247.66 m	17.832 °C
17.11.2006 14:20:48.64	19004	7561	248.23 m	17.828 °C

entsprechend kalibrierten Temperaturwerte an.

2.2 Gemessene Temperaturprofile in Erdwärmesonden und deren Interpretation

Es wurden Temperaturmessungen in total 33 Erdwärmesonden gemacht. Davon konnte die Messung in der Bohrung Esslingen [23] (Zahlen in eckigen Klammern bedeuten die Nummerierung der Bohrungen, siehe auch Tabelle A-1 im Anhang A) wegen totalen Datenverlusten nicht verwendet werden. Die Lage der Bohrungen ist in der Figur 11 sowie in der Tabelle 3 dargestellt. Alle Angaben zu den Bohrungen und Messungen sind im Anhang A Tabelle A-1 dargestellt.



Erdwärmesonden:

- Bohrung mit Temperaturlog
- Bohrung mit stark gestörtem Temperaturlog (vertikaler Wasserfluss im Bohrloch)
- Bohrung mit Temperaturlog und Wärmeflussbestimmung
- Bohrung mit 'verlorenem' Temperaturlog (Datenverlust während Messung)

Figur 11: Lage der Erdwärmesonden-Bohrungen

Tabelle 3: Geografische Lage und Tiefe der Bohrungen

Nr.	Ort	Adresse	Koordinaten			Tiefe [m u. T.]	Messung Datum
			X [m]	Y [m]	Kote [m ü.M.]		
1	St. Gallen	Wartensteinstrasse 21	746500	255650	704	335	07.04.2005
2	St. Gallen	Notkerianum	748475	255915	660	250	07.07.2005
3	Jona	Bubikerstrasse	704490	233500	460	290	20.06.2005
4	Kilchberg	Gheistrasse 3	683848	241054	490	275	18.07.2005
5	Stadel	Bachstrasse 13-17	677435	264900	437	270	22.07.2005
6	Oberhasli	Sandrainstrasse 14+16	680009	257555	437	290	22.07.2005
7	Illnau	Lättenstrasse 14-18	697180	251770	510	320	22.07.2005
8	Rorbas	Haldenstrasse	685104	265338	410	280	18.08.2005
9	Zollikon	Gartenstrasse 19	686345	243245	490	250	26.09.2005
10	Bülach	Unterweg	683090	264250	418	275	29.09.2005
11	Kloten	Steinacherstrasse 68	688051	255757	445	250	29.09.2005
12	Erlenbach	Laubholzstrasse 31-41	687975	239410	470	300	30.09.2005
13	Zürich-Witikon	In der Looren 9	687190	246630	615	275	04.10.2005
14	Wädenswil	Holzmosrütistrasse	692135	231885	480	300	11.10.2005
15	Meilen	Seidengasse 50	692125	235845	423	200	21.10.2005
16	Dielsdorf	Buchsersrasse 52-56	676380	258750	480	200	31.10.2005
17	Bülach	Wiesentalstrasse	682920	262975	410	294	16.11.2005
18	Oberembrach	Neuwisstrasse	689085	260135	465	320	25.11.2005
19	Hittnau	Tösstalstrasse	704510	247575	640	300	26.01.2006
20	Zürich	Fifastrasse 18/20	685645	248415	605	275	16.12.2005
21	Pfäffikon	Pfäffikerstrasse	703395	244545	560	298	12.05.2006
22	Zürich	Friedhofsstrasse	680920	245275	445	280	15.05.2006
23	Esslingen	Löwenstrasse	696310	238350	490	270	12.05.2006
24	Benken	Rötlistrasse	718604	228804	410	169	16.06.2005
25	Hombrechtikon	Eichwisweg 16 - 24	701720	234030	481	300	13.07.2006
26	Erlenbach	Lerchenbergstrasse 62	687600	240015	470	295	30.06.2006
27	Eggenwil AG	Im Rebhügel	667920	247185	380	275	24.08.2006
28	Wollerau	Heiniweidstrasse	696790	228490	460	270	07.09.2006
29	Neuaffoltern	Wolfswinkel	681100	253185	447	240	22.09.2006
30	Weiningen	Badenerstrasse	674675	252430	410	279	22.09.2006
31	Zürich-Höngg	Einsteinstrasse	680536	251295	522	250	17.12.2006
32	Erlenbach	Seestrasse 22	686978	240160	410	248	06.12.2006
33	Niederweningen	Binzacherweg 45-64	670215	262710	455	275	07.12.2006

Legende: Nr. = laufende Nummerierung der Bohrungen (Tabelle A-1)

In den folgenden Figuren 12 – 40 wurde eine Synthese zwischen den geothermischen und geologischen Daten erstellt. Das Temperatur-Tiefen-Profil wurde soweit als möglich in lineare Gradientenabschnitte unterteilt. Das geologische Schichtprofil wurde aufgrund von Cuttingproben erstellt. Tiefenintervalle mit konvektivem Wärmetransport durch Wasser wurden - soweit erkennbar - markiert. Die im Kapitel 3.2 berechneten Wärmeflusswerte sind in den entsprechenden Tiefenbereichen dargestellt, werden aber erst später diskutiert.

In den detailliert aufgenommenen Bohrprofilen wurden Lithotypen mit zunehmender Korngrösse, d.h. *Mergel*, *Siltstein*, *Feinsandstein*, *Mittelsandstein*, *Grobsandstein* und *Konglomerat* unterschieden. In den dargestellten Profilen (Figuren 13 - 40) ist diese Unterteilung mit den Signaturen zu sehen. Zusätzlich wurde eine Einteilung der Lithologien durch Farben gemacht (Legende siehe Figur 12). In dieser Unterteilung sind die ‚reinen‘ Lithologien (nur ein Lithotyp) sichtbar sowie auch gemischte Lithologien (mit einem Lithotyp als Hauptgemenganteil und einem oder zwei Lithotypen als Nebengemenganteil) leicht auseinander zu halten. Reine Mergel sind dunkellila, Mergel welche noch Siltstein oder Sandstein enthalten helllila. Reiner Siltstein ist hellblau. Reine Sandsteine haben Gelbtöne, wobei der Ton von Feinkörnigen zu grobkörnigen Sandsteinen dunkler wird. Konglomerate sind hellrot gefärbt, enthalten sie noch Sandstein oder Mergel so ist die Farbe orangerot. So kann auf einen Blick gesehen werden, ob ein Bohrprofil vorwiegend aus Sandstein besteht

(Figuren 34 und 35), vorwiegend aus Konglomerat (Figur 29) oder vorwiegen aus Mergel (Figuren 13, 26, 32). Es gibt auch Bohrungen mit schnell wechselnder Abfolge verschiedener Lithotypen (Figuren 15, 17, 28, 31, 33). Alle Bohrungen liegen in der Mittelländischen Molasse. Je nach Bohrtiefe und Lage der Erdwärmesondenbohrung werden das Quartär (9%), die Obere Süßwassermolasse (60%), die Obere Meeresmolasse (22%) und die Untere Süßwassermolasse (9%) aufgeschlossen.

Die obersten 15 Metern sind in allen Bohrungen durch tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen der Lufttemperatur gekennzeichnet. Der Startwert des Temperaturprofils an der Erdoberfläche repräsentiert die Jahreszeit mit hohen Temperaturen im Sommer und Tiefen im Winter. Unterhalb dieses Bereiches ist die Temperatur von den Jahreszeiten nicht mehr beeinflusst. Von 15 bis ca. 50 m ist die Temperatur mehrheitlich relativ konstant. Dies ist auf die langjährige Klimaerwärmung und anthropogene Einwirkung im Zuge der wachsenden Urbanisierung zurückzuführen. Die Eindringtiefe von 80 m widerspiegelt etwa Klimaeffekte der letzten 150-200 Jahre. Die Klimaeffekte können allerdings in diesem Tiefenbereich durch Grundwasserströmungen verwischt werden (Figuren 20, 30 und 35). Darunter nimmt die Temperatur zu, bis ca. 80 m leicht, danach stärker, im Mittel mit ca. 25 bis 40 °C/km, je nach Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsschichten. In diesem Bereich lässt sich das Temperatur-Tiefen-Profil in lineare Abschnitte mit konstanter Temperaturzunahme unterteilen. Ab und zu ist das Temperaturprofil lokal durch positive oder negative Anomalien ‚gestört‘ (Figuren 28, 30). Dort erfolgt der Wärmetransport zusätzlich durch Wasserzirkulation im Bohrloch oder/und in den Gesteinsschichten bez. Klüften.

In einigen Erdwärmesonden mussten die Sondenrohre unmittelbar vor der Messung in den obersten Metern mit Wasser mit Hahntemperatur aufgefüllt werden, damit die Messsonden in die Rohre eingeleitet werden konnten. Meistens waren es nur wenige Meter, manchmal aber auch 10 -15 m. Dort kann der saisonale Temperatureffekt verwischt sein (Figur 39).

Im Felsgestein sind oft konvektive Störungszonen mit geringer Mächtigkeit (wenige Meter) festzustellen (z.B. Figuren 28 und 32). Dabei handelt es sich um Kluftzonen. Im Lockergestein sind die konvektiven Zonen meistens mächtiger und von Porengrundwasser bestimmt. Dort kann auch die Hinterfüllung weggespült werden und es kann sich einen vertikalen Wasserfluss im Bohrloch einstellen (Figuren 20 und 35).

Es ist keine signifikante Korrelation zwischen Gradientenänderungen und Lithologieänderungen zu sehen. In einem linearen Gradientenabschnitt können mehrere unterschiedliche Lithologien auftreten (Figuren 31 und 33) oder umgekehrt können in einer homogen scheinenden Gesteinsschicht die Gradienten ändern (Figuren 13 und 38). Die Probenahme für die Erstellung des geologischen Profils erfolgte meistens alle 2 m, manchmal auch alle 3 oder gar nur alle 4 m (Figuren 35 und 38). Eine Cuttingprobe repräsentiert das durchfahrene Gestein nur über ca. 25 bis 50 cm. Die Probenahme hat somit punktuellen Charakter und das stratigraphische Auflösungsvermögen beträgt höchstens ± 0.75 m. Demgegenüber variiert die Mächtigkeit von Gesteinsschichten mit homogener Lithologie zwischen 2 und 110 m.

Extrapoliert man in jeder Bohrung den mehr oder weniger konstant zunehmenden Temperaturverlauf zwischen 100 und 300 m linear an die Erdoberfläche erhält man mittlere Oberflächentemperaturen zwischen 9.0 und 10.5 °C. Diese liegen deutlich tiefer als die heutigen Werte.

Lithologische Unterteilung der Felsgesteinsschichten

nach Signaturen:

	Mergel
	Siltstein
	Sandstein (Fein-, Mittel-, Grobsandstein)
	Konglomerat
	Kalk

nach Farben:

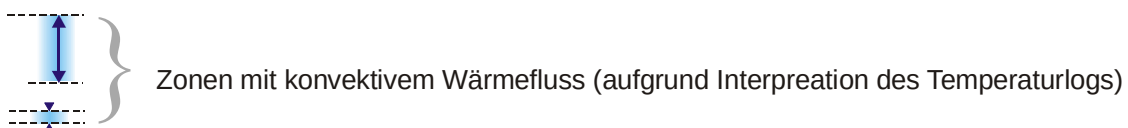
	Mergel
	Mergel mit Siltstein/Sandstein oder Siltstein mit Mergel
	Siltstein
	Sandstein mit Mergel
	Feinsandstein oder Feinsandstein mit Siltstein
	Mittelsandstein
	Grobsandstein
	Konglomerat mit Sandstein/Mergel
	Konglomerat
	Kalk

Geologie:

<i>q</i>	Quartär: Postglaziale Ablagerungen (weiss), Moräne (grau)
<i>OSM</i>	Obere Süsswassermolasse
<i>OMM</i>	Obere Meeresmolasse
<i>USM</i>	Untere Süsswassermolasse

Hydrogeologie:

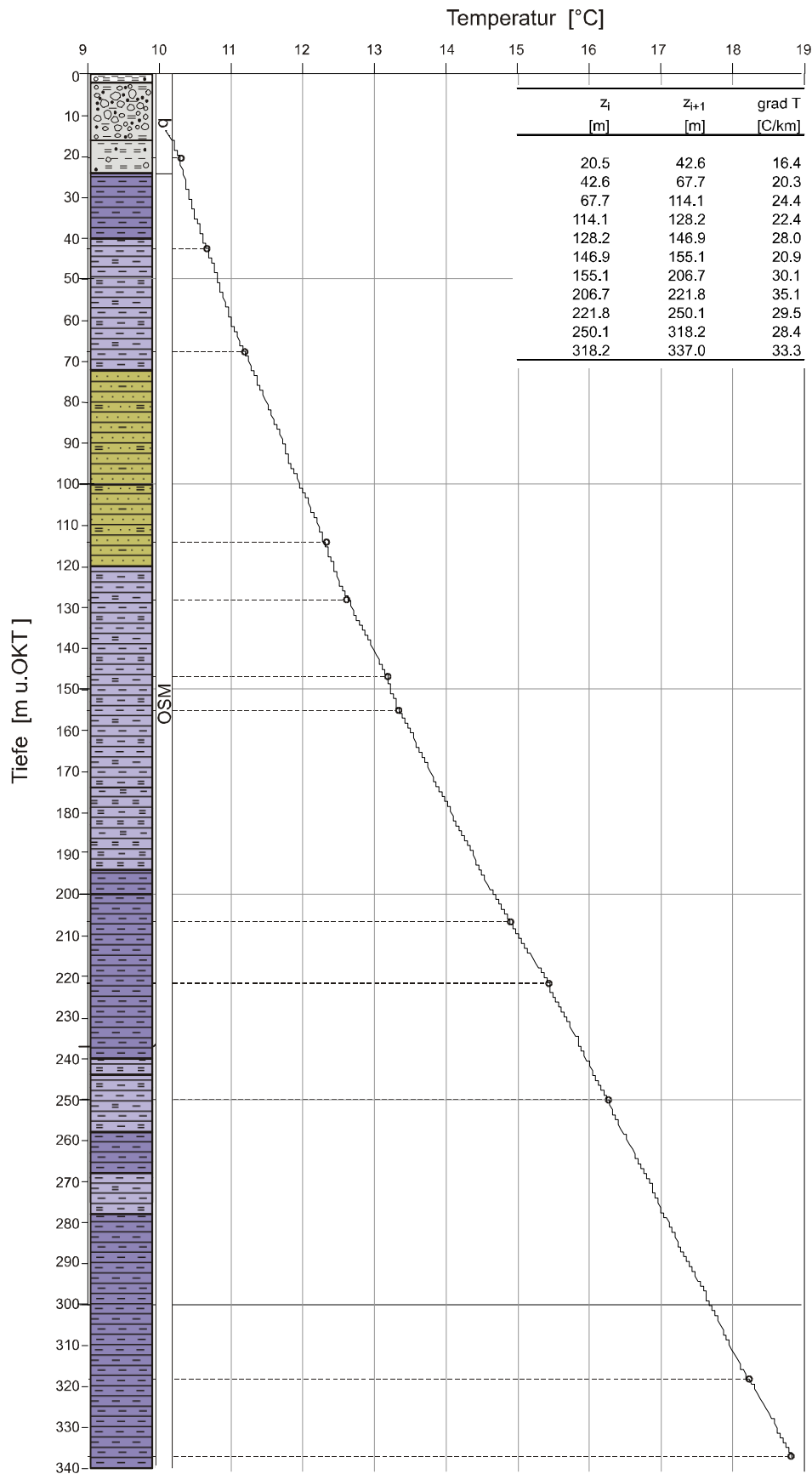
	Wassereintritte beim Bohren beobachtet
	Gespannt



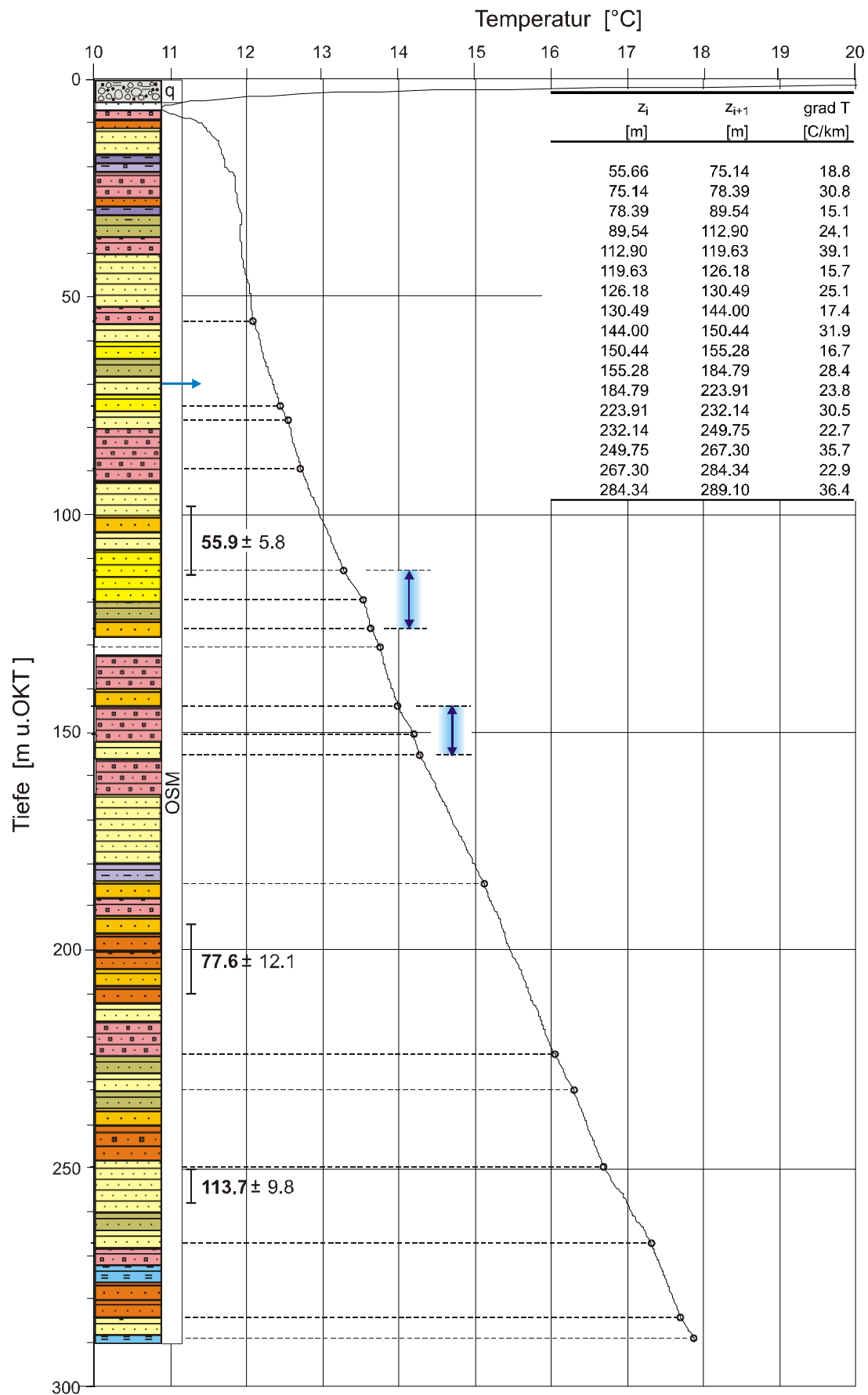
Geothermie:

	97.6 ± 20.4 Zone mit Wärmeflussbestimmung [mW/m ²]
---	---

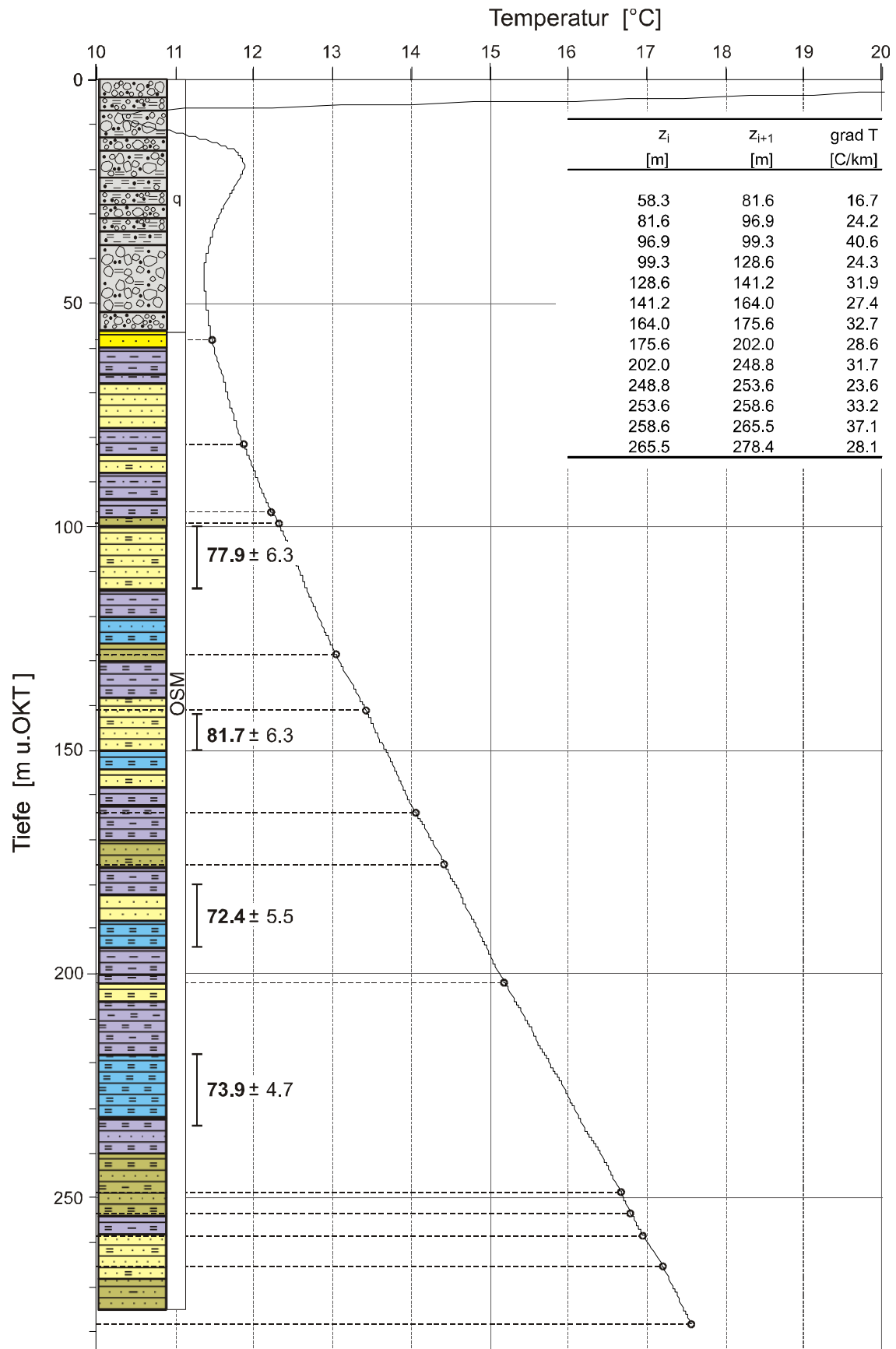
Figur 12: Legende zu den Figuren 13 – 40 , [...] laufende Nummerierung der Bohrungen



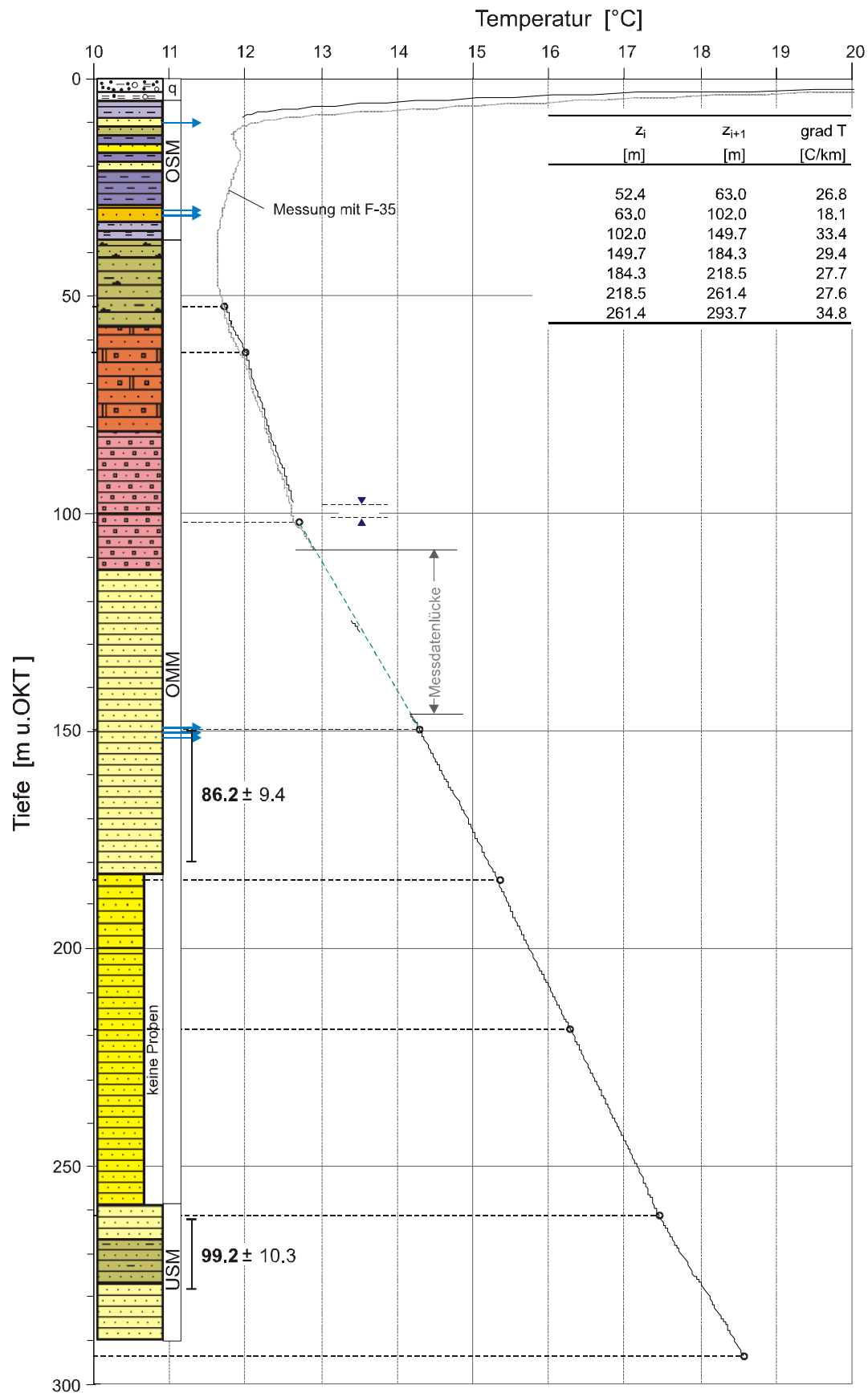
Figur 13: [1] St. Gallen Wartensteinstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



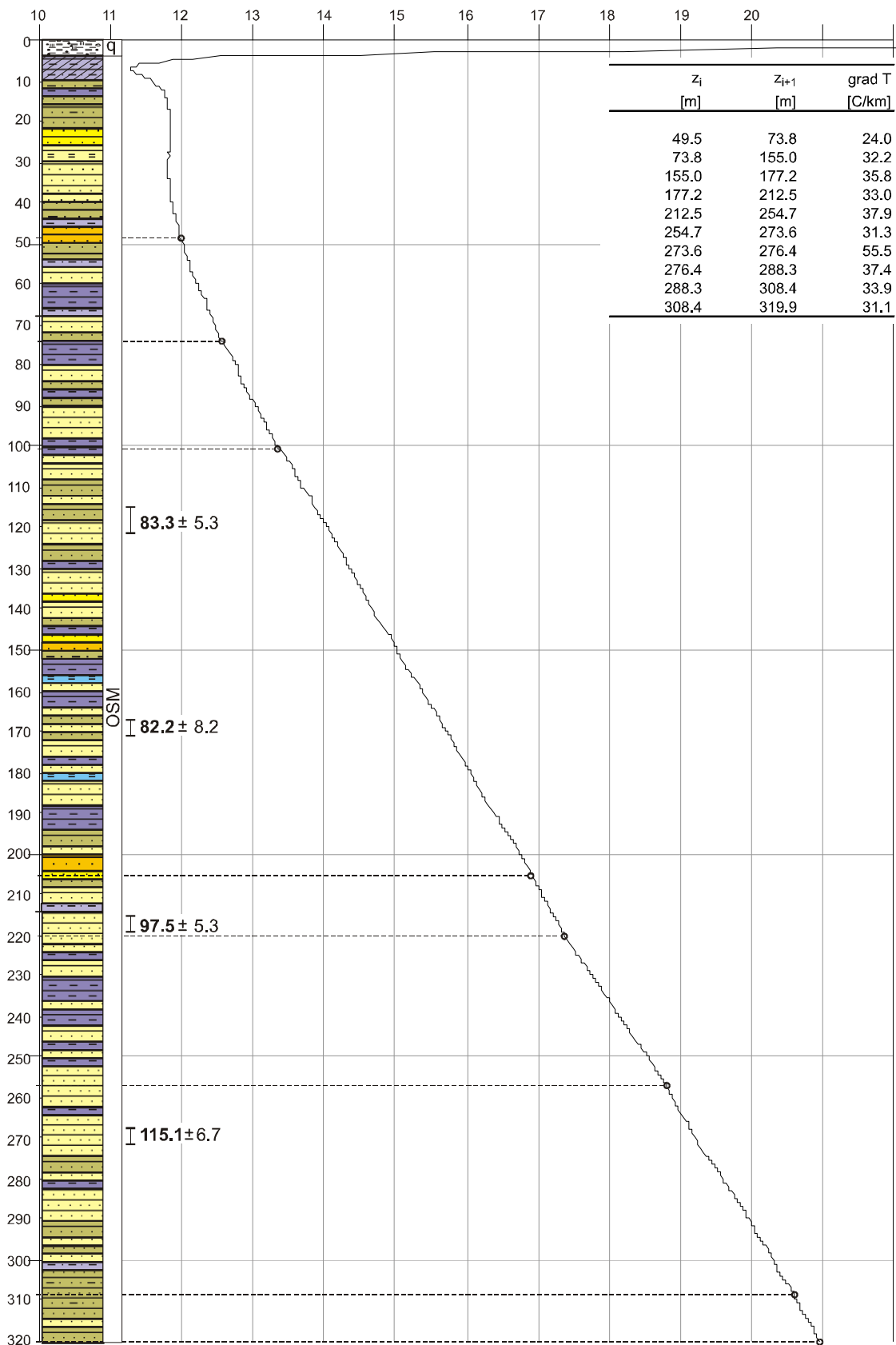
Figur 14: [3] Jona Bubikerstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



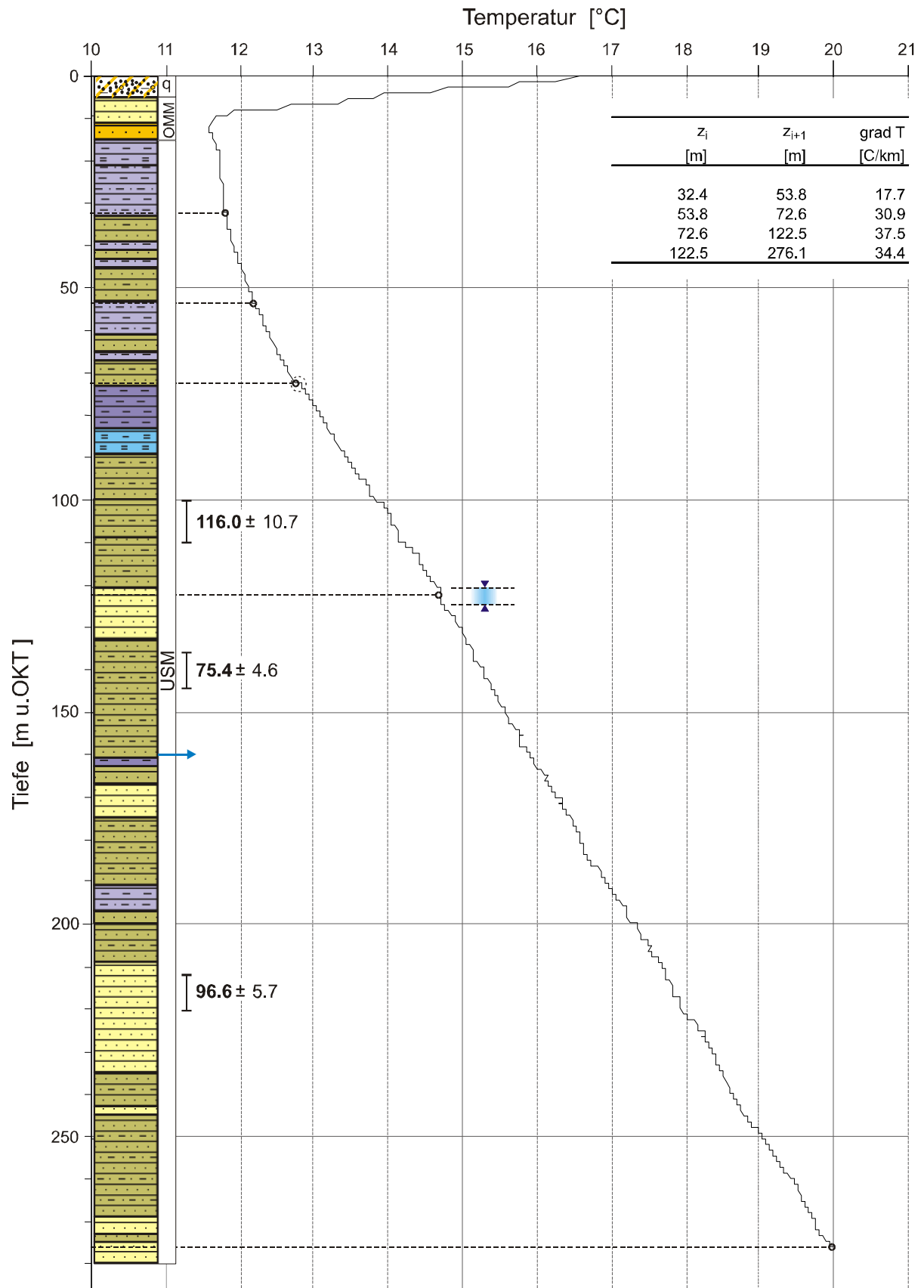
Figur 15: [4] Kilchberg Gheistrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



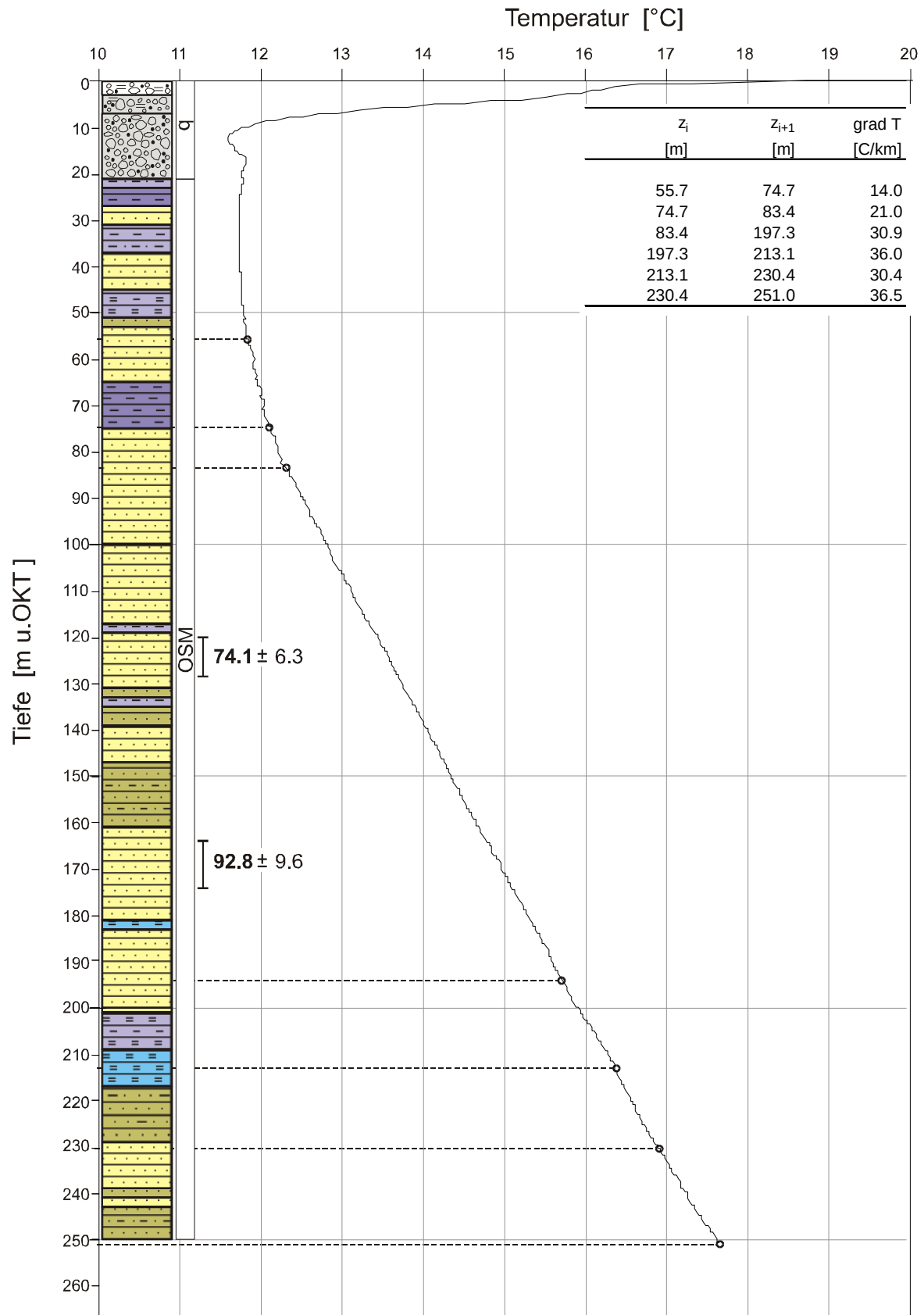
Figur 16: [6] Oberhasli Sandrainstrasse: Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



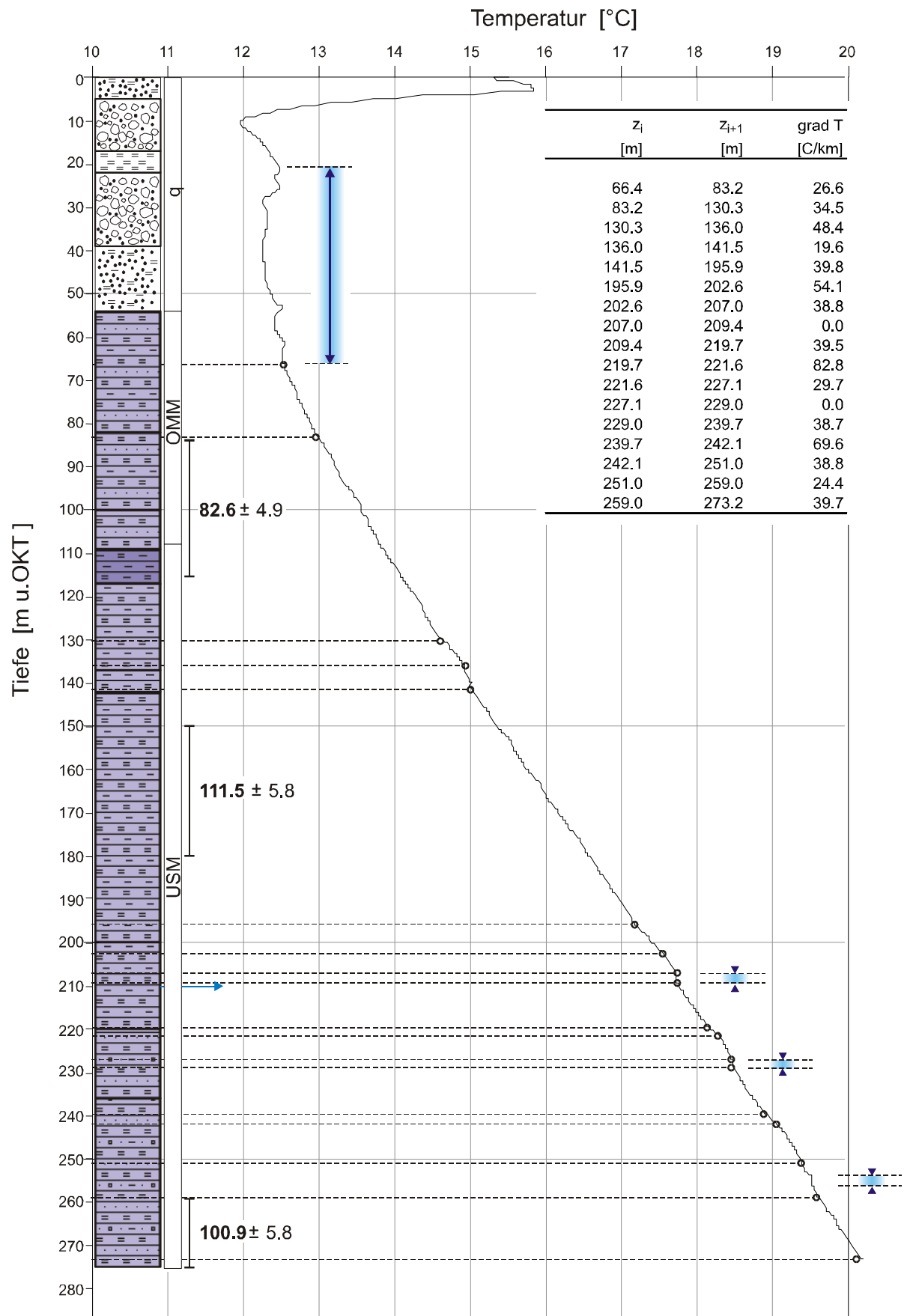
Figur 17: [7] Illnau Lättenstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



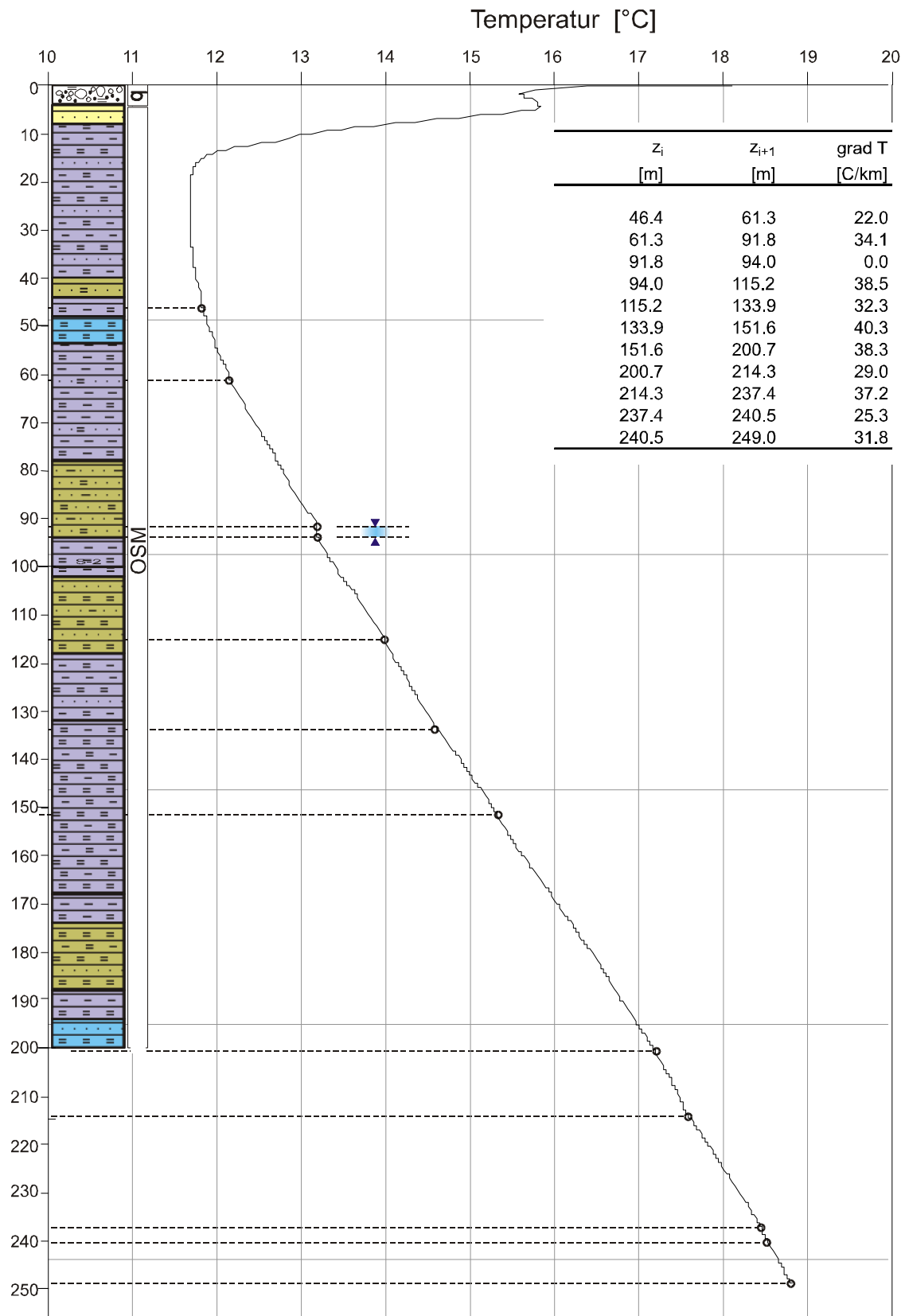
Figur 18: [8] Rorbas Haldenstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



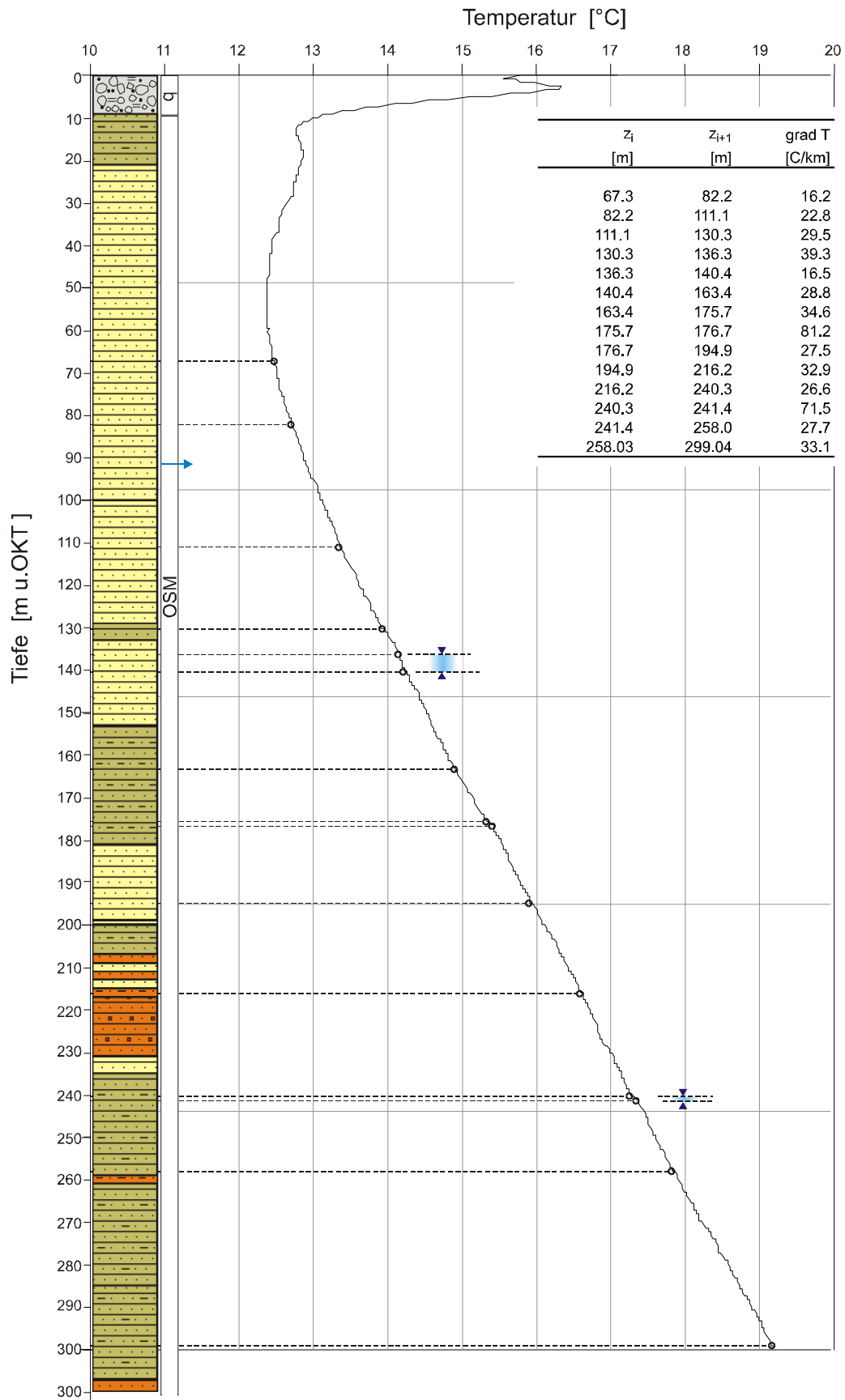
Figur 19: [9] Zollikon Gartenstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



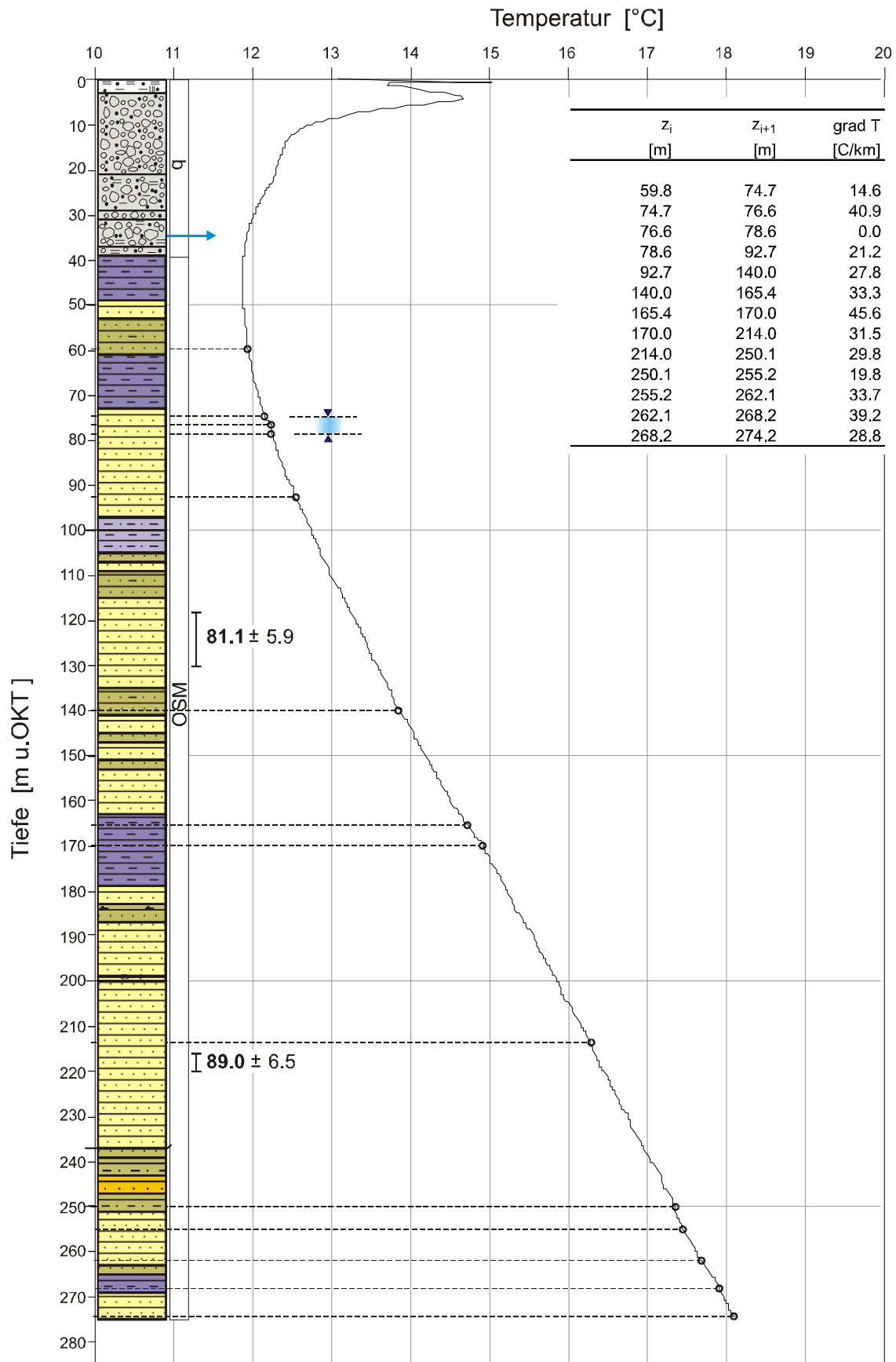
Figur 20: [10] Bülach Unterweg, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



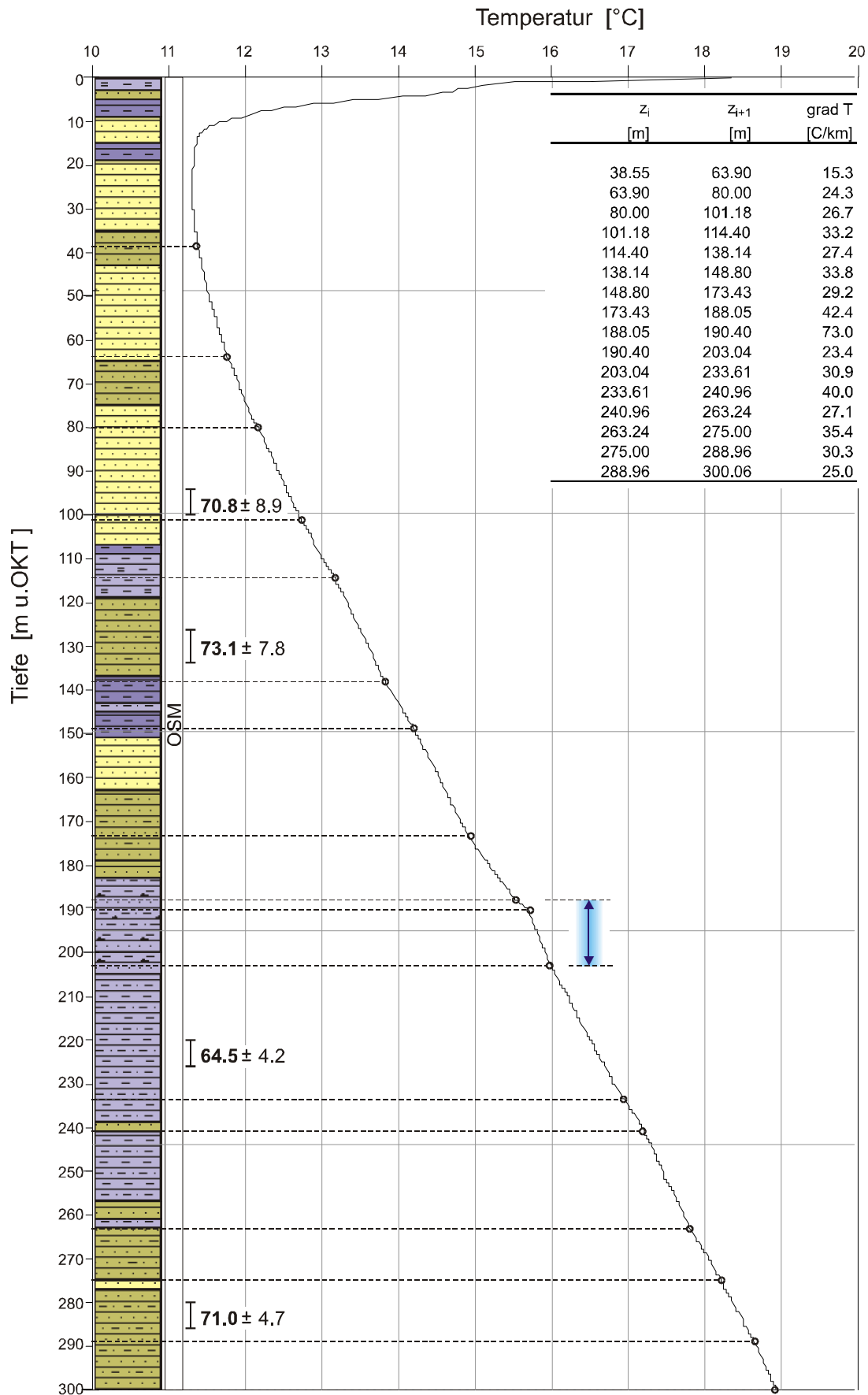
Figur 21: [11] Kloten Steinacherstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



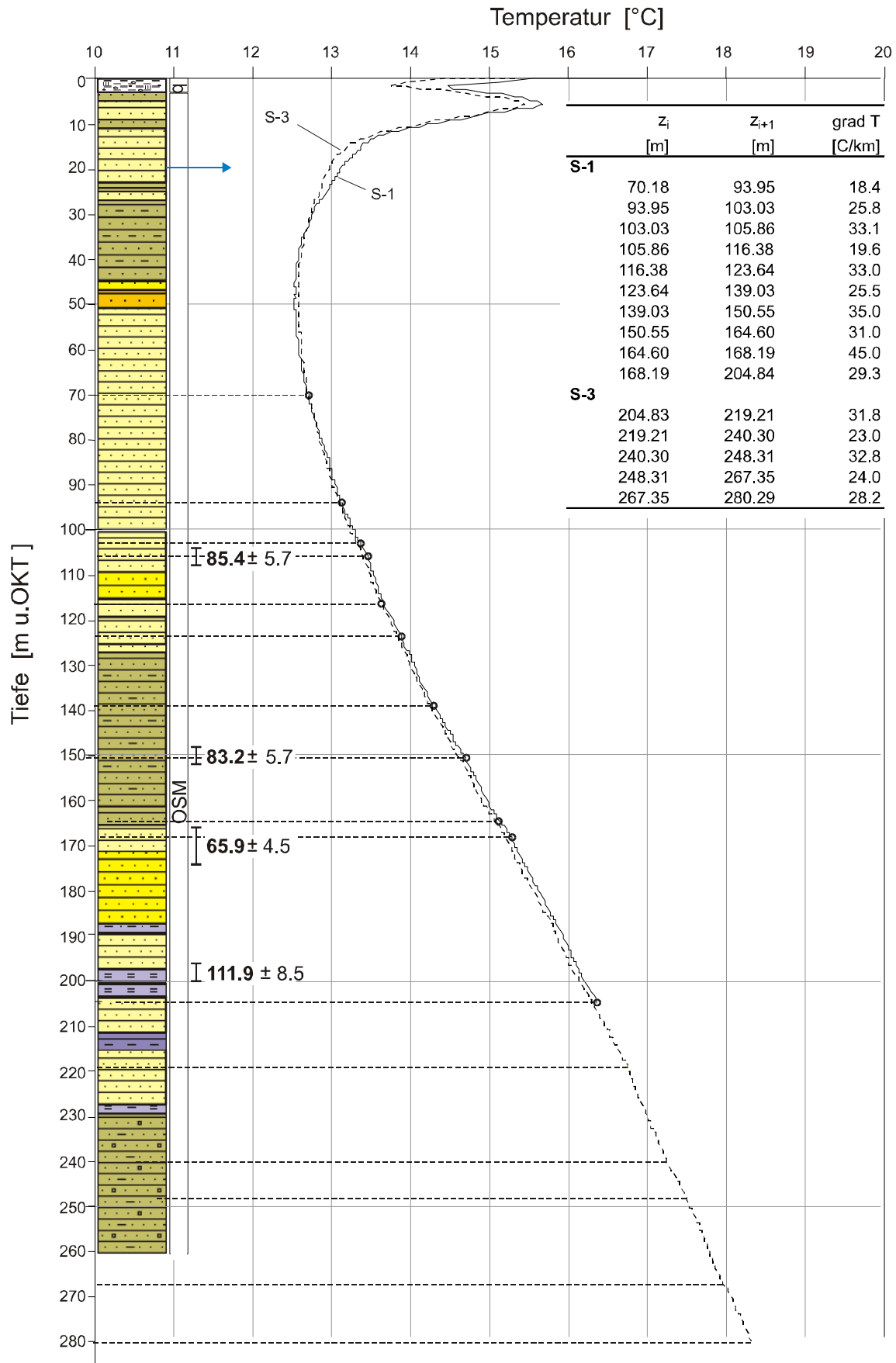
Figur 22: [12] Erlenbach Laubholzstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



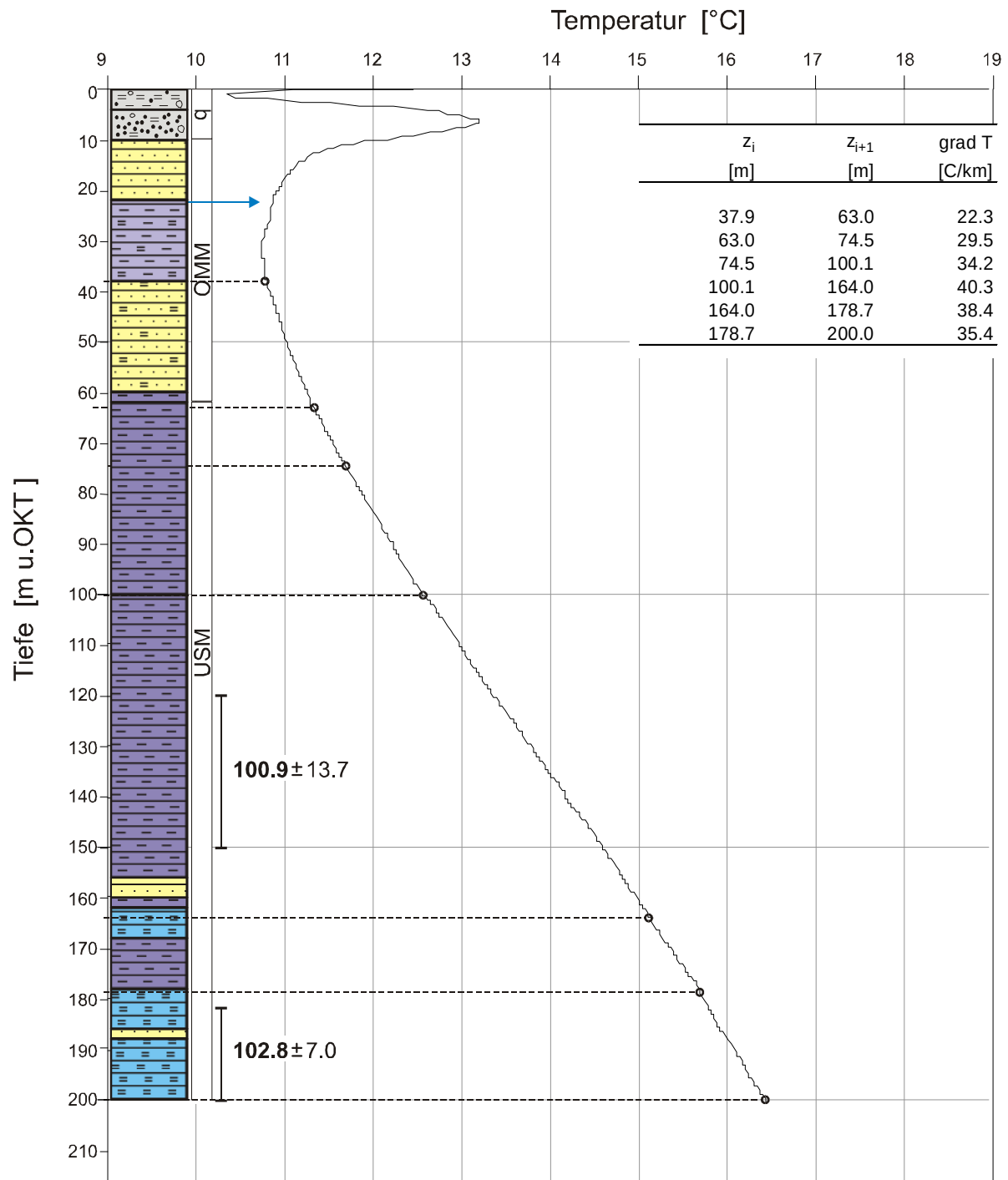
Figur 23: [13] Zürich-Witikon In den Looren, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



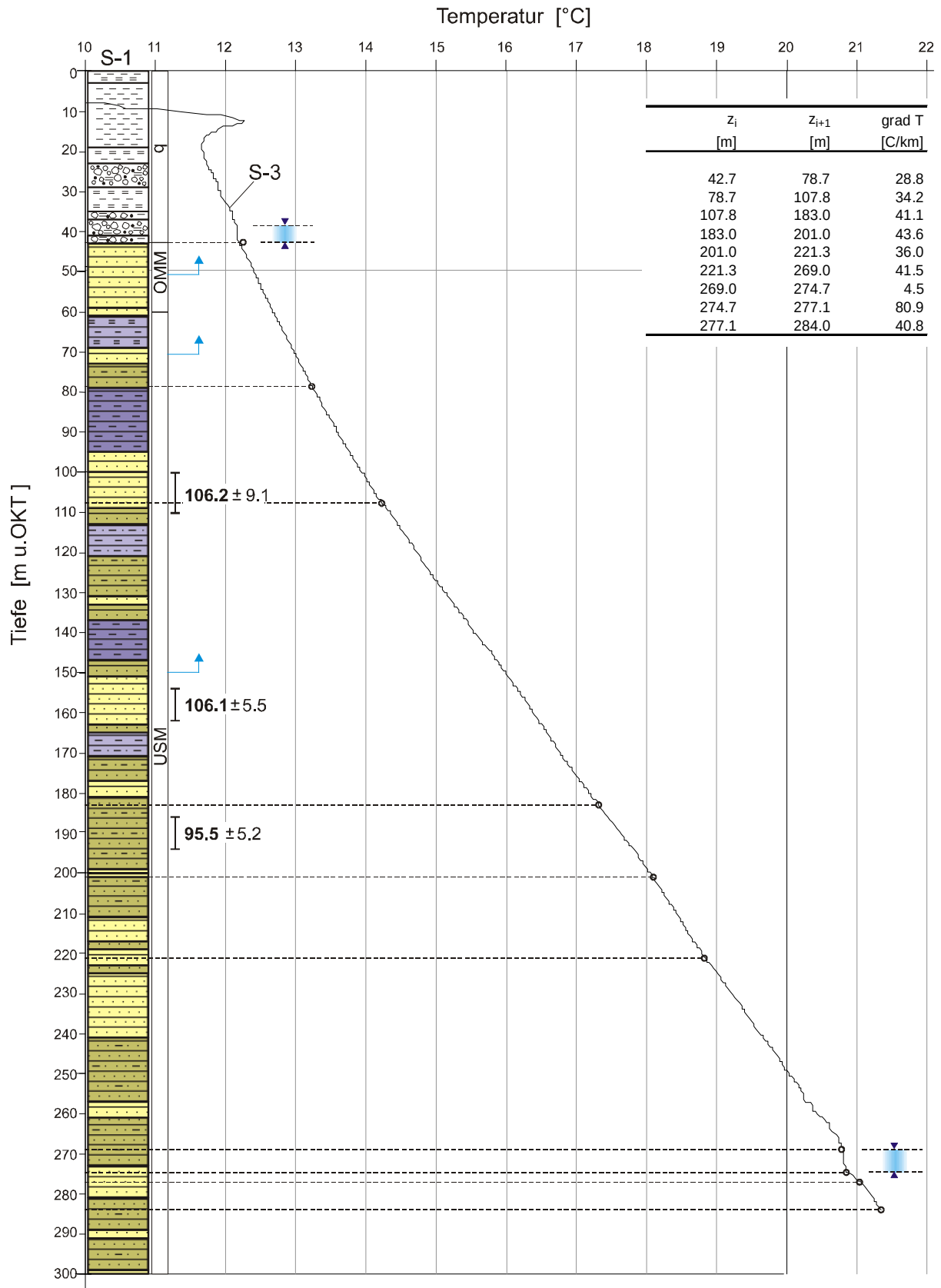
Figur 24: [14] Wädenswil Holzmoosrütistrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



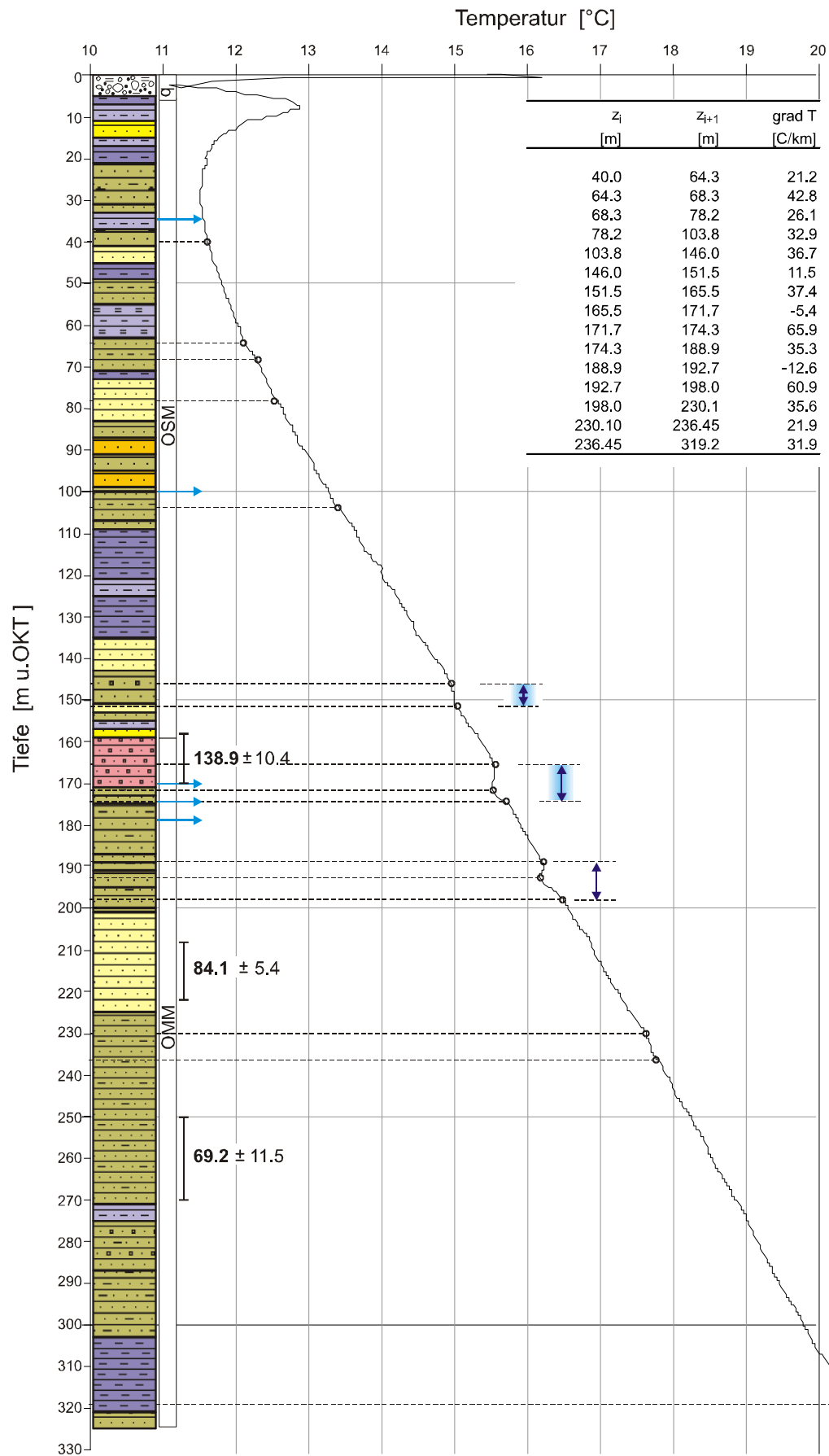
Figur 25: [15] Meilen Seidengasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



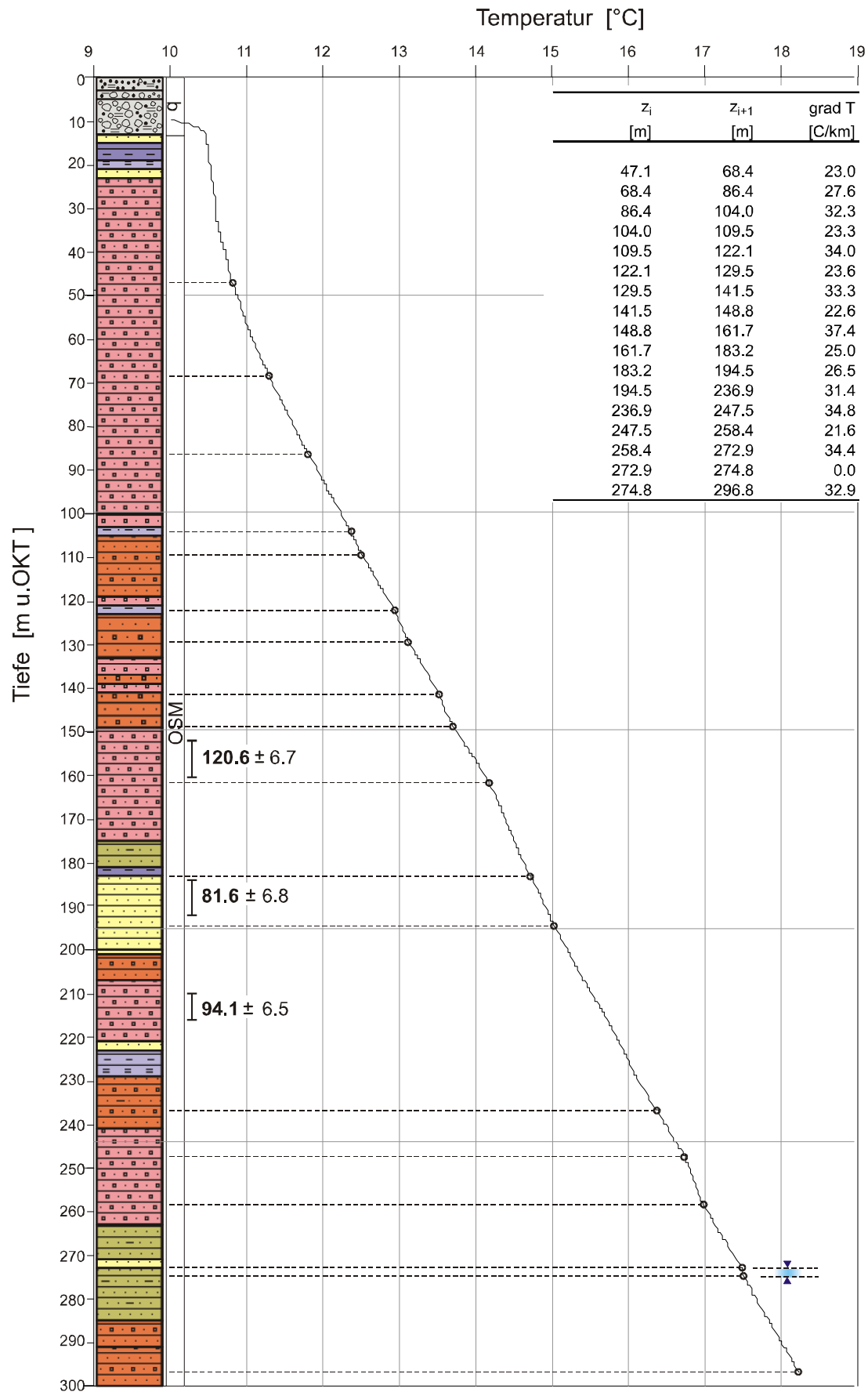
Figur 26: [16] Dielsdorf Buchserstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



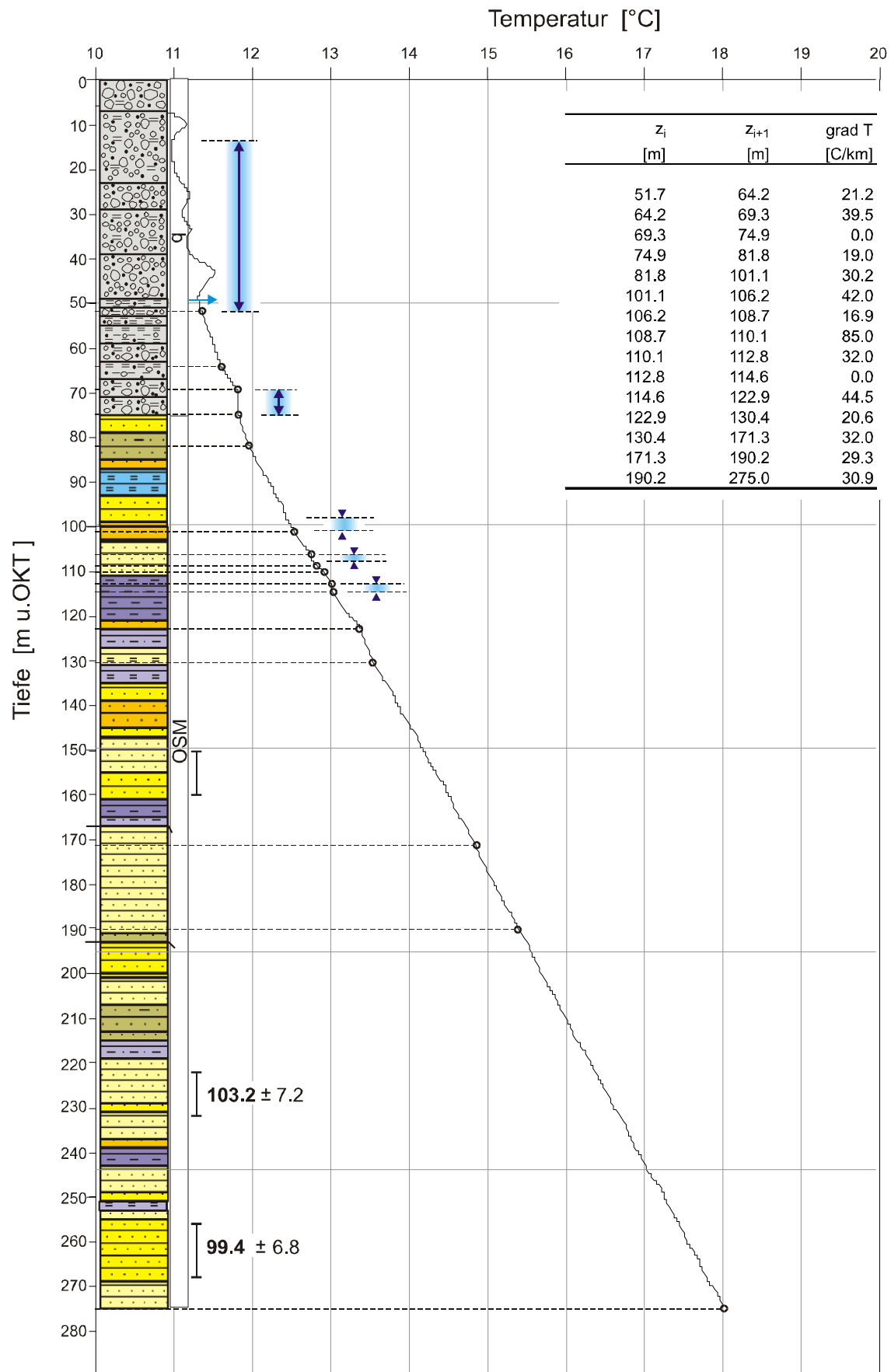
Figur 27: [17] Bülach Wisenstalstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



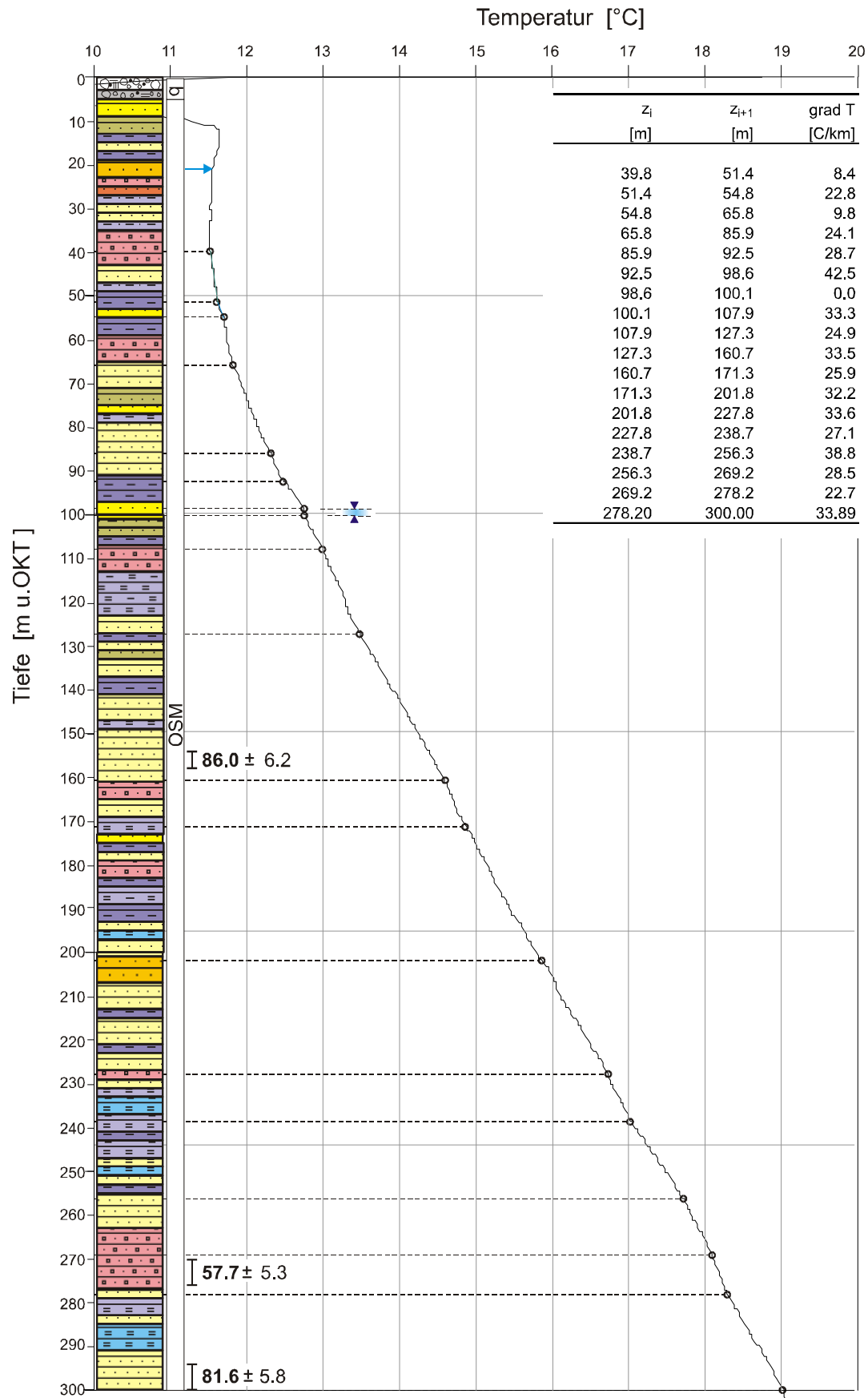
Figur 28: [18] Oberembrach Neuwisstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



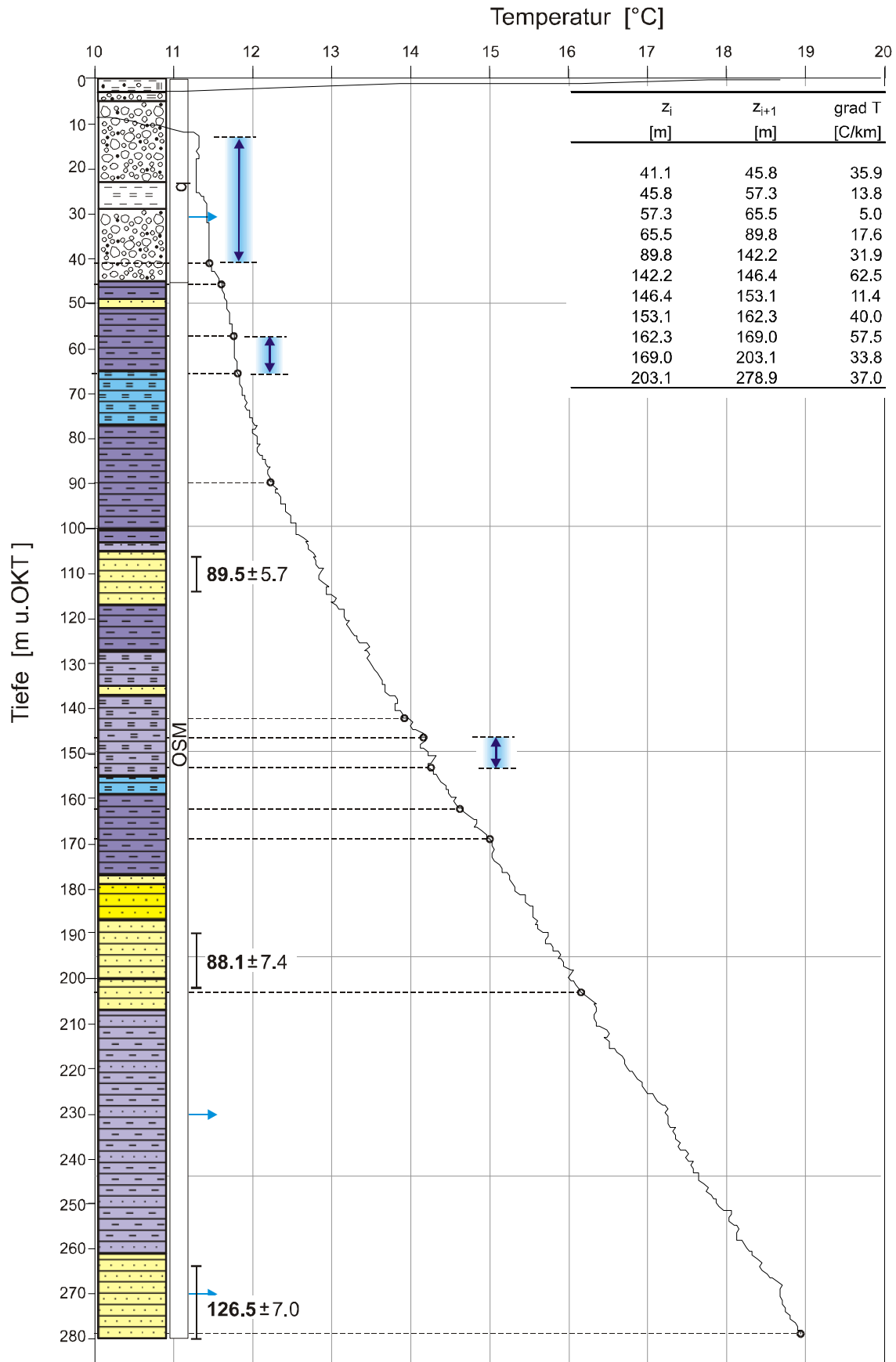
Figur 29: [19] Hittnau Tösstalstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



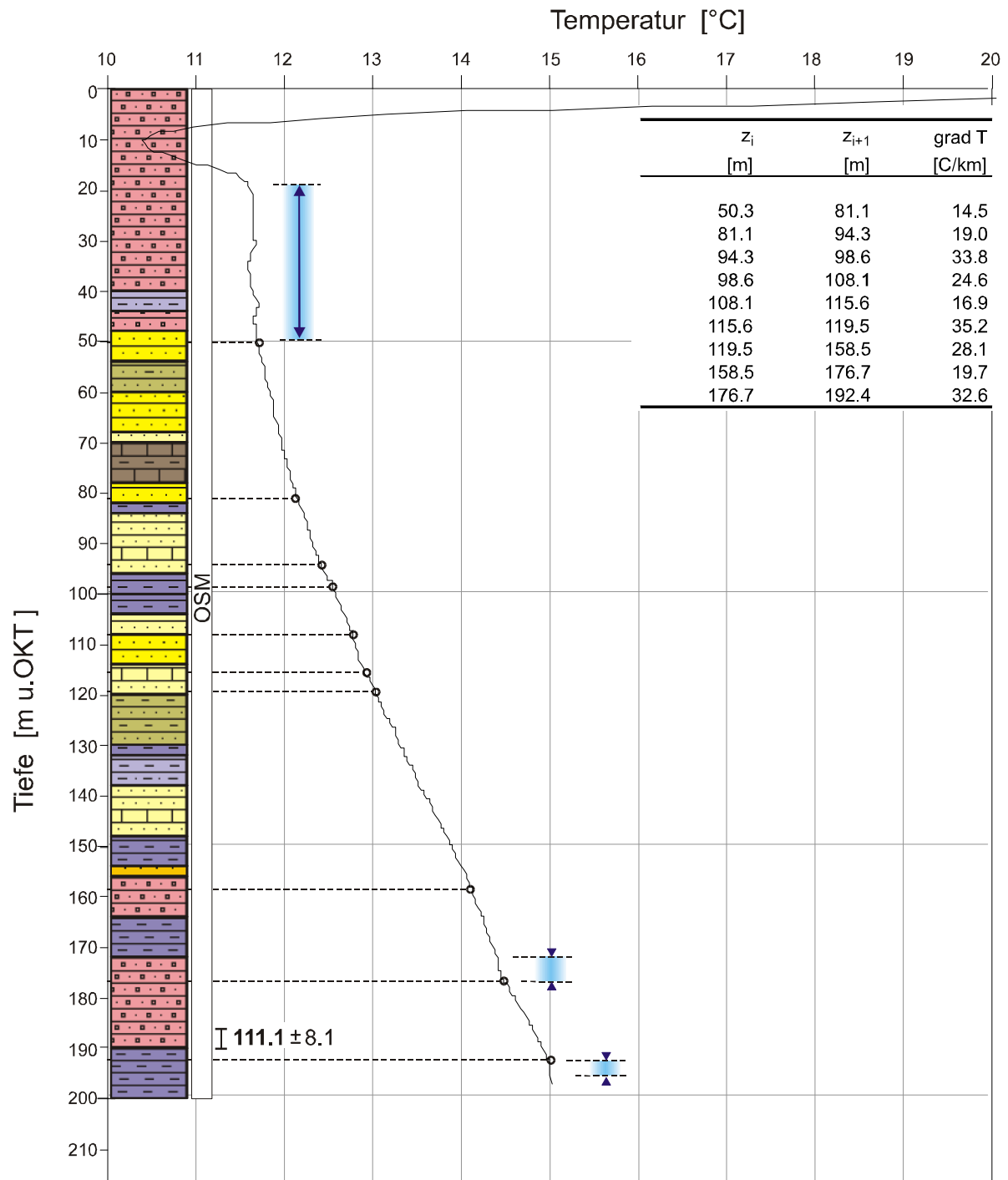
Figur 30: [20] Zürich FIFA-Strasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



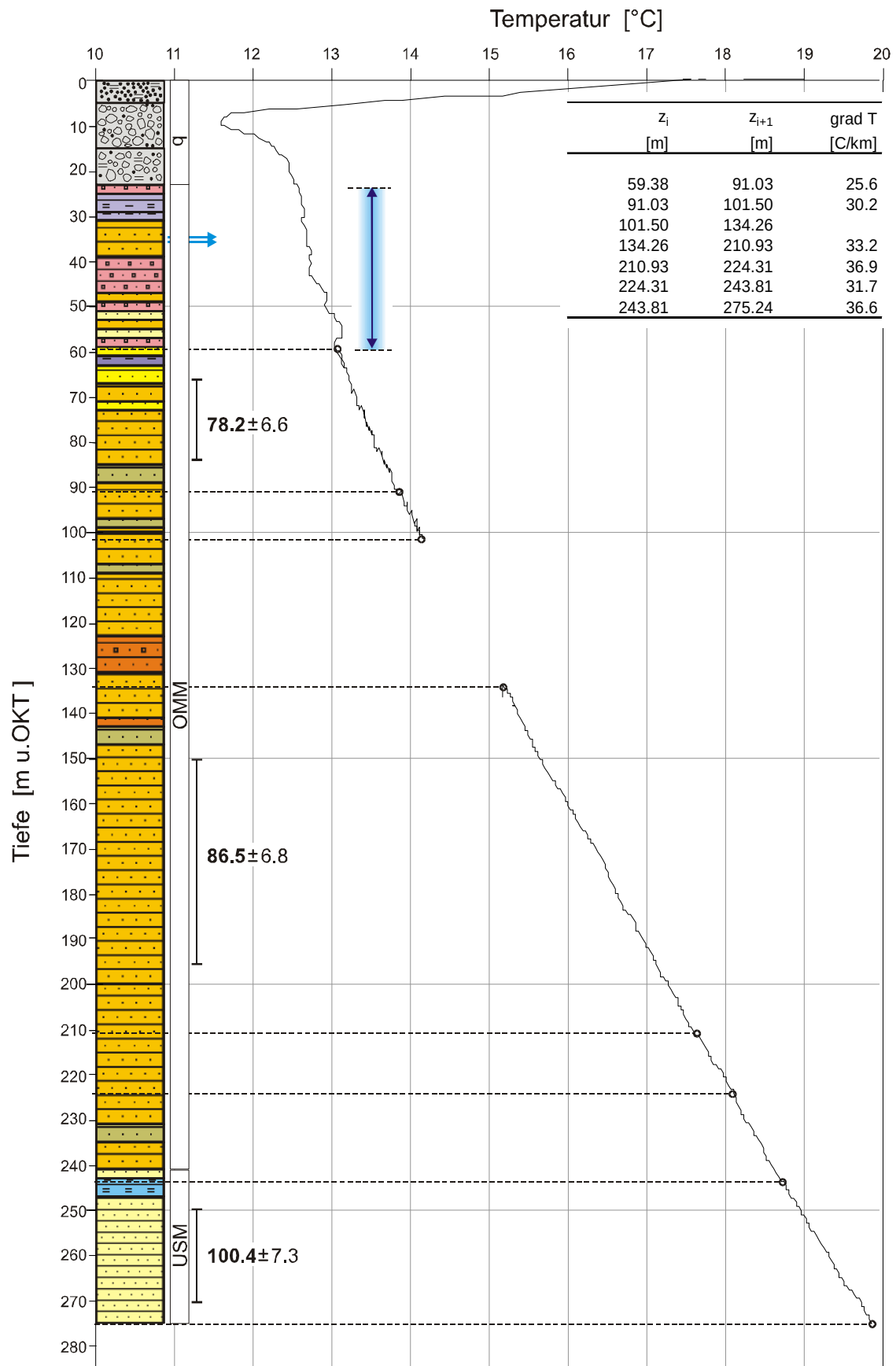
Figur 31: [21] Auslikon Pfäffikerstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



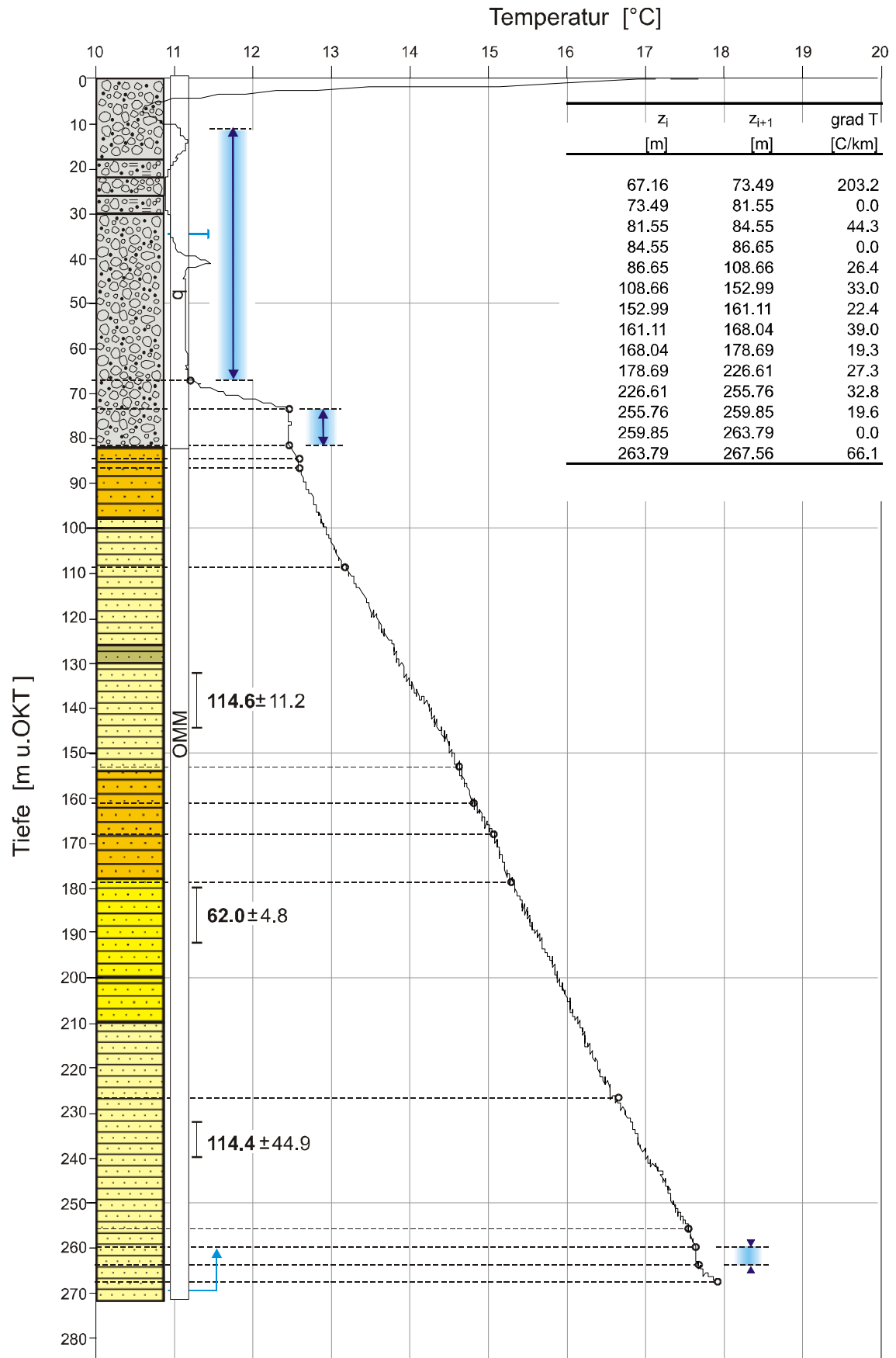
Figur 32: [22] Zürich-Altstetten Friedhofstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



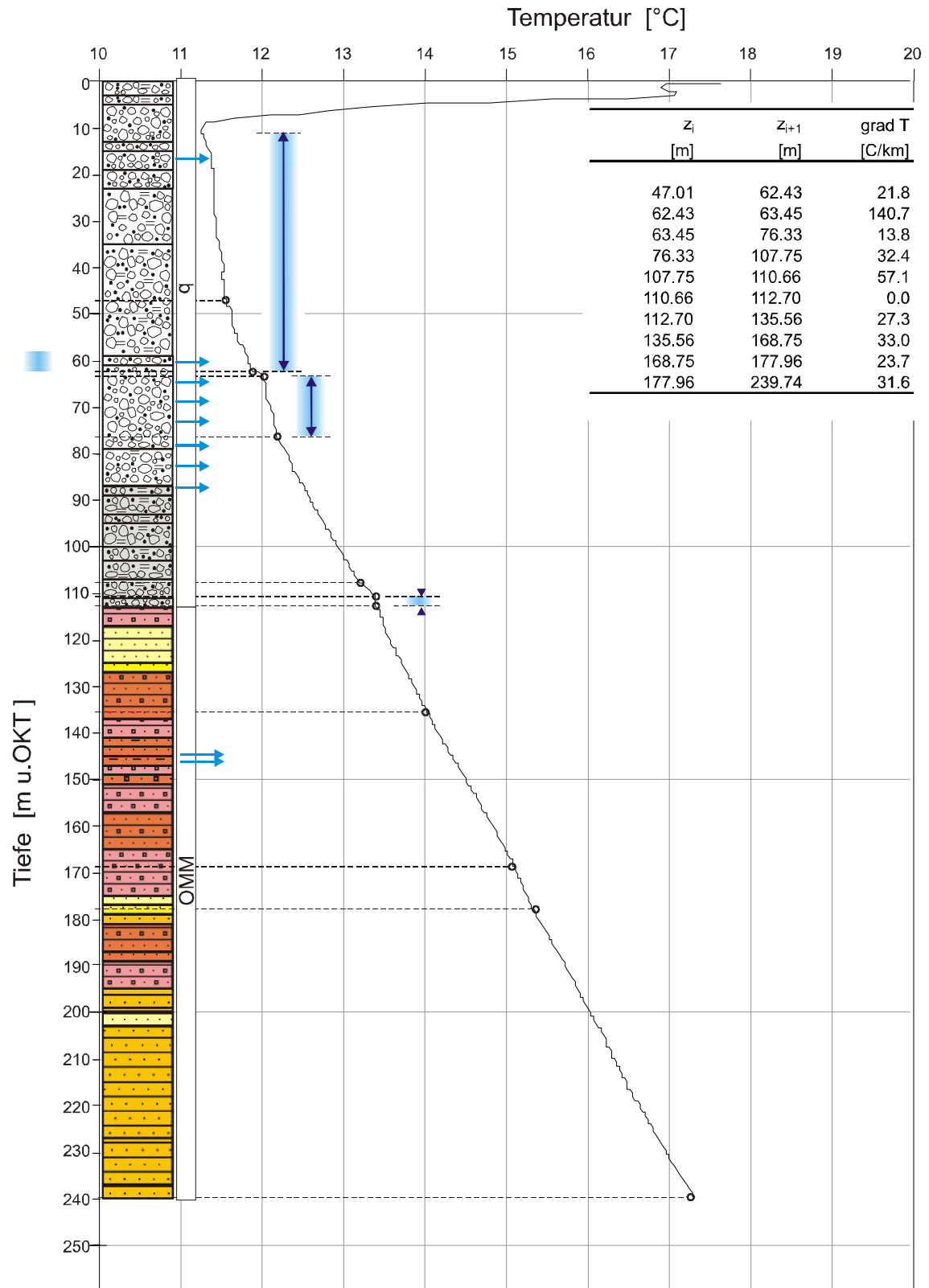
Figur 33: [25] Hombrechtikon Eichwiesweg, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



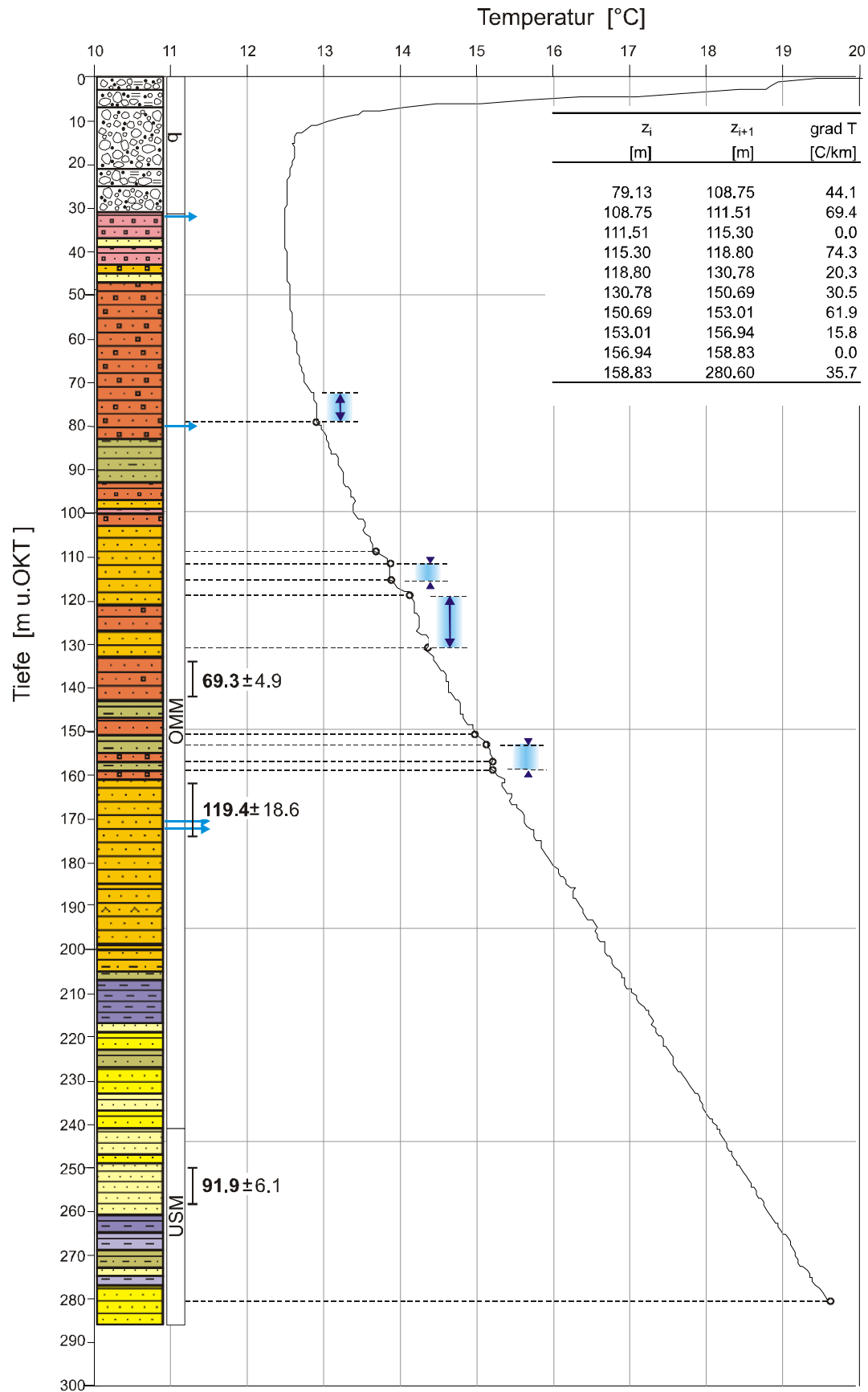
Figur 34: [27] Eggenwil Im Rebhügel, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



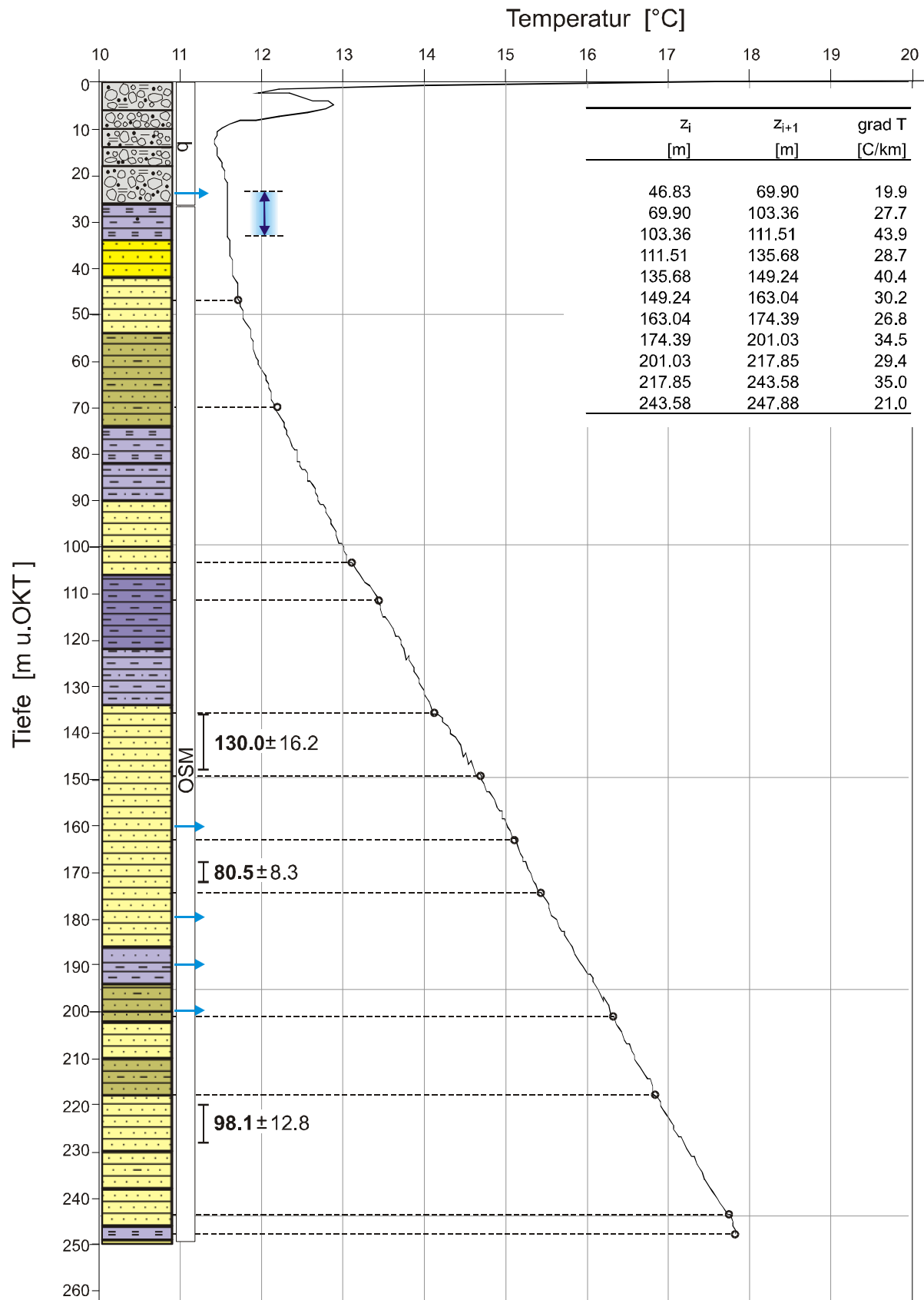
Figur 35: [28] Wollerau Heiniweidstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



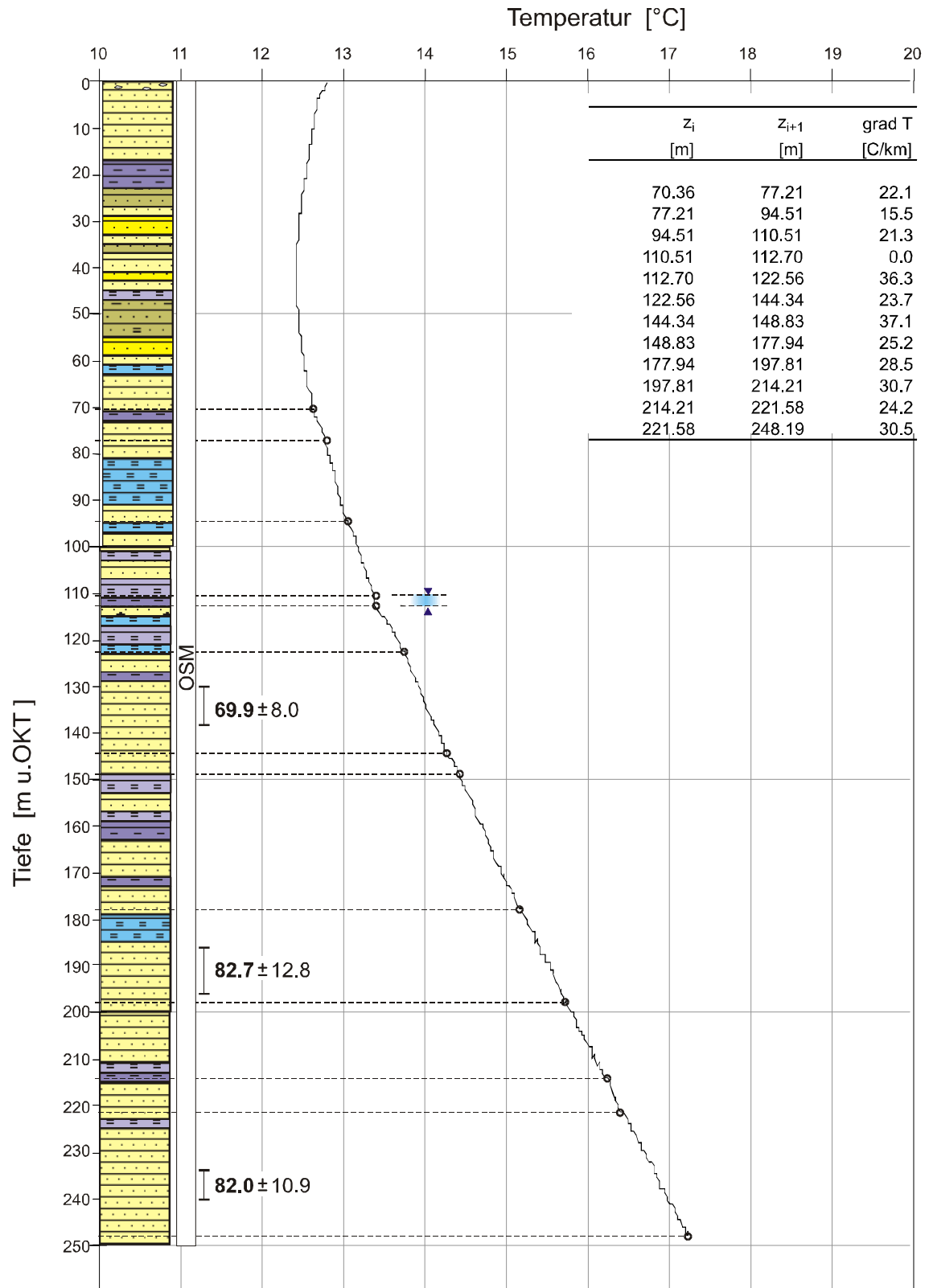
Figur 36: [29] Zürich-Affoltern Wolfswinkel, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



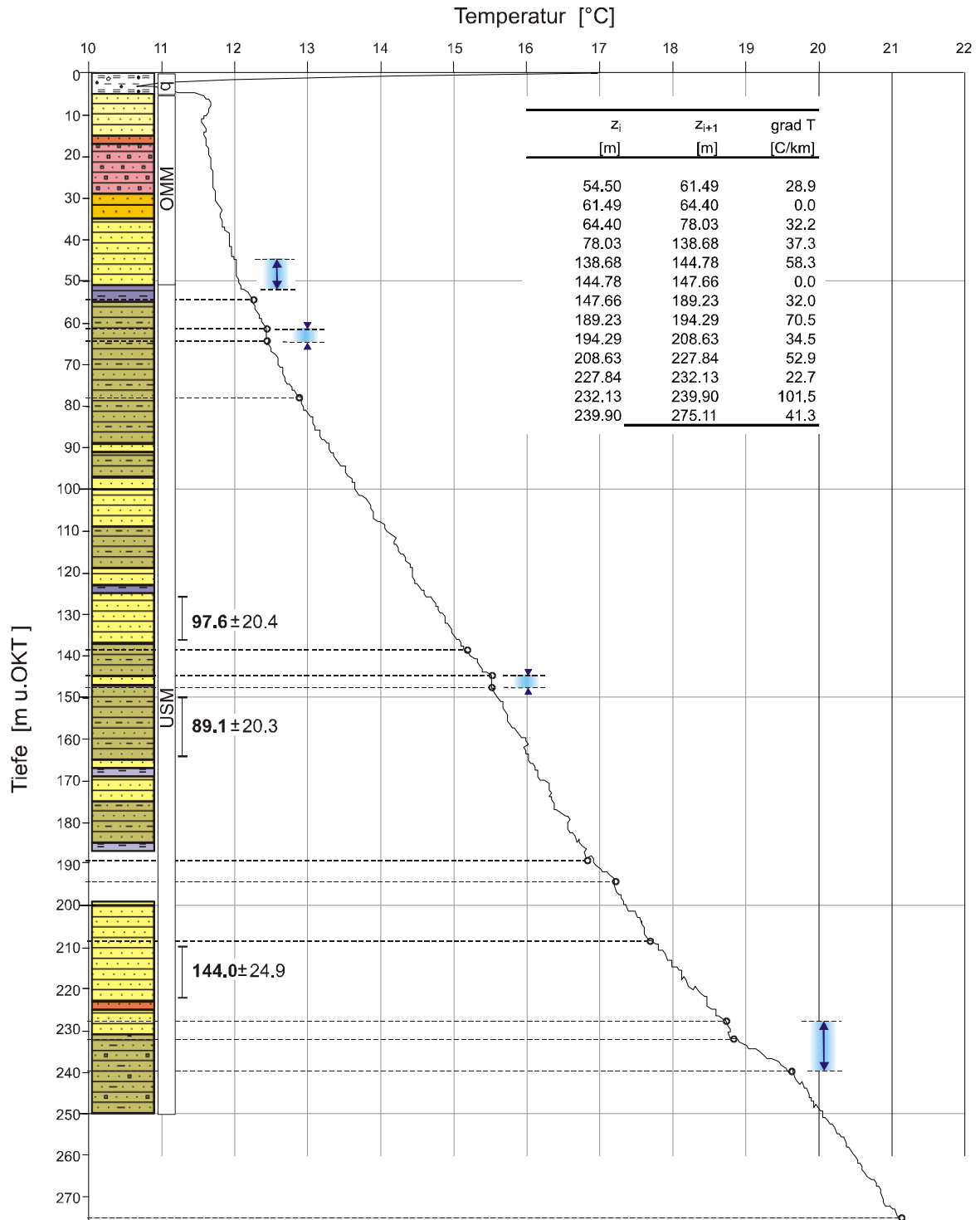
Figur 37: [30] Weiningen Badenerstrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



Figur 38: [31] Zürich ETH-Hönggerberg, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



Figur 39: [32] Erlenbach Seestrasse, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).



Figur 40: [33] Niederweningen Binzacher, Temperaturmessung und geologisches Profil (Figurenlegende siehe Figur 12).

Wie oben erwähnt, ist das Temperaturfeld im oberen Bereich durch Klimaänderungen beeinflusst. Der Effekt der Klimaeinfluss im Kanton Zürich und den angrenzenden Gebieten kann mittels einer einfachen Analyse anhand der gemessenen Temperaturprofile abgeschätzt werden, wie nachfolgende beschrieben wird.

Das Temperatur-Tiefen-Profil entlang von Bohrungen ist unter anderem eine Funktion von Oberflächentemperaturänderungen (2). Über die thermische Diffusivität (Temperaturleitfähigkeit) κ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] ist die Eindringtiefe einer Temperaturänderung l [m] mit der Zeit t [s] verbunden, es gilt:

$$l = \sqrt{\kappa \cdot t} \quad (2)$$

Unter Annahme einer mittleren Diffusivität von $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ beinhalten die ersten 100 m Informationen über die Oberflächentemperaturänderungen der letzten rund 300 Jahre. Tages- beziehungsweise jahreszeitliche Änderungen machen sich bis in eine Tiefe von einigen Dezimetern bis ca. 10 – 20 m bemerkbar. Aus der Analyse von Temperatur-Tiefen-Profilen kann somit auf Temperaturänderungen an der Erdoberfläche geschlossen werden. Solche Veränderungen werden durch Klimaänderungen hervorgerufen, können aber auch ortspezifische Effekte, wie zum Beispiel der Einfluss von Siedlungsdichte oder Rodung, verursacht sein.

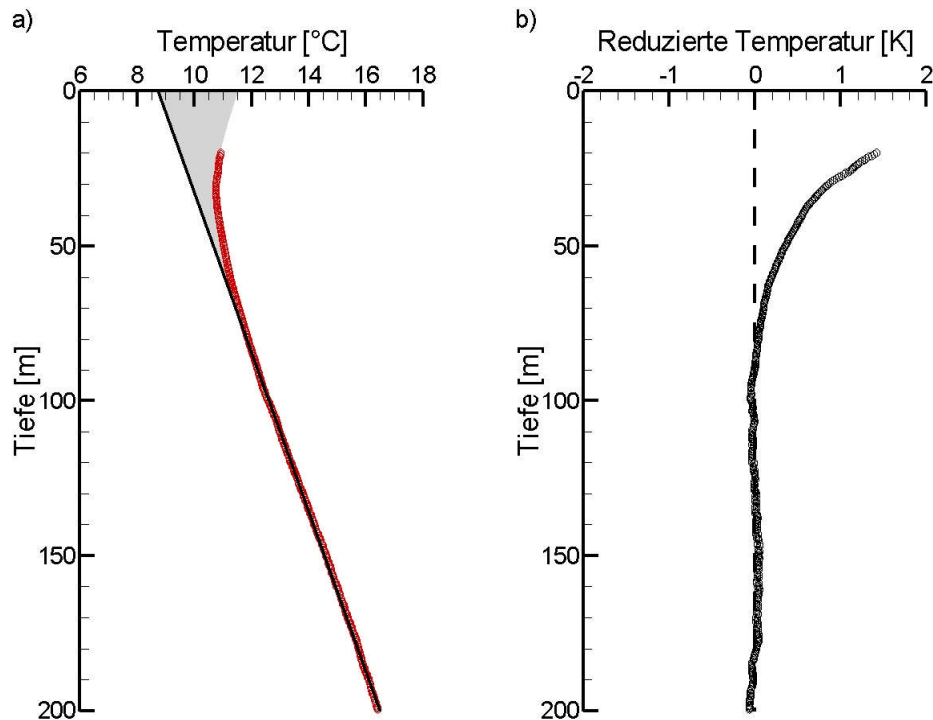
Änderungen der Oberflächentemperatur erzeugen eine Krümmung des meist linearen Temperaturverlaufes. Dadurch ist es möglich, aus den Bohrlochmessungen die Temperaturänderungen zu extrahieren. Unterhalb von ca. 100 m nimmt die Temperatur oft mehr oder weniger linear zu. Extrapoliert man diesen Teil des Logs bis zur Terrainoberfläche erhält man einen linearen Temperaturverlauf im Untergrund (3), der dem theoretisch erwarteten Verlauf entspricht, mit einer mittleren Jahrestemperatur T_0' vor einer Oberflächentemperaturänderung:

$$T'(z) = T_0' + \text{grad } T_{\text{mittel}} \quad (3)$$

Aus der Differenz dem gemessenen Temperaturverlauf $T(z)$ und theoretischen $T'(z)$ berechnet sich die sogenannte reduzierte Temperatur T_{red} , (4) wodurch Temperaturänderungen sichtbar gemacht werden können, welche auf transiente Effekte, wie die Klimaänderung, zurückzuführen sind.:

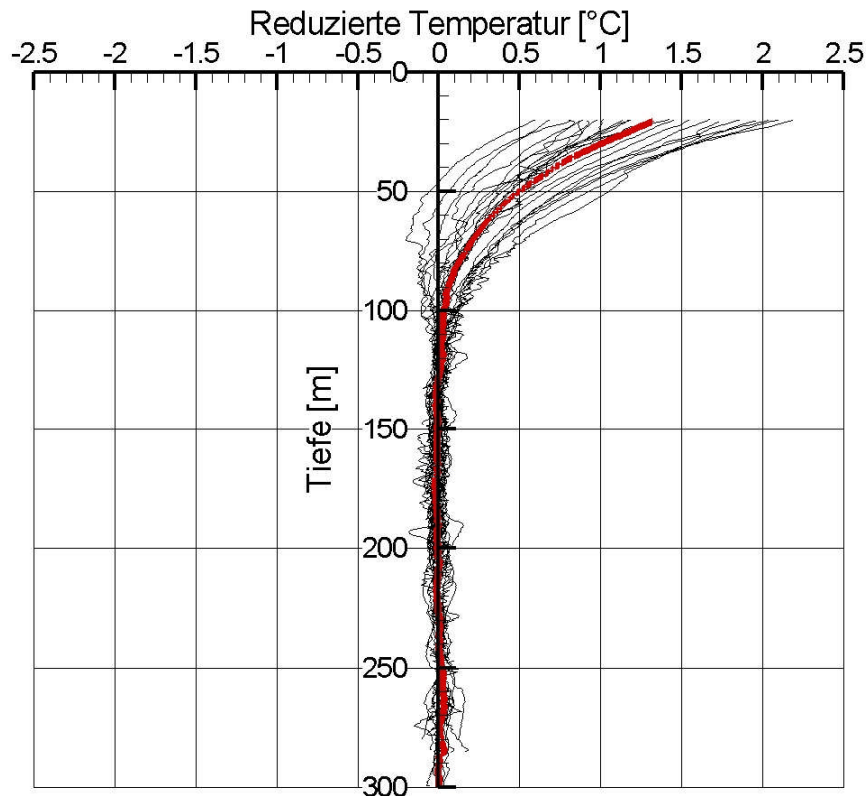
$$T_{\text{red}} = T(z) - T'(z) \quad (4)$$

Das Vorgehen ist exemplarisch in Figur 41 dargestellt. Die roten Kreise in Figur 41 a) zeigen die Messungen in der Bohrung Dielsdorf. Um transiente Tages- und Jahreseffekte, die möglicherweise die Bestimmung des linearen Gradienten beeinflussen, zu eliminieren, werden die Messungen in den ersten 20 m nicht verwendet. Die schwarze Linie zeigt den linearen Temperaturgradienten, berechnet aus den Messungen unterhalb von 100 m. Figur 41 b) zeigt die reduzierte Temperatur entlang der Bohrung. Diese wird berechnet indem der lineare Trend vom gemessenen Temperaturprofil abgezogen wird und so nur der Effekt von Oberflächentemperaturänderungen übrig bleibt. Dies wird für alle Bohrungen durchgeführt, wobei Bohrungen, die eindeutig den Einfluss von Wasserzirkulation zeigen (Figuren 16, 35 und 40), nicht verwendet wurden.



Figur 41: Exemplarisches Vorgehen zur Bestimmung der reduzierten Temperatur anhand der Messungen in der Bohrung Dielsdorf. a) Die roten Kreise zeigen die Messungen, in schwarz ist der lineare Gradient dargestellt. b) zeigt die reduzierte Temperatur, wenn der lineare Trend vom gemessenen Temperaturprofil abgezogen wird.

Figur 42 zeigt die reduzierten Temperaturen für die ausgemessenen Bohrungen. Die kleinen Schwankungen der reduzierten Temperatur sind auf die inhomogene Verteilung der Wärmeleitfähigkeit entlang der Bohrungen zurückzuführen. Der einheitliche Verlauf der reduzierten Temperatur unterhalb von 100 m, rechtfertigt die Gradientenbildung jeweils mit den Messungen ab 100 m. Die berechneten Temperaturgradienten variieren zwischen 2.5 K und 4.1 K pro 100 m. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Bohrungen eine positive reduzierte Temperatur in den obersten 100 m zeigen. Dies deutet auf eine Erwärmung an allen Standorten hin. Extrapoliert man die reduzierten Temperaturen bis zur Oberfläche, ergeben sich Erwärmungen von ca. 1 bis über 2.5 K. Die rote Kurve in Figur 42 repräsentiert den Verlauf der mittleren reduzierten Temperatur aller Bohrungen und weist auf eine Temperaturänderung von um die 2 K seit den letzten rund 300 Jahren hin. Wie oben erwähnt, können in diesen Änderungen neben Klima- auch ortspezifische Effekte beinhaltet sein. Die Analyse der Standorte zeigt keinen eindeutigen Zusammenhang zur Siedlungsdichte. Tendenziell scheint aber die Erwärmung im dichtbesiedelten Gebiet um den Unteren Zürichsee eher höher zu sein als im Durchschnitt.



Figur 42: Reduzierte Temperaturprofile aller Bohrungen. Die rote Linie stellt das mittlere reduzierte Temperaturprofil aller Bohrungen dar.

2.3 Kartierung der Temperaturverhältnisse im Untergrund und Interpretation

Die durchgeführten Messungen in den Bohrungen liefern an einzelnen Standorten den Temperaturverlauf bis in maximal 320 m Tiefe unter Terrain. Diese punktuellen Temperaturwerte werden durch lineare Interpolation flächenhaft auf das gesamte Untersuchungsgebiet interpoliert. Die lineare Interpolation ermöglicht die Vorhersage der Werte zwischen den Stützstellen der bereits erfassten Daten, basierend auf dem mathematisch einfachen Ansatz der Verbindung benachbarter Punkte durch Geraden (Lineare Funktionen). Die Lineare Interpolation eignet sich in der Regel um so besser, je genauer die Stützpunkte ermittelt werden können und je dichter die Stützstellen beieinander liegen. Die Stützpunkte selbst müssen keine lineare Tendenz aufweisen.

Die lineare Interpolation wird hier mit der Software Tecplot auf ein Raster von 250 x 250 m durchgeführt. Die Bohrungen in St. Gallen (1 und 2) werden für die Interpolation aufgrund der grossen Distanz zu den anderen Bohrungen nicht verwendet. Ebenfalls nicht für die Interpolation betrachtet werden die Bohrungen 5 und 24, wegen starker Wasserzirkulation im Bohrloch und 23 wegen Datenverlust bei der Temperaturmessung.

Temperaturkarten werden für die Tiefen 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m und 300 m unter Terrain berechnet. Da nicht alle Bohrungen bis in eine Tiefe von 300 m abgeteuft wurden, nimmt die Informationsdichte mit der Tiefe ab. Für den Tiefenbereich 50 bis 200 m standen 28, für die Tiefe 250 m 26 und für die Tiefe 300 m 17 Werte zur Verfügung. Für die Tiefen 250 m und 300 m wird das Temperaturprofil der Bohrungen, die nicht bis in diese Tiefe reichen, mittels dem jeweiligen linearen Temperaturgradienten bis 300 m verlängert. So

werden virtuelle Stützwerte gebildet, wo Bohrungen wegfallen, und dadurch wird eine mit der Tiefe konsistente Temperaturkartierung gewährleistet.

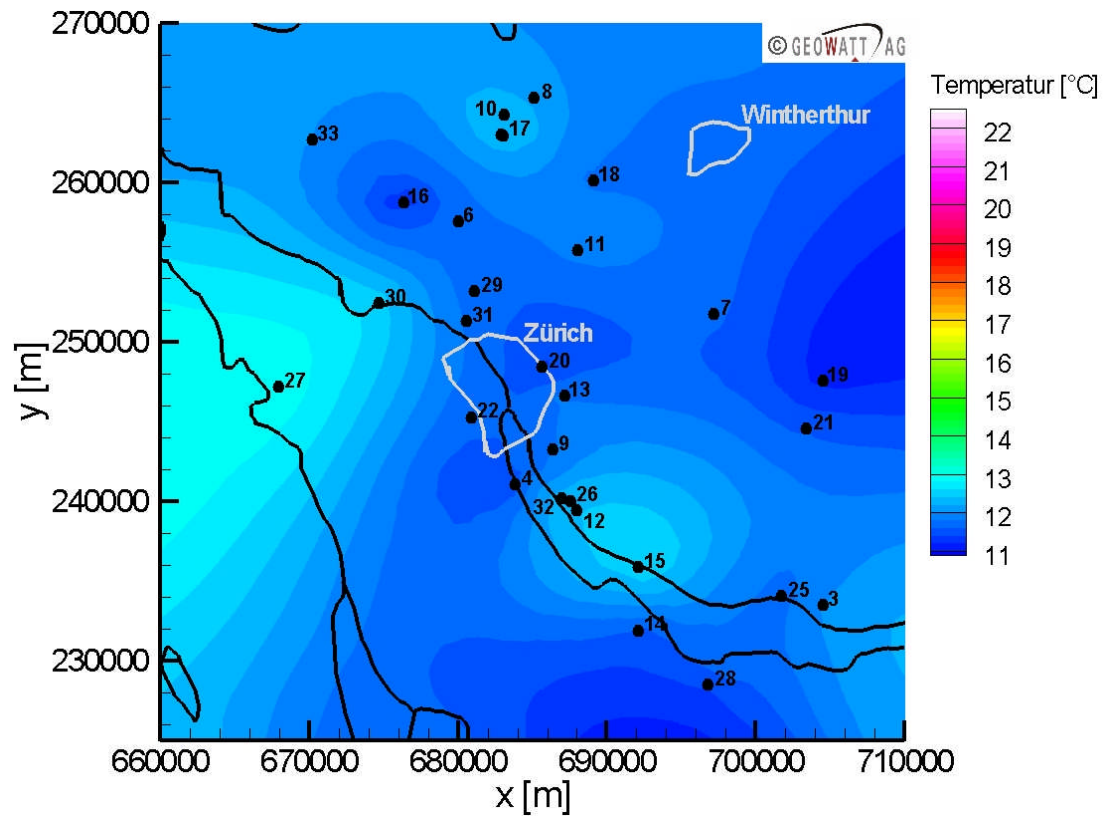
Die Temperaturkartierungen für die verschiedenen Tiefenbereiche sind in den Figuren 43 bis 47 dargestellt. Die verwendeten Bohrungen sind jeweils als Punkte eingezeichnet. In der Tiefe von 50 m sind Temperaturen zwischen 11 bis über 13 °C zu erwarten. Bis in eine Tiefe von 300 m steigen die Temperaturen auf 18 bis 22.5 °C an. Die am weitesten entfernten Bohrung liegen ca. 50 km auseinander. Die höchsten Temperaturen treten jeweils im Nordwesten des Untersuchungsgebietes auf. Gegen Südosten ist die Temperatur im Untergrund tendenziell tiefer als in den anderen Gebieten gleicher Tiefe.

Es ist zu bemerken, dass die vorhandene Datenmenge keine detaillierte, lokale Bestimmung der Temperaturverteilung im Untergrund zulässt. Je grösser die Distanz zwischen den Bohrungen ist, desto unsicherer sind die Ergebnisse der Interpolation. Die hier gezeigte Kartierung kann nur den grossräumigen, regionalen Trend der Temperaturverhältnisse wiedergeben. Lokal können Abweichungen zu den hier gezeigten Temperaturen auftreten.

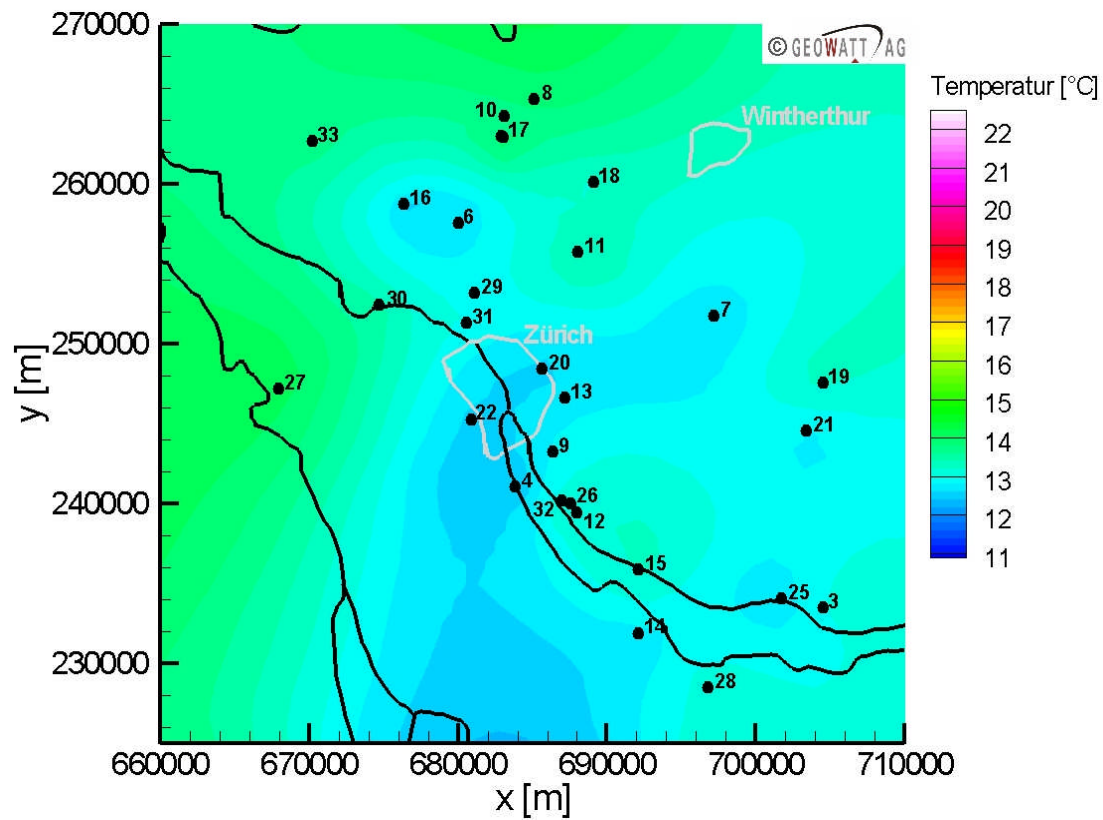
Tabelle 4: Temperaturwerte in verschiedenen Tiefen (Grundlage für die Kartierung der Temperaturen in verschiedenen Tiefen)

Nr	Name	Sondentiefe	T ₅₀ [°C]	T ₁₀₀ [°C]	T ₁₅₀ [°C]	T ₂₀₀ [°C]	T ₂₅₀ [°C]	T ₃₀₀ [°C]	Bemerkung
1	St. Gallen Wartest.	325	10.84	11.99	13.25	14.68	16.26	17.66	
2	St. Gallen Nokt.	250	11.01	12.14	13.41	14.87			
3	Jona	290	12.06	13.01	14.23	15.63	16.86	18.25	
4	Kilchberg	275	11.40	12.37	13.74	15.22	16.80	18.25	
5	Stadel	270	11.64	12.01	13.11	14.73	17.06		gestört
6	Oberhasli	290	11.68	12.60	14.30	15.74	17.16	18.75	
7	Illnau	320	11.68	12.61	14.30	15.74	17.16	19.80	
8	Rorbas	280	12.13	13.94	15.64	17.41	19.16	21.00	
9	Zollikon	250	11.77	12.81	14.33	15.90	17.62		
10	Bülach Unterweg	275	12.37	13.56	15.36	17.39	19.36	21.30	
11	Kloten	250	11.90	13.41	15.28	17.18	18.81		
12	Erlenbachh Laubholz	300	12.37	13.11	14.53	16.11	17.62	19.21	
13	Zürich-Witikon	275	11.87	12.74	14.18	15.86	17.33	18.90	
14	Wädenswil	300	11.53	12.70	14.24	15.93	17.47	18.96	
15	Meilen	278	12.59	13.25	14.62	16.15	17.56	18.85	
16	Dielsdorf	200	11.03	12.57	14.61	16.43			
17	Bülach Wisental S-11	294	12.41	13.96	16.00	18.10	20.10	22.10	
18	Oberembrach	320	11.77	13.18	14.95	16.33	18.03	19.55	
19	Hittnau	300	11.08	13.26	14.98	16.56	18.24	19.80	
20	Zürich FIFA	275	11.32	12.49	14.18	15.69	17.25		
21	Auslikon	298	11.60	12.76	14.25	15.79	17.50	19.03	
22	Altstetten	280	11.66	12.53	14.22	16.00	17.80		
23	Esslingen	270	Datenverlust						
24	Benken	169	13.75	15.25	16.12				gestört
25	Hombrechtikon	300	11.70	12.60	13.92	15.25			
26	Erlenbach Lerchenberg	295	12.21	13.18	14.72	16.43	17.96	19.40	
27	Eggenwil	275	12.92	14.11	15.64	17.26	18.94		
28	Wollerau	270	11.34	13.10	14.67	16.00	17.47		
29	Neuaffoltern	240	11.63	12.93	14.49	16.02	17.65		
30	Weiningen	279	12.55	13.43	14.99	16.69	18.44	20.30	
31	ETH-Hönnigerberg	250	11.75	13.00	14.70	16.30	17.90		
32	Erlenbach Seestr.	248	12.44	13.17	14.46	15.80	17.30		
33	Niederweningen	275	12.01	13.67	15.07	17.46	20.10	22.30	

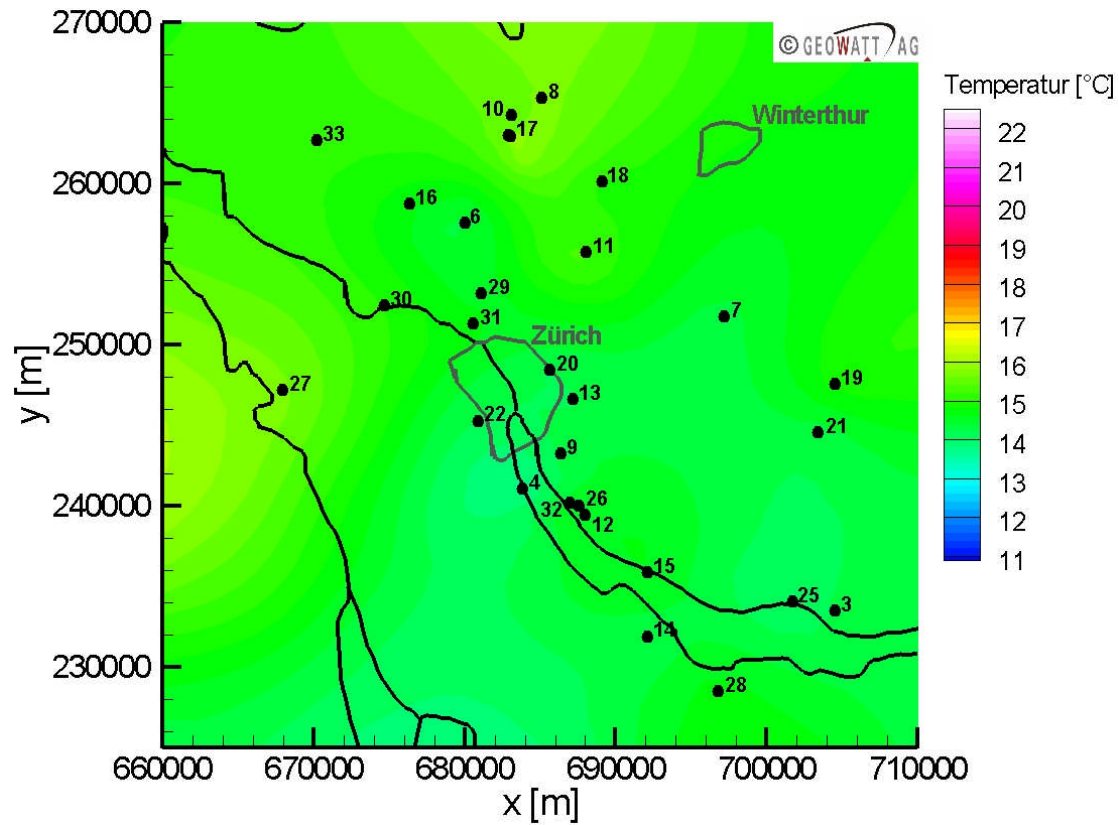
Legende: Nr. Nummerierung der Bohrungen (Tabelle A-1), T₅₀ = Temperatur in 50 m Tiefe, rote Zahlen = extrapolierte Temperaturwerte (aus Temperaturlog)



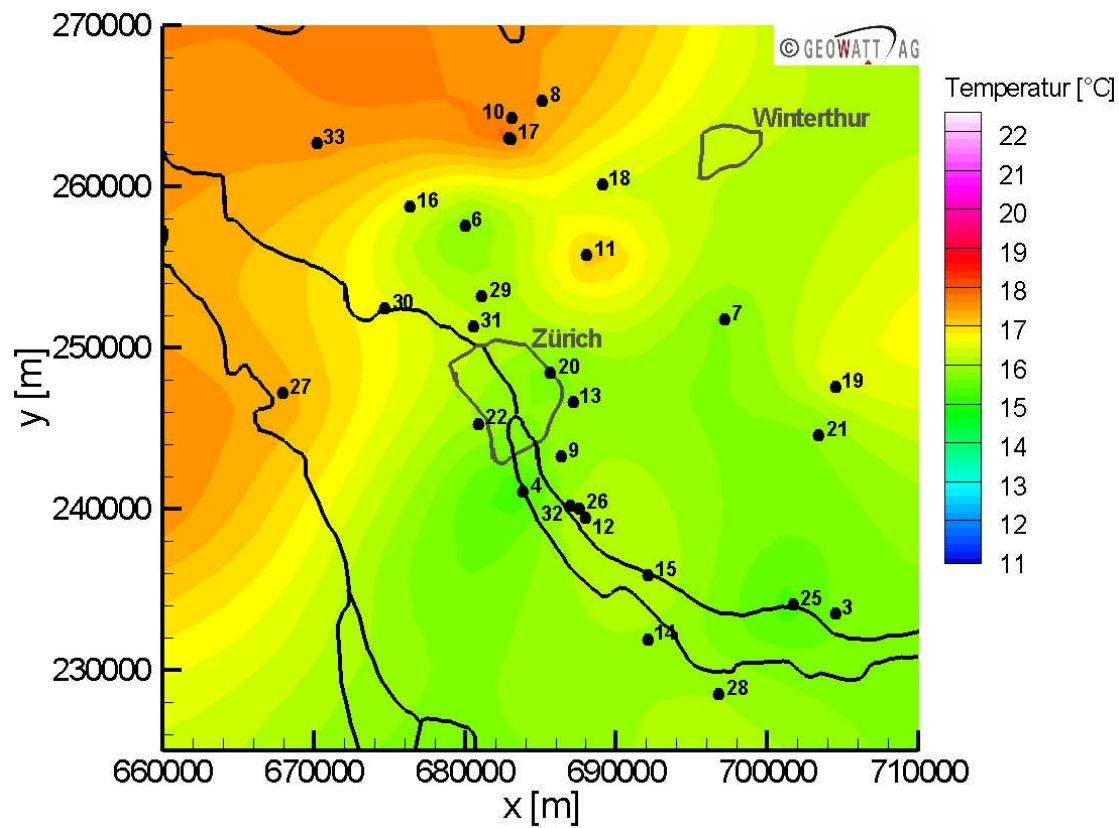
Figur 43: Temperaturen in 50 m Tiefe



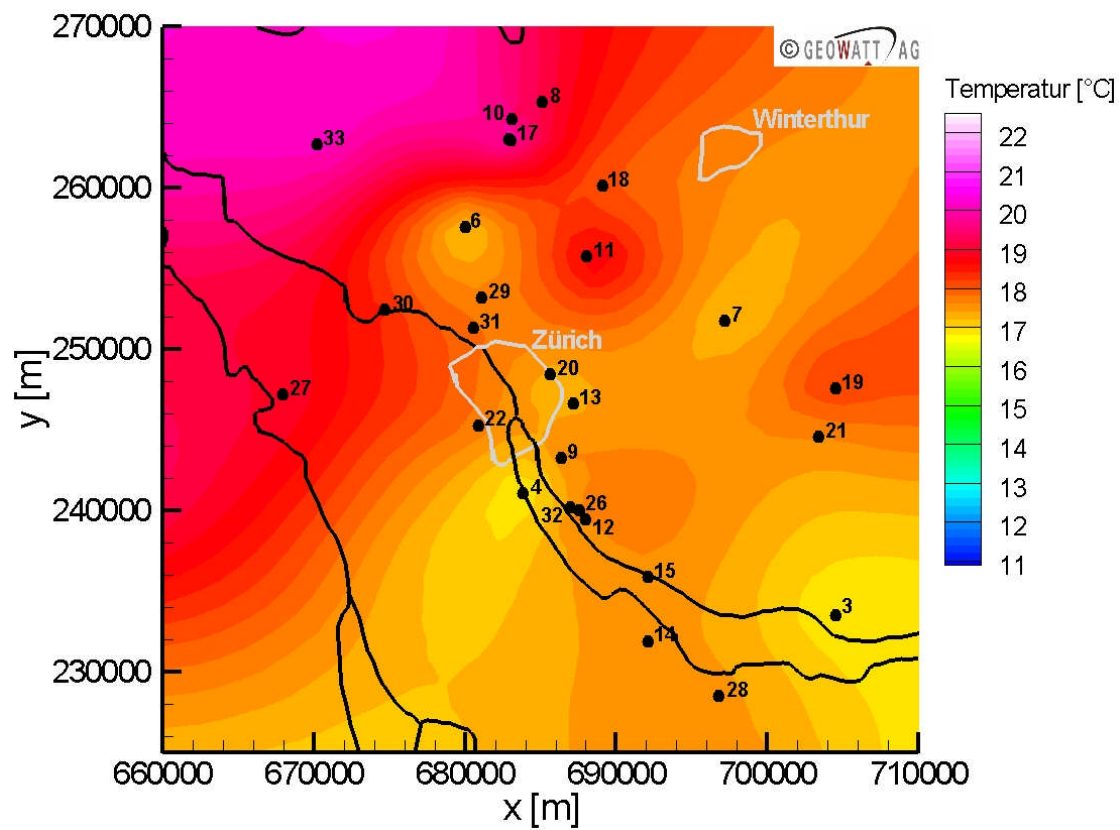
Figur 44: Temperaturen in 100 m Tiefe



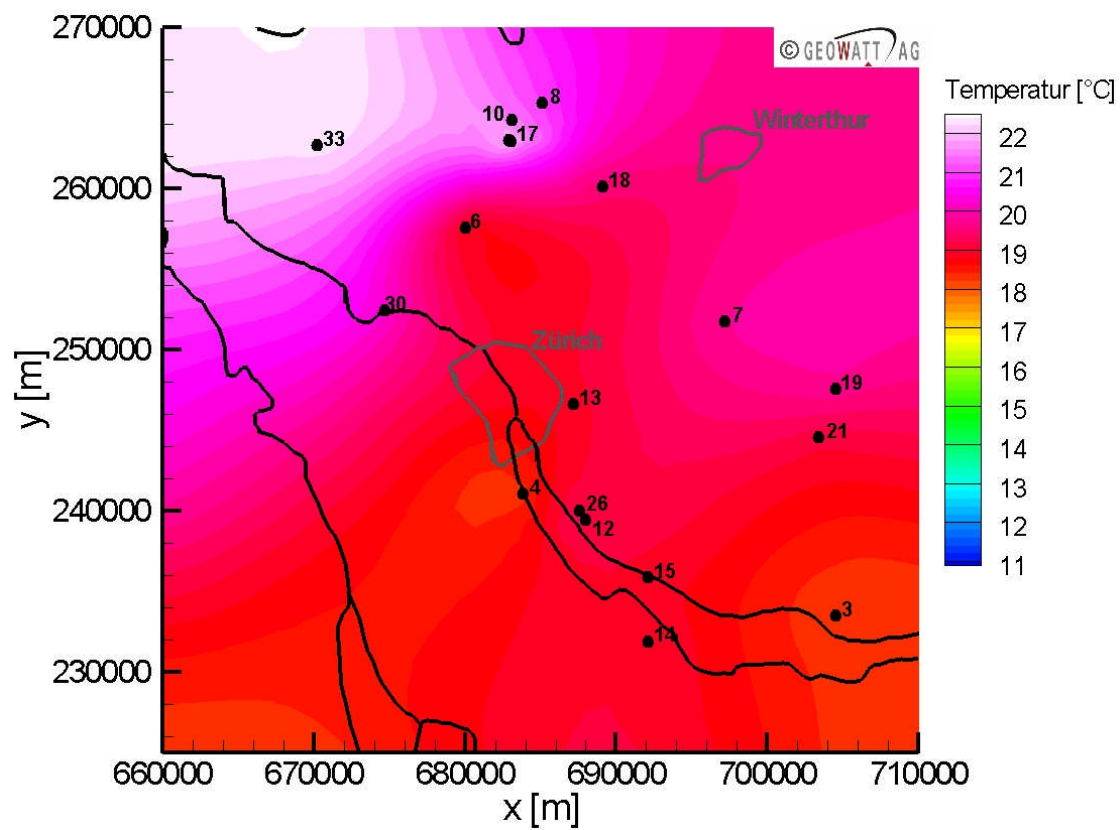
Figur 45: Temperaturen in 150 m Tiefe



Figur 46: Temperaturen in 200 m Tiefe



Figur 47: Temperaturen in 250 m Tiefe



Figur 48: Temperaturen in 300 m Tiefe

3 THERMISCHE LABORMESSUNGEN UND WÄRMEFLUSS-BESTIMMUNG

Mit den ermittelten Temperaturgradienten $\text{grad}T_i$ und den im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten λ_i kann der vertikale Wärmefluss $q_{z,i}$ nach Formel (5) bestimmt werden.

$$q_{z,i} = \lambda_i \cdot \text{grad}T_i \quad (5)$$

i: Gradientenabschnitt i (Tiefenbereich zwischen z_i und z_{i+1})

Pro Bohrungen wurden 2 bis 4 Bestimmungen in verschiedenen Tiefenbereichen gemacht, in welchen folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

- linearer Gradientenabschnitt mit rein konduktiver Wärmeübertragung und unterhalb des Einflussbereiches des Klimas (> 80 m)
- lithologisch homogene Gesteinschicht, wenn möglich Sandstein

Die Messungen im Labor sollen möglichst gut die in-situ Bedingungen der Gesteine simulieren. Es wurde von 100% wassergesättigtem Gestein ausgegangen. Der Wassergehalt wurde durch Bestimmung der Porosität an den Cuttings berechnet. Da die Cuttings gegenüber dem festen, nicht zerbrochenen Gesteinen ‚gestört‘ sind, wurden Vergleichsmessungen der Porosität zwischen ‚ungestörten‘ Bohrkernen bez. Handstücken und ‚gestörten‘ Cuttings gemacht (Tabelle 6, Tabellen B-1, C-1, C-2). Damit wird die Messmethode an Cuttings anhand der Werte von festem Gestein kalibriert.

Mit den basierend auf den Temperaturmessungen bestimmten Temperaturgradienten kann mittels Wärmeleitfähigkeitsmessungen der Wärmefluss entlang einer Bohrung bestimmt werden. In diesem Kapitel wird die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten an Bohrproben im Labor beschrieben und die daraus bestimmten Wärmeflüsse diskutiert.

Ziel der Messungen ist in erster Linie die Ausarbeitung einer zuverlässigen Messmethode für die Wärmeleitfähigkeit und damit verbunden für die Porosität an Cuttings und in zweiter Linie für eine indirekte Bestimmung eines Wärmeleitfähigkeit-Tiefenprofils mit dem berechneten Wärmefluss und den Temperaturgradienten in einer Bohrung.

3.1 Petrophysikalische Vergleichsmessungen

Für den Vergleich ‚Bohrkerne – Cuttings‘ wurden an 20 Gesteinsproben aus der mittelländischen Molasse Wärmeleitfähigkeits-, Dichte- und Porositätsmessungen an Bohrkernen/Handstücken und den daraus gebrochenen Cuttings von Dr. U. Schärli Geologie + Geophysik im Geothermik-Labor des Instituts für Geophysik an der ETH Zürich durchgeführt. Die Messergebnisse sind in der Tabelle B-1, C-1 und C-2 dargestellt. Bei der Mergel-Probe B 4/3 konnte kein vollständiger Datensatz gemessen werden, da die Probe z.T. zerbrach.

3.1.1 Wärmeleitfähigkeit

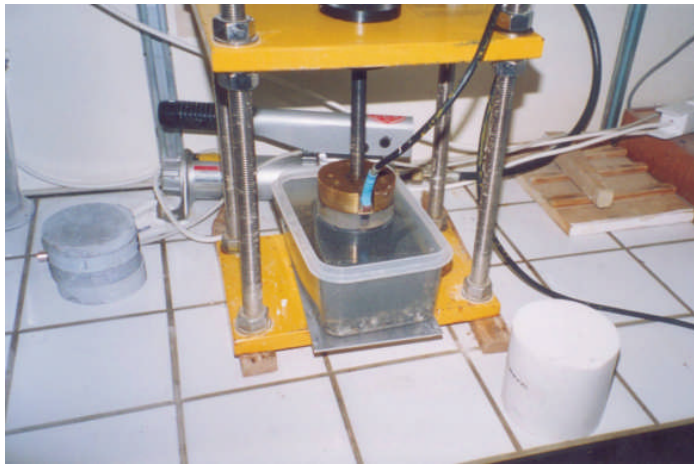
3.1.1.1 Messmethode für feste Gesteine

Die zubereiteten Gesteinsproben wurden mit dem TK04-Messgerät bei Raumtemperatur (18 – 22°C) gemessen. Das Gerät misst die Wärmeleitfähigkeit λ mit einer Linienquelle (Heizdraht) nach der instationären Methode. Die Linienquelle liegt an der Unterseite eines Plexiglaszylinders (Figur 49). Dieser wird mit 10 bis 15 bar auf die trockene ($\rightarrow\lambda_t$) oder - unter Wasser liegende ($\rightarrow\lambda_f$) - eben geschliffene Fläche der Gesteinsprobe gedrückt und während 80 sec mit ca. 4-6 W/m beheizt (q). Mit dieser sog. Halbraum-Sonde (HLQ) liegt die Linienquelle an der Grenze zweier Halbräume (Gestein und Messsonde). Die während der Messung produzierte Wärme wird praktisch vollständig ans Gestein abgegeben, da die Wärmeleitfähigkeit des Plexiglases ($\lambda = 0.16 \text{ W/m, K}$) gegenüber derjenigen des Gesteins (3 bis 5 W/m,K) vernachlässigbar klein ist. Ein Thermistor in der Mitte des Heizdrahtes

registriert die Temperatur $T(t)$ an der Oberfläche des Gesteins. Die Wärme dringt mehrere Millimeter in das Gestein ein. Aus dem Anstieg der Temperatur wird die Wärmeleitfähigkeit nach Formel (6) berechnet.

$$T(t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln(t) \quad (6)$$

Dabei wird jede Messung durch die Software TKSAM auf verschiedene vorgegebene Kriterien geprüft (Schärli, 2001). Diese können auch mit dem Programm TKGRAPH graphisch angesehen und beurteilt werden. Es werden mehrere Messungen an verschiedenen Punkten der Gesteinsprobe durchgeführt, um die Inhomogenität, welche durch verschiedene Minerale mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten verursacht werden kann, repräsentativ zu erfassen.



Figur 49 : Wärmeleitfähigkeitsmessung eines wassergesättigten Bohrkerns

3.1.1.2 Messmethode für Cuttings

Für die Wärmeleitfähigkeitsbestimmung an Cuttings wurde die gleiche Messsonde (TK04) wie für feste Gesteine benutzt (Leu, 1999). Bei den Cuttings wurde vorerst ein künstlich hergestelltes Gemisch von trockenen Gesteinsfragmenten mit dem Gewicht m_m und Wasser mit dem Gewicht m_w gemessen ($\rightarrow \lambda_{gem}$). Aus der Formel (7) kann die Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix ($\rightarrow \lambda_m$) berechnet werden. Bei dieser Formel wird von einem Porenmodell ausgegangen, in welchem die Poren gleichmässig in der Gesteinsmatrix verteilt sind und mehr oder weniger sphärische Form haben.

$$\lambda_m = \lambda_{gem} \cdot \left(\frac{\lambda_{gem}}{\lambda_w} \right)^{\frac{m_w \cdot \rho_m}{m_m \cdot \rho_w}} \quad (7)$$

Dabei muss auch gemäss Formel (7) die Matrixdichte ρ_m durch eine separate Messung, d.h. Auftriebsmessung von wassergesättigten Cuttings im Wasserbad bestimmt werden. Für die Berechnung der in-situ Wärmeleitfähigkeit ist die Kenntnis der effektive Porosität ϕ_{eff} des Gesteins im ursprünglichen Zustand nötig.



Figur 50: Wärmeleitfähigkeitsmessung an einer Cutting-Probe

3.1.1.3 Probenvorbereitung

3.1.1.3.1 Feste Proben

Feste Proben wie Bohrkerne oder Gesteinshandstücke wurden zuerst mit einer Diamanttrennscheibe zersägt. Eine ebene Fläche des Gesteins wurde - falls nötig - noch mit Korundsand geschliffen. Für die Messung von trockenen Gesteinen wurden diese in einem Ofen bei 105°C während 24 h getrocknet. Zum Erreichen einer vollständigen Wassersättigung wurden die Proben ins Wasser getaucht und unter Vakuum während 24 h entgast. Nachher blieben die Proben bis zum Ende der Messungen immer im Wasserbad.

3.1.1.3.2 Cuttings

In den Erdwärmesondenbohrungen werden fast nur Bohrproben in Form von Cuttings gewonnen. Die Korngrösse dieser Cuttings liegt meistens zwischen 0.1 und etwa 10 mm. Bei den durchgeführten Vergleichsmessungen wurde ein Teil der Bohrkerne bez. Handstücke in einem Steinbrecher zu Gesteinsfragmenten von ca. 0.1 - 5 mm Grösse gebrochen. Ca. 400 g der Fragmente wurden anschliessend in einem Ofen bei 105°C während 6 h getrocknet, gewogen und dann in einem Messzylinder aus PVC mit Wasser gesättigt (Figur 50). Dann wird wie schon erwähnt λ_{gem} gemessen.

3.1.1.4 Messungen

3.1.1.4.1 Feste Gesteine

Pro Probe wurden 8 - 10 Messungen an verschiedenen Punkten der mindestens 7 x 10 cm grossen, eben geschliffenen Gesteinsoberfläche durchgeführt. Dabei wurde an einem Punkt auf dieser Fläche die Messsonde nach einer Messung um 90° gedreht um eine allfällige Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit zu erfassen.

Bei den Messungen an Cuttings wurden 2 Messungen in der gleichen Position gemacht, dann wurde die Sonde um 90°, manchmal um 45° gedreht und wieder 2 Messungen gemacht. Anschliessend wurde die Probe neu durchmischt und das gleiche Verfahren wiederholt.

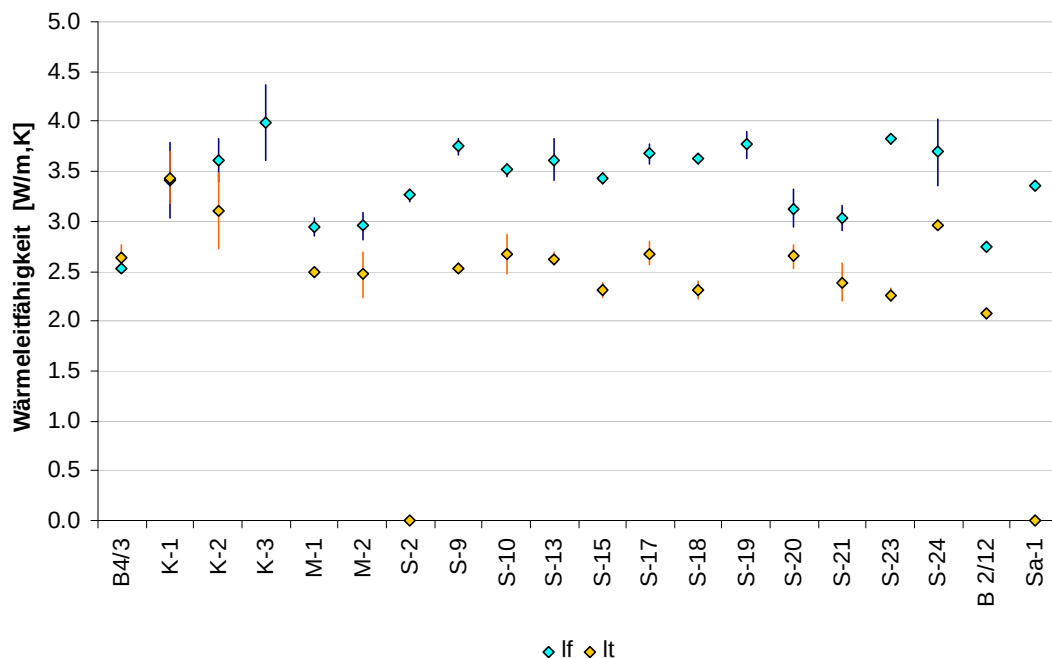
3.1.1.5 Messergebnisse

Die Messwerte der Proben sind in den Figuren 51 und 52 sowie in den Tabellen 5 sowie B-1 dargestellt.

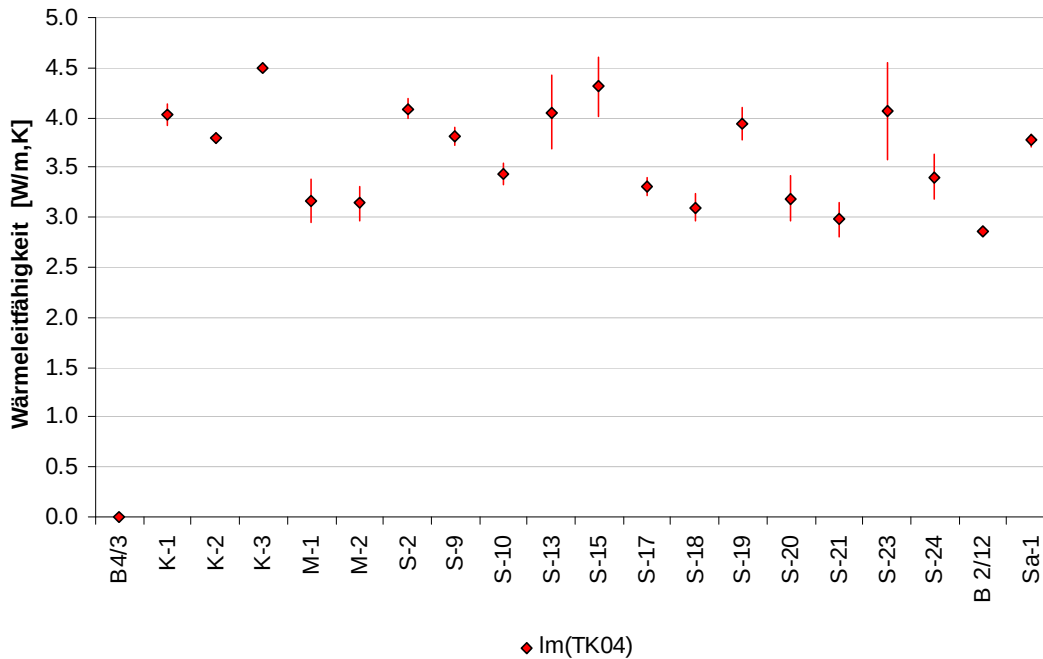
Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Bohrkernen/Handstücken und an aus diesen abgeleiteten Cuttings

Probe	Gesteinstyp	Geologie	Wärmeleitfähigkeit								
			Kerne/Handstücke						Cuttings		
			λ_f	$s\lambda_f$	$N\lambda_f$	λ_t	$s\lambda_t$	$N\lambda_t$	λ_m	$\Delta\lambda_m$	$N\lambda_m$
			[W/m,K]	[W/m,K]		[W/m,K]	[W/m,K]		[W/m,K]	[W/m,K]	
B4/3	Mergel	USM	2.53	0.02	4	2.64	0.13	7	$\lambda_{m(TK04)}$ ¹⁾		4
K-1	Konglomerat	OSM	3.41	0.37	9	3.44	0.27	7	4.03	0.12	5
K-2	Konglomerat	OSM	3.61	0.21	9	3.10	0.38	7	3.80	0.06	6
K-3	Konglomerat	OSM	3.99	0.38	10				4.50	0.03	2
M-1	Mergel	OSM	2.94	0.09	8	2.49	0.03	4	3.17	0.22	6
M-2	Mergel	OSM	2.95	0.14	7	2.46	0.23	7	3.14	0.16	4
S-2	Feinsandstein	OMM	3.26	0.07	8				4.09	0.10	4
S-9	Mittelsandstein	OMM	3.75	0.08	6	2.53	0.06	5	3.82	0.09	5
S-10	Feinsandstein	OMM	3.52	0.06	6	2.67	0.19	4	3.44	0.11	6
S-13	Feinsandstein	OMM	3.62	0.20	7	2.62	0.07	5	4.05	0.37	8
S-15	Feinsandstein	OMM	3.43	0.06	8	2.30	0.07	8	4.31	0.30	7
S-17	Mittelsandstein	OMM	3.68	0.09	7	2.68	0.12	5	3.31	0.09	6
S-18	Mittelsandstein	OMM	3.63	0.05	10	2.31	0.09	6	3.10	0.14	6
S-19	Mittelsandstein	OMM	3.77	0.13	8				3.94	0.16	9
S-20	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	3.13	0.19	7	2.65	0.12	6	3.19	0.22	8
S-21	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	3.03	0.13	8	2.39	0.19	7	2.98	0.17	3
S-23	Mittelsandstein	OMM	3.82	0.05	9	2.26	0.07	5	4.06	0.48	5
S-24	Feinsandstein	OMM	3.69	0.33	7	2.96	0.04	5	3.40	0.22	7
B 2/12	Mergel (leicht anisotrop)	USM	2.74	0.05	7	2.08	0.14	2	2.86	0.03	5
Sa-1	Grobsandstein	OSM	3.35	0.22	6				3.77	0.06	4

Legende: λ = Wärmeleitfähigkeit, m = Matrix, f = wassergesättigt, t = trocken, N = Anzahl Messungen pro Probe, s = Standardabweichung, Δ = Messfehler



Figur 51: Wärmeleitfähigkeitswerte von Bohrkernen/Handstücken, If= λ_f und It= λ_t



Figur 52: Matrixwärmeleitfähigkeit an Cuttings (zerkleinerte Bohrkern/Handstücken), $\lambda_m = \lambda_m$

Die Wärmeleitfähigkeiten der wassergesättigten festen Proben liegen zwischen 2.9 und 3.8 W/m,K und sind deutlich höher als diejenigen von trockenen Proben (2.3 – 3.4 W/m,K). Eine Ausnahme bildet die Mergel-Probe B4/3. Für die in-situ Verhältnisse wird mit Wassersättigung gerechnet. Die nach Formel 4 ermittelten Matrixwärmeleitfähigkeiten liegen zwischen 2.9 und 4.5 W/m,K. Diese Werte werden zusammen mit dem ermittelten Wassergehalt bez. der Porosität nach Formel 11 an die in-situ Verhältnisse angepasst.

3.1.2 Dichte- und Porositätsbestimmung

3.1.2.1 Messmethode

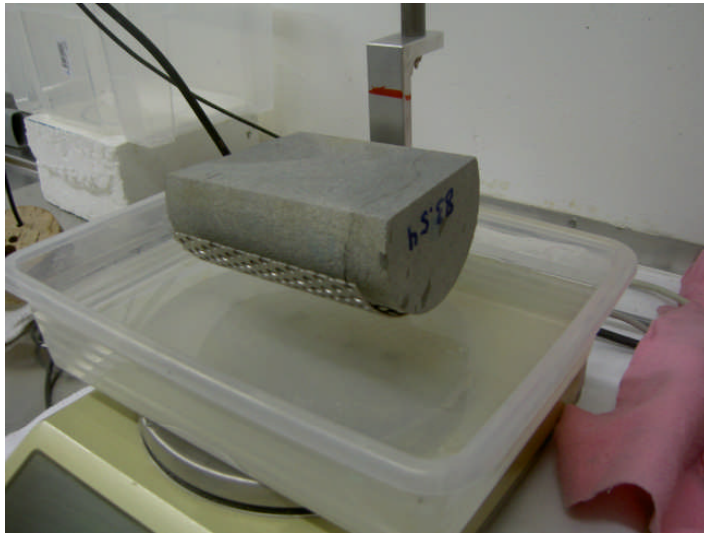
3.1.2.1.1 Feste Gesteine

Die Dichte ρ_m und die Porosität ϕ der Gesteine müssen für die Berechnung der in-situ Wärmeleitfähigkeit bekannt sein. Deshalb wurden Messungen an Bohrkernen/Handstücken und aus diesen abgeleiteten Cuttings mit der gleichen Messmethode durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Die Messmethode funktioniert nach dem Prinzip von Archimedes und besteht aus 3 Messungen: Wägen der trockenen Probe (G_t), Wägen der wassergesättigten Probe (G_f) und Wägen des Auftriebs (A) der wassergesättigten Probe im Wasserbad. Mit dieser Methode werden die Trockendichte ρ_t , Feuchtraumdichte ρ_f , die Matrixdichte ρ_m (Formel 8) sowie die effektive (kommunizierende) Porosität ϕ (Formel 9) bestimmt. Zuerst wird die Gesteinsprobe (Bohrkern/Handstück oder Cuttings) im Wasser unter Vakuum während 24 Stunden entgast. Cutting-Proben brauchen nur ca. 6 Stunden.

$$\rho_m = \frac{G_t \cdot \rho_w}{A - (G_f - G_t)} \quad (8) \quad \phi_F = \frac{G_f - G_t}{A} \quad (9)$$

Die festen Gesteine wie Bohrkern oder Handstücke werden mit einem saugfähigen Tuch abgetrocknet um überschüssiges Wasser von der Gesteinsoberfläche zu entfernen, gewogen und dann in einem speziell konstruierten Lochbleches (Figur 53), welches starr mit einem Stativ verbunden ist vollständig in ein auf einer Waage stehendes Wasserbad nach vorgängiger Tarierung eingetaucht. Das Gewicht der Probe und des Siebes wird durch ein mit diesem starr verbundenen Gestänge über dem Wasserbad gehalten. So wird der Auftrieb A bez. das totale Volumen V_{tot} der Probe gemessen. Nachher wird die Probe in

einem Ofen bei 105°C während mindestens 24 h getrocknet und nach Abkühlung gewogen (G_t).



Figur 53: Auftriebswägung eines Bohrkerns im Wasserbad

3.1.2.1.2 Cuttings

Beim Messen der Cuttings wird zuerst der Feinanteil ($d < 2 \text{ mm}$) mit einem entsprechenden Sieb abgetrennt. Die verbleibenden Körner werden wie oben erwähnt mit Wasser gesättigt. Dann werden sie in einem saugfähigen Papier soweit abgetrocknet (Figur 55), bis dieses nicht mehr feucht wird. Anschliessend werden die Cuttings gewogen und dann der Auftrieb von diesen gemessen, indem man die Körner in einen Aluminiumbecher schüttet, welcher von einem Stativ gehalten in einem Wasserbad hängt (Figur 54). Vor dem Einbringen der Gesteinsstücke wird die Waage tariert.



Figur 54: Wägen des Auftriebs von Cuttings



Figur 55: Abtrocknen der feuchten Cuttings

Aus der Messung resultiert die scheinbare Porosität ϕ_c nach Formel 10.

$$\phi_c = \frac{G_f - G_t}{A} \quad (10)$$

Die scheinbare Porosität ϕ_c wird dann mit ϕ_F verglichen (siehe Kapitel 3.1.3).

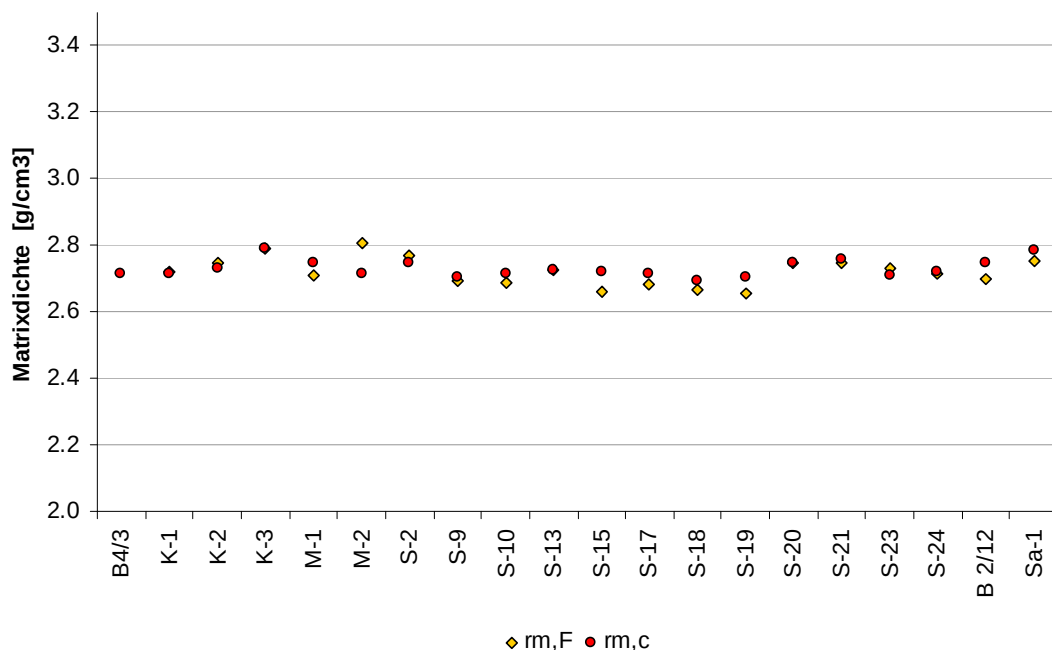
3.1.2.2 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen sind in der Tabelle 6, in den Figuren 56 und 57 und in den Tabellen B-1, C-1 und C-2 dargestellt..

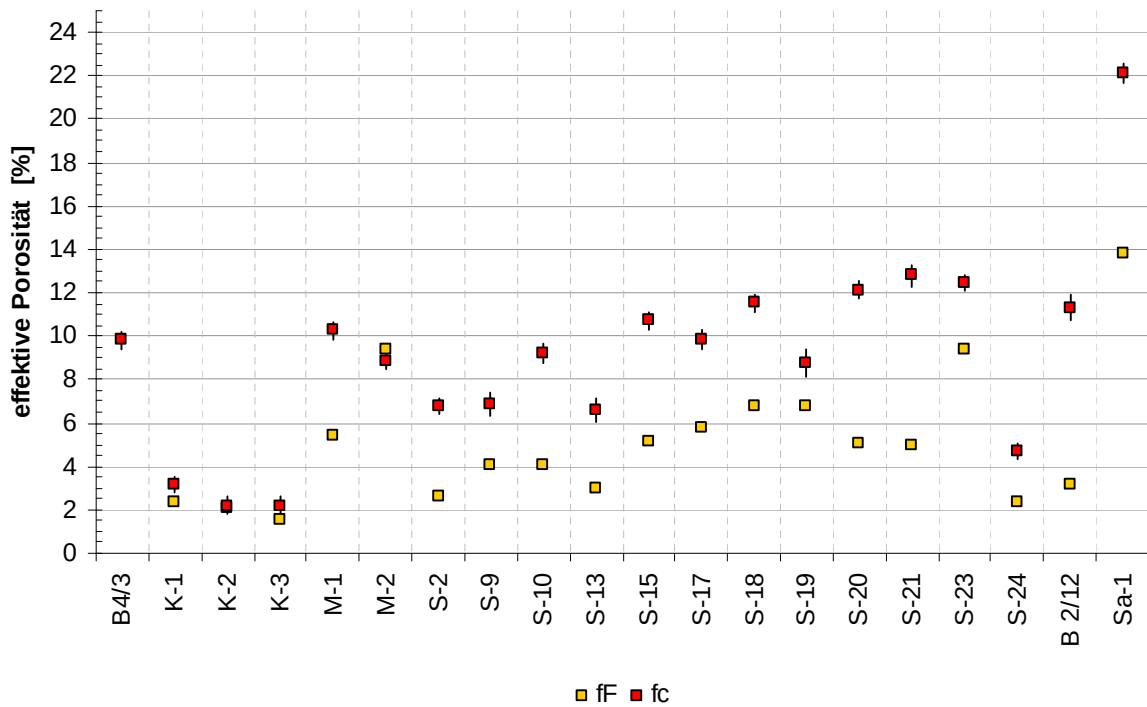
Tabelle 6: Dichte- und Porositätsmessungen an Bohrkernen/Handstücken und Cuttings

Probe	Gesteinstyp	Geologie	Porositäten/Dichte									
			Kerne/Handstücke				Cuttings					
			$\rho_{m,F}$	$\rho_{f,F}$	ϕ_F	$\Delta\phi_F$	$\rho_{m,c}$	ρ_f	ϕ_c	$\phi_{c,korr}$	$\Delta\phi_c$	
			[cm ³ /g]	[cm ³ /g]	[cm ³ /g]	[%]	[cm ³ /g]		[%]		[%]	
			$\rho_{m,F}$				$\rho_{m,c}$					
B4/3	Mergel	USM	1)				2.72	2.55	9.83	6.94	0.40	
K-1	Konglomerat	OSM	2.72	2.68	2.36	0.017	2.71	2.66	3.17	2.50	0.35	
K-2	Konglomerat	OSM	2.75	2.71	2.11	0.017	2.73	2.69	2.21	1.74	0.39	
K-3	Konglomerat	OSM	2.79	2.76	1.58	0.022	2.79	2.75	2.20	1.73	0.43	
M-1	Mergel	OSM	2.71	2.62	5.40	0.022	2.75	2.57	10.25	6.49	0.43	
M-2	Mergel	OSM	2.80	2.63	9.42	0.023	2.71	2.56	8.85	7.99	0.41	
S-2	Feinsandstein	OMM	2.77	2.72	2.63	0.039	2.75	2.63	6.79	3.08	0.35	
S-9	Mittelsandstein	OMM	2.69	2.62	4.04	0.042	2.70	2.58	6.86	3.91	0.55	
S-10	Feinsandstein	OMM	2.69	2.62	4.10	0.028	2.72	2.56	9.22	4.23	0.48	
S-13	Feinsandstein	OMM	2.73	2.67	3.01	0.024	2.73	2.67	6.56	2.97	0.52	
S-15	Feinsandstein	OMM	2.66	2.57	5.19	0.018	2.72	2.54	10.72	4.94	0.41	
S-17	Mittelsandstein	OMM	2.68	2.59	5.75	0.043	2.71	2.54	9.84	5.76	0.41	
S-18	Mittelsandstein	OMM	2.67	2.56	6.73	0.040	2.69	2.50	11.52	6.80	0.39	
S-19	Mittelsandstein	OMM	2.66	2.55	6.76	0.069	2.70	2.56	8.77	5.09	0.61	
S-20	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	2.75	2.66	5.03	0.076	2.75	2.51	12.11	5.61	0.40	
S-21	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	2.75	2.66	5.00	0.035	2.76	2.53	12.81	5.94	0.49	
S-23	Mittelsandstein	OMM	2.73	2.57	9.40	0.029	2.71	2.50	12.43	7.37	0.36	
S-24	Feinsandstein	OMM	2.71	2.67	2.36	0.046	2.72	2.64	4.67	2.07	0.37	
B 2/12	Mergel	USM	2.70	2.64	3.15	0.031	2.75	2.55	11.31	5.33	0.61	
Sa-1	Grobsandstein	OSM	2.75	2.51	13.85	0.023	2.78	2.39	22.10	13.38	0.49	

Legende: ρ = Dichte, m = Matrix, f = wassergesättigt, F = Bohrkern/Handstück; c = Cutting, ϕ = Porosität: ϕ_F = Porosität an Bohrkernen/Handstücken, ϕ_c = scheinbare Porosität der Cuttings, Δ = Fehler



Figur 56: Matrixdichte von Bohrkernen/Hanstücken (F) und Cuttings (c) (zerkleinerte Bohrkern/Handstücke), $rm = \rho_m$



Figur 57: effektive Porosität von Bohrkernen/Hanstücken (F) und Cuttings (c) (zerkleinerte Bohrkern/Hanstücke), ϕ_F = Effektive Porosität von Bohrkernen/Hanstücken, ϕ_c = scheinbare Porosität von Cuttings, schwarze Balken = Streuung der Messwerte (bei ϕ_F ist die Streuung so klein, dass sie nicht mehr erkennbar ist)

3.1.3 Vergleich der Messungen an festen Gesteinen und Cuttings

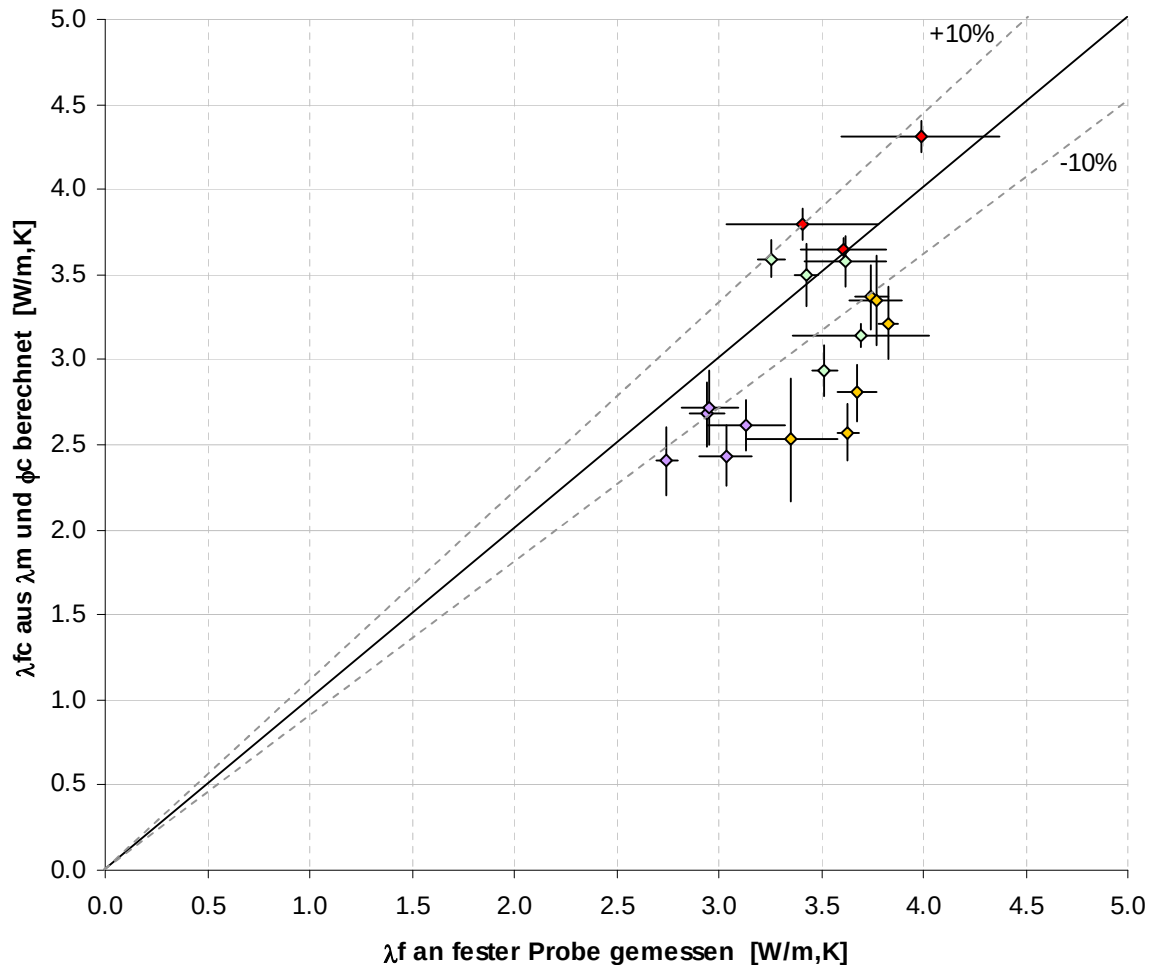
Es werden nun die Wärmeleitfähigkeitsmessungen an festen Gesteinen (Bohrkerne/Handstücke) und Cuttings verglichen (Tabelle 7, Figur 58). Dabei wird immer von wassergesättigten Gesteinsproben ausgegangen, da in-situ die Gesteine meistens mit Wasser gesättigt sind. An den festen wassergesättigten Proben kann die Wärmeleitfähigkeit direkt gemessen werden. Für die Cuttings muss die ‚in-situ‘ Wärmeleitfähigkeit aus der Wärmeleitfähigkeit des Matrixanteils und derjenigen des Wasseranteils nach Formel 11 zusammengesetzt werden.

$$\lambda_{f,c} = \lambda_m^{1-\phi} \cdot \lambda_w^{\phi} \quad (11)$$

Tabelle 7: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten an festen Gesteinen und Cuttings

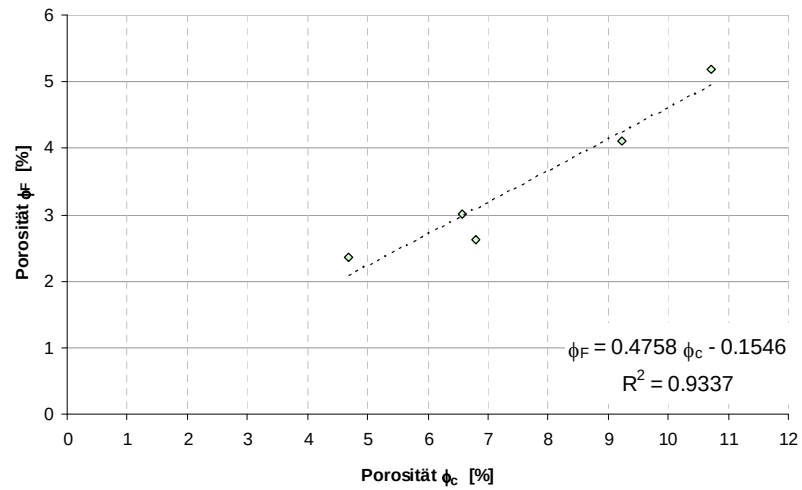
Probe	Gesteinstyp	Geologie	in situ					
			Cuttings				Kerne	
			λ_{ϕ_c}	$\Delta\lambda_{\phi_c}$	$\lambda_{\phi_c, \text{korrr}}$	$\Delta\lambda_{\phi_c, \text{korrr}}$	λ_f	$S\lambda_f$
			[W/m,K]	[W/m,K]	[W/m,K]	[W/m,K]	[W/m,K]	[W/m,K]
B4/3	Mergel	USM						
K-1	Konglomerat	OSM	3.80	0.09	3.75	0.09	3.41	0.37
K-2	Konglomerat	OSM	3.65	0.07	3.55	0.07	3.61	0.21
K-3	Konglomerat	OSM	4.31	0.09	4.13	0.08	3.99	0.38
M-1	Mergel	OSM	2.68	0.19	3.03	0.21	2.94	0.09
M-2	Mergel	OSM	2.72	0.22	3.00	0.24	2.95	0.14
S-2	Feinsandstein	OMM	3.60	0.10	3.82	0.11	3.26	0.07
S-9	Mittelsandstein	OMM	3.37	0.19	3.59	0.20	3.75	0.08
S-10	Feinsandstein	OMM	2.94	0.15	3.27	0.17	3.52	0.06
S-13	Feinsandstein	OMM	3.58	0.15	3.79	0.16	3.62	0.20
S-15	Feinsandstein	OMM	3.50	0.18	4.03	0.21	3.43	0.06
S-17	Mittelsandstein	OMM	2.81	0.17	3.16	0.19	3.68	0.09
S-18	Mittelsandstein	OMM	2.57	0.17	2.97	0.19	3.63	0.05
S-19	Mittelsandstein	OMM	3.35	0.27	3.70	0.29	3.77	0.13
S-20	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	2.62	0.15	3.06	0.17	3.13	0.19
S-21	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	2.44	0.18	2.87	0.21	3.03	0.13
S-23	Mittelsandstein	OMM	3.22	0.21	3.83	0.25	3.82	0.05
S-24	Feinsandstein	OMM	3.14	0.07	3.23	0.07	3.69	0.33
B 2/12	Mergel	USM	2.41	0.20	2.76	0.23	2.74	0.05
Sa-1	Grobsandstein	OSM	2.53	0.36	3.60	0.52	3.35	0.22

Legende: λ_{ϕ_c} = Wärmeleitfähigkeit mit scheinbarer Cutting-Porosität ϕ_c , $\lambda_{\phi_c, \text{korrr}}$ = Wärmeleitfähigkeit mit korrigierter Cutting-Porosität $\phi_{c, \text{korrr}}$ (siehe Figuren 59 – 62), λ_f = Wärmeleitfähigkeit von wassergesättigten Kernen/Handstücken

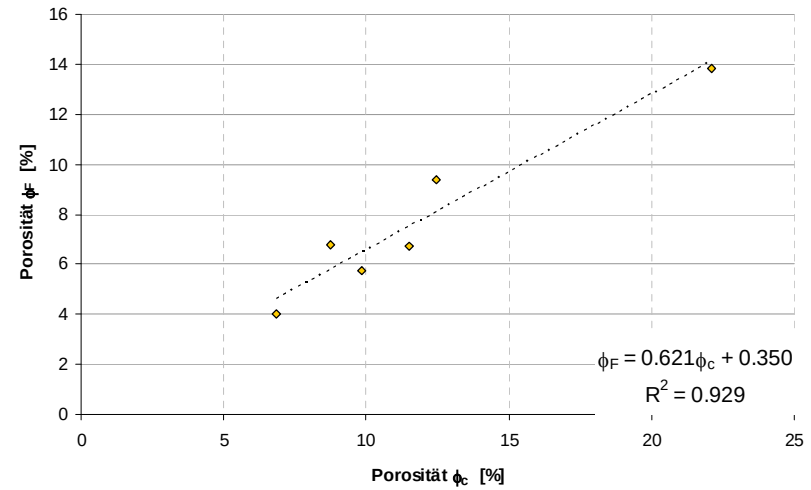


Figur 58: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von festen Gesteinen und Cuttings vor Korrektur der Porosität. Signaturen: lila = Mergel, grün = Feinsandstein, gold = Mittel- bis Grobsandstein, rot = Konglomerat.

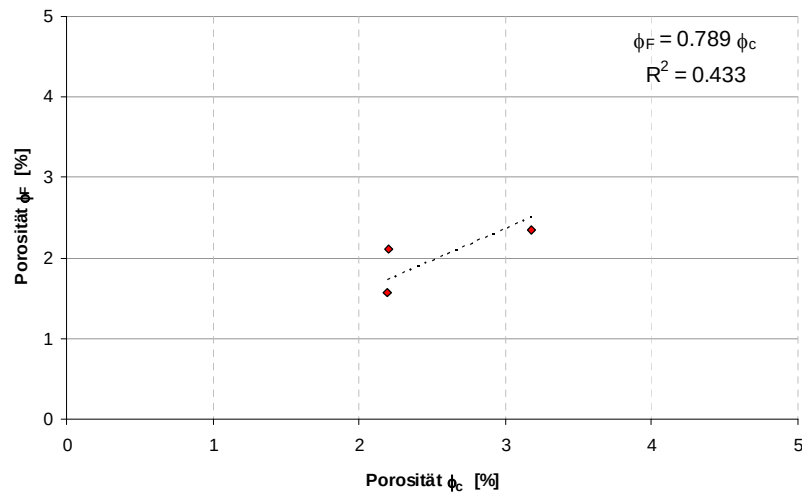
In der Figur 58 sieht man, dass die berechneten Wärmeleitfähigkeiten an Cuttings meistens tiefer liegen als diejenige der festen Gesteine (Mergel, Sandsteine). Der Fehler dafür liegt hauptsächlich bei der im Labor durchgeführten Porositätsbestimmung an Cuttings (Kap. 3.1.2). Die angewendete Messmethode im Labor ergibt eine scheinbare Porosität ϕ_c , welche deutlich höher ist als diejenige an festen, unzerbrochenen Gesteinen gemessene (Figur 57). Deshalb wurden die scheinbaren Porositäten an Cuttings für verschiedene Gesteinstypen wie Mergel, Feinsandstein, Mittel- und Grobsandstein sowie Konglomerat aufgrund der Diagramme in den Figuren 59 – 62 korrigiert und die in-situ Wärmeleitfähigkeit berechnet (Tabelle 7).



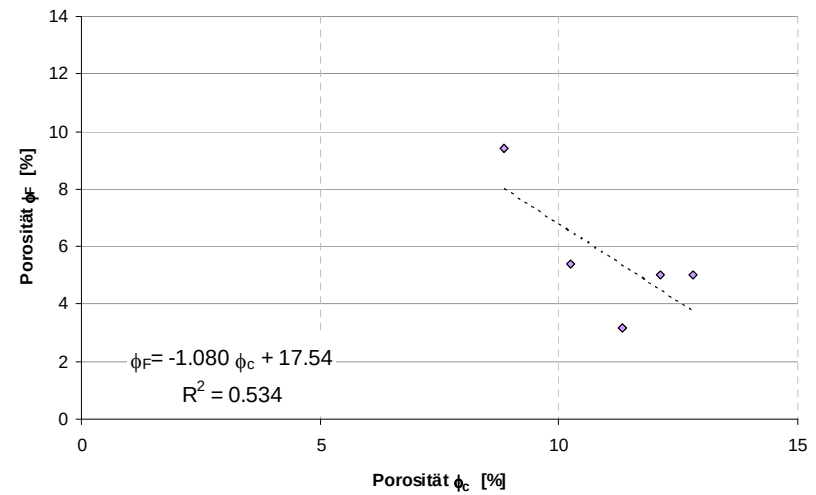
Figur 59: Kalibration für Feinsandstein



Figur 60: Kalibration für Mittel- und Grobsandstein

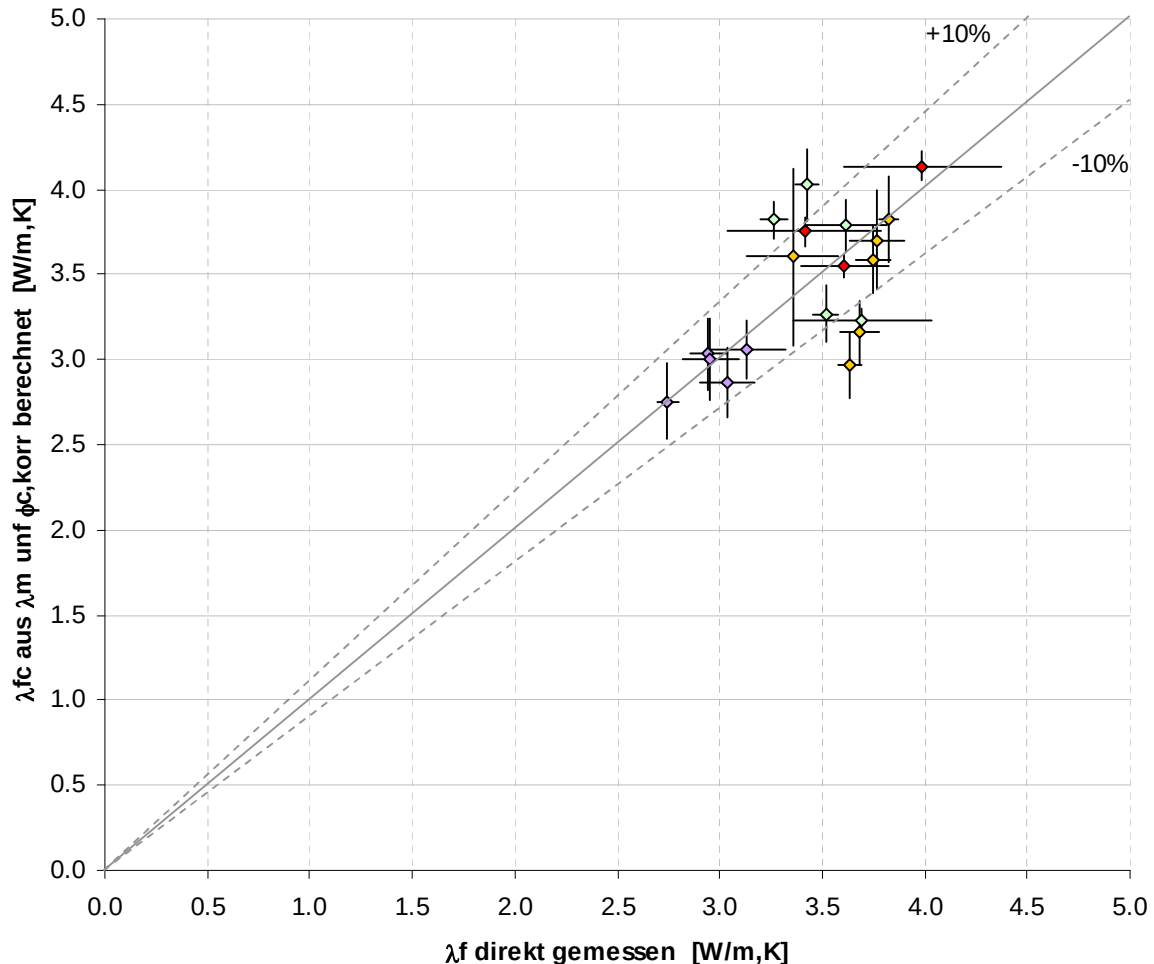


Figur 61: Kalibration für Konglomerat



Figur 62: Kalibration für Mergel

Für den Vergleich gibt es pro Lithologie relativ wenig Datenpunkte. Nach der Korrektur gemäss Formeln in den Figuren 59 – 62 rücken die Messwerte näher zur 45° Geraden (Figur 63). Eine relative gute lineare Korrelation konnte bei Sandsteinen gefunden werden (Figuren 59 und 60). Für Mergel und Konglomerate ist eine lineare Korrelation schlecht (Figuren 61 und 62). Es müssten mehr Proben gemessen werden können.



Figur 63: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von festen Gesteinen und Cuttings nach Korrektur der Porosität. Signaturen: lila = Mergel, grün = Feinsandstein, gold = Mittel- bis Grobsandstein, rot = Konglomerat

Der Vergleich der Wärmeleitfähigkeitswerte an festen, unzerbrochenen Gesteinsproben und zerbrochenen Gesteinen (Cuttings) zeigt, dass 70% der Messungen innerhalb einer Abweichung von $\pm 10\%$ liegen, der Rest innerhalb von $\pm 20\%$. Damit wird eine Wärmeflussbestimmung mit einer ähnlichen Ungenauigkeit behaftet sein.

Die Wärmeleitfähigkeiten von Mergel liegen deutlich tiefer als diejenigen von Sandsteinen und Konglomeraten. Innerhalb der Siltsteine und Sandsteine ist kein eigentlicher Wärmeleitfähigkeitskontrast auszumachen (siehe auch Figur 65)

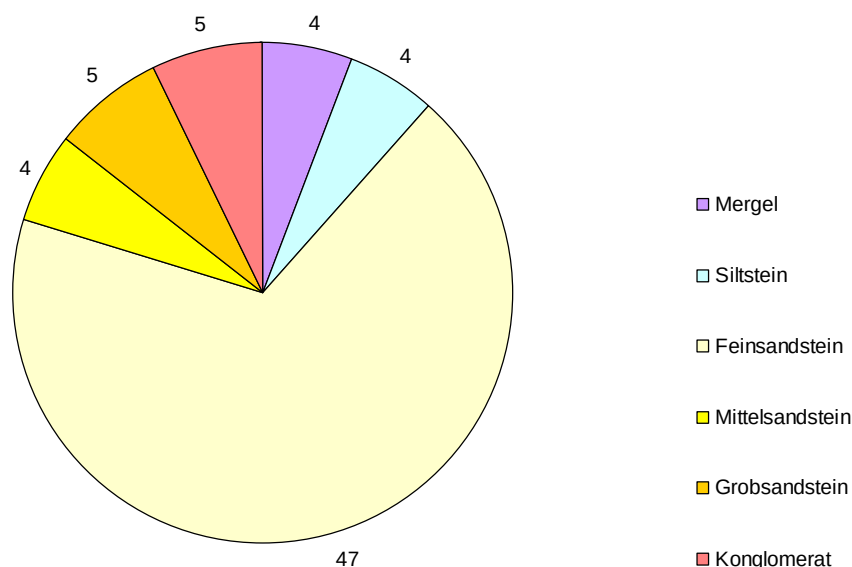
3.2 Bestimmung des geothermischen Wärmeflusses

Der nach Formel 5 bestimmte vertikale geothermische Wärmefluss q_z ist nebst den Untergrundtemperaturen der zweite wichtige Parameter um die geothermischen Verhältnisse im Untergrund beschreiben zu können.

Hier wird nun anhand der Wärmeleitfähigkeitsmessungen und den jeweiligen Temperaturgradienten in den entsprechenden Tiefenbereichen, der Wärmefluss in den Erdwärmesondenbohrungen berechnet. Basierend auf diesen punktuellen Berechnungen und den daraus gemittelten Wärmeflusswerten in den einzelnen Bohrungen wird dann ein durchgehendes Wärmeleitfähigkeit-Tiefenprofils in den von Klimateffekten und durch konvektiven Wärmetransport unbeeinflussten Tiefenbereichen erstellt. Die erzielten Resultate werden abschliessend diskutiert.

3.2.1 Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Cuttings

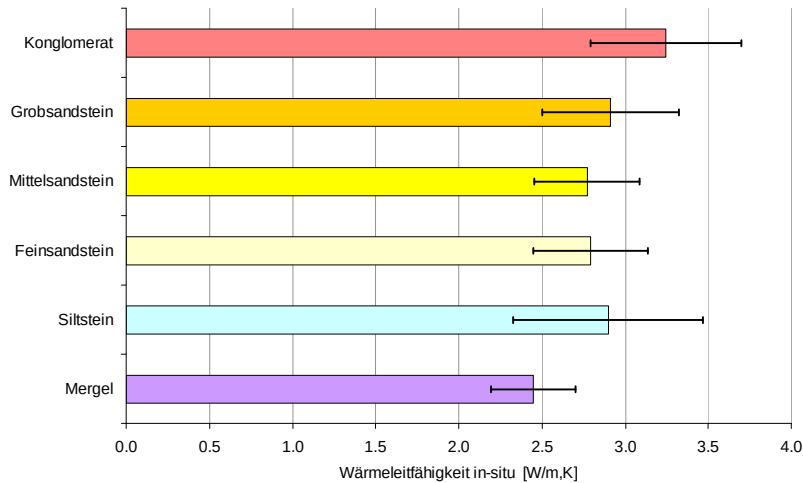
Von den 33 untersuchten Bohrungen wurden in 24 Bohrungen insgesamt 69 Wärmeleitfähigkeits-, Dichte- und Porositätsbestimmungen an Cuttings im Labor durchgeführt (Tabellen 8, B-2 und C-3). Die angestrebte Zahl von 72 Datensätzen konnte nicht ganz erreicht werden, da 3 Proben nicht gemessen werden konnten. Pro Bohrung wurden 2 - 4 Tiefenbereiche beprobt und untersucht (Figuren 13 – 40). Die Messungen wurden wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben durchgeführt. Es wurden hauptsächlich so weit als möglich Sandsteine ausgewählt, da an diesen wegen ihrer Kompaktheit die Porosität am besten bestimmt werden kann. Die Verteilung der untersuchten Gesteinstypen ist in der Figur 64 dargestellt.



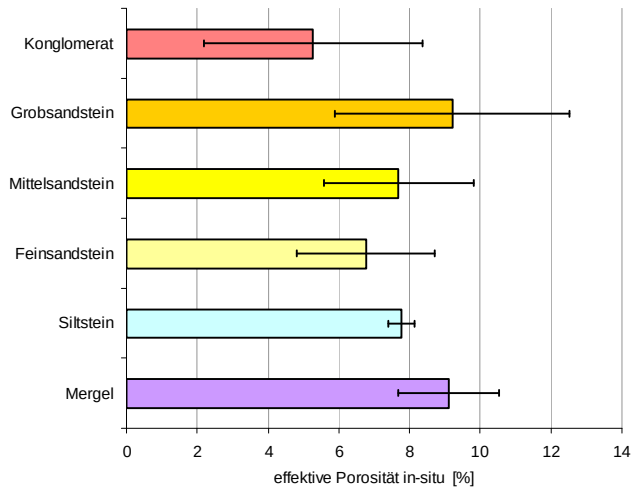
Figur 64: Verteilung der untersuchten Gesteinstypen von 69 Proben

Die Mittelwert der in-situ Wärmeleitfähigkeiten und nach korrigierten Porositäten sind in den Figuren 65 und 66 zu sehen. Die Wärmeleitfähigkeit von Mergel (2.4 W/m,K) sind am tiefsten, diejenigen von Konglomeraten (3.3 W/m,K) am höchsten. Zwischen diesen beiden Gruppen liegen Silt- und Sandsteine mit 2.8 – 2.9 W/m,K. Umfangreiche Messungen von Molassegesteinen findet man in Leu et al. (1999) und Schärli&Kohl (2002).

Die ermittelten Porositäten liegen zwischen 5 und 10 %, wobei Konglomerate die geringsten Werte zeigen, Mergel und Grobsandsteine die höchsten.



Figur 65: Mittelwerte der gemessenen in-situ Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Gesteinstypen in der Molasse, schwarze Balken: Streuung der Mittelwerte



Figur 66: Mittelwerte der korrigierten Porositäten für verschiedene Gesteinstypen in der Molasse, schwarze Balken: Streuung der Mittelwerte

3.2.2 Berechnung des geothermischen Wärmeflusses

Der Wärmefluss $q_{z,i}$ wurde nach Formel 12 berechnet, der Fehler des Wärmeflusses nach Formel 13.

$$q_{z,i} = \lambda_{f,i} \cdot \text{grad } T_i \quad (12) \quad \Delta q_{z,i} = \pm \sqrt{(\text{grad } T \cdot \Delta \lambda_{f,i})^2 + (\lambda_{f,i} \cdot \Delta \text{grad } T)^2} \quad (13)$$

$\text{grad } T_i$: Temperaturgradient im Tiefenabschnitt $z_{i+1} - z_i$, ($\Delta \text{grad } T = \pm 2 \text{ } ^\circ\text{K/km}$)

$\lambda_{f,i}$: in-situ Wärmeleitfähigkeit im Tiefenabschnitt $z_{i+1} - z_i$

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der Tabelle 8 und in den Figuren 13 - 40 dargestellt.

Tabelle 8: Berechnung des geothermischen Wärmeflusses in diskreten Tiefenintervallen

Bohrung	Nr.	Probe m u.T. Oben Unten		Lithologie	Geologie	λ_m	ρ_m	ϕ_F	λ_{eff}	$\Delta\lambda_{eff}$	grad T _i °C/km	q _{z,i} mW/m ²	$\Delta q_{z,i}$ mW/m ²
						W/m,K	g/cm ³	%	W/m,K	W/m,K			
Jona	3	98	114	Feinsandstein	OSM	2.71	2.76	10.15	2.33	0.15	24.0	55.9	5.8
		194	210	Grobsandstein mit Konglomerat	OSM	3.54	2.73	4.41	3.27	0.43	23.7	77.6	12.1
		250	258	Feinsandstein	OSM	3.48	2.74	5.14	3.19	0.21	35.7	113.7	9.8
Kilchberg	4	102	114	Feinsandstein mit Siltstein/Mergel	OSM	3.36	2.78	6.66	3.00	0.07	24.3	72.9	6.3
		142	150	Feinsandstein mit Siltstein	OSM	3.26	2.76	5.39	2.98	0.07	27.4	81.7	6.3
		180	194	Mittelsandstein+Siltstein	OSM	2.95	2.78	9.88	2.53	0.08	28.6	72.4	5.5
		218	234	Siltstein	OSM	2.61	2.79	7.80	2.33	0.02	31.7	73.9	4.7
Oberhasli	6	150	180	Feinsandstein	OMM	3.33	2.75	8.30	2.90	0.25	29.4	85.3	9.4
		262	278	Feinsandstein, z.T. mit Mergel	USM	3.33	2.76	9.19	2.85	0.25	34.8	99.2	10.3
Illnau	7	115	121	Feinsandstein, z.T. mit Mergel	OSM	2.92	2.74	7.16	2.61	0.03	32.2	84.1	5.3
		167	171	Feinsandstein	OSM	2.58	2.73	8.05	2.30	0.19	35.8	82.2	8.2
		215	219	Feinsandstein	OSM	2.74	2.76	4.33	2.57	0.03	37.9	97.5	5.3
		267	271	Feinsandstein	OSM	3.38	2.72	5.54	3.08	0.07	37.4	115.1	6.7
Rorbas	8	100	110	Feinsandstein mit Mergel	USM	3.39	2.70	5.33	3.09	0.23	37.5	116.0	10.7
		136	144	Feinsandstein mit Mergel	USM	2.48	2.69	9.15	2.19	0.04	34.5	75.4	4.6
		212	220	Feinsandstein mit Mergel	USM	3.07	2.71	5.72	2.80	0.03	34.5	96.6	5.7
Zollikon	9	120	128	Feinsandstein	OSM	2.55	2.74	4.27	2.40	0.13	30.9	74.1	6.3
		164	174	Feinsandstein	OSM	3.31	2.76	5.78	3.00	0.24	30.9	92.8	9.6
Bülach Unterweg	10	84	116	Mergel-Siltstein-Feinsandstein	OMM	2.82	2.76	10.88	2.39	0.03	34.5	82.6	4.9
		150	180	Mergel-Siltstein	USM	3.14	2.76	7.02	2.80	0.04	39.8	111.5	5.8
		260	275	Siltstein-Feinsandstein-Mergel	USM	2.84	2.74	7.29	2.54	0.07	39.7	100.9	5.8
Zürich-Witikon	13	118	130	Feinsandstein	OSM	3.27	2.73	6.77	2.92	0.03	27.8	81.1	5.9
		216	220	Feinsandstein	OSM	3.37	2.78	7.12	2.99	0.09	29.8	89.0	6.5
Wädenswil	14	94	100	Feinsandstein	OSM	2.89	2.75	5.70	2.65	0.27	26.7	70.8	8.9
		126	134	Feinsandstein mit Mergel	OSM	2.92	2.78	5.87	2.67	0.21	27.4	73.1	7.8
		220	226	Mergel mit Feinsandstein	OSM	2.35	2.73	8.75	2.09	0.02	30.9	64.5	4.2
		280	286	Feinsandstein mit Mergel	OSM	2.54	2.78	5.67	2.34	0.02	30.3	71.0	4.7
Meilen	15	104	108	Feinsandstein	OSM	3.01	2.74	9.79	2.58	0.07	33.1	85.4	5.7
		148	152	Feinsandstein mit Mergel	OSM	3.08	2.79	8.54	2.68	0.07	31.0	83.2	5.7
		166	174	Feinsandstein	OSM	2.46	2.74	6.50	2.25	0.02	29.3	65.9	4.5
		196	200	Siltstein/Mergel	OSM	4.50	2.75	8.30	3.82	0.12	29.3	111.9	8.5
Dielsdorf	16	120	150	Mergel	USM	2.91	2.73	9.79	2.50	0.32	40.3	100.9	13.7
		182	200	Siltstein	USM	3.30	2.70	7.66	2.90	0.11	35.4	102.8	7.0
Bülach Wiesental	17	106	110	Feinsandstein	USM	2.72	2.72	3.49	2.58	0.18	41.1	106.2	9.1
		154	162	Feinsandstein	USM	2.78	2.78	4.83	2.58	0.05	41.1	106.1	5.5
		186	194	Feinsandstein mit Mergel	USM	2.33	2.72	5.17	2.18	0.06	43.6	95.0	5.2
Oberembrach	18	158	170	Konglomerat	OMM	3.98	2.69	3.79	3.71	0.19	37.4	138.9	10.4
		208	222	Fein- bis Mittelsandstein	USM	2.64	2.71	7.78	2.36	0.07	35.6	84.1	5.4
		250	270	Fein- bis Mittelsandstein mit Mergel	USM	2.33	2.72	5.43	2.17	0.33	31.9	69.2	11.5
Hittnau	19	152	160	Konglomerat	OSM	3.39	2.78	2.94	3.22	0.05	37.4	120.6	6.7
		184	192	Feinsandstein	OSM	3.47	2.74	7.01	3.08	0.11	26.5	81.6	6.8
		210	216	Konglomerat	OSM	3.24	2.75	4.77	3.00	0.08	31.4	94.1	6.5
Zürich-Fifa	20	150	160	Mittelsandstein	OSM	3.37					32.0		
		222	232	Feinsandstein	OSM	3.61	2.74	4.46	3.34	0.08	30.9	103.2	7.2
		256	268	Mittelsandstein	OSM	3.74	2.73	8.38	3.22	0.08	30.9	99.4	6.8
Auslikon	21	154	158	Feinsandstein	OSM	2.99	2.78	9.62	2.567	0.10	33.5	86.0	6.2
		270	276	Konglomerat	OSM	3.05	2.81	11.35	2.543	0.06	22.7	57.7	5.3
		294	300	Feinsandstein	OSM	2.71	2.81	7.95	2.408	0.09	33.9	81.6	5.8
Zürich-Altstetten	22	106	114	Feinsandstein	OSM	3.38	2.77	10.96	2.81	0.03	31.9	89.5	5.7
		190	202	Feinsandstein	OSM	2.94	2.77	7.69	2.61	0.16	33.8	88.1	7.4
		264	280	Feinsandstein	OSM	3.82	2.77	6.17	3.42	0.04	37.0	126.5	7.0

Nr.	Probe		Lithologie	Geologie	λ_m W/m,K	ρ_m g/cm ³	ϕ_F %	λ_{eff} W/m,K	$\Delta\lambda_{eff}$ W/m,K	grad T_i °C/km	$q_{z,i}$ mW/m ²	$\Delta q_{z,i}$ mW/m ²
	m u.T. Oben	Unten										
25	186	190	Konglomerat	OSM	4.01	2.78	3.53	3.75	0.11	29.6	111.1	8.1
27	66	84	Grobsandstein	OMM	3.46	2.72	7.27	3.05	0.10	25.6	78.2	6.6
	150	196	Grobsandstein	OMM	3.32	2.73	14.37	2.61	0.13	33.2	86.5	6.8
	250	270	Feinsandstein	USM	3.54	2.75	5.43	3.22	0.11	31.2	100.4	7.3
28	132	144	Feinsandstein	OMM	3.69	2.73	3.43	3.47	0.08	33	114.6	7.4
	180	192	Mittelsandstein	OMM	2.76	2.74	4.81	2.27	0.03	27.3	62.0	4.6
	232	240	Feinsandstein	OMM	3.71	2.74	3.46	3.49	0.39	32.8	114.4	14.5
30	134	142	Grobsandstein mit Konglomerat	OMM	2.62	2.71	9.82	2.27	0.03	30.5	69.3	4.6
	162	174	Grobsandstein	OMM	4.05	2.73	10.20	3.35	0.14	35.7	119.4	8.5
	250	258	Feinsandstein	USM	2.75	2.75	4.57	2.57	0.03	35.7	91.9	5.3
31	136	148	Feinsandstein	OSM	3.71	2.79	7.98	3.22	0.11	40.4	130.0	7.9
	168	172	Feinsandstein	OSM	3.43	2.80	7.79	3.00	0.07	26.8	80.5	6.3
	220	228	Feinsandstein	OSM	3.29	2.71	9.59	2.80	0.12	35	98.1	6.9
32	130	138	Feinsandstein	OSM	3.33	2.77	7.18	2.95	0.08	23.7	69.9	6.2
	186	196	Feinsandstein	OSM	3.66	2.78	6.19	3.28	0.13	25.2	82.7	7.4
	234	240	Feinsandstein	OSM	2.95	2.78	5.87	2.69	0.12	30.5	82.0	6.4
33	126	136	Feinsandstein	USM	2.94	2.73	7.55	2.62	0.20	37.3	97.6	9.2
	150	164	Feinsandstein mit Mergel	USM	3.36	2.76	11.06	2.78	0.22	32	89.1	9.0
	210	222	Feinsandstein	USM	3.01	2.73	6.32	2.72	0.17	52.9	144.0	10.5

Legende: λ_m Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix ϕ_F korrigierte Porosität an Cutting-Proben λ_{eff} in-situ Wärmeleitfähigkeit: berechnet aus λ_m und ϕ_F ρ_m Matrixdichte an Cutting-Probengrad T_i Temperaturgradient im i-ten Tiefenintervall der gemessenen Bohrproben $q_{z,i}$ vertikaler Wärmefluss im i-ten Gradientenabschnitt Δ Messfehler

gelb schraffierte Flächen: Bohrungen mit relativ konstantem Wärmefluss (weniger als 5% Streuung)

Der mittlere Wärmefluss in einer Bohrung wird durch das arithmetische Mittel gebildet (Formel 14) (:

$$q_z = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{eff,i} \cdot grad T_i}{n} \quad (14)$$

n : Anzahl untersuchte Tiefenintervalle

Tabelle 9: Mittlere Wärmeflüsse in den Bohrungen

Nr	Name	Sondentiefe	q_z	sq_z	N
			mW/m ²	mW/m ²	
1	St. Gallen Wartest.	325			
2	St. Gallen Nokt.	250			
3	Jona	290	82.40	23.80	3
4	Kilchberg	275	75.20	3.77	4
5	Stadel	270			
6	Oberhasli	290	92.20	6.97	2
7	Illnau	320	94.70	13.14	4
8	Rorbas	280	96.00	16.59	3
9	Zollikon	250	83.50	9.35	2
10	Bülach Unterweg	275	98.30	11.94	3
11	Kloten	250			
12	Erlenbachh Laubholz	300			
13	Zürich-Witikon	275	85.10	3.95	2
14	Wädenswil	300	69.80	3.20	4
15	Meilen	278	86.60	16.45	4
16	Dielsdorf	200	101.80	0.95	2
17	Bülach Wisental S-11	294	102.40	5.28	3
18	Oberembrach	320	97.40	29.96	3
19	Hittnau	300	98.80	16.26	3
20	Zürich FIFA	275	101.30	1.94	2
21	Auslikon	298	75.10	12.43	3
22	Altstetten	280	101.40	17.79	3
23	Esslingen	270			
24	Benken	169			
25	Hombrechtikon	300	111.10		1
26	Erlenbach Lerchenberg	295			
27	Eggenwil	275	88.40	9.18	3
28	Wollerau	270	97.00	24.75	3
29	Neuaffoltern	240			
30	Weiningen	279	93.50	20.52	3
31	ETH-Hönningerberg	250	102.90	20.51	3
32	Erlenbach Seestr.	248	78.20	5.89	3
33	Niederweningen	275	110.20	24.14	3

Legende: rote Zahlen = Werte mit kleiner Streuung innerhalb einer Bohrung (<5%)

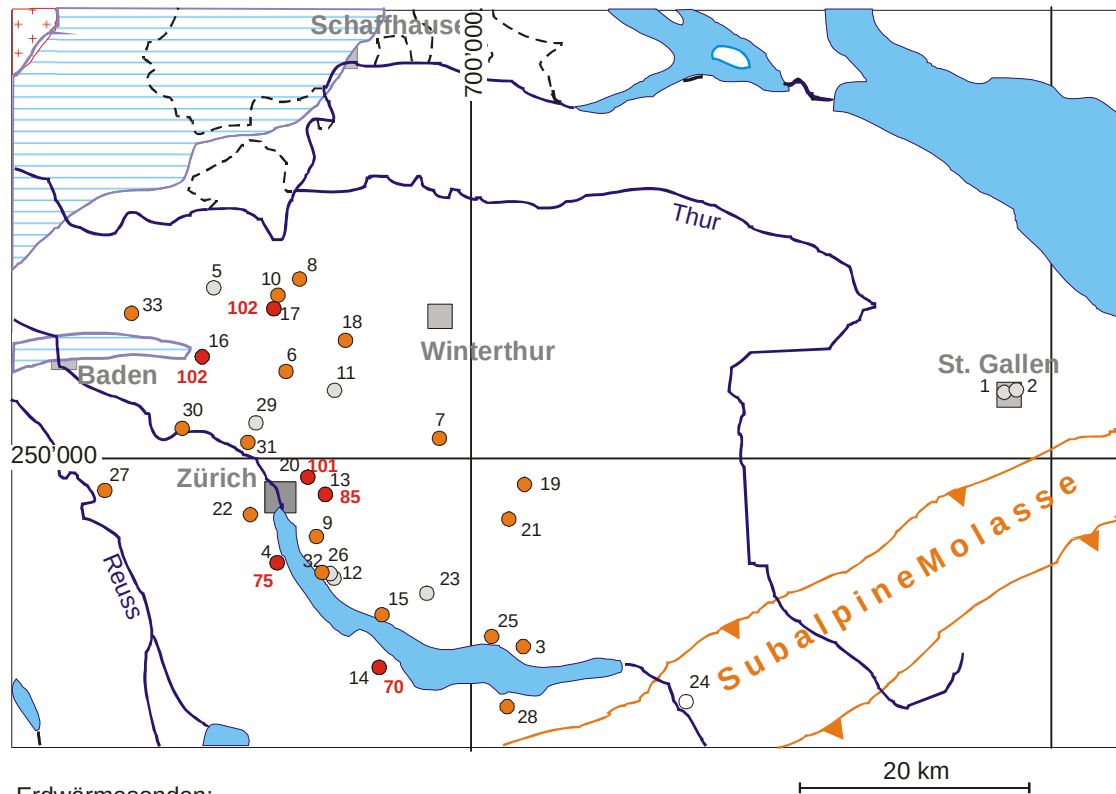
3.2.3 Interpretation der Ergebnisse

Die berechneten Wärmeflusswerte sind innerhalb der Bohrungen meistens nicht konstant (Tabelle 8, Figuren 13 - 40). Nur in 6 Bohrungen ergibt sich ein mittlerer Wärmefluss mit weniger als 5% Streuung um den Mittelwert (Bohrungen 4, 13, 14, 16, 17 und 20 bez. Figuren 15, 23, 24, 26, 27 und 30). Diese Werte wurden in der Karte (Figur 67) eingetragen. Sie korrelieren mit der neusten Wärmeflusskarte der Nordschweiz (Schärli & Rybach, 2002). Eine Zunahme von Süden nach Norden ist sichtbar. Eine detaillierte Wärmeflusskarte konnte wegen den vielen ungenauen Daten (grosse Streuung der Werte innerhalb der Bohrungen) nicht erstellt werden. Die punktuellen Wärmeflusswerte streuen bis zu 30 % um den Mittelwert in einer Bohrung. Der Fehler der einzelnen Wärmeflussbestimmung beträgt maximal 17 %,

Es kann verschiedene Gründe für die zum Teil hohe vertikale Streuung der berechneten Wärmeflusswerte innerhalb einer Bohrung geben:

- Nicht repräsentative Laborsbestimmung: zu wenig Probenmaterial, zu wenig Messungen, Kontaktprobleme bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung

- In-situ Verhältnisse im Untergrund können im Labor nicht genügend gut simuliert werden: grossräumige Kluftsysteme, Wassergehalt, räumliche Orientierung der Schichtung → Anisotrope der Wärmeleitfähigkeit kann nicht erfasst werden, konvektive Zonen werden nicht erkannt
- Vergleichsmessungen zeigen eine Ungenauigkeit der Wärmeleitfähigkeit bis zu 20%



Erdwärmesonden:

- Bohrung mit guter Wärmeflussbestimmung
- Bohrung mit ungenauer Wärmeflussbestimmung (zu starke Streuung)
- Bohrung ohne wärmeflussbestimmung

Figur 67 Rudimentäre Wärmeflusskarte: rote Zahlen = Wärmeflusswerte mit weniger als 5% Streuung

3.2.4 Indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Innerhalb einer Bohrung mit guter Wärmeflussbestimmung, d.h. konstantem Wärmefluss q_z im ungestörten Temperaturprofil kann die Wärmeleitfähigkeit λ_i über die Tiefe bestimmt werden. Dabei gilt für jeden i-ten linearen Gradientenabschnitt (z_i, z_{i+1}), in welchem die Wärme nur konduktiv übertragen wird, die Formeln 15 und 16 (Rohner et al. 2005).

$$\lambda_i = \frac{q_z}{\text{grad } T_i} \quad (15)$$

$$\text{grad } T_i = \frac{T_{i+1} - T_i}{z_{i+1} - z_i} \quad (16)$$

T_i = Temperatur in der Tiefe z_i

Die Ergebnisse und der Vergleich mit den Labormessungen sind in den Tabellen 10 und 15 dargestellt.

Tabelle 10: indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in der Bohrung Kilchberg [4]

$$q_z = 75.2 \pm 3.77 \text{ mW/m}^2$$

Tiefe			λ indirekt		λ Labor			Bemerkungen
z_i m u.T.	z_{i+1} m u.T.	grad T [C/km]	λ_{qi} [W/m,K]	$\Delta\lambda_{qi}$ [W/m,K]	λ_{gem} [W/m,K]	von	bis [m u.T.]	
58.3	81.6	16.7	4.50	0.23				Klimaeffekt
81.6	96.9	24.2	3.11	0.16				
96.9	99.3	40.6	1.85	0.09				
99.3	128.6	24.3	3.09	0.15	3.00	102	114	
128.6	141.2	31.9	2.35	0.12				
141.2	164.0	27.4	2.74	0.14	2.98	142	150	
164.0	175.6	32.7	2.30	0.12				
175.6	202.0	28.6	2.63	0.13	2.53	180	194	
202.0	248.8	31.7	2.37	0.12	2.33	218	234	
248.8	253.6	23.6	3.18	0.16				
253.6	258.6	33.2	2.26	0.11				
258.6	265.5	37.1	2.03	0.10				
265.5	278.4	28.1	2.67	0.13				

Legende: z = Tiefe, i = i-ter linearer Gradientenabschnitt, grad T = Temperaturgradient im Abschnitt (z_i, z_{i+1}), λ_{qi} = indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach Formel 10, Δ = Messfehler, λ_{gem} = im Labor bestimmte Wärmeleitfähigkeit, [...] = Zuordnung der Bohrungen (siehe Tabelle 9 und A-1), dunkelgelb markierte Flächen = von Klimaeffekten beeinflusste Zonen, hellgelb markierte Flächen = Zonen mit Wasserkonvektionen

Tabelle 11: indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Zürich-Witikon [13]

$$q_z = 85.1 \pm 3.95 \text{ mW/m}^2$$

Tiefe			λ indirekt		λ Labor			Bemerkungen
z_i m u.T.	z_{i+1} m u.T.	grad T [C/km]	λ_{qi} [W/m,K]	$\Delta\lambda_{qi}$ [W/m,K]	λ_{gem} [W/m,K]	von	bis [m u.T.]	
59.8	74.7	14.6	5.83	0.84				Klimaeffekt
74.7	76.6	40.9	2.08	0.14				
76.6	78.6	0.0						Wasser
78.6	92.7	21.2	4.02	0.42				
92.7	140.0	27.8	3.06	0.26	2.92	118	130	
140.0	165.4	33.3	2.56	0.19				
165.4	170.0	45.6	1.87	0.12				
170.0	214.0	31.5	2.70	0.21				
214.0	250.1	29.8	2.86	0.23	2.99	216	220	
250.1	255.2	19.8	4.29	0.48				
255.2	262.1	33.7	2.52	0.19				
262.1	268.2	39.2	2.17	0.15				
268.2	274.2	28.8	2.95	0.25				

Legende: (siehe Tabelle 10)

Tabelle 12: indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Wädenswil [14]

$$q_z = 69.8 \pm 3.77 \text{ mW/m}^2$$

Tiefe		grad T _i [C/km]	λ indirekt		λ Labor			Bemerkungen
Z _i m u.T.	Z _{i+1} m u.T.		λ _{qi} [W/m,K]	Δλ _{qi} [W/m,K]	λ _{gem} [W/m,K]	von	bis [m u.T.]	
38.55	63.90	15.3	4.57	0.65				Klimaeffekt
63.90	80.00	24.3	2.87	0.28				
80.00	101.18	26.7	2.61	0.24	2.65	94	100	
101.18	114.40	33.2	2.10	0.17				
114.40	138.14	27.4	2.54	0.23	2.67	126	134	
138.14	148.80	33.8	2.06	0.17				Mergel mit Kohle?
148.80	173.43	29.2	2.39	0.21				
173.43	188.05	42.4	1.65	0.12				
188.05	190.40	73.0	0.96	0.06				
190.40	203.04	23.4	2.98	0.30				
203.04	233.61	30.9	2.26	0.19	2.09	220	226	
233.61	240.96	40.0	1.75	0.13				
240.96	263.24	27.1	2.58	0.24				
263.24	275.00	35.4	1.97	0.15				
275.00	288.96	30.3	2.30	0.20	2.34	280	286	
288.96	300.06	25.0	2.79	0.27				

Legende: (siehe Tabelle 10)

Tabelle 13: indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Dielsdorf [15]

$$q_z = 101.8 \pm 0.95 \text{ mW/m}^2$$

Tiefe		grad T [C/km]	λ indirekt		λ Labor			Bemerkungen
Z _i m u.T.	Z _{i+1} m u.T.		λ _{qi} [W/m,K]	Δλ _{qi} [W/m,K]	λ _{gem} [W/m,K]	von	bis [m u.T.]	
37.9	63.0	22.3	4.58	0.41				Klimaeffekt
63.0	74.5	29.5	3.45	0.24				
74.5	100.1	34.2	2.97	0.18				
100.1	164.0	40.3	2.52	0.13	2.50	120	150	
164.0	178.7	38.4	2.65	0.14				
178.7	200.0	35.4	2.88	0.16	2.90	182	200	

Legende: (siehe Tabelle 10)

Tabelle 14: indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Bülach-Wisental [17]

$$q_z = 102.4 \pm 5.28 \text{ mW/m}^2$$

Tiefe		grad T [C/km]	λ indirekt		λ Labor			Bemerkungen
Z _i m u.T.	Z _{i+1} m u.T.		λ _{qi} [W/m,K]	Δλ _{qi} [W/m,K]	λ _{gem} [W/m,K]	von	bis [m u.T.]	
42.7	78.7	28.8	3.55	0.31				Klimaeffekt/Wasser ?
78.7	107.8	34.2	2.99	0.23				
107.8	183.0	41.1	2.49	0.18	2.58	106	110	
183.0	201.0	43.6	2.35	0.16	2.18	186	194	
201.0	221.3	36.0	2.85	0.22				
221.3	269.0	41.5	2.47	0.17				Wasser Wasser
269.0	274.7	4.5	22.58	10.03				
274.7	277.1	80.9	1.27	0.07				
277.1	284.0	40.8	2.51	0.18				

Legende: (siehe Tabelle 10)

Tabelle 15: indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Zürich-Fifastrasse [20]

$$q_z = 101.3 \pm 1.94 \text{ mW/m}^2$$

Tiefe			λ indirekt		λ Labor			Bemerkungen
Z_i m u.T.	Z_{i+1} m u.T.	grad T [C/km]	λ_{qi} [W/m,K]	$\Delta\lambda_{qi}$ [W/m,K]	λ_{gem} [W/m,K]	von	bis	
						[m u.T.]		
51.7	64.2	21.2	4.78	0.46				Klimaeffekt
64.2	69.3	39.5	2.56	0.14				
69.3	74.9	0.0						Wasser
74.9	81.8	19.0	5.32	0.57				Wasser
81.8	101.1	30.2	3.35	0.23				
101.1	106.2	42.0	2.41	0.12				
106.2	108.7	16.9	5.99	0.72				Wasser
108.7	110.1	85.0	1.19	0.04				Wasser
110.1	112.8	32.0	3.16	0.21				
112.8	114.6	0.0						Wasser
114.6	122.9	44.5	2.28	0.11				
122.9	130.4	20.6	4.93	0.49				Wasser
130.4	171.3	32.0	3.16	0.21				
171.3	190.2	29.3	3.46	0.25				
190.2	275.0	30.9	3.28	0.22	3.34	222	232	
					3.22	256	268	

Legende: (siehe Tabelle 10)

Der Vergleich zwischen Labormesswert und indirekter Bestimmung ist in diesen 6 Bohrungen gut! In der Tabelle 16 sind alle verglichenen Werte und deren Differenzen aufgelistet. Die Differenzen sind nicht systematisch und schwanken – 0.24 bis + 0.17 W/m,K. Die Kalibration der thermischen Leitfähigkeit von in-situ Messungen (aus Temperaturlog) mit den Laborbestimmungen ist in somit teilweise gelungen.

Tabelle 16: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten aus indirekter Bestimmung und aus Labormethode

	indirekt λ_{qi} [W/m,K]	Labor λ_{gem} [W/m,K]	Differenz $\lambda_{qi} - \lambda_{gem}$ [W/m,K]
Kilchberg	3.09	3.00	0.09
	2.74	2.98	-0.24
	2.63	2.53	0.10
Witikon	2.37	2.33	0.04
	3.06	2.92	0.14
Wädenswil	2.86	2.99	-0.13
	2.61	2.65	-0.04
	2.54	2.67	-0.13
	2.26	2.09	0.17
Dielsdorf	2.30	2.34	-0.04
	2.52	2.50	0.02
Wisental	2.88	2.90	-0.02
	2.49	2.58	-0.09
	2.35	2.18	0.17
FIFA	3.28	3.34	-0.06
	3.28	3.22	0.06

Eine Korrelation zwischen den indirekt bestimmten Wärmeleitfähigkeiten und der Stratigraphie ist aber meistens nicht vorhanden (Figuren 15, 23, 24, 25, 27 und 30)!

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die kabellose Temperaturmesssonde NIMO-T liefert in kurzer Zeit mit wenig Aufwand kontinuierliche Messungen des ungestörten Temperaturfeldes mit guter Auflösung (1 Messung pro 20 cm).

Die Messungen zeigen in den oberen Tiefenbereichen (0 bis ca. 90 m) den Einfluss rezenter Klimaänderungen.

In einigen Bohrungen konnten Wasser führende Schichten durch sichtbare Anomalien identifiziert werden.

Unterhalb einer vom Klima beeinflussten Tiefe von ca. 80 – 100 m nimmt die Temperatur mit einem mittleren Gradienten von 25 – 40 °C/km zu, wobei der Temperaturverlauf meist in lineare Temperaturgradientenabschnitte eingeteilt werden kann, deren Längen von einigen Metern bis zu 100 m Länge reichen kann.

Die Variation der Mächtigkeit von Gesteinsschichten mit homogener Lithologie reicht von wenigen Zentimetern bis über 100 m.

Die kontinuierlichen Temperaturmessungen an verschiedenen Erdwärmesondenstandorten, ermöglichten die flächenhafte Kartierung der Temperaturverhältnisse in verschiedenen Tiefen. Es ergab einen charakteristischen regionalen Trend im Untersuchungsgebiet mit einer Zunahme der Temperaturen von Südosten gegen Nordwesten – über eine Strecke von ca. 50 km - um 1 - 2 °K in fast allen Tiefenbereichen. Es ist zu bemerken, dass aufgrund der vorhandenen Datenmenge nur ein regionaler Trend wiedergegeben werden kann und lokal Abweichungen auftreten können.

Die petrophysikalischen Vergleichsmessungen der Wärmeleitfähigkeit und der Porosität zwischen Bohrkernen und Cuttings zeigen, dass die Porosität an Cuttings nur bei Sandsteinen an den Bohrkernen kalibriert werden konnte. Der Vergleich der Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen an Cuttings mit denen an festen Gesteinen liegt meist innerhalb von 10% Genauigkeit, kann aber auch bis zu 20% Abweichung aufweisen.

Die an zahlreichen Cuttings bestimmten mittleren Wärmeleitfähigkeitswerte für typische Lithologien der Molasse liegen in einem ähnlichen Bereich wie in den bisherigen Untersuchungen an diesen Gesteinen. Ein Wärmeleitfähigkeitskontrast existiert zwischen Mergeln und Sandsteinen

Die Bestimmung des mittleren geothermischen Wärmeflusses aus punktuellen Berechnungen in verschiedenen Tiefen ergibt in 25% der untersuchten Bohrungen einen relativ konstanten vertikalen Wärmefluss mit weniger als 5% Streuung. In diesen Bohrungen konnte das aus dem Temperaturlog bestimmten Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofil mit den Laborwerten kalibriert werden. Die einzelnen Wärmeflussbestimmungen haben Fehler bis zu 10 %.

5 AUSBLICK

Die Messmethode mit der kabellosen Temperaturmesssonde NIMO-T kann noch weiter optimiert werden. Mit langsamerer Sinkgeschwindigkeit kann ein Temperaturlog mit höherer Datendichte erreicht werden und stratigrafische Schichtwechsel sowie wasserführende Schichten und Konvektionen im Bohrloch können noch genauer erfasst werden. Ebenso lässt sich mit den Temperaturmessungen die Qualität der Ankoppelung Hinterfüllung in der Erdwärmesonde überprüfen.

Ein dichteres Messnetz wäre aufgrund der laufend installiert werdenden Erdwärmesonden im Kanton Zürich leicht zu realisieren. Die Messungen könnten auch auf andere Gebiete in der Schweiz ausgedehnt werden.

Die Genauigkeit der Labormessungen von thermischen Parametern ist noch verbesserungsfähig. Es braucht dazu aber umfangreichere Vergleichsmessungen. Das Ziel einer detaillierten Wärmeflusskarte kann in Zukunft erreicht werden.

6 LITERATUR

- LEU W., KELLER B., MATTER H., SCHÄRLI, U. & RYBACH, L. (1999). Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens (Tiefenbereich 0-500 m). Bericht Bundesamt für Energie, 79 Seiten. (ENET-Nr. 9723719).
- ROHNER, E., RYBACH, L., SCHÄRLI, U. (2005): A New Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design. In: Proceedings World Geothermal Congress, Antalya Turkey, 24-29 April 2005.
- RYBACH L., BASSETTI S., BAUMGARTNER R., ROHNER E., (2003) Drahtloser Minidatenlogger für Temperaturmessungen in Erdwärmesonden. BFE Bericht P.Nr. 47'974.
- SCHÄRLI, U. (2001): Thermische Labormessungen an Bohrproben der DHM-Bohrung Otterbach 2, zuhanden Geothermal Explores Ltd. (Häring Geoproject, Steinmauer)
- SCHÄRLI, U. & KOHL, T. (2002): Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 36, Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- SCHÄRLI, U. & RYBACH, L.(2002): Geothermische Verhältnisse in der Nordschweiz. In: Müller W.H., Naef, N., Graf, H.R.: Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland, NAGRA Bericht 99-08,

18. Juli 2007

Dr. U. Schärli Geologie+Geophysik
 Ueli Schärli, Dr.sc.nat.ETH
 Geophysiker



Ernst Rohner
 Geowatt AG Zürich



7 ANHANG A: ANGABEN ZU DEN BOHRUNGEN UND TEMPERATURMESSUNGEN

PLZ	Ort	Adresse	Koordinaten X [m]	Y [m]	Kote [m ü.M.]	Nr.	Bohrung	Bohrdatum	Tiefe	Überstand [m]	Messung Datum	Zeit	Fischsonde	Δt [s]	Tiefe nach Messung Oben [m u. OKT]	Unten	Steigung [Ap/m]	Daten- verluste	Geologie	Proben	Proben- intervall [m]	Wasser- eintritte	Bohrfirma	Bohrmeister	Bauherr	Geologe	Operateur
9000	St. Gallen	Wartensteinstrasse 21	746500	255650	704	1	S-1	02.11.2004	335	0.7	07.04.2005	08:47	F-35 F-62	3 3	-0.7 -0.7	337.41 337.73	64.23 64.14								Schäppi	ER	
9000	St. Gallen	Notkerianum	748475	255915	660	2	S-1		250	0.0	07.07.2005	13:58	F-35 F-62	3 3	0.0 0.0	244.83 245.22	64.23 64.14									ER	
8645	Jona	Bubikerstrasse	704490	233500	460	3	S-5	06.06.2005	290	0.5	20.06.2005	17:25	F-35 F-62	3 3	-0.5 -0.5	285.21 285.46	64.23 64.14	ja	ja	ja	4	ja	Foralith	Heim	EKZ		ER/US
8802	Kilchberg	Gheistrasse 3	683848	241054	490	4	S-1	08.02.2005	275	0.5	18.07.2005	10:11	F-35 F-62	3 3	-0.5 -0.5	275.34 274.3	64.23 64.14		ja	ja	2		Frutiger	Momm	S. Dangel & T. Scheitlin	Friedli/Partner AG	ER/US
8174	Stadel	Bachstrasse 13-17	677435	264900	437	5	S-4	14.07.2005	270	0.5	22.07.2005	09:30	F-35 F-62	3 3	-0.5 -0.5	¹⁾ 270.31 269.77	64.14 64.14	ja	ja	ja	2	ja	Hoppler	R. Berisha	EKZ	Schärli	US
							S-5	18.07.2005	200	0.5	22.07.2005	10:33	F-62	3	-0.5	195.62	64.14									US	
8156	Oberhasli	Sandrainstrasse 14+16	680009	257555	437	6	S-1	11.07.2005	290	0.8	22.07.2005	12:07	F-35 F-62	3 3	-0.8 -0.8	¹⁾ 290.0 289.82	64.14	ja	ja	ja	2	ja	Broder	Markovic/Obrandi	EKZ	Schärli	US
8308	Illnau	Lättenstrasse 14-18	697180	251770	510	7	S-1	14.07.2005	260	0.5	18.07.2005	08:51	F-35 F-62	3 3	-0.5 -0.5	261.35 260.7	64.23 64.14						Foralith	Huckenbeck	EKZ	Schärli	ER/US
							S-2	12.07.2005	320	0.5	22.07.2005	15:10	F-35 F-62	3 3	-0.5 -0.5	²⁾ 275.5 318.97	64.14	ja	ja	ja	2		Foralith	Huckenbeck	EKZ	Schärli	US
8427	Rorbas	Haldenstrasse	685104	265338	410	8	S-1	05.08.2005	280	0.5	18.08.2005	08:51	F-35 F-62	3 3	-0.5 -0.5	272.61 273.24	64.14 64.23	ja	ja	ja	2	ja	Erni	Styger	EKZ	Schärli	ER/US
											30.08.2005	10:45	F-35 F-62	3 3	-0.5 -0.5	273.24 ²⁾ 255.10	64.23 64.14	ja								ER/US	
8702	Zollikon	Gartenstrasse 19	686345	243245	490	9	S-1	20.09.2005	250	0.6	26.09.2005	11:10	F-35 F-62	4 2	-0.6 -0.6	²⁾ 206.19 249.73	64.23 64.14	ja	ja	ja	2		Erni	Arnet	M. Brüscher Zürich	Schärli	US
								27.09.2005			16:10		F-35 F-62	4 2	-0.6 -0.6	250.61 250.04	64.23 64.14									US	
8810	Bülach	Unterweg	683090	264250	418	10	S-	20.09.2005	275	0.5	29.09.2005	09:30	F-35 F-62	4 2	-0.5 -0.5	272.98 273.2	64.23 64.14		ja	ja	2	ja	Frutiger	Momm		A. Rissi Zürich	US
8302	Kloten	Steinacherstrasse 68	688051	255757	445	11	S-1		250	0.6	29.09.2005	14:42	F-35 F-62	4 2	-0.6 -0.6	²⁾ 197.42 249.53	64.23 64.14	ja					Frutiger	Rogg	OPO Oeschgetr AG	Von Moos	US
							S-3		250	1.0	29.09.2005	15:45	F-35 F-62	4 2	-1.0 -1.0	249.08 ²⁾ 77.56	64.23 64.14										
8703	Erlenbach	Laubholzstrasse 31-41	687975	239410	470	12	S-3	23.09.2005	300	0.2	30.09.2005	14:48	F-35 F-62	4 2	-0.2 -0.2	298.98 ²⁾ 276.72	64.23 64.14	ja	ja	zu wenig	2	ja	Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US
8053	Zürich-Witikon	In der Looren 9	687190	246630	615	13	S-1	23.09.2005	275	0.5	04.10.2005	10:05	F-35 F-62	4 2	-0.5 -0.5	274.69 274.34	64.23 64.14		ja	ja	2	ja	Erni	P. Erni	B. Maurenbrecher Zürich	Schärli	US
8820	Wädenswil	Holzmosrütistrasse	692135	231885	480	14			300	0.6	11.10.2005	15:00	F-35 F-62	4 4	-0.6 -0.6	299.59 299.24	64.23 64.14		ja		2		Erni/Hastag	Arnet/Wehinger	EWZ	Schärli	ER/US
8706	Meilen	Seidengasse 50	692125	235845	423	15	S-1	07.10.2005	200	1.2	21.10.2005	14:11	F-35 F-62	4 4	-1.2 -1.2	204.44 203.96	64.23 64.14		ja	ja	2	ja	Stump	Winatz	EKZ	Schärli	US
							S-3	15.10.2005	278	1.0	27.10.2005	10:20	F-35 F-62	4 4	-1.0 -1.0	279.58 279.05	64.23 64.14									US	
8157	Dielsdorf	Buchserstrasse 52-56	676380	258750	480	16	S-2	26.10.2005	200	0.2	31.10.2005	16:20	F-62 F-35	4 4	-0.2	199.63	64.14	ja	ja	ja	2	ja	Frutiger	Momm	Petro Cortali AG	Jaeckli	US
								07.11.2005			17:12		F-62 F-35	4 4	-0.2 -0.2	199.72 200.04	64.14 64.23										
								14.11.2005			10:33		F-62 F-35	4 4	-0.2 -0.2	199.89 200.07	64.14 64.23										
8810	Bülach	Wiesentalstrasse	682920	262975	410	17	S-1	10.11.2005	294	0.3	16.11.2005	09:40	F-35 F-62	4 4	-0.3 -0.3	288.03 287.96	64.23 64.14		ja	ja	2	ja	Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US
			682920	262975	410		S-1	10.11.2005	294	0.3	29.11.2005	16:15	F-35 F-62	4 4	-0.3 -0.3	287.97 287.71	64.23 64.14										
			682998	262970	410	17a	S-11	14.12.2005	285	0.4	12.01.2006	15:00	F-35	4	-0.4	284.12	64.23					ja	Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US

PLZ	Ort	Adresse	Koordinaten X [m]	Y [m]	Kote [m ü.M.]	Nr.	Bohrung	Bohrdatum	Tiefe	Überstand [m]	Messung Datum	Zeit	Fischsonde	Δt [s]	Tiefe nach Messung Oben [m u. OKT]	Unten	Steigung [°/m]	Daten- verluste	Geologie	Proben	Proben- intervall [m]	Wasser- eintritte	Bohrfirma	Bohrmeister	Bauherr	Geologe	Operateur
8425	Oberembrach	Neuwisstrasse	689085	260135	465	18	S-1	16.11.2005	320	0.2	25.11.2005	14:38	F-35 F-62	4 4	0.0 0.0	319.36 319.19	64.23 64.14		ja	ja	2	ja	Frutiger	Momm	Keller Baudienstleistung	Schärli	US
8335	Hilttau	Töstalstraee	704510	247575	640	19	S-1	16.12.2006	300	0.3	26.01.2006	10:30	F-35	4	-0.3	296.85	64.23		ja	ja	2		Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US
8044	Zürich	Fifastrasse 18/20	685645	248415	605	20	S-1	06.11.2005	275	0.8	16.12.2005	10:00	F-35	4	-0.8	274.58	64.23		ja	ja	2	ja	Frutiger	Momm	FIFA	Schärli	US
8330	Pfaffikon	Pfaffikerstrasse	703395	244635	560	21	S-6	22.04.2006	298	0.4	12.05.2006	14:00	F-62	4	-0.4	302.33	64.14		ja	ja	2	ja	Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US
8048	Zürich	Friedhofsstrasse	680920	245275	445	22	S-5	23.04.2006	280	0.7	15.05.2006	14:00	F-62	4	-0.7	278.66	64.14		ja	ja	2	ja	Erni	Sahin	EKZ	Schärli	US
8311	Esslingen	Löwenstrasse	696310	238350	490	23	S-1	15.04.2006	270	0.0	12.05.2006	16:00	F-66	4	0.0	¹⁾ 136.57	²⁾	ja	ja	ja	2		Broder	Radojkovic	EKZ	Schärli	US
8717	Benken	Rötlstrasse	718604	228804	410	24	S-1	07.06.2006	169	0.2	16.06.2005	10:00	F-62	4	0.2	167.22	²⁾		ja	ja	4	ja	Foralith	Heim	EKZ	Schärli	US
8634	Hombrechtikon	Eichwisweg 16 - 24	701720	234030	481	25	S-2	07.07.2006	300	0.5	13.07.2006	14:40	F-62	4	-0.5	195.77	*	ja	ja	ja	2		Broder	Markovic	EKZ	Wyssling	US
8703	Erlenbach	Lerchenbergstrasse 62	687600	240015	470	26	S-1	20.06.2006	295	0.5	30.06.2006	09:40	F-62 F-66	4 4	-0.5	290.73 290.05	*				ja		Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US
5445	Eggenwil AG	Im Rebhügel	667920	247185	380	27	S-1	21.08.2006	275	0.5	24.08.2006	09:40	F-62 F-66	4 4	-0.5	273.12 213.08		ja	ja	ja	2	ja	Frutiger	Momm	EKZ	Schärli	US
8832	Wollerau	Heiniweidstrasse	696790	228490	460	28	S-1	30.08.2006	270	0.5	07.09.2006	10:00	F-62 F-66	4 3	-0.5	264.4 264.4		ja	ja	ja	4	ja	Heim	Heim	EKZ	Schärli	US
8046	Neuaffoltern	Wolfswinkel	681100	253185	447	29	S-1	11.09.2006	240	0.5	22.09.2006		F-62 F-66	4 4	-0.5 -0.5	237.94 238.91			ja	ja	2	ja	Grünwald	Gudermann	ABZ	Schärli	US
8104	Weiningen	Badenerstrasse	674675	252430	410	30	S-1	13.09.2006	279	0.5	22.09.2006		F-62 F-66	4 4	-0.5 -0.5	278.08 277.92			ja	ja	2	ja	Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US
8093	Zürich-Höngg	Einsteinstrasse	680536	251295	522	31	S-1	08.11.2006	250	0.7	17.12.2006		F-CO	4	-0.7	250.8			ja	ja	4	ja	Heim	Heim	EKZ	Schärli	US
8703	Erlenbach	Seestrasse 22	686978	240160	410	32	S-1	30.11.2006	248	0.3	06.12.2006		F-CO	4	-0.3	247.74			ja	ja	2	ja	Broder	Markovic	EKZ	Schärli	US
8166	Niederweningen	Binzacherweg 45-64	670215	262710	455	33	S-1	10.11.2006	275	0.8	07.12.2006		F-CO	4	-0.8	273.68			ja	ja	2	ja	Erni	Styger	EKZ	Schärli	US

1) Datenausfall

2) neue Sonde: Kalibration noch nicht abgeschlossen

Legende: Nr. = Zuordnung Bohrung, Δt = Zeitintervall zwischen 2 Messungen, $\Delta p/m$ = Kalibrierfaktor für Tiefenmessung, Bauherren: EKZ = Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, EWZ = Elektrizitätswerke der Stadt Zürich, ABZ = Allgemeine Baugenossenschaft Zürich, Operateur: US = U. Schärli, ER = E. Rohner

8 ANHANG B: WÄRMELEITFÄHIGKEITSMESSUNGEN

Tabelle B-1: Vergleichsmessungen Bohrkerne/Handstücke – Cuttings; Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Porosität von Kernen/Handstücken

Probe	Gesteinstyp	Geologie	Wärmeleitfähigkeit									Porositäten/Dichte													
			Kerne/Handstücke						Cuttings			Kerne/Handstücke					Cuttings					Cuttings			
			λ_f	$S\lambda_f$	$N\lambda_f$	λ_t	$S\lambda_t$	$N\lambda_t$	λ_m	$\Delta\lambda_m$	$N\lambda_m$	$\rho_{m,F}$	$\rho_{t,F}$	ϕ_F	$\Delta\phi_F$	$\rho_{m,c}$	ρ_t	ϕ_c	$\phi_{c,korr}$	$\Delta\phi_c$		λ_{fc}	$\Delta\lambda_{fc}$	$\lambda_{fc,korr}$	$\Delta\lambda_{fc,korr}$
			[W/m,K]	[W/m,K]		[W/m,K]	[W/m,K]		[W/m,K]	[W/m,K]		[cm ³ /g]	[cm ³ /g]	[cm ³ /g]	[%]	[cm ³ /g]		[%]		[%]		[W/m,K]	[W/m,K]	[W/m,K]	[W/m,K]
			λ_f			λ_t			$\lambda_{m(TK04)}$			$\rho_{m,F}$				$\rho_{m,c}$									
B4/3	Mergel	USM	2.53	0.02	4	2.64	0.13	7			1)					2.72	2.55	9.83	6.94	0.40					
K-1	Konglomerat	OSM	3.41	0.37	9	3.44	0.27	7	4.03	0.12	5	2.72	2.68	2.36	0.017	2.71	2.66	3.17	2.50	0.35		3.80	0.09	3.75	0.09
K-2	Konglomerat	OSM	3.61	0.21	9	3.10	0.38	7	3.80	0.06	6	2.75	2.71	2.11	0.017	2.73	2.69	2.21	1.74	0.39		3.65	0.07	3.55	0.07
K-3	Konglomerat	OSM	3.99	0.38	10				4.50	0.03	2	2.79	2.76	1.58	0.022	2.79	2.75	2.20	1.73	0.43		4.31	0.09	4.13	0.08
M-1	Mergel	OSM	2.94	0.09	8	2.49	0.03	4	3.17	0.22	6	2.71	2.62	5.40	0.022	2.75	2.57	10.25	6.49	0.43		2.68	0.19	3.03	0.21
M-2	Mergel	OSM	2.95	0.14	7	2.46	0.23	7	3.14	0.16	4	2.80	2.63	9.42	0.023	2.71	2.56	8.85	7.99	0.41		2.72	0.22	3.00	0.24
S-2	Feinsandstein	OMM	3.26	0.07	8				4.09	0.10	4	2.77	2.72	2.63	0.039	2.75	2.63	6.79	3.08	0.35		3.60	0.10	3.82	0.11
S-9	Mittelsandstein	OMM	3.75	0.08	6	2.53	0.06	5	3.82	0.09	5	2.69	2.62	4.04	0.042	2.70	2.58	6.86	3.91	0.55		3.37	0.19	3.59	0.20
S-10	Feinsandstein	OMM	3.52	0.06	6	2.67	0.19	4	3.44	0.11	6	2.69	2.62	4.10	0.028	2.72	2.56	9.22	4.23	0.48		2.94	0.15	3.27	0.17
S-13	Feinsandstein	OMM	3.62	0.20	7	2.62	0.07	5	4.05	0.37	8	2.73	2.67	3.01	0.024	2.73	2.67	6.56	2.97	0.52		3.58	0.15	3.79	0.16
S-15	Feinsandstein	OMM	3.43	0.06	8	2.30	0.07	8	4.31	0.30	7	2.66	2.57	5.19	0.018	2.72	2.54	10.72	4.94	0.41		3.50	0.18	4.03	0.21
S-17	Mittelsandstein	OMM	3.68	0.09	7	2.68	0.12	5	3.31	0.09	6	2.68	2.59	5.75	0.043	2.71	2.54	9.84	5.76	0.41		2.81	0.17	3.16	0.19
S-18	Mittelsandstein	OMM	3.63	0.05	10	2.31	0.09	6	3.10	0.14	6	2.67	2.56	6.73	0.040	2.69	2.50	11.52	6.80	0.39		2.57	0.17	2.97	0.19
S-19	Mittelsandstein	OMM	3.77	0.13	8				3.94	0.16	9	2.66	2.55	6.76	0.069	2.70	2.56	8.77	5.09	0.61		3.35	0.27	3.70	0.29
S-20	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	3.13	0.19	7	2.65	0.12	6	3.19	0.22	8	2.75	2.66	5.03	0.076	2.75	2.51	12.11	5.61	0.40		2.62	0.15	3.06	0.17
S-21	Schlammstein/Feinsandstein	OMM	3.03	0.13	8	2.39	0.19	7	2.98	0.17	3	2.75	2.66	5.00	0.035	2.76	2.53	12.81	5.94	0.49		2.44	0.18	2.87	0.21
S-23	Mittelsandstein	OMM	3.82	0.05	9	2.26	0.07	5	4.06	0.48	5	2.73	2.57	9.40	0.029	2.71	2.50	12.43	7.37	0.36		3.22	0.21	3.83	0.25
S-24	Feinsandstein	OMM	3.69	0.33	7	2.96	0.04	5	3.40	0.22	7	2.71	2.67	2.36	0.046	2.72	2.64	4.67	2.07	0.37		3.14	0.07	3.23	0.07
B 2/12	Mergel (leicht anisotrop)	USM	2.74	0.05	7	2.08	0.14	2	2.86	0.03	5	2.70	2.64	3.15	0.031	2.75	2.55	11.31	5.33	0.61		2.41	0.20	2.76	0.23
Sa-1	Grobsandstein	OSM	3.35	0.22	6				3.77	0.06	4	2.75	2.51	13.85	0.023	2.78	2.39	22.10	13.38	0.49		2.53	0.36	3.60	0.52

Legende: 1) Probe zerbrochen, λ_f = Wärmeleitfähigkeit, ρ = Dichte, m = Matrix, f = wassergesättigt, t = trocken, c = Cutting, ϕ = effektive Porosität, F = Kerne/Hanstücke, c = Cutting, λ_{fc} = in-situ Wärmeleitfähigkeit aus Cutting-Messung (Formel 7) ohne Porositätskorrektur, $\lambda_{fc,korr}$ = in-situ Wärmeleitfähigkeit aus Cutting-Messung mit Porositätskorrektur (Figuren 58 -61)

:

Tabelle B-2: Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Cuttings

Probe	Nr.	Tiefe [m u.T.]	Lithologie	λ_{gem} W/m K	$s\lambda_{\text{gem}}$ W/m K	λ_w W/m K	m_m g	m_w g	ρ_w g/cm ³	ρ_m g/cm ³	λ_m W/m,K	$\Delta\lambda_m$ W/m,K	$\Delta\lambda_m/\lambda_m$ [%]	ϕ_c [%]	ϕ_F [%]	$\Delta\phi_{\text{eff}}$ [%]	$\Delta\phi_F$ [%]	λ_{eff} W/m,K	$\Delta\lambda_{\text{eff}}$ W/m,K
Jona																			
Jo 98	3	98 - 114	Feinsandstein	1.91	0.112	0.62	432.50	48.03	1	2.76	2.71	0.19	7.00	21.64	10.15	0.65	0.30	2.33	0.147
Jo 194	3	194 - 210	Grobsandstein mit Konglomerat	2.14	0.231	0.62	480.52	71.90	1	2.73	3.54	0.48	13.58	6.54	4.41	1.07	0.72	3.27	0.427
Jo 250	3	250 - 258	Feinsandstein	2.08	0.113	0.62	409.84	63.49	1	2.74	3.48	0.24	6.91	11.12	5.14	0.40	0.18	3.19	0.209
Kilchberg																			
Ki 102	4	102 - 114	Feinsandstein mit Siltstein/Mergel	1.90	0.034	0.62	271.55	49.55	1	2.78	3.36	0.09	2.54	14.32	6.66	0.66	0.31	3.00	0.073
Ki 142	4	142 - 150	Feinsandstein mit Siltstein	1.90	0.035	0.62	295.02	51.69	1	2.76	3.26	0.08	2.60	11.65	5.39	0.46	0.21	2.98	0.074
Ki 180	4	180 - 194	Mittelsandstein+Siltstein	1.75	0.044	0.62	277.16	50.44	1	2.78	2.95	0.10	3.40	15.35	9.88	0.52	0.34	2.53	0.079
Ki 218	4	218 - 234	Siltstein	1.55	0.005	0.62	266.01	54.39	1	2.79	2.61	0.03	1.03	16.72	7.80	0.37	0.17	2.33	0.023
Oberhasli																			
Ob 150	6	150 - 180	Feinsandstein	2.01	0.150	0.62	191.76	30.26	1	2.75	3.33	0.32	9.50	17.76	8.30	0.60	0.28	2.90	0.253
Ob 262	6	262 - 268	Feinsandstein-Mergel	2.01	0.150	0.62	238.30	37.25	1	2.76	3.33	0.32	9.49	19.63	9.19	0.46	0.21	2.85	0.246
Illnau																			
Il 115	7	115 - 121	Feinsandstein-Mergel	2.06	0.016	0.62	331.98	34.84	1	2.74	2.92	0.03	1.09	15.37	7.16	0.56	0.26	2.61	0.028
Il 167	7	167 - 171	Feinsandstein	1.79	0.133	0.62	378.02	47.59	1	2.73	2.58	0.23	9.06	17.23	8.05	0.56	0.26	2.30	0.191
Il 215	7	215 - 219	Feinsandstein	1.65	0.010	0.62	297.44	56.38	1	2.76	2.74	0.03	1.24	9.42	4.33	0.28	0.13	2.57	0.031
Il 267	7	267 - 271	Feinsandstein	1.89	0.030	0.62	335.16	64.31	1	2.72	3.38	0.08	2.34	11.96	5.54	0.40	0.19	3.08	0.069
Rorbas																			
Ro 100	8	100 - 110	Feinsandstein-Mergel	1.77	0.100	0.62	259.57	59.70	1	2.70	3.39	0.27	7.94	11.52	5.33	0.45	0.21	3.09	0.233
Ro 136	8	136 - 144	Feinsandstein-Mergel	1.75	0.031	0.62	386.04	48.02	1	2.69	2.48	0.06	2.23	19.55	9.15	0.55	0.26	2.19	0.045
Ro 212	8	212 - 220	Feinsandstein-Mergel	1.97	0.001	0.62	435.29	61.81	1	2.71	3.07	0.03	0.82	12.34	5.72	0.87	0.40	2.80	0.028
Zollikon																			
Zo 120	9	120 - 128	Feinsandstein	2.02	0.104	0.62	403.02	29.31	1	2.74	2.55	0.15	5.82	9.30	4.27	0.39	0.18	2.40	0.134
Zo 164	9	164 - 174	Feinsandstein	2.35	0.174	0.62	423.07	39.28	1	2.76	3.31	0.28	8.60	12.46	5.78	0.49	0.23	3.00	0.244
Bülach U																			
BüU 84	10	84 - 116	Mergel-Siltstein-Feinsandstein	1.52	0.009	0.62	255.95	63.69	1	2.76	2.82	0.04	1.40	23.18	10.88	0.49	0.23	2.39	0.031
BüU 150	10	150 - 180	Mergel-Siltstein	1.69	0.010	0.62	291.06	65.31	1	2.76	3.14	0.04	1.41	15.07	7.02	0.65	0.30	2.80	0.039
BüU 260	10	260 - 275	Siltstein-Feinsandstein-Mergel	1.62	0.032	0.62	102.79	21.81	1	2.74	2.84	0.08	2.86	15.64	7.29	0.87	0.41	2.54	0.069
Witikon																			
Wit 118	13	118 - 130	Feinsandstein	2.06	0.014	0.62	113.99	16.01	1	2.73	3.27	0.04	1.19	14.55	6.77	0.57	0.27	2.92	0.035
Wit 216	13	216 - 220	Feinsandstein	1.77	0.036	0.62	234.47	51.51	1	2.78	3.37	0.10	3.04	15.29	7.12	0.52	0.24	2.99	0.085
Wädenswil																			
Wäd 94	14	94 - 100	Feinsandstein	2.09	0.191	0.62	361.97	35.28	1	2.75	2.89	0.31	10.69	12.29	5.70	0.48	0.22	2.65	0.267
Wäd 126	14	126 - 134	Feinsandstein mit Mergel	2.12	0.149	0.62	420.03	39.37	1	2.78	2.92	0.24	8.16	12.66	5.87	1.05	0.49	2.67	0.206
Wäd 220	14	220 - 226	Mergel mit Feinsandstein	1.46	0.001	0.62	262.10	53.13	1	2.73	2.35	0.02	0.87	18.71	8.75	0.59	0.27	2.09	0.018
Wäd 280	14	280 - 286	Feinsandstein mit Mergel	1.73	0.004	0.62	122.85	16.57	1	2.78	2.54	0.02	0.73	12.24	5.67	0.89	0.41	2.34	0.021
Meilen																			
Me 104	15	104 - 108	Feinsandstein	1.67	0.033	0.62	271.20	58.89	1	2.74	3.01	0.09	2.91	20.89	9.79	0.88	0.41	2.58	0.070
Me 148	15	148 - 152	Feinsandstein mit Mergel	1.73	0.031	0.62	320.22	64.44	1	2.79	3.08	0.08	2.65	18.27	8.54	0.51	0.24	2.68	0.066
Me 166	15	166 - 174	Feinsandstein	1.61		0.62	190.31	30.62	1	2.74	2.46	0.02	0.77	13.99	6.50	0.47	0.22	2.25	0.018
Me 196	15	196 - 200	Siltstein-Mergel	1.97	0.043	0.62	175.38	45.55	1	2.75	4.50	0.16	3.48	17.76	8.30	0.66	0.31	3.82	0.124
Dielsdorf																			
Di 120	16	120 - 150	Mergel	1.60	0.161	0.62	157.43	36.11	1	2.73	2.91	0.41	13.98	20.89	9.79	0.60	0.28	2.50	0.316
Di 182	16	182 - 200	Siltstein	1.75	0.049	0.62	102.31	23.29	1	2.70	3.30	0.13	4.05	16.42	7.66	0.67	0.31	2.90	0.110
Wisental																			
Wi 100	17	100 - 110	Feinsandstein	1.75	0.101	0.62	421.62	65.54	1	2.72	2.72	0.20	7.32	7.66	3.49	0.51	0.23	2.58	0.183
Wi 154	17	154 - 162	Feinsandstein	1.84	0.024	0.62	386.14	53.88	1	2.72	2.78	0.05	1.81	10.48	4.83	1.10	0.51	2.58	0.049
Wi 186	17	186 - 194	Feinsandstein/Mergel	1.78	0.046	0.62	438.38	41.44	1	2.72	2.33	0.07	3.07	11.18	5.17	0.67	0.31	2.18	0.064

Probe	Nr.	Tiefe [m u.T.]	Lithologie	λ_{gem} W/m K	$s\lambda_{\text{gem}}$ W/m K	λ_w W/m K	m_m g	m_w g	ρ_w g/cm ³	ρ_m g/cm ³	λ_m W/m,K	$\Delta\lambda_m$ W/m,K	$\Delta\lambda_m/\lambda_m$ [%]	ϕ_c [%]	ϕ_F [%]	$\Delta\phi_{\text{eff}}$ [%]	$\Delta\phi_F$ [%]	λ_{eff} W/m,K	$\Delta\lambda_{\text{eff}}$ W/m,K
Oberembrach																			
Oe 158	18	158 - 170	Konglomerat	2.52	0.111	0.62	360.84	43.82	1	2.69	3.98	0.21	5.37	4.80	3.79	0.54	0.43	3.71	0.194
Oe 208	18	208 - 222	Feinsandstein-Mittelsandstein	1.94	0.053	0.62	415.77	41.97	1	2.71	2.64	0.09	3.24	16.67	7.78	0.75	0.35	2.36	0.071
Oe 250	18	250 - 270	Fein-Mittelsandstein-Mergel	1.80	0.254	0.62	348.49	30.97	1	2.72	2.33	0.38	16.25	11.73	5.43	0.36	0.17	2.17	0.333
Hittnau																			
Hit 152	19	152 - 160	Konglomerat	1.87	0.013	0.62	315.46	60.87	1	2.78	3.39	0.05	1.42	3.72	2.94	0.37	0.30	3.22	0.047
Hit 184	19	184 - 192	Feinsandstein	2.27	0.072	0.62	387.05	46.29	1	2.74	3.47	0.14	3.89	15.05	7.01	0.47	0.22	3.08	0.112
Hit 210	19	210 - 216	Konglomerat	1.88	0.039	0.62	318.29	57.15	1	2.75	3.24	0.09	2.86	6.04	4.77	0.30	0.24	3.00	0.082
Zürich-FIFA																			
Fi 150	20	150 - 160	Mittelsandstein	1.91	0.092	0.62	192.00	35.95	1	2.70	3.37	0.22	6.44						
Fi 222	20	222 - 232	Feinsandstein	2.28	0.045	0.62	225.25	28.95	1	2.74	3.61	0.09	2.56	9.57	4.46	0.51	0.24	3.34	0.083
Fi 256	20	256 - 268	Mittelsandstein	1.97	0.032	0.62	296.03	59.87	1	2.73	3.74	0.09	2.49	12.93	8.38	0.48	0.31	3.22	0.076
Pfäffikon																			
Aus 154	21	154 - 158	Feinsandstein	1.99	0.073	0.62	211.74	26.31	1	2.78	2.99	0.13	4.50	20.40	9.62	0.47	0.22	2.57	0.105
Aus 270	21	270 - 276	Konglomerat	1.95	0.039	0.62	251.19	34.89	1	2.81	3.05	0.08	2.58	14.39	11.35	0.55	0.43	2.54	0.061
Aus 294	21	294 - 300	Feinsandstein	1.85	0.064	0.62	230.48	28.35	1	2.81	2.71	0.11	4.21	17.04	7.95	0.68	0.32	2.41	0.094
Altstetten																			
Alt 106	22	106 - 114	Feinsandstein	1.75	0.005	0.62	260.73	59.93	1	2.77	3.38	0.04	1.26	23.35	10.96	0.61	0.29	2.81	0.034
Alt 190	22	190 - 202	Feinsandstein	1.63	0.077	0.62	274.89	60.14	1	2.77	2.94	0.19	6.53	16.48	7.69	0.31	0.14	2.61	0.157
Alt 264	22	264 - 280	Feinsandstein	1.94	0.001	0.62	303.99	65.44	1	2.77	3.82	0.05	1.23	13.28	6.17	0.43	0.20	3.42	0.041
Hombrechtikon																			
Hb 186	25	186 - 190	Konglomerat	2.24	0.045	0.62	252.38	41.03	1	2.78	4.01	0.11	2.80	4.47	3.53	0.58	0.46	3.75	0.106
Eggenwil																			
Egg 66	27	66 - 84	Grobsandstein	2.06	0.051	0.62	241.00	38.09	1	2.72	3.46	0.11	3.24	11.14	7.27	0.78	0.51	3.05	0.096
Egg 150	27	150 - 196	Grobsandstein	2.04	0.095	0.62	267.78	39.97	1	2.73	3.32	0.20	5.89	22.57	14.37	0.44	0.28	2.61	0.132
Egg 250	27	250 - 270	Feinsandstein	2.06	0.055	0.62	202.30	32.99	1	2.75	3.54	0.12	3.52	11.72	5.43	0.26	0.12	3.22	0.107
Wollerau																			
Wo 132	28	132 - 144	Feinsandstein	2.21	0.037	0.62	271.43	39.96	1	2.73	3.69	0.08	2.26	7.53	3.43	0.31	0.14	3.47	0.076
Wo 180	28	180 - 192	Mittelsandstein	1.80	0.013	0.62	234.80	34.44	1	2.74	2.76	0.03	1.19	7.19	4.81	0.20	0.13	2.57	0.030
Wo 232	28	232 - 240	Feinsandstein	2.17	0.197	0.62	264.11	41.05	1	2.74	3.71	0.43	11.50	7.59	3.46	0.20	0.09	3.49	0.387
Weiningen																			
Wn 134	30	134 - 142	Grobsandstein mit Konglomerat	1.69	0.012	0.62	219.21	35.40	1	2.71	2.62	0.03	1.19	15.26	9.82	0.51	0.33	2.27	0.027
Wn 162	30	162 - 174	Grobsandstein	2.21	0.079	0.62	223.10	38.93	1	2.73	4.05	0.19	4.78	15.86	10.20	0.47	0.30	3.35	0.145
Wn 250	30	250 - 258	Feinsandstein	1.73	0.015	0.62	244.18	39.91	1	2.75	2.75	0.04	1.39	9.92	4.57	0.43	0.20	2.57	0.035
Zürich-ETH																			
ETH 136	31	136 - 148	Feinsandstein	2.18	0.064	0.62	251.01	37.96	1	2.79	3.71	0.14	3.84	17.09	7.98	0.55	0.26	3.22	0.115
ETH 168	31	168 - 172	Feinsandstein	2.14	0.041	0.62	250.70	34.08	1	2.80	3.43	0.09	2.54	16.70	7.79	0.45	0.21	3.00	0.071
ETH 220	31	220 - 228	Feinsandstein	2.00	0.071	0.62	262.73	41.35	1	2.71	3.29	0.15	4.59	20.47	9.59	0.58	0.27	2.80	0.117
Erlenbach																			
Eb 130	32	130 - 138	Feinsandstein	2.04	0.043	0.62	239.76	35.59	1	2.77	3.33	0.09	2.77	15.40	7.18	0.43	0.20	2.95	0.076
Eb 186	32	186 - 196	Feinsandstein	2.28	0.078	0.62	270.97	35.66	1	2.78	3.66	0.16	4.32	13.33	6.19	0.37	0.17	3.28	0.133
Eb 234	32	234 - 240	Feinsandstein	1.95	0.072	0.62	265.12	34.22	1	2.78	2.95	0.13	4.57	12.66	5.87	0.42	0.20	2.69	0.116
Niederweningen																			
Nw 126	33	126 - 136	Feinsandstein	1.87	0.124	0.62	223.75	33.64	1	2.73	2.94	0.25	8.37	16.19	7.55	0.84	0.39	2.62	0.203
Nw 150	33	150 - 164	Feinsandstein mit Mergel	1.93	0.130	0.62	219.36	38.56	1	2.76	3.36	0.30	8.82	23.57	11.06	0.77	0.36	2.78	0.219
Nw 210	33	210 - 222	Feinsandstein	1.88	0.097	0.62	238.05	37.14	1	2.73	3.01	0.20	6.63	13.61	6.32	0.60	0.28	2.72	0.169

Legende: λ_{gem} = Wärmeleitfähigkeit des Cutting-Wasser-Gemisches, λ_{eff} = in-situ Wärmeleitfähigkeit aus Cuttings berechnet (Gestein wassergesättigt), λ_w = Wärmeleitfähigkeit von Wasser (0.62 W/m,K), m_w = Gewicht des Wasseranteils im Cutting-Wasser-Gemisch, m_m = Gewicht des Matrixanteils der Gesteinsprobe, ρ_w = Dichte von Wasser, ρ_m = Matrixdichte des Gesteins, Δ = Fehler, ϕ_c = scheinbare Porosität der Cuttings, ϕ_F = korrigierte Porosität (nach Formeln in Figuren 50 – 61)

9 ANHANG C: DICHT- UND POROSITÄTSMESSUNGEN

Tabelle C-1: Vergleichsmessungen Bohrkerne/Handstücke - Cuttings, Dichte und Porosität von Bohrkerne/Handstücken

Probe	Lithologie	G_f [g]	A [g]	G_t [g]	$G_f - G_t$ [g]	$\rho_{t,F}$ [g]	$\rho_{t,F}$ [g/cm ³]	$\rho_{m,F}$ [g/cm ³]	$\Delta \rho_m$ [g/cm ³]	ϕ_F [%]	$\Delta \phi_F$ [%]	$\Delta \phi_F$ [%]
B 4/3	Mergel											
K-1	Konglomerat	1762.30	657.90	1746.8	15.50	2.68	2.66	2.72	0.0006	2.36	0.0170	0.7
K-2	Konglomerat	1763.50	650.60	1749.8	13.70	2.71	2.69	2.75	0.0006	2.11	0.0172	0.8
K-3	Konglomerat	1435.80	519.93	1427.6	8.20	2.76	2.75	2.79	0.0008	1.58	0.0215	1.4
M-1	Mergel	1323.00	505.45	1295.70	27.30	2.62	2.56	2.71	0.0008	5.40	0.0221	0.4
M-2	Mergel	1297.70	492.61	1251.30	46.40	2.63	2.54	2.80	0.0009	9.42	0.0228	0.2
S-2	Feinsandstein	776.70	285.31	769.20	7.50	2.72	2.70	2.77	0.0014	2.63	0.0392	1.5
S-9a	Mittelsandstein	773.00	294.77	761.10	11.90	2.62	2.58	2.69	0.0014	4.04	0.0380	0.9
S-9b	Mittelsandstein	639.00	242.92	630.80	8.20	2.63	2.60	2.69	0.0016	3.38	0.0460	1.4
S-10	Feinsandstein	1032.90	394.70	1016.70	16.20	2.62	2.58	2.69	0.0010	4.10	0.0283	0.7
S-13	Feinsandstein	1233.30	461.30	1219.40	13.90	2.67	2.64	2.73	0.0009	3.01	0.0242	0.8
S-15	Feinsandstein	1588.30	617.10	1556.30	32.00	2.57	2.52	2.66	0.0006	5.19	0.0181	0.3
S-17a	Mittelsandstein	954.60	368.63	932.90	21.70	2.59	2.53	2.69	0.0011	5.89	0.0304	0.5
S-17b	Mittelsandstein	527.31	204.16	515.87	11.44	2.58	2.53	2.68	0.0020	5.60	0.0548	1.0
S-18	Mittelsandstein	718.20	281.03	699.30	18.90	2.56	2.49	2.67	0.0015	6.73	0.0399	0.6
S-19	Mittelsandstein	410.48	161.24	399.58	10.90	2.55	2.48	2.66	0.0025	6.76	0.0695	1.0
S-20a	Schlammstein/Feinsandstein	531.63	188.58	522.38	9.25	2.82	2.77	2.91	0.0023	4.91	0.0593	1.2
S-20b	Schlammstein/Feinsandstein	323.95	121.91	317.82	6.13	2.66	2.61	2.75	0.0034	5.03	0.0918	1.8
S-21	Schlammstein/Feinsandstein	856.50	322.09	840.40	16.10	2.66	2.61	2.75	0.0013	5.00	0.0347	0.7
S-23	Mittelsandstein	979.70	381.73	943.80	35.90	2.57	2.47	2.73	0.0011	9.40	0.0294	0.3
S-24	Mittelsandstein	645.00	241.35	639.30	5.70	2.67	2.65	2.71	0.0016	2.36	0.0463	2.0
B2/12	Mergel	949.10	358.84	937.80	11.30	2.64	2.61	2.70	0.0011	3.15	0.0312	1.0
Sa-1	Grobsandstein	1220.20	486.08	1152.90	67.30	2.51	2.37	2.75	0.0009	13.85	0.0232	0.2

Legende: G_f = Gewicht der wassergesättigten Probe, G_t = Gewicht der getrockneten Probe, G_{Beh} = Gewicht des leeren Probenbehälters, A = Gewicht des Auftriebs der Probe, $\rho_{t,F}$ = Feuchtraumdichte (Dichte der wassergesättigten Probe), $\rho_{t,F}$ = Dichte der trockenen Probe, ρ_m = Matrixdichte, ϕ_F = effektive Porosität, $\Delta \phi$ = Fehler der effektive Porosität, F = Bohrkerne/Handstücke

Tabelle C-2: Vergleichsmessungen Bohrkern/Handstücke – Cuttings; Dichte und Porosität an Cuttings (zerkleinerte Bohrkern/Handstücke)

Probe	Lithologie	G _f [g]	A [g]	G _{Beh} [g]	G _{Beh} +G _t [g]	G _t [g]	G _f -G _t [g]	ρ _{f,c} [g/cm ³]	ρ _{t,c} [g/cm ³]	ρ _{m,c} [g/cm ³]	Δρ _{m,c} [g/cm ³]	φ _c [%]	Δφ _c [%]
B 4/3 a	Mergel	72.97	28.64	28.53	98.69	70.16	2.81	2.55	2.45	2.72	0.008	9.81	0.39
B 4/3 b	Mergel	69.6	27.32	28.87	95.78	66.91	2.69	2.55	2.45	2.72	0.009	9.85	0.41
								2.55	2.45	2.72	0.008	9.83	0.40
K-1 a	Konglomerat	81.28	30.58	28.77	109.05	80.28	1	2.66	2.63	2.71	0.006	3.27	0.37
K-1 b	Konglomerat	91.48	34.42	28.47	118.89	90.42	1.06	2.66	2.63	2.71	0.004	3.08	0.32
								2.66	2.63	2.71	0.005	3.17	0.35
K-2 a	Konglomerat	77.81	28.86	29.21	106.4	77.19	0.62	2.70	2.67	2.73	0.006	2.15	0.39
K-2 b	Konglomerat	77.24	28.7	29.15	105.74	76.59	0.65	2.69	2.67	2.73	0.006	2.26	0.39
								2.69	2.67	2.73	0.006	2.21	0.39
K-3 a	Konglomerat	81.52	29.58	29.08	109.96	80.88	0.64	2.76	2.73	2.79	0.005	2.16	0.38
K-3 b	Konglomerat	64.19	23.35	28.94	92.61	63.67	0.52	2.75	2.73	2.79	0.010	2.23	0.48
								2.75	2.73	2.79	0.008	2.20	0.43
M-1a	Mergel	69.1	27.05	29.12	95.21	66.09	3.01	2.55	2.44	2.75	0.009	11.13	0.41
M-1b	Mergel	63.35	24.56	29.84	90.89	61.05	2.3	2.58	2.49	2.74	0.012	9.36	0.46
								2.57	2.46	2.75	0.011	10.25	0.43
M-2 a	Mergel	61.17	23.68	29.11	88.17	59.06	2.11	2.58	2.49	2.74	0.013	8.91	0.47
M-2 b	Mergel	82.68	32.53	29.85	109.67	79.82	2.86	2.54	2.45	2.69	0.006	8.79	0.34
								2.56	2.47	2.71	0.009	8.85	0.41
S-2 a	Feinsandstein	79.04	30.06	29.37	106.38	77.01	2.03	2.63	2.56	2.75	0.006	6.75	0.37
S-2 b	Feinsandstein	88.16	33.51	29.18	115.05	85.87	2.29	2.63	2.56	2.75	0.005	6.83	0.33
								2.63	2.56	2.75	0.006	6.79	0.35
S-9 a	Mittelsandstein	57.86	22.38	29.12	85.44	56.32	1.54	2.59	2.52	2.70	0.015	6.88	0.50
S-9 b	Mittelsandstein	48.72	18.85	28.83	76.26	47.43	1.29	2.58	2.52	2.70	0.028	6.84	0.59
								2.58	2.52	2.70	0.022	6.86	0.55
S-10 a	Feinsandstein	65.97	25.8	28.3	91.88	63.58	2.39	2.56	2.46	2.72	0.010	9.26	0.43
S-10 b	Feinsandstein	54.96	21.47	29.22	82.21	52.99	1.97	2.56	2.47	2.72	0.019	9.18	0.52
								2.56	2.47	2.72	0.014	9.22	0.48
S-13 a	Feinsandstein	54.72	20.93	29.25	82.62	53.37	1.35	2.61	2.55	2.73	0.018	6.45	0.53
S-13 b	Feinsandstein	57.18	21.86	29.34	85.06	55.72	1.46	2.62	2.55	2.73	0.016	6.68	0.51
								2.62	2.55	2.73	0.017	6.56	0.52
S-15 a	Feinsandstein	64.52	25.42	29.2	91.01	61.81	2.71	2.54	2.43	2.72	0.011	10.66	0.44
S-15 b	Feinsandstein	73.7	29.05	29.13	99.7	70.57	3.13	2.54	2.43	2.72	0.008	10.77	0.39
								2.54	2.43	2.72	0.009	10.72	0.41
S-17 a	Mittelsandstein	68.16	26.79	29.84	95.38	65.54	2.62	2.54	2.45	2.71	0.010	9.78	0.42
S-17 b	Mittelsandstein	69.1	27.15	28.48	94.89	66.41	2.69	2.55	2.45	2.72	0.009	9.91	0.41
								2.54	2.45	2.71	0.009	9.84	0.41

Probe	Lithologie	G_f [g]	A [g]	G_{Beh} [g]	$G_{Beh}+G_t$ [g]	G_t [g]	G_f-G_t [g]	$\rho_{f,c}$ [g/cm ³]	$\rho_{t,c}$ [g/cm ³]	$\rho_{m,c}$ [g/cm ³]	$\Delta\rho_{m,c}$ [g/cm ³]	ϕ_c [%]	$\Delta\phi_c$ [%]
S-18 a	Mittelsandstein	69.22	27.64	29.19	95.3	66.11	3.11	2.50	2.39	2.70	0.009	11.25	0.41
S-18 b	Mittelsandstein	75.57	30.3	29.2	101.2	72	3.57	2.49	2.38	2.69	0.007	11.78	0.37
								2.50	2.38	2.69	0.008	11.52	0.39
S-19 a	Mittelsandstein	45.83	17.92	29.3	73.57	44.27	1.56	2.56	2.47	2.71	0.042	8.71	0.62
S-19 b	Mittelsandstein	47.99	18.8	29.35	75.68	46.33	1.66	2.55	2.46	2.70	0.033	8.83	0.60
								2.56	2.47	2.70	0.038	8.77	0.61
S-20-a	Schlammstein/Feins	71.96	29.09	28.29	97.01	68.72	3.24	2.47	2.36	2.66	0.008	11.14	0.38
S-20-b	Schlammstein/Feins	68.54	26.89	29.49	94.51	65.02	3.52	2.55	2.42	2.78	0.010	13.09	0.42
								2.51	2.39	2.72	0.009	12.11	0.40
S-21 a	Schlammstein/Feins	54.17	21.41	29.51	80.94	51.43	2.74	2.53	2.40	2.75	0.022	12.80	0.52
S-21 b	Schlammstein/Feins	62.03	24.49	28.98	87.87	58.89	3.14	2.53	2.40	2.76	0.013	12.82	0.46
								2.53	2.40	2.76	0.017	12.81	0.49
S-23 a	Mittelsandstein	81.05	32.46	28.74	105.67	76.93	4.12	2.50	2.37	2.71	0.006	12.69	0.34
S-23 b	Mittelsandstein	73.17	29.28	29.7	99.31	69.61	3.56	2.50	2.38	2.71	0.008	12.16	0.38
								2.50	2.37	2.71	0.007	12.43	0.36
S-24 a	Mittelsandstein	83.96	31.8	29.16	111.65	82.49	1.47	2.64	2.59	2.72	0.005	4.62	0.35
S-24 b	Mittelsandstein	75.54	28.59	29.21	103.4	74.19	1.35	2.64	2.59	2.72	0.007	4.72	0.39
								2.64	2.59	2.72	0.006	4.67	0.37
B2/12 a	Mergel	47.72	18.69	29.31	74.94	45.63	2.09	2.55	2.44	2.75	0.036	11.18	0.60
B2/12 b	Mergel	45.66	17.91	29.24	72.85	43.61	2.05	2.55	2.43	2.75	0.045	11.45	0.63
								2.55	2.44	2.75	0.040	11.31	0.61
Sa-1 a	Grobsandstein	53.07	22.15	28.95	77.29	48.34	4.73	2.40	2.18	2.77	0.026	21.35	0.51
Sa-1 b	Grobsandstein	57.63	24.2	29.22	81.32	52.1	5.53	2.38	2.15	2.79	0.020	22.85	0.46
								2.39	2.17	2.78	0.023	22.10	0.49

Legende: G_f = Gewicht der wassergesättigten Probe, G_t = Gewicht der getrockneten Probe, G_{Beh} = Gewicht des leeren Probenbehälters, A = Gewicht des Auftriebs der Probe, $\rho_{f,c}$ = Feuchtraumdichte (Dichte der wassergesättigten Probe), $\rho_{t,c}$ = Dichte der trockenen Probe, $\rho_{m,c}$ = Matrixdichte, ϕ_c = scheinbare Porosität, $\Delta\phi_c$ = Fehler der effektive Porosität, c = Cuttings

Tabelle C-3: Dichte- und Porositätsmessungen an Cuttings

Probe	Bohrung	Nr.	Lithologie	Geologie	Tiefenintervall [m u.T.]	G _r [g]	A [g]	G _{Beh} [g]	G _{Beh} +G _t [g]	G _t [g]	G _r -G _t [g]	ρ _{t,c} [g/cm ³]	ρ _{t,c} [g/cm ³]	ρ _{m,c} [g/cm ³]	Δρ _{m,c} [g/cm ³]	φ _c [%]	Δφ _c [%]
Jona																	
Jo 98 a	Jona	3	Feinsandstein	OSM	98-114 m	41.72	17.43	242.17	280.11	37.94	3.78	2.39	2.18	2.78	0.001	21.69	0.64
Jo 98 b	Jona	3	Feinsandstein	OSM	98-114 m	40.89	17.27	29.32	66.48	37.16	3.73	2.37	2.15	2.74	0.135	21.60	0.65
												2.38	2.16	2.76	0.068	21.64	0.65
Jo 194 a	Jona	3	Grobsandstein mit Konglomerat	OSM	194 - 210 m	29.27	11.22	29.32	57.84	28.52	0.75	2.61	2.54	2.72		6.68	1.00
Jo 194 a	Jona	3	Grobsandstein mit Konglomerat	OSM	194 - 210 m	25.83	9.86	28.52	53.72	25.20	0.63	2.62	2.56	2.73	0.591	6.39	1.13
												2.61	2.55	2.73	0.591	6.54	1.07
Jo 250 b	Jona	3	Feinsandstein	OSM	250 - 258 m	76.48	30.04	29.75	102.86	73.11	3.37	2.55	2.43	2.74	0.007	11.22	0.37
Jo 250 a	Jona	3	Feinsandstein	OSM	250 - 258 m	67.80	26.67	29.20	94.06	64.86	2.94	2.54	2.43	2.73	0.010	11.02	0.42
												2.54	2.43	2.74	0.008	11.12	0.40
Kilchberg																	
Ki 102 a	Kilchberg	4	Feinsandstein mit Siltstein/Mergel	OSM	102 - 114 m	39.14	15.62	29.66	66.43	36.77	2.37	2.51	2.35	2.78	0.164	15.17	0.72
Ki 102 b	Kilchberg	4	Feinsandstein mit Siltstein/Mergel	OSM	102 - 114 m	47.87	18.85	28.92	74.25	45.33	2.54	2.54	2.40	2.78	0.035	13.47	0.59
												2.52	2.38	2.78	0.100	14.32	0.66
Ki 142 a	Kilchberg	4	Feinsandstein mit Siltstein	OSM	142 - 150 m	62.50	24.46	29.10	88.75	59.65	2.85	2.56	2.44	2.76	0.012	11.65	0.46
Ki 180 a	Kilchberg	4	Mittelsandstein+Siltstein	OSM	180 - 184 m	53.64	21.43	28.53	78.88	50.35	3.29	2.50	2.35	2.78	0.021	15.35	0.52
Ki 218 a	Kilchberg	4	Siltstein	OSM	218 - 234 m	60.18	23.98	29.36	85.61	56.25	3.93	2.51	2.35	2.81	0.015	16.39	0.47
Ki 218 b	Kilchberg	4	Siltstein	OSM	218 - 234 m	99.05	39.99	29.05	121.28	92.23	6.82	2.48	2.31	2.78	0.004	17.05	0.28
												2.49	2.33	2.79	0.010	16.72	0.37
Oberhasli																	
Ob 150 a	Oberhasli	6	Feinsandstein	OMM	150 - 180 m	50.08	20.59	29.44	75.82	46.38	3.70	2.43	2.25	2.75	0.034	17.97	0.54
Ob 150 b	Oberhasli	6	Feinsandstein	OMM	150 - 180 m	42.08	17.26	28.87	67.92	39.05	3.03	2.44	2.26	2.74	0.082	17.56	0.65
												2.44	2.26	2.75	0.058	17.76	0.60
Ob 262 a	Oberhasli	6	Feinsandstein mit Mergel	USM	262 - 278 m	51.73	21.44	29.19	76.74	47.55	4.18	2.41	2.22	2.75	0.029	19.50	0.52
Ob 262 a	Oberhasli	6	Feinsandstein mit Mergel	USM	262 - 278 m	68.63	28.44	28.65	91.66	63.01	5.62	2.41	2.22	2.76	0.010	19.76	0.39
												2.41	2.22	2.76	0.020	19.63	0.46
Illnau																	
Il 115 a	Illnau	7	Feinsandstein mit Mergel	OSM	115 - 121 m	45.48	18.53	29.33	72.09	42.76	2.72	2.45	2.31	2.70	0.051	14.68	0.60
Il 115 b	Illnau	7	Feinsandstein mit Mergel	OSM	115 - 121 m	54.22	21.80	28.48	79.20	50.72	3.50	2.49	2.33	2.77	0.021	16.06	0.51
												2.47	2.32	2.74	0.036	15.37	0.56
Il 167 a	Illnau	7	Feinsandstein	OSM	167 - 171 m	47.86	19.92	28.95	73.03	44.08	3.78	2.40	2.21	2.73	0.041	18.98	0.56
Il 167 b	Illnau	7	Feinsandstein	OSM	167 - 171 m	48.87	19.83	29.23	75.03	45.80	3.07	2.46	2.31	2.73	0.035	15.48	0.57
												2.43	2.26	2.73	0.038	17.23	0.56
Ill 215 a	Illnau	7	Feinsandstein	OSM	215 - 219 m	110.45	42.60	29.40	135.85	106.45	4.00	2.59	2.50	2.76	0.003	9.39	0.26
Ill 215 b	Illnau	7	Feinsandstein	OSM	215 - 219 m	97.86	37.78	29.33	123.62	94.29	3.57	2.59	2.50	2.76	0.004	9.45	0.30
												2.59	2.50	2.76	0.004	9.42	0.28
Ill 267 a	Illnau	7	Feinsandstein	OSM	267 - 271 m	58.48	23.14	29.43	85.27	55.84	2.64	2.53	2.41	2.72	0.016	11.41	0.48
Ill 267 b	Illnau	7	Feinsandstein	OSM	267 - 271 m	86.34	34.44	28.98	111.01	82.03	4.31	2.51	2.38	2.72	0.005	12.51	0.33
												2.52	2.40	2.72	0.011	11.96	0.40
Rorbas																	
Ror 100 a	Rorbas	8	Feinsandstein mit Mergel	USM	100 - 110 m	61.84	24.72	28.82	87.78	58.96	2.88	2.50	2.39	2.70	0.013	11.65	0.45
Ror 100 b	Rorbas	8	Feinsandstein mit Mergel	USM	100 - 110 m	63.15	25.22	29.37	89.65	60.28	2.87	2.50	2.39	2.70	0.012	11.38	0.44
												2.50	2.39	2.70	0.012	11.52	0.45
Ro 136 a	Rorbas	8	Feinsandstein mit Mergel	USM	136 - 144 m	49.31	20.70	28.72	74.20	45.48	3.83	2.38	2.20	2.70	0.034	18.50	0.54
Ro 136 b	Rorbas	8	Feinsandstein mit Mergel	USM	136 - 144 m	47.66	20.39	28.84	72.30	43.46	4.20	2.34	2.13	2.68	0.043	20.60	0.55
												2.36	2.16	2.69	0.038	19.55	0.55
Ror 212 a	Rorbas	8	Feinsandstein mit Mergel	USM	212 - 220 m	34.01	13.59	28.57	60.88	32.31	1.70	2.50	2.38	2.72	0.539	12.51	0.82
Ror 212 b	Rorbas	8	Feinsandstein mit Mergel	USM	212 - 220 m	30.60	12.24	29.24	58.35	29.11	1.49	2.50	2.38	2.71		12.17	0.91
												2.50	2.38	2.71	0.539	12.34	0.87
Zollikon																	
Zo 120 a	Zollikon	9	Feinsandstein	OSM	120 - 128 m	80.82	31.39	29.41	107.15	77.74	3.08	2.57	2.48	2.75	0.006	9.81	0.36
Zo 120 b	Zollikon	9	Feinsandstein	OSM	120 - 128 m	69.13	26.76	29.70	96.48	66.78	2.35	2.58	2.50	2.74	0.009	8.78	0.42
												2.58	2.49	2.74	0.008	9.30	0.39
Zo 164 a	Zollikon	9	Feinsandstein	OSM	164 - 174 m	58.45	22.96	28.89	84.51	55.62	2.83	2.55	2.42	2.76	0.015	12.33	0.49
Zo 164 b	Zollikon	9	Feinsandstein	OSM	164 - 174 m	57.78	22.78	29.12	84.03	54.91	2.87	2.54	2.41	2.76	0.016	12.60	0.49
												2.54	2.42	2.76	0.016	12.46	0.49
Bülach Unterweg																	
Bü-U 84 a	Bülach Unterweg	10	Mergel-Siltstein-Feinsandstein	OMM	84 - 116 m	54.03	22.95	29.25	77.96	48.71	5.32	2.35	2.12	2.76	0.026	23.18	0.49
Bü-U 84 b	Bülach Unterweg	10	Mergel-Siltstein-Feinsandstein	OMM	84 - 116 m												
Bü-U 150 a	Bülach Unterweg	10	Mergel-Siltstein	USM	150 - 180 m	45.22	18.18	28.67	71.14	42.47	2.75	2.49	2.34	2.75	0.047	15.13	0.62
Bü-U 150 b	Bülach Unterweg	10	Mergel-Siltstein	USM	150 - 180 m	40.42	16.18	29.58	67.57	37.99	2.43	2.50	2.35	2.76	0.120	15.02	0.69
												2.49	2.34	2.76	0.083	15.07	0.65
Bü-U 260 a	Bülach Unterweg	10	Siltstein-Feinsandstein-Mergel	USM	150 - 180 m	31.69	12.85	29.15	58.83	29.68	2.01	2.47	2.31	2.74		15.64	0.87
Zürich-Witikon																	
Wit 118 a	Zürich-Witikon	13	Feinsandstein	OSM	118 - 130 m	58.03	23.38	28.30	83.02	54.72	3.31	2.48	2.34	2.73	0.015	14.16	0.48
Wit 118 b	Zürich-Witikon	13	Feinsandstein	OSM	118 - 130 m	41.48	16.73	29.12	68.10	38.98	2.50	2.48	2.33	2.74	0.088	14.94	0.67
												2.48	2.34	2.73	0.052	14.55	0.57
Wit 216 a	Zürich-Witikon	13	Feinsandstein	OSM	216 - 220 m	45.34	17.93	29.21	72.01	42.80	2.54	2.53	2.39	2.78	0.049	14.17	0.62
Wit 216 b	Zürich-Witikon	13	Feinsandstein	OSM	216 - 220 m	65.90	26.49	28.81	90.36	61.55	4.35	2.49	2.32	2.78	0.011	16.42	0.42
												2.51	2.36	2.78	0.030	15.29	0.52
Wädenswil																	
Wäd 94 a	Wädenswil	14	Feinsandstein	OSM	94 - 100 m	43.93	17.32	29.52	71.45	41.93	2.00	2.54	2.42	2.74	0.059	11.55	0.65
Wäd 94 b	Wädenswil	14	Feinsandstein	OSM	94 - 100 m	92.88	36.74	28.32	116.41	88.09	4.79	2.53	2.40	2.76	0.004	13.04	0.30
												2.53	2.41	2.75	0.031	12.29	0.48
Wäd 126 a	Wädenswil	14	Feinsandstein mit Mergel	OSM	126 - 134 m	25.18	9.85	29.27	53.21	23.94	1.24	2.56	2.43	2.78	0.226	12.59	1.14
Wäd 126 b	Wädenswil	14	Feinsandstein mit Mergel	OSM	126 - 134 m	29.53	11.54	28.28	56.34	28.06	1.47	2.56	2.43	2.79		12.74	0.97
												2.56	2.43	2.78	0.226	12.66	1.05
Wäd 220 a	Wädenswil	14	Mergel mit Feinsandstein	OSM	220 - 226 m	39.19	16.06	29.65	66.00	36.35	2.84	2.44	2.26	2.75	0.183	17.68	0.70
Wäd 220 b	Wädenswil	14	Mergel mit Feinsandstein	OSM	220 - 226 m	56.23	23.66	29.39	80.95	51.56	4.67	2.38	2.18	2.72	0.021	19.74	0.47
												2.41	2.22	2.73	0.102	18.71	0.59
Wäde 280 a	Wädenswil	14	Feinsandstein mit Mergel	OSM	280 - 286 m	37.60	14.50	28.74	64.78	36.04	1.56	2.59	2.49				

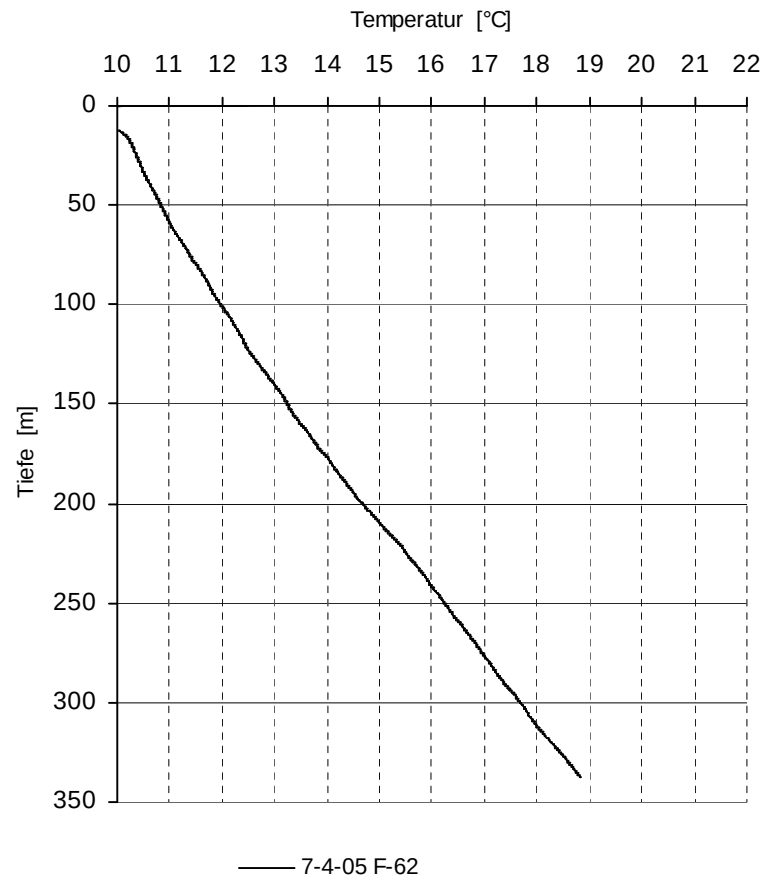
Probe	Bohrung	Nr.	Lithologie	Geologie	Tiefenintervall [m u.T.]	G _r [g]	A [g]	G _{Beh} [g]	G _{Beh} +G _t [g]	G _t [g]	G _r -G _t [g]	ρ _{r,c} [g/cm ³]	ρ _{t,c} [g/cm ³]	ρ _{m,c} [g/cm ³]	Δρ _{m,c} [g/cm ³]	φ _c [%]	Δφ _c [%]
Meilen																	
Me 104 a	Meilen	15	Feinsandstein	OSM	104 - 108 m	28.54	12.27										
Me 104 b	Meilen	15	Feinsandstein	OSM	104 - 108 m	30.47	12.83	29.14	56.93	27.79	2.68	2.37	2.17	2.74	3.811	20.89	0.88
Me 148 a	Meilen	15	Feinsandstein mit Mergel	OSM	148 - 152 m	45.60	18.50	28.66	70.89	42.23	3.37	2.46	2.28	2.79	0.049	18.22	0.61
Me 148 b	Meilen	15	Feinsandstein mit Mergel	OSM	148 - 152 m	67.30	27.29	28.42	90.72	62.30	5.00	2.47	2.28	2.79	0.010	18.32	0.41
												2.47	2.28	2.79	0.030	18.27	0.51
Me 166 a	Meilen	15	Feinsandstein	OSM	166 - 174 m	48.39	19.40	28.55	74.21	45.66	2.73	2.49	2.35	2.74	0.032	14.07	0.58
Me 166 b	Meilen	15	Feinsandstein	OSM	166 - 174 m	78.63	31.49	29.19	103.44	74.25	4.38	2.50	2.36	2.74	0.007	13.91	0.36
												2.50	2.36	2.74	0.020	13.99	0.47
Me 196 a	Meilen	15	Siltstein-Mergel	OSM	196 - 200 m	41.52	17.00	28.66	67.16	38.50	3.02	2.44	2.26	2.75	0.087	17.76	0.66
Dielsdorf																	
Di 120 a	Dielsdorf	16	Mergel	USM	120 - 150 m	39.60	16.70	28.35	64.48	36.13	3.47	2.37	2.16	2.73	0.133	20.78	0.67
Di 120 b	Dielsdorf	16	Mergel	USM	121 - 150 m	50.73	21.38	29.50	75.74	46.24	4.49	2.37	2.16	2.74	0.034	21.00	0.53
												2.37	2.16	2.73	0.084	20.89	0.60
Di 182 a	Dielsdorf	16	Siltstein	USM	182 - 200 m	41.02	16.63	29.67	67.96	38.29	2.73	2.47	2.30	2.75	0.115	16.42	0.67
Bülach-Wisental																	
Wi 106 a	Bülach-Wisental	17	Feinsandstein	USM	106 - 110 m	55.16	21.28	29.08	82.65	53.57	1.59	2.59	2.52	2.72	0.018	7.47	0.53
Wi 106 b	Bülach-Wisental	17	Feinsandstein	USM	106 - 110 m	58.62	22.66	28.69	85.53	56.84	1.78	2.59	2.51	2.72	0.014	7.86	0.49
												2.59	2.51	2.72	0.016	7.66	0.51
Wi 154 a	Bülach-Wisental	17	Feinsandstein	USM	154 - 162 m	30.68	12.08	29.36	58.69	29.33	1.35	2.54	2.43	2.73		11.18	0.93
Wi 154 b	Bülach-Wisental	17	Feinsandstein	USM	154 - 162 m	22.38	8.79	28.68	50.20	21.52	0.86	2.55	2.45	2.71	0.117	9.78	1.27
												2.54	2.44	2.72	0.117	10.48	1.10
Wi 186 a	Bülach-Wisental	17	Feinsandstein mit Mergel	USM	186 - 194 m	50.48	20.00	29.21	77.46	48.25	2.23	2.52	2.41	2.72	0.027	11.15	0.56
Wi 186 b	Bülach-Wisental	17	Feinsandstein mit Mergel	USM	186 - 194 m	36.45	14.35	29.62	64.46	34.84	1.61	2.54	2.43	2.73	0.294	11.22	0.78
												2.53	2.42	2.72	0.161	11.18	0.67
Oberembrach																	
Oe 158 a	Oberembrach	18	Konglomerat	OMM	158 - 170 m	46.29	17.68	29.33	74.86	45.53	0.76	2.62	2.58	2.69	0.036	4.30	0.63
Oe 158 b	Oberembrach	18	Konglomerat	OMM	158 - 170 m	65.30	25.10	28.83	92.80	63.97	1.33	2.60	2.55	2.69	0.010	5.30	0.45
												2.61	2.56	2.69	0.023	4.80	0.54
Oe 208 b	Oberembrach	18	Fein- bis Mittelsandstein	USM	208 - 222 m	36.57	15.11	29.39	63.43	34.04	2.53	2.42	2.25	2.71	0.364	16.74	0.74
Oe 208 a	Oberembrach	18	Fein- bis Mittelsandstein	USM	209 - 222 m	35.56	14.65	29.30	62.43	33.13	2.43	2.43	2.26	2.71	0.527	16.59	0.77
												2.42	2.26	2.71	0.445	16.67	0.75
Oe 250 a	Oberembrach	18	Fein- bis Mittelsandstein mit Mergel	USM	250 - 270 m	71.77	28.62	29.35	97.50	68.15	3.62	2.51	2.38	2.73	0.009	12.65	0.39
Oe 250 b	Oberembrach	18	Fein- bis Mittelsandstein mit Mergel	USM	251 - 270 m	86.15	34.16	28.94	111.40	82.46	3.69	2.52	2.41	2.71	0.005	10.80	0.33
												2.51	2.40	2.72	0.007	11.73	0.36
Hittnau																	
Hitt 152 a	Hittnau	19	Konglomerat	OSM	152 - 160 m	70.08	25.81	29.20	98.36	69.16	0.92	2.72	2.68	2.78	0.008	3.56	0.43
Hitt 152 b	Hittnau	19	Konglomerat	OSM	152 - 160 m	96.33	35.54	28.76	123.71	94.95	1.38	2.71	2.67	2.78	0.004	3.88	0.31
												2.71	2.68	2.78	0.006	3.72	0.37
Hitt 184 a	Hittnau	19	Feinsandstein	OSM	184 - 192 m	50.87	20.62	29.21	76.88	47.67	3.20	2.47	2.31	2.74	0.029	15.52	0.54
Hitt 184 b	Hittnau	19	Feinsandstein	OSM	184 - 192 m	70.26	28.26	29.17	95.31	66.14	4.12	2.49	2.34	2.74	0.009	14.58	0.40
												2.48	2.33	2.74	0.019	15.05	0.47
Hitt 210 a	Hittnau	19	Konglomerat	OSM	210 - 216 m	104.20	39.32	29.46	131.32	101.86	2.34	2.65	2.59	2.75	0.003	5.95	0.28
Hitt 211 b	Hittnau	19	Konglomerat	OSM	210 - 216 m	94.89	35.88	29.47	122.16	92.69	2.20	2.64	2.58	2.75	0.004	6.13	0.31
												2.65	2.59	2.75	0.004	6.04	0.30
Zürich-FIFA																	
Fi 150 a	Zürich-FIFA	20	Mittelsandstein														
Fi 150 b	Zürich-FIFA	20	Mittelsandstein														
Fi 222 a	Zürich-FIFA	20	Feinsandstein	OSM	222 - 232 m	53.42	20.80	28.87	80.15	51.28	2.14	2.57	2.47	2.75	0.021	10.29	0.54
Fi 222 b	Zürich-FIFA	20	Feinsandstein	OSM	222 - 232 m	60.53	23.41	30.01	88.47	58.46	2.07	2.59	2.50	2.74	0.014	8.84	0.48
												2.58	2.48	2.74	0.017	9.57	0.51
Fi 256 a	Zürich-FIFA	20	Mittelsandstein	OSM	256 - 268 m	58.22	23.20	28.50	83.72	55.22	3.00	2.51	2.38	2.73	0.015	12.93	0.48
Fi 256 b	Zürich-FIFA	20	Mittelsandstein														
Pläffikon																	
Aus 154 a	Pläffikon	21	Feinsandstein	OSM	154 - 158 m	57.61	23.82	29.29	82.04	52.75	4.86	2.42	2.21	2.78	0.019	20.40	0.47
Aus 154 b	Pläffikon	21	Feinsandstein	OSM	154 - 158 m												
Aus 270 a	Pläffikon	21	Konglomerat	OSM	270 - 276 m	56.01	22.02	28.34	81.02	52.68	3.33	2.54	2.39	2.82	0.018	15.12	0.51
Aus 270 b	Pläffikon	21	Konglomerat	OSM	270 - 276 m	48.33	18.96	28.31	74.05	45.74	2.59	2.55	2.41	2.79	0.031	13.66	0.59
												2.55	2.40	2.81	0.024	14.39	0.55
Aus 294 a	Pläffikon	21	Feinsandstein	OSM	294 - 300 m	47.12	18.79	29.15	73.19	44.04	3.08	2.51	2.34	2.80	0.042	16.39	0.60
Aus 294 b	Pläffikon	21	Feinsandstein	OSM	294 - 300 m	36.35	14.59	29.05	62.82	33.77	2.58	2.49	2.31	2.81	0.350	17.68	0.77
												2.50	2.33	2.81	0.196	17.04	0.68
Zürich-Altstetten																	
Alt 106 a	Altstetten	22	Feinsandstein	OSM	106 - 114 m	47.90	20.14	28.46	71.75	43.29	4.61	2.38	2.15	2.79	0.041	22.89	0.56
Alt 106 b	Altstetten	22	Feinsandstein	OSM	106 - 114 m	39.35	16.80	29.09	64.44	35.35	4.00	2.34	2.10	2.76	0.205	23.81	0.67
												2.36	2.13	2.77	0.123	23.35	0.61
Alt 190 a	Altstetten	22	Feinsandstein	OSM	190 - 202 m	114.34	46.09	29.63	136.49	106.86	7.48	2.48	2.32	2.77	0.003	16.23	0.24
Alt 190 b	Altstetten	22	Feinsandstein	OSM	190 - 202 m	74.93	30.23	28.80	98.67	69.87	5.06	2.48	2.31	2.78	0.008	16.74	0.37
												2.48	2.31	2.77	0.005	16.48	0.31
Alt 264 a	Altstetten	22	Feinsandstein	OSM	264 - 280 m	66.09	25.97	28.32	91.22	62.90	3.19	2.54	2.42	2.76	0.010	12.28	0.43
Alt 264 b	Altstetten	22	Feinsandstein	OSM	264 - 280 m	66.81	26.47	28.32	91.35	63.03	3.78	2.52	2.38	2.78	0.010	14.28	0.42
												2.53	2.40	2.77	0.010	13.28	0.43
Hombrechtikon																	
Hb 186 a	Hombrechtikon	25	Konglomerat	OSM	186 - 190 m	44.14	16.34	28.34	71.75	43.41	0.73	2.70	2.66	2.78	0.040	4.47	0.68
Hb 186 a	Hombrechtikon	25	Konglomerat	OSM	186 - 190 m	62.78	23.27	29.44	91.18	61.74	1.04	2.70	2.65	2.78	0.011	4.47	0.48
												2.70	2.65	2.78	0.026	4.47	0.58
Eggenwil																	
Egg 66 a	Eggenwil	27	Grobsandstein	OMM	66 - 84 m	42.51	16.73	29.37	70.15	40.78	1.73	2.54	2.44	2.72	0.068	10.34	0.67
Egg 66 b	Eggenwil	27	Grobsandstein	OMM	66 - 84 m	31.49	12.56	28.93	58.92	29.99	1.50	2.51	2.39	2.71		11.94	0.89
												2.52	2.41	2.72	0.068	11.14	0.78
Egg 150 a	Eggenwil	27	Grobsandstein	OMM	150 - 196 m	56.70	24.22	28.31	79.60	51.29	5.41	2.34	2.12	2.73	0.019	22.34	0.46
Egg 150 b	Eggenwil	27	Grobsandstein	OMM	150 - 196 m	63.30	27.09	29.									

Probe	Bohrung	Nr.	Lithologie	Geologie	Tiefenintervall [m u.T.]	G _f [g]	A [g]	G _{Beh} [g]	G _{Beh} +G _f [g]	G _t [g]	G _f -G _t [g]	ρ _{f,c} [g/cm ³]	ρ _{t,c} [g/cm ³]	ρ _{m,c} [g/cm ³]	Δρ _{m,c} [g/cm ³]	ϕ _c [%]	Δϕ _c [%]
Wollerau																	
Woll 132 a	Wollerau	28	Feinsandstein	OMM	132 - 144 m	97.17	37.54	29.13	123.27	94.14	3.03	2.59	2.51	2.73	0.004	8.07	0.30
Woll 132 b	Wollerau	28	Feinsandstein	OMM	132 - 144 m	91.45	35.02	29.99	118.99	89.00	2.45	2.61	2.54	2.73	0.005	7.00	0.32
												2.60	2.52	2.73	0.004	7.53	0.31
Woll 160 a	Wollerau	28	Mittelsandstein	OMM	180 - 192 m	167.04	64.08	28.66	190.96	162.30	4.74	2.61	2.53	2.74	0.002	7.40	0.17
Woll 160 b	Wollerau	28	Mittelsandstein	OMM	180 - 192 m	130.39	49.87	29.19	156.10	126.91	3.48	2.61	2.54	2.74	0.002	6.98	0.22
												2.61	2.54	2.74	0.002	7.19	0.20
Woll 232 a	Wollerau	28	Feinsandstein	OMM	232 - 240 m	167.46	64.18	28.95	191.51	162.56	4.90	2.61	2.53	2.74	0.002	7.63	0.17
Woll 232 b	Wollerau	28	Feinsandstein	OMM	232 - 240 m	133.30	51.08	28.62	158.07	129.45	3.85	2.61	2.53	2.74	0.002	7.54	0.22
												2.61	2.53	2.74	0.002	7.59	0.20
Weiningen																	
Wn 134 a	Weiningen	30	Grobsandstein mit Konglomerat	OMM	134 - 142 m	47.40	19.35	29.11	73.59	44.48	2.92	2.45	2.30	2.71	0.040	15.09	0.58
Wn 134 b	Weiningen	30	Grobsandstein mit Konglomerat	OMM	134 - 142 m	63.27	25.81	28.78	88.07	59.29	3.98	2.45	2.30	2.72	0.012	15.42	0.43
												2.45	2.30	2.71	0.026	15.26	0.51
Wn 162 a	Weiningen	30	Grobsandstein	OMM	162 - 174 m	46.69	18.98	28.82	72.55	43.73	2.96	2.46	2.30	2.73	0.041	15.60	0.59
Wn 162 b	Weiningen	30	Grobsandstein	OMM	162 - 174 m	77.12	31.55	29.34	101.37	72.03	5.09	2.44	2.28	2.72	0.007	16.13	0.36
												2.45	2.29	2.73	0.024	15.86	0.47
Wn 250 a	Weiningen	30	Feinsandstein	USM	250 - 258 m	67.88	26.32	28.33	93.60	65.27	2.61	2.58	2.48	2.75	0.009	9.92	0.43
Wn 250 b	Weiningen	30	Feinsandstein	USM	250 - 258 m	92.69	36.12		117.65								
Zürich-ETH																	
ETH 136 a	ETH-Hönggerberg	31	Feinsandstein	OSM	136 - 148 m	54.56	22.10	29.35	79.89	50.54	4.02	2.47	2.29	2.80	0.023	18.19	0.51
ETH 136 b	ETH-Hönggerberg	31	Feinsandstein	OSM	136 - 148 m	47.86	19.13	29.22	74.02	44.80	3.06	2.50	2.34	2.79	0.039	16.00	0.59
												2.49	2.31	2.79	0.031	17.09	0.55
ETH 168 a	ETH-Hönggerberg	31	Feinsandstein	OSM	168 - 172 m	62.46	24.79	29.10	87.62	58.52	3.94	2.52	2.36	2.81	0.013	15.89	0.45
ETH 168 b	ETH-Hönggerberg	31	Feinsandstein	OSM	168 - 172 m	61.69	24.85	29.16	86.50	57.34	4.35	2.48	2.31	2.80	0.014	17.51	0.45
												2.50	2.33	2.80	0.014	16.70	0.45
ETH 220 a	ETH-Hönggerberg	31	Feinsandstein	OSM	220 - 228 m	46.12	19.89	29.46	71.63	42.17	3.95	2.32	2.12	2.65	0.056	19.86	0.56
ETH 220 b	ETH-Hönggerberg	31	Feinsandstein	OSM	220 - 228 m	45.16	18.78	28.30	69.50	41.20	3.96	2.40	2.19	2.78	0.053	21.09	0.60
												2.36	2.16	2.71	0.054	20.47	0.58
Erlenbach																	
Eb 130 a	Erlenbach	32	Feinsandstein	OSM	130 - 138 m	53.32	21.30	28.69	78.91	50.22	3.10	2.50	2.36	2.76	0.022	14.55	0.53
Eb 130 b	Erlenbach	32	Feinsandstein	OSM	130 - 138 m	84.10	33.78	28.88	107.49	78.61	5.49	2.49	2.33	2.78	0.006	16.25	0.33
												2.50	2.34	2.77	0.014	15.40	0.43
Eb 186 a	Erlenbach	32	Feinsandstein	OSM	186 - 196 m	66.54	26.13	29.44	92.58	63.14	3.40	2.55	2.42	2.78	0.011	13.01	0.43
Eb 186 b	Erlenbach	32	Feinsandstein	OSM	186 - 196 m	94.26	37.09	29.24	118.44	89.20	5.06	2.54	2.40	2.78	0.004	13.64	0.30
												2.54	2.41	2.78	0.008	13.33	0.37
Eb 234 a	Erlenbach	32	Feinsandstein	OSM	234 - 240 m	56.68	22.13	28.31	82.20	53.89	2.79	2.56	2.44	2.79	0.016	12.61	0.51
Eb 234b	Erlenbach	32	Feinsandstein	OSM	234 - 240 m	84.53	33.17	29.12	109.43	80.31	4.22	2.55	2.42	2.77	0.006	12.72	0.34
												2.55	2.43	2.78	0.011	12.66	0.42
Niederweningen																	
Nw 126 a	Niederweningen	33	Feinsandstein	USM	126 - 136 m	28.22	11.46	28.64	55.09	26.45	1.77	2.46	2.31	2.73	1.398	15.45	0.98
Nw 126 b	Niederweningen	33	Feinsandstein	USM	126 - 136 m	39.27	16.06	29.41	65.96	36.55	2.72	2.45	2.28	2.74	0.161	16.94	0.70
												2.45	2.29	2.73	0.780	16.19	0.84
Nw 150 a	Niederweningen	33	Feinsandstein mit Mergel	USM	150 - 164 m	31.88	13.61	29.08	57.63	28.55	3.33	2.34	2.10	2.78	25.089	24.47	0.83
Nw 150 b	Niederweningen	33	Feinsandstein mit Mergel	USM	150 - 164 m	37.57	15.97	29.21	63.16	33.95	3.62	2.35	2.13	2.75	0.349	22.67	0.70
												2.35	2.11	2.76	12.719	23.57	0.77
Nw 210 a	Niederweningen	33	Feinsandstein	USM	210 - 222 m	41.41	16.52	29.20	68.48	39.28	2.13	2.51	2.38	2.73	0.085	12.89	0.68
Nw 210 b	Niederweningen	33	Feinsandstein	USM	211 - 222 m	52.40	21.09	28.48	77.86	49.38	3.02	2.48	2.34	2.73	0.023	14.32	0.53
												2.50	2.36	2.73	0.054	13.61	0.60

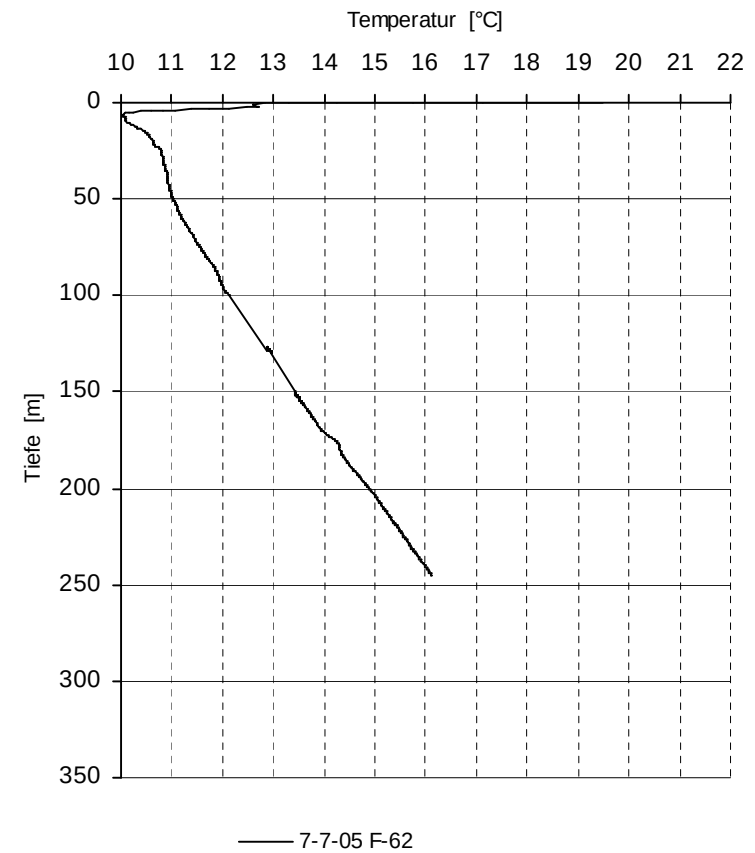
Legende:

G _f	Gewicht der wassergesättigten Probe
G _t	Gewicht der getrockneten Probe
G _{Beh}	Gewicht des leeren Probenbehälters
A	Gewicht des Auftriebes (verdrängtes Wasservolumen)
ρ _{f,c}	Feuchtraumdichte (Dichte der wassergesättigten Probe) des Cuttings
ρ _{m,c}	Matrixdichte des Cuttings
ϕ _c	scheinbare Porosität des Cuttings
Δϕ _c	Fehler der scheinbaren Porosität
ϕ _F	Porosität des Cuttings (nach Formeln in Figuren 58 – 61 korrigiert)

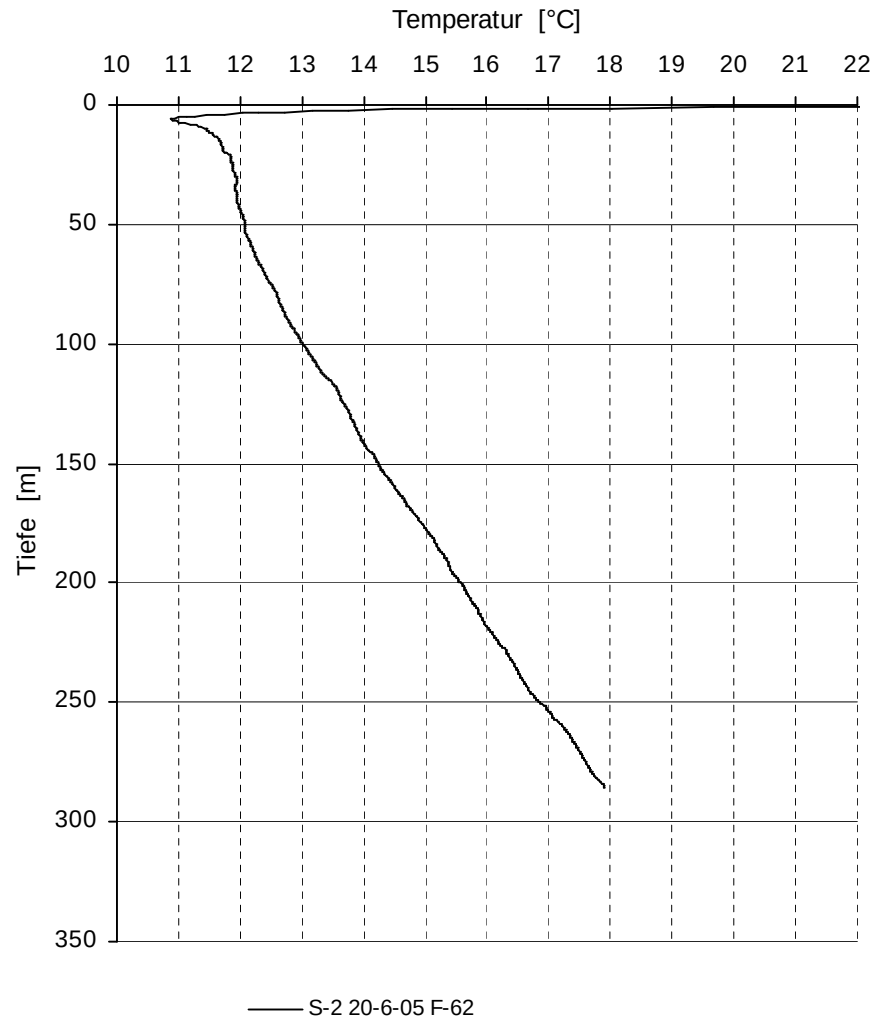
10 ANHANG D: TEMPERATURMESSUNGEN



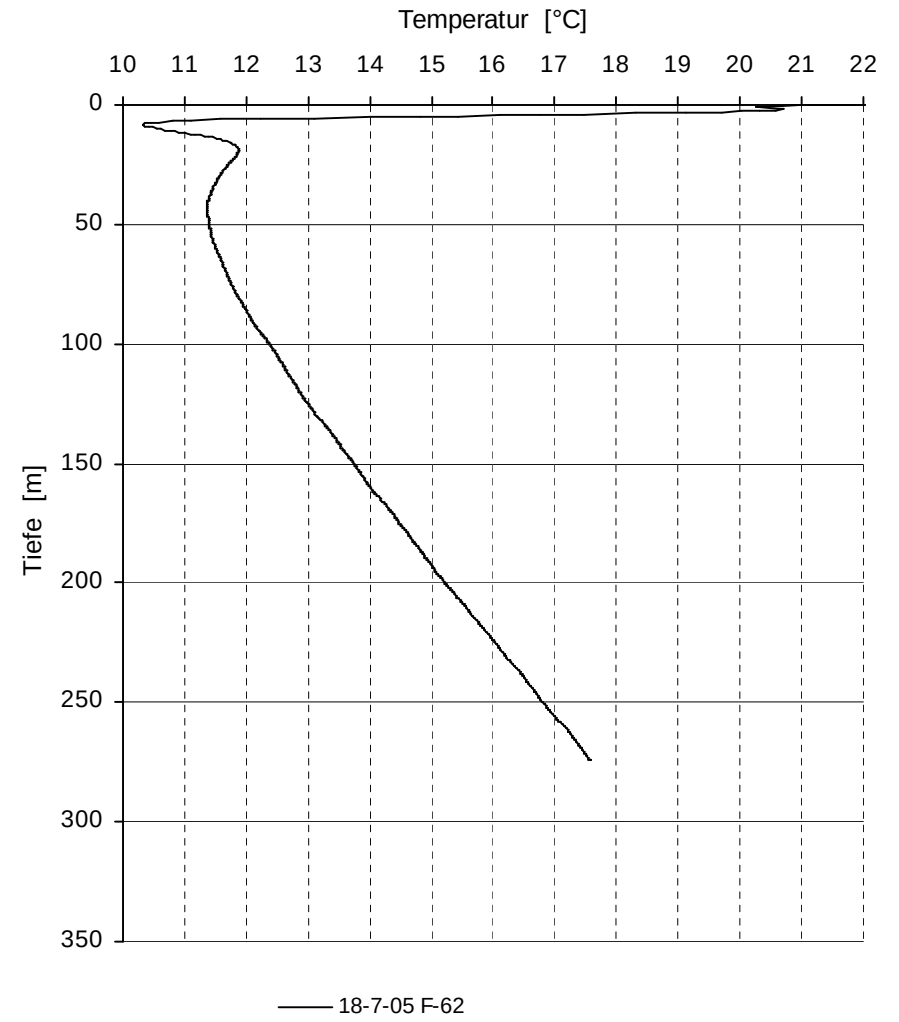
Figur C-1: [1] St. Gallen Wartensteinstrasse, Temperaturlog



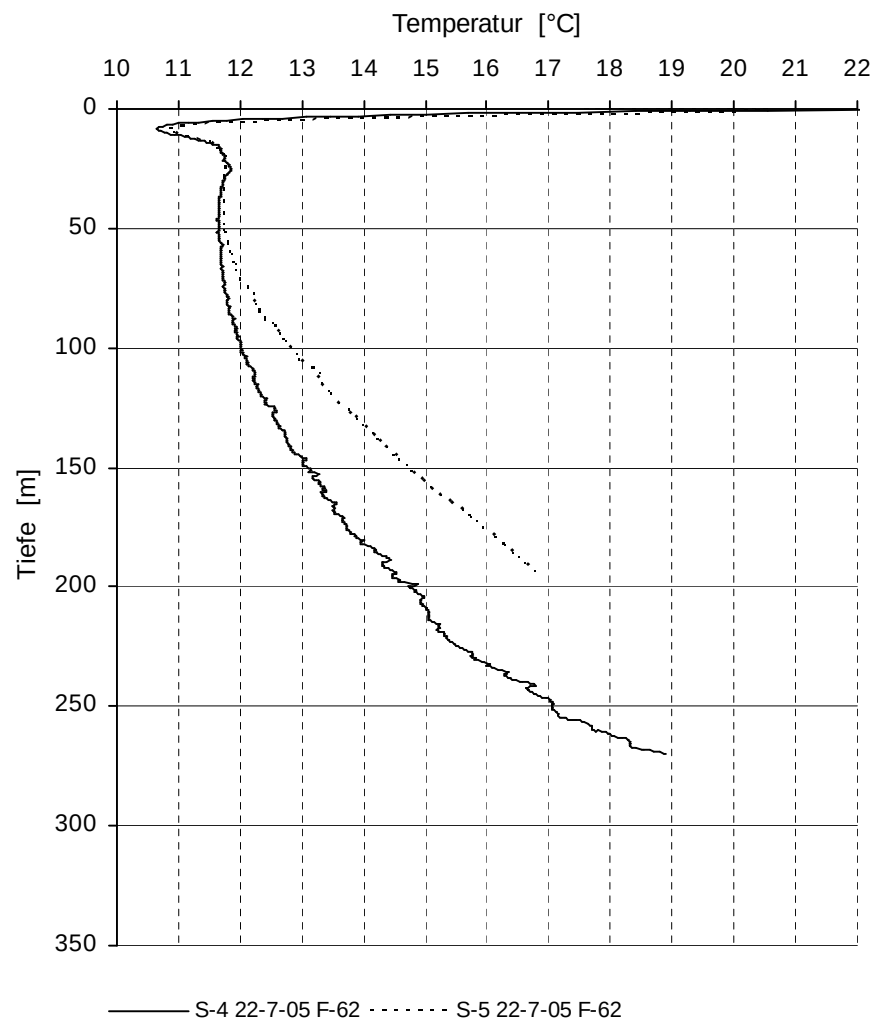
Figur C-2: [2] St. Gallen Nokterianum, Temperaturlog



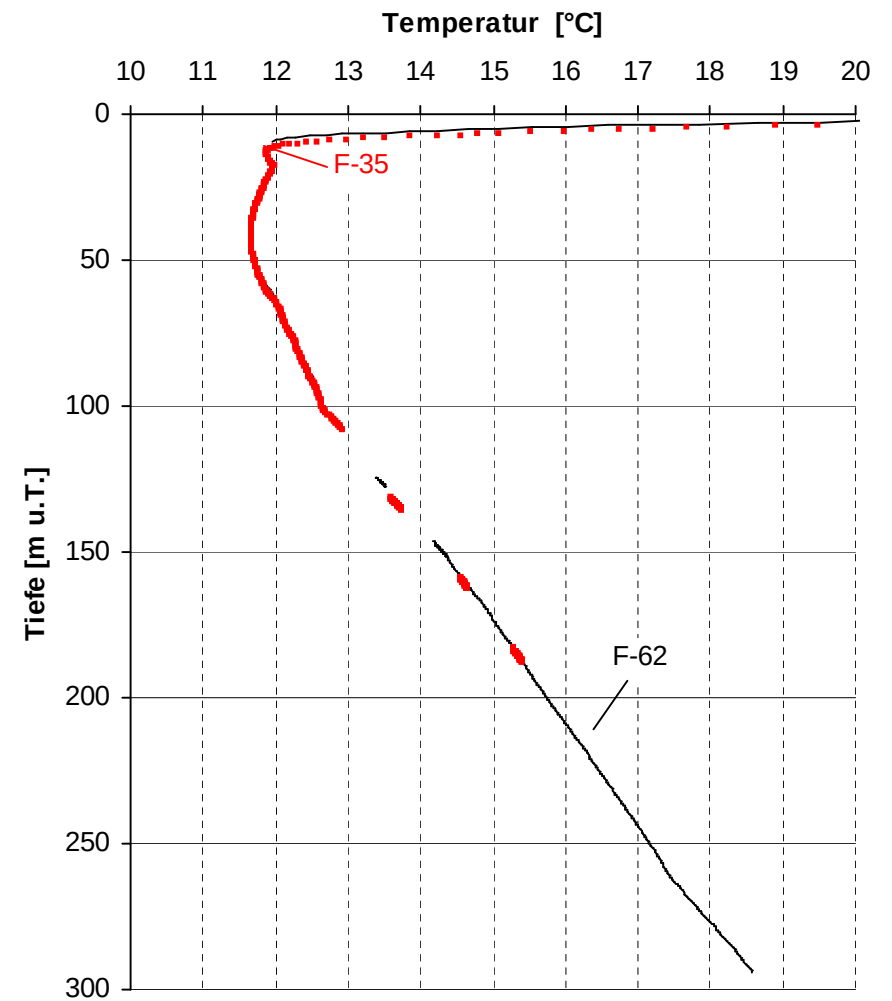
Figur C-3: [3] Jona Bubikerstrasse, Temperaturlog



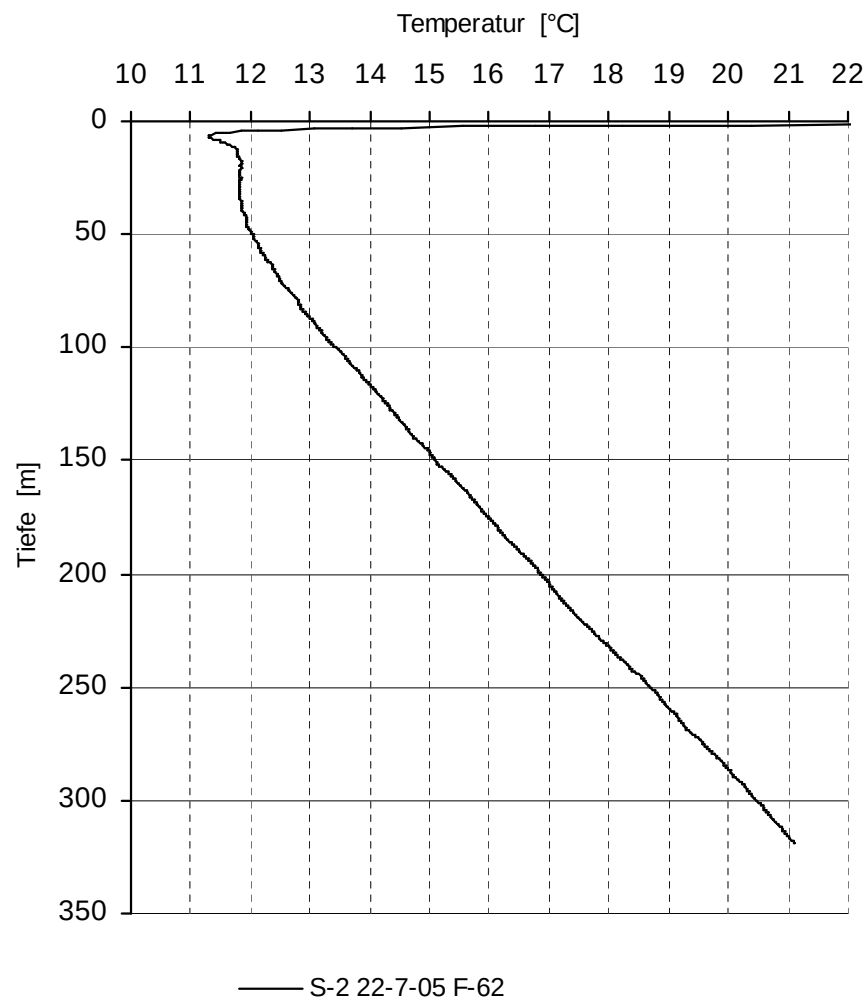
Figur C-4: St. [4] Kilchberg Gheistrasse, Temperaturlog



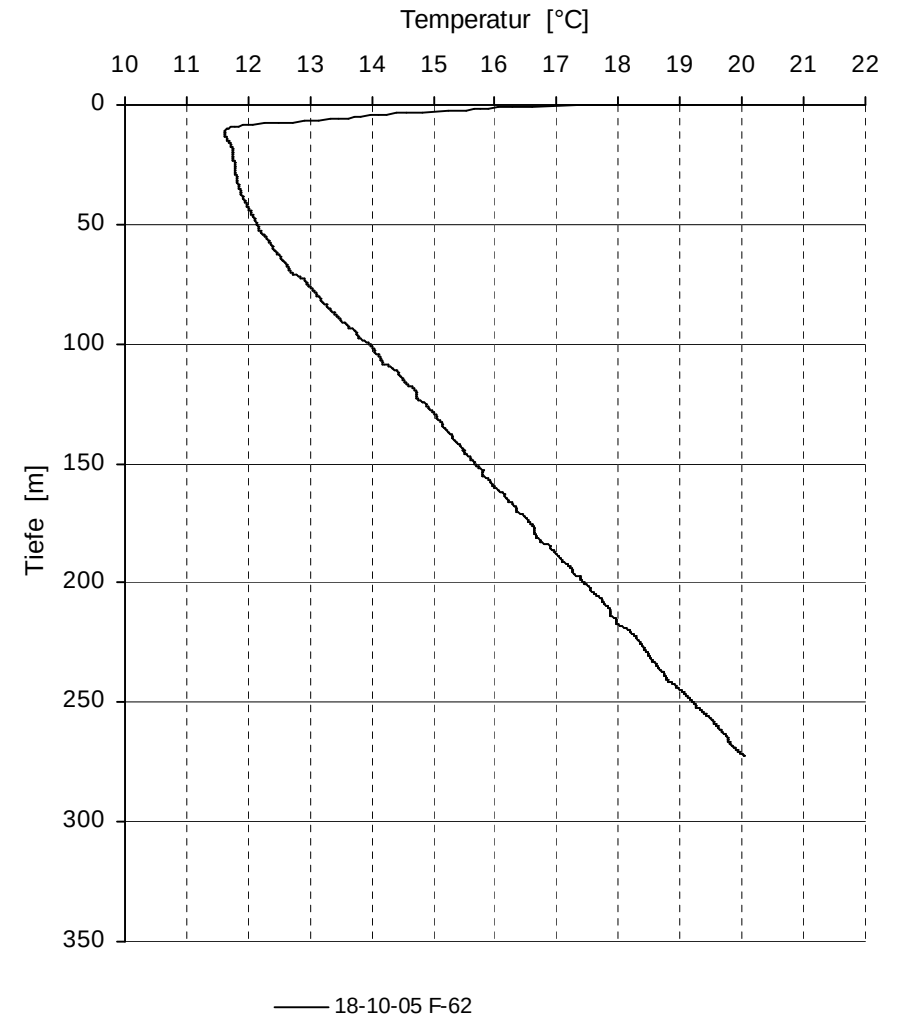
Figur C-5: [5] Stadel Bachstrasse, Temperaturlog



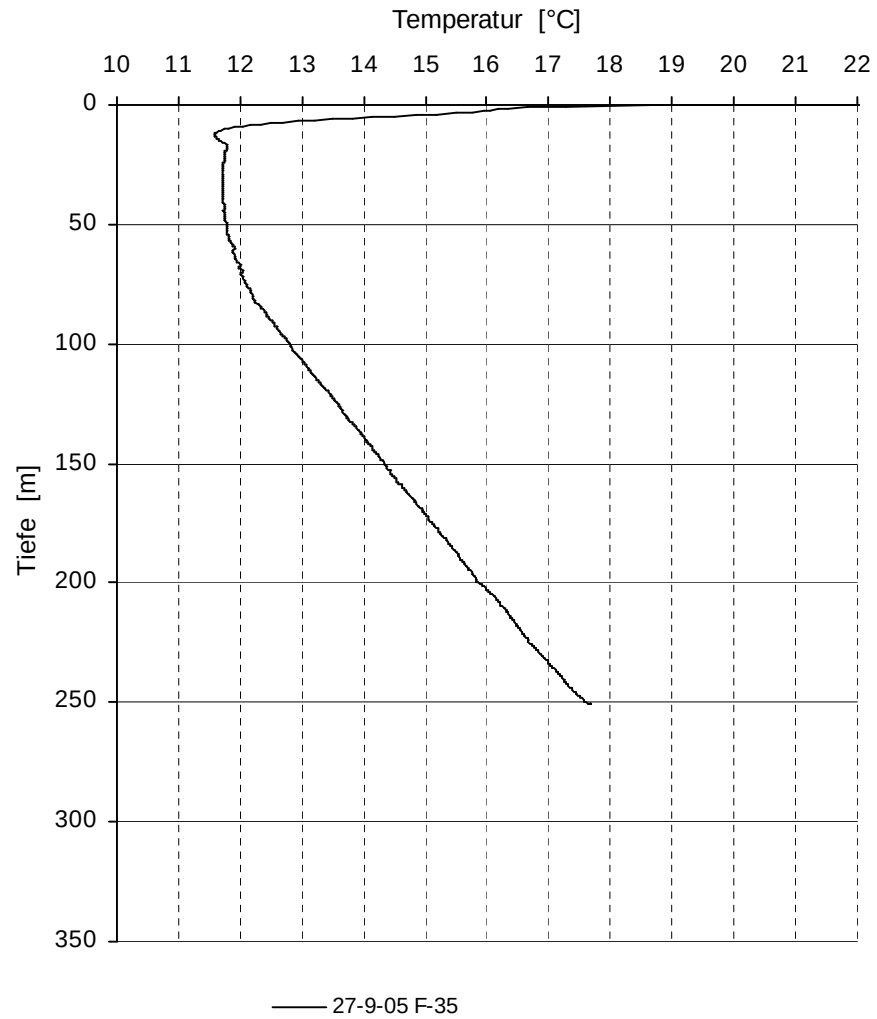
Figur C-6: [6] Oberhasli Sandrainstrasse, Temperaturlog



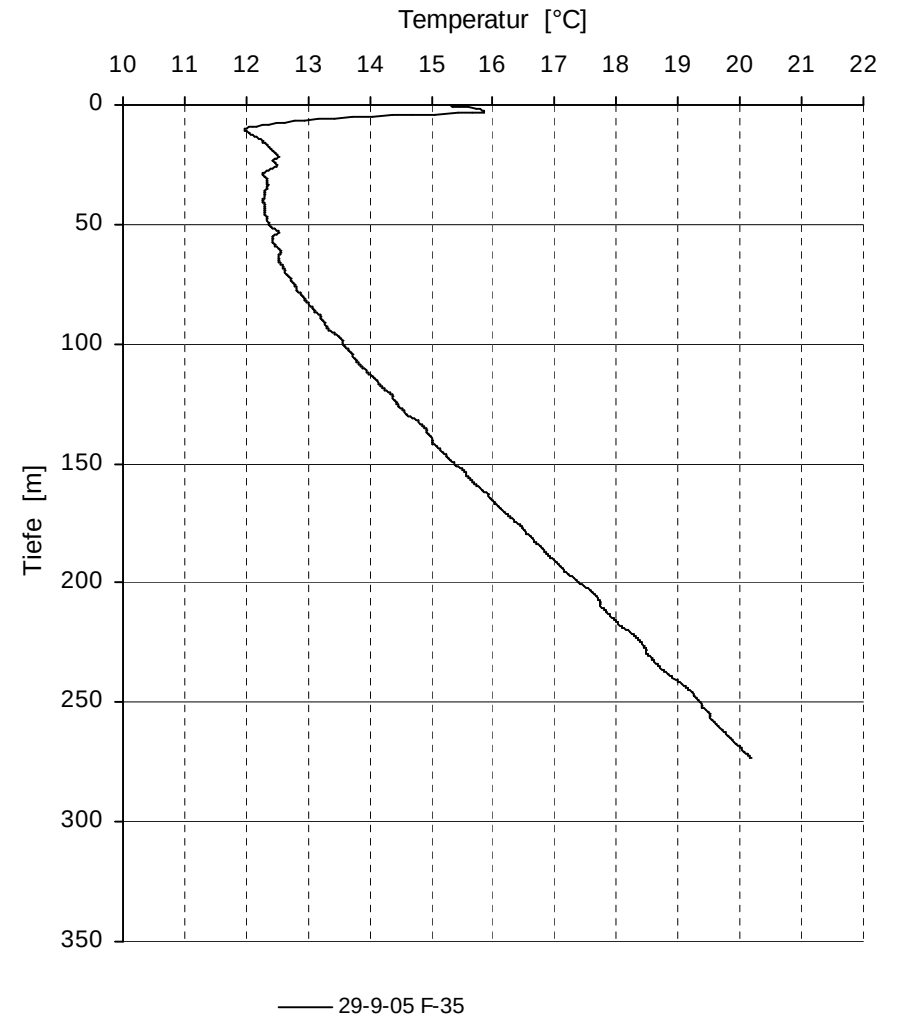
Figur C-7: [7] Illnau Lättenstrasse, Temperaturlog



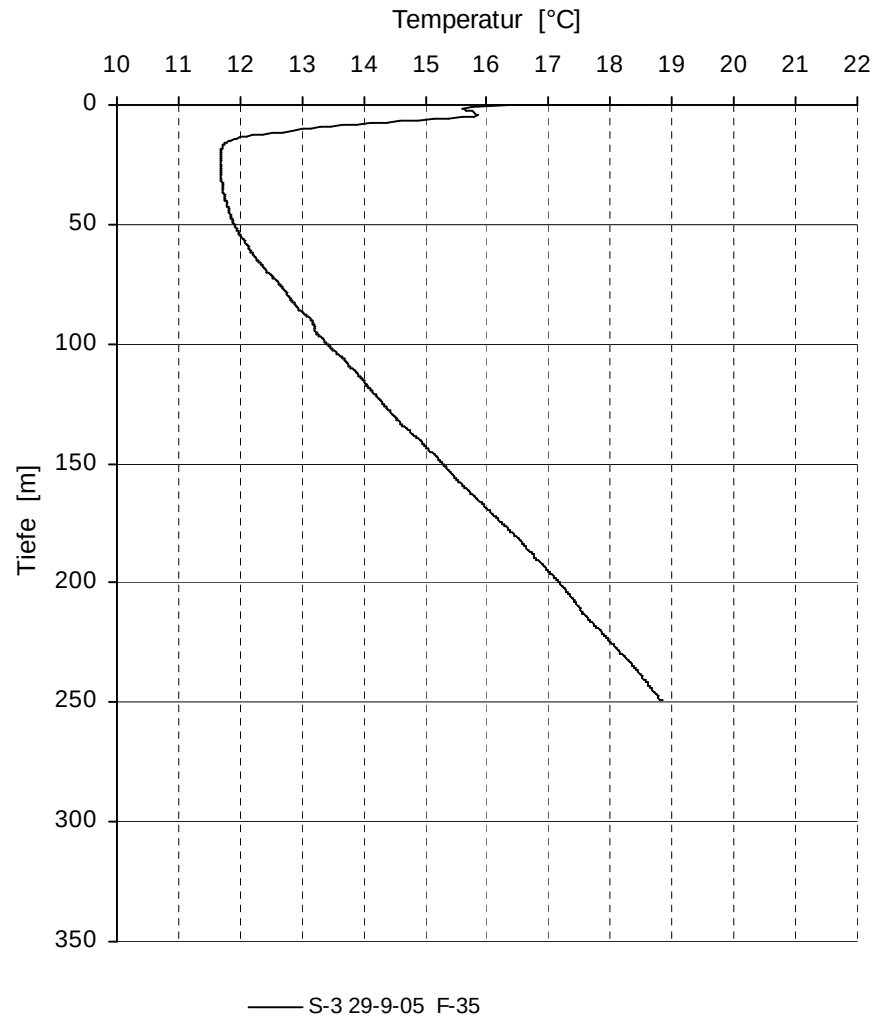
Figur C-8: [8] Oberhasli Sandrainstrasse, Temperaturlog



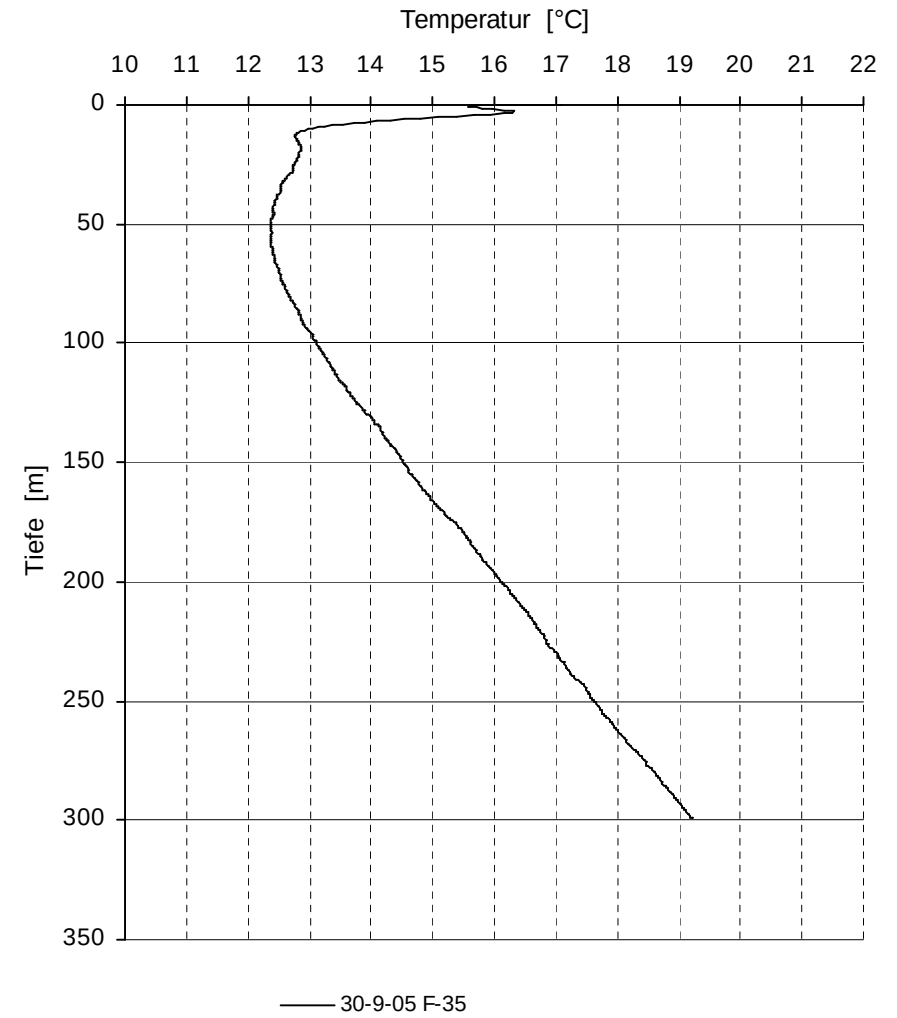
Figur C-9: [9] Zollikon Gartenstrasse, Temperaturlog



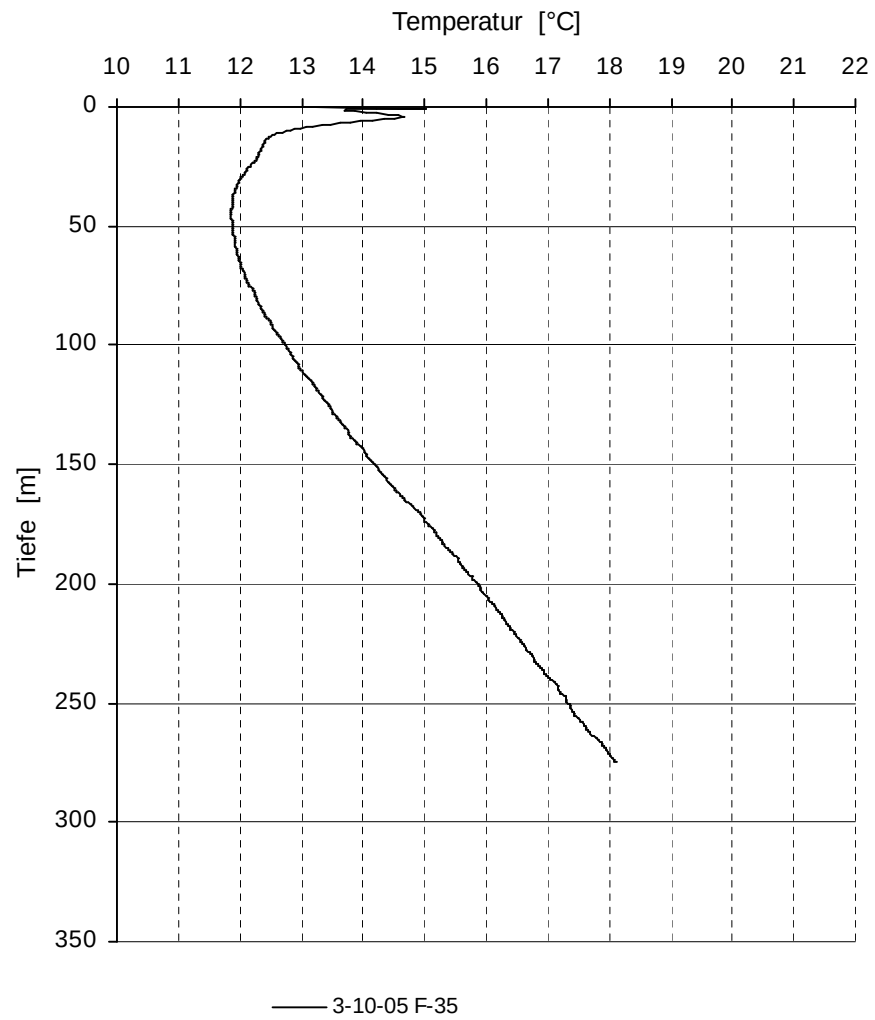
Figur C-10: [10] Bülach Unterweg, Temperaturlog



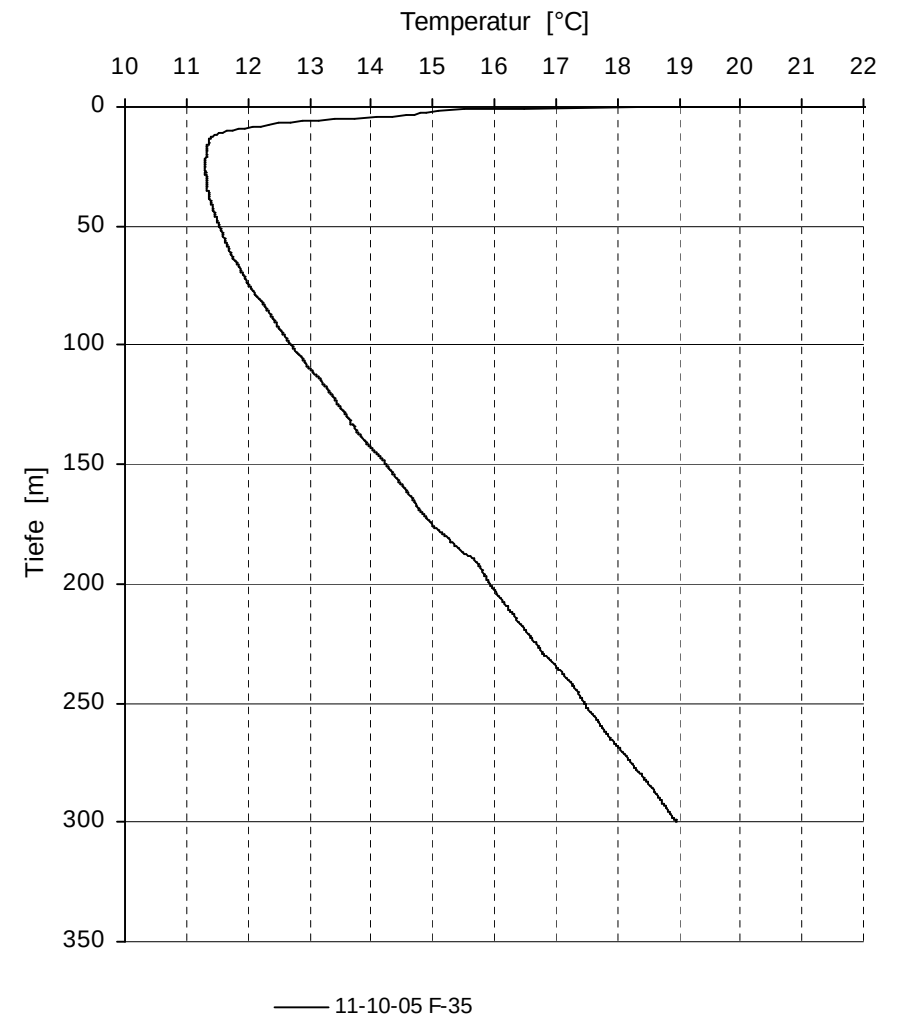
Figur C-11: [11] Kloten Steinacherstrasse, Temperaturlog



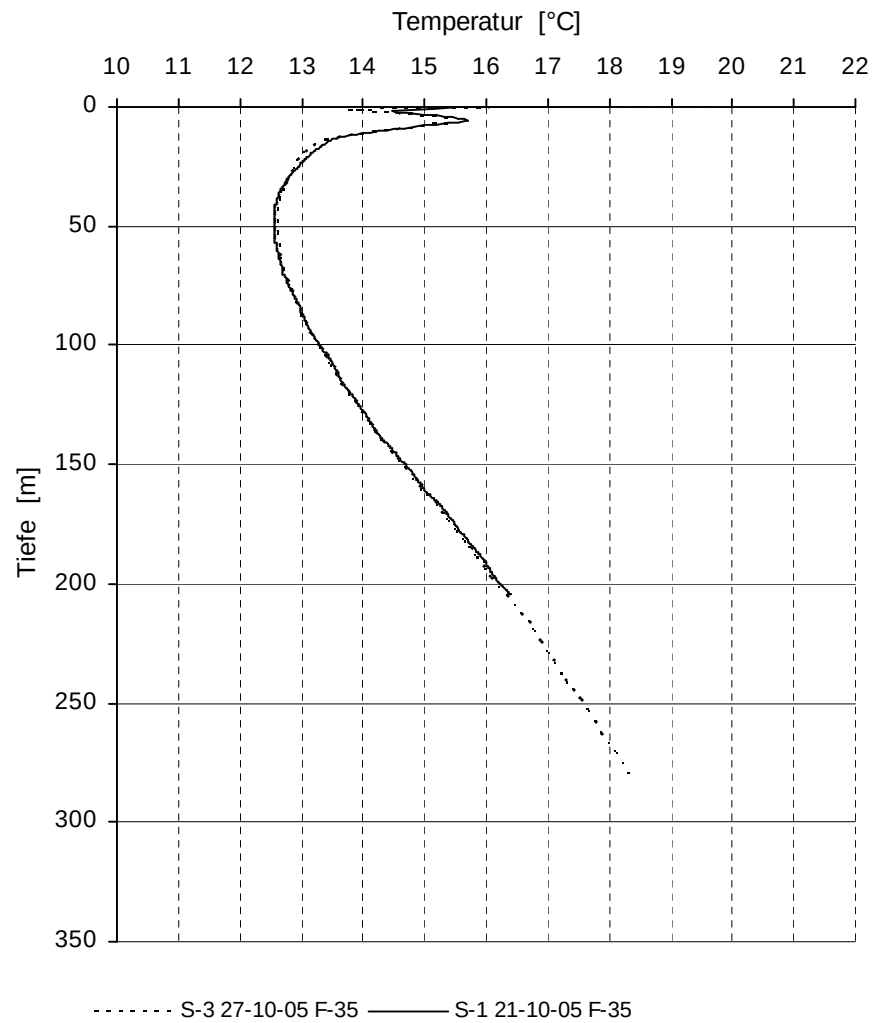
Figur C-12: [12] Erlenbach Laubholzstrasse, Temperaturlog



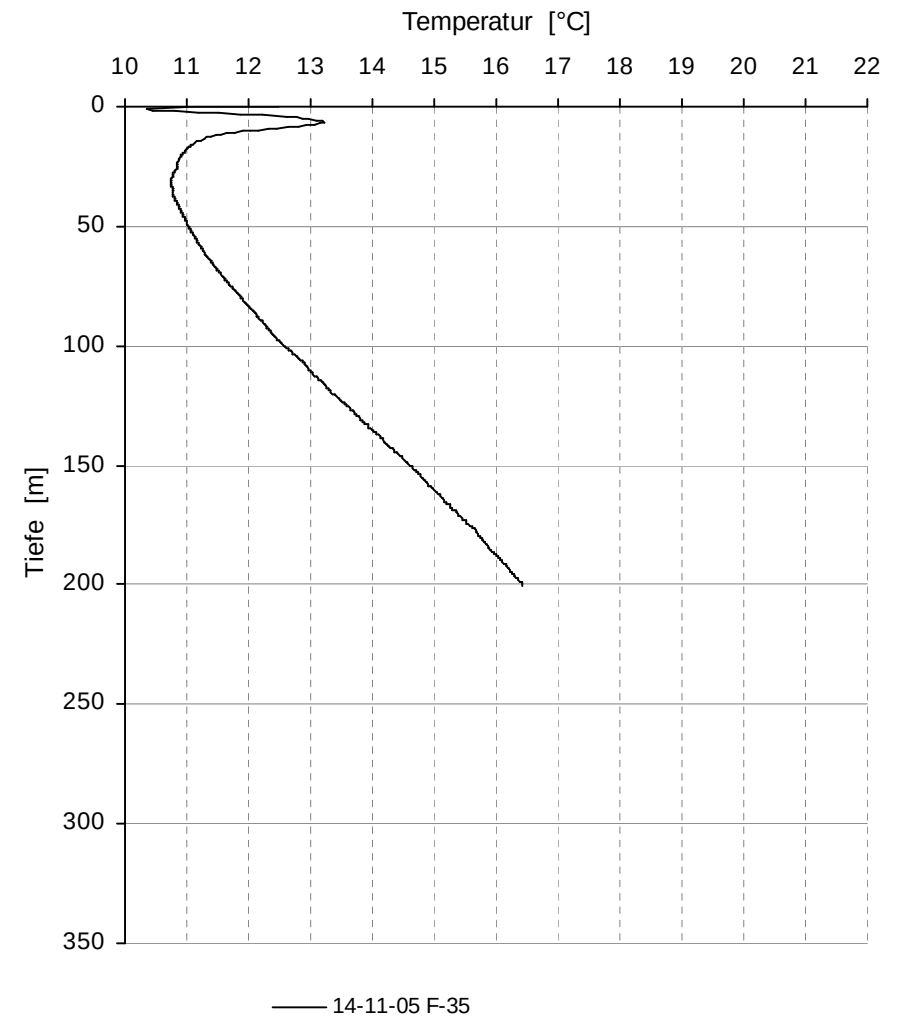
Figur C-13: [13] Zürich-Witikon In den Looren, Temperaturlog



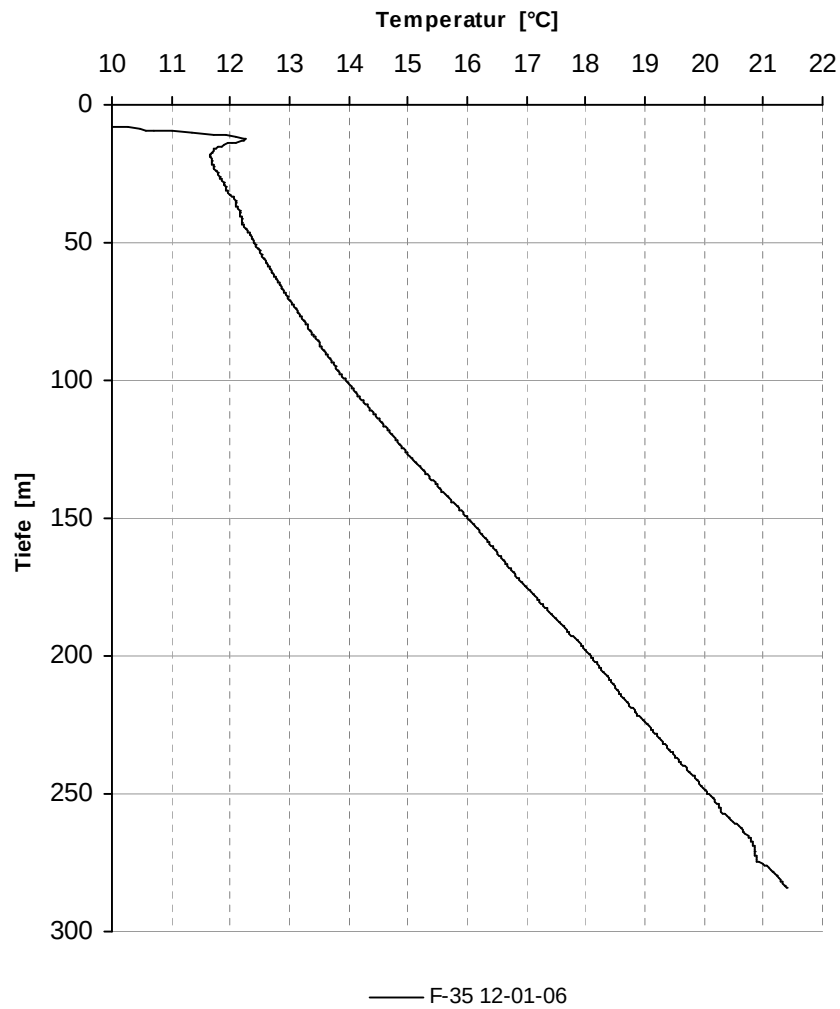
Figur C-14: [14] Wädenswil Holzmoosrütistrasse, Temperaturlog



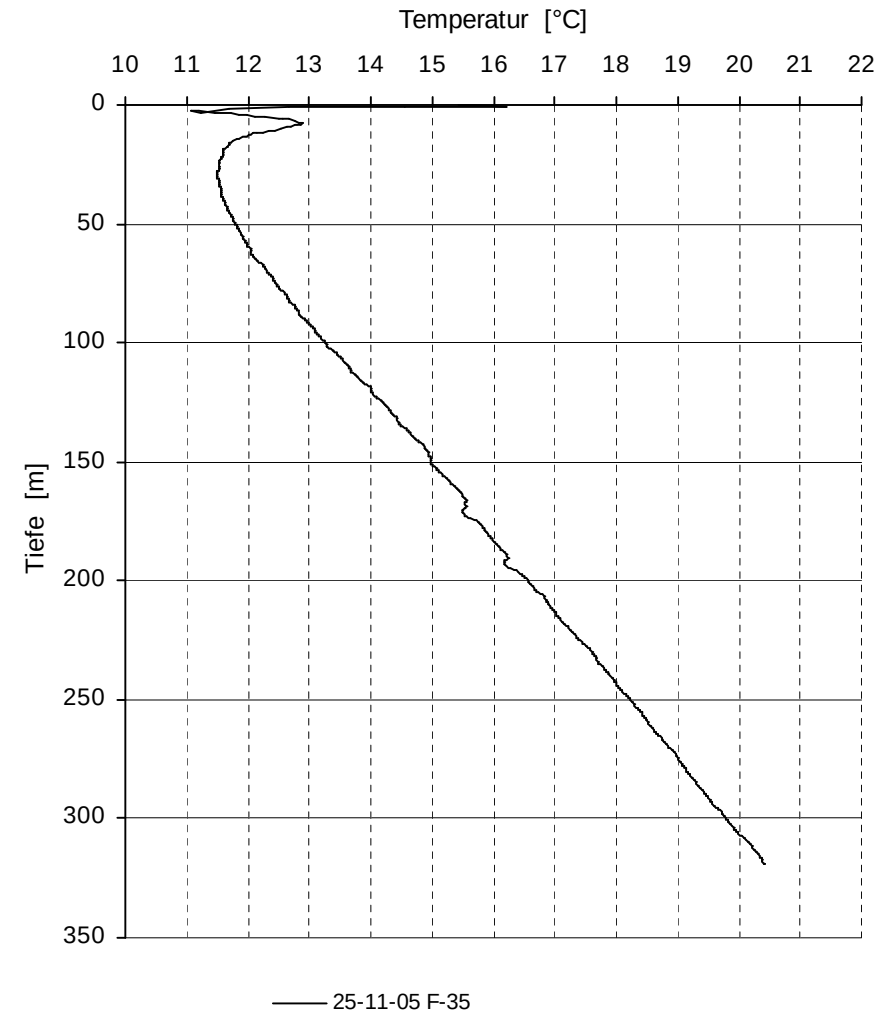
Figur C-15: [15] Meilen Seidengasse, Temperaturlog



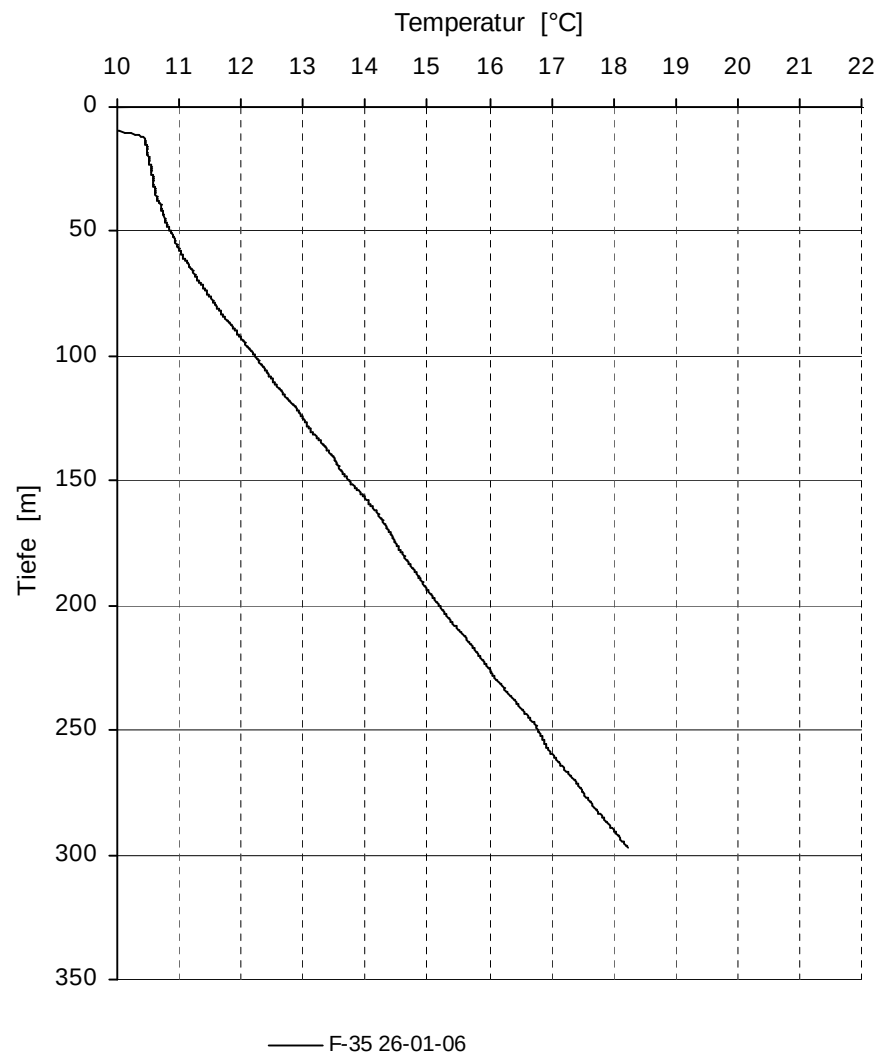
Figur C-16: [16] Dielsdorf Buchserstrasse, Temperaturlog



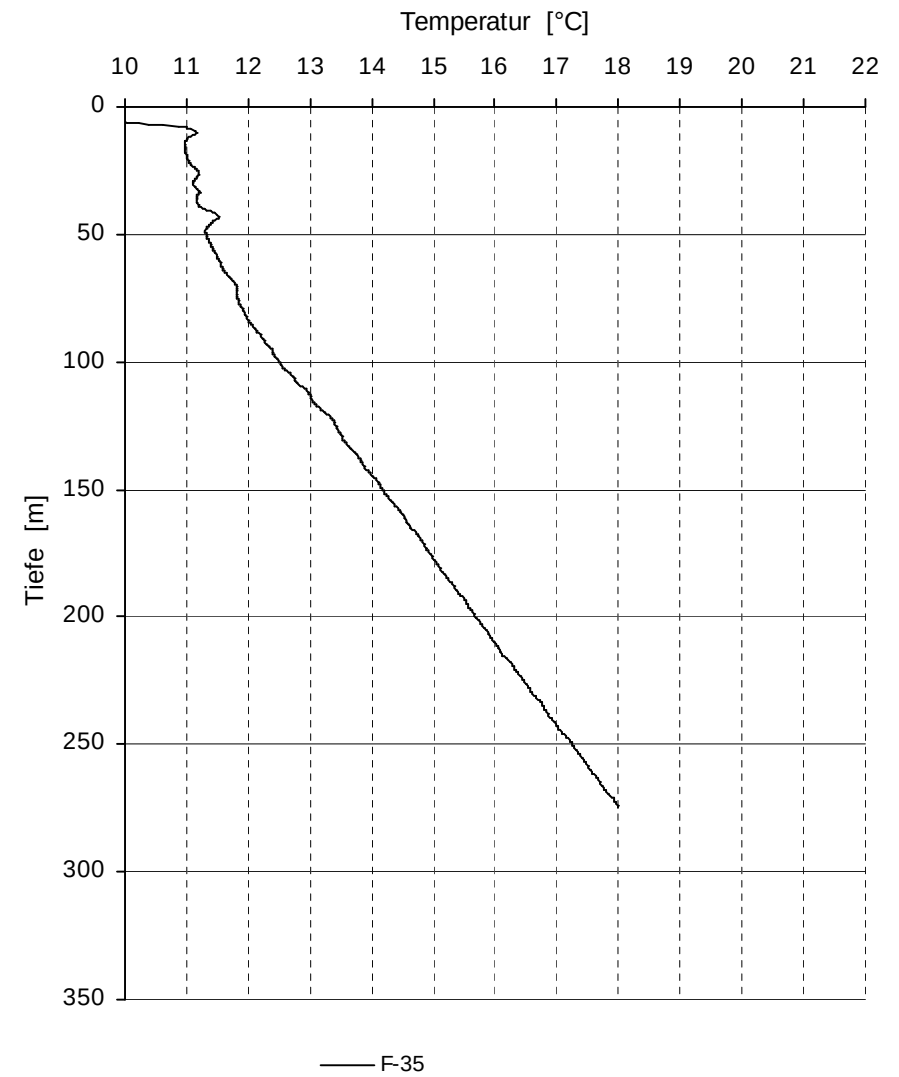
Figur C-17: [17] Bülach Wisentalstrasse, Temperaturlog



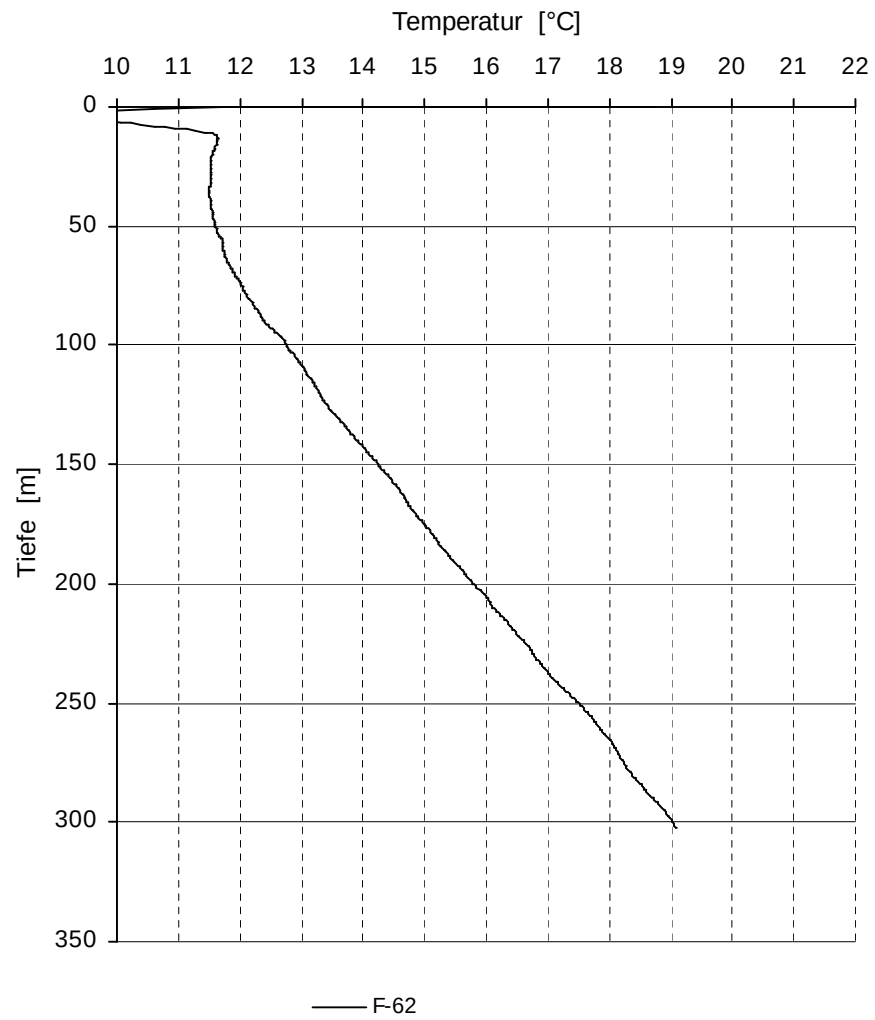
Figur C-18: [18] Oberembrach Neuwisstrasse, Temperaturlog



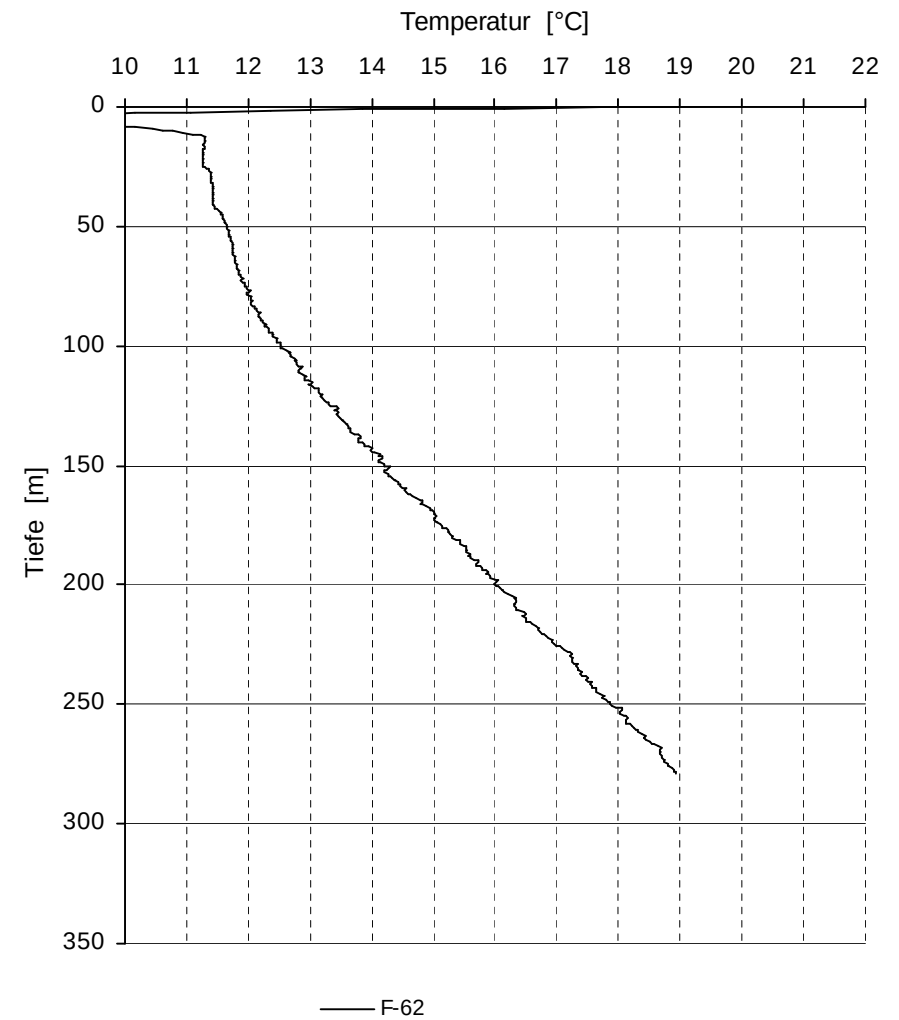
Figur C-19: [19] Hittnau Tösstalstrasse, Temperaturlog



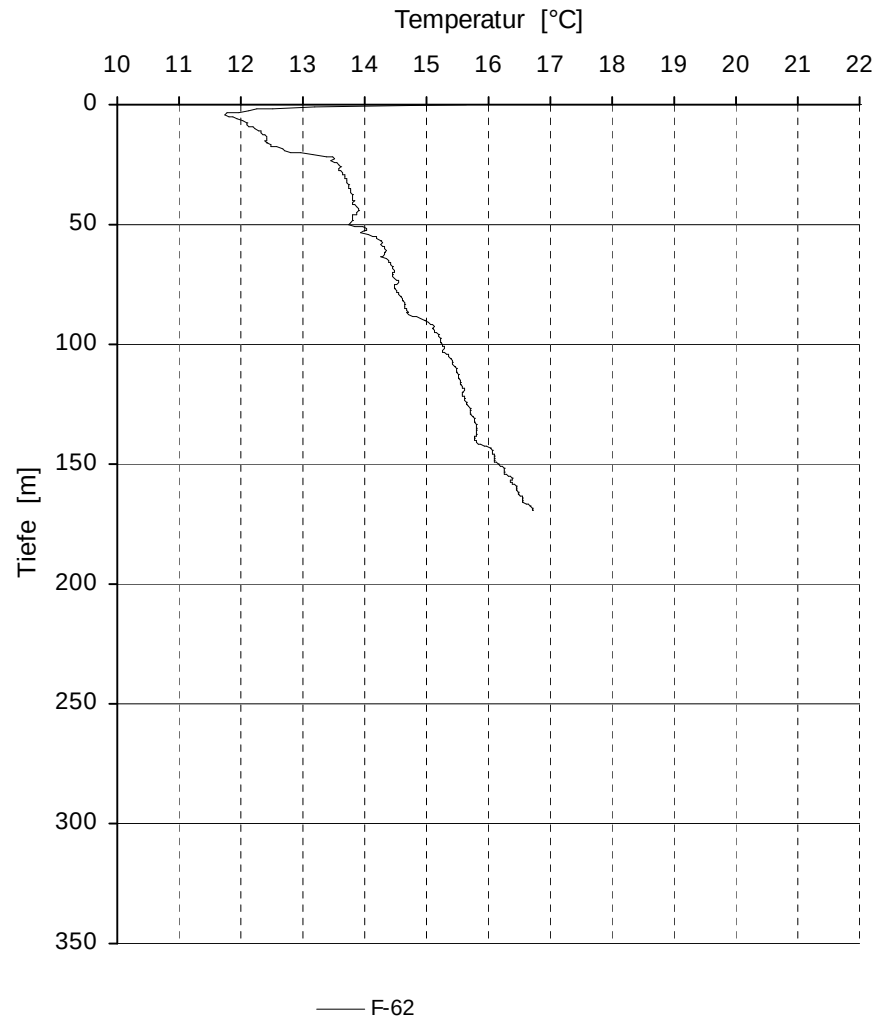
Figur C-20: [20] Zürich FIFA-Strasse, Temperaturlog



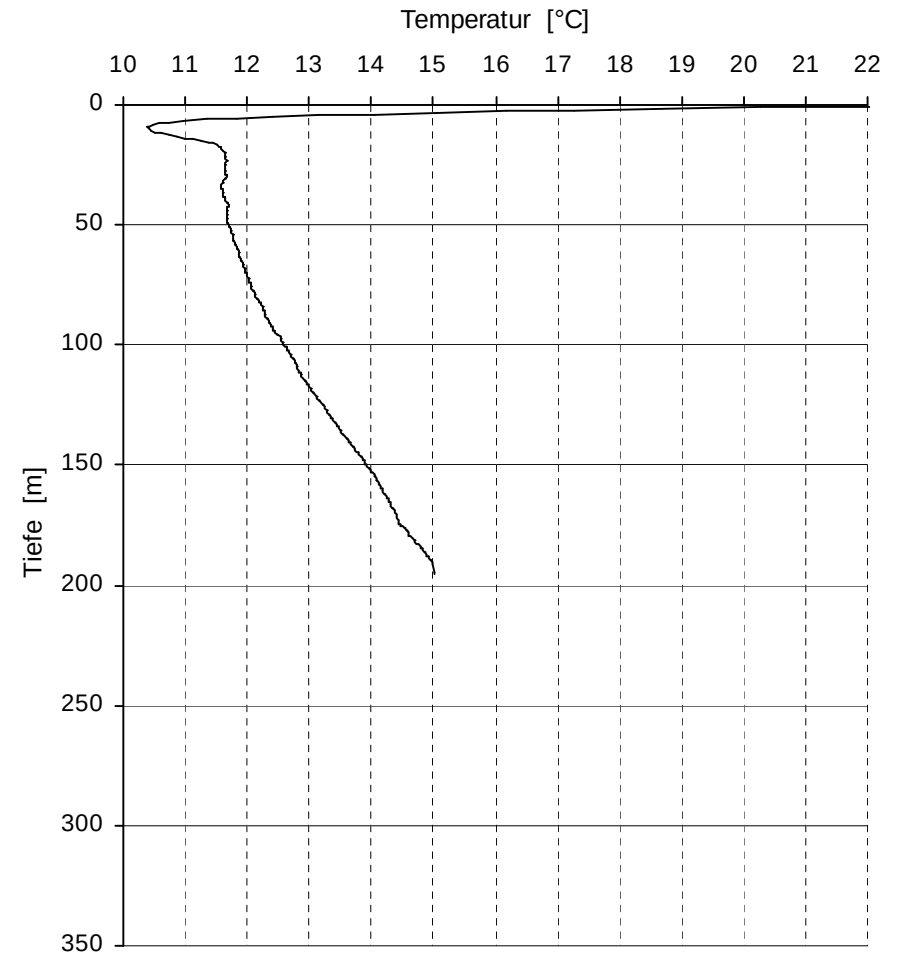
Figur C-21: [21] Auslikon Pfäffikerstrasse, Temperaturlog



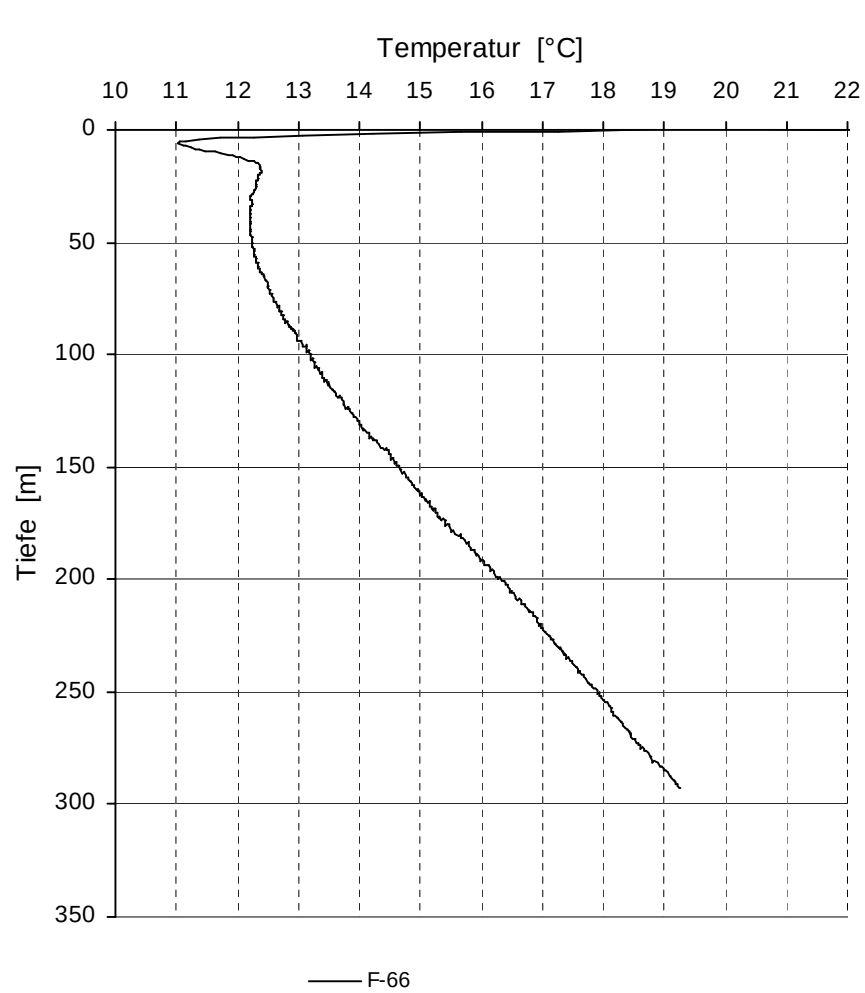
Figur C-22: [22] Zürich-Altstetten Friedhofstrasse, Temperaturlog



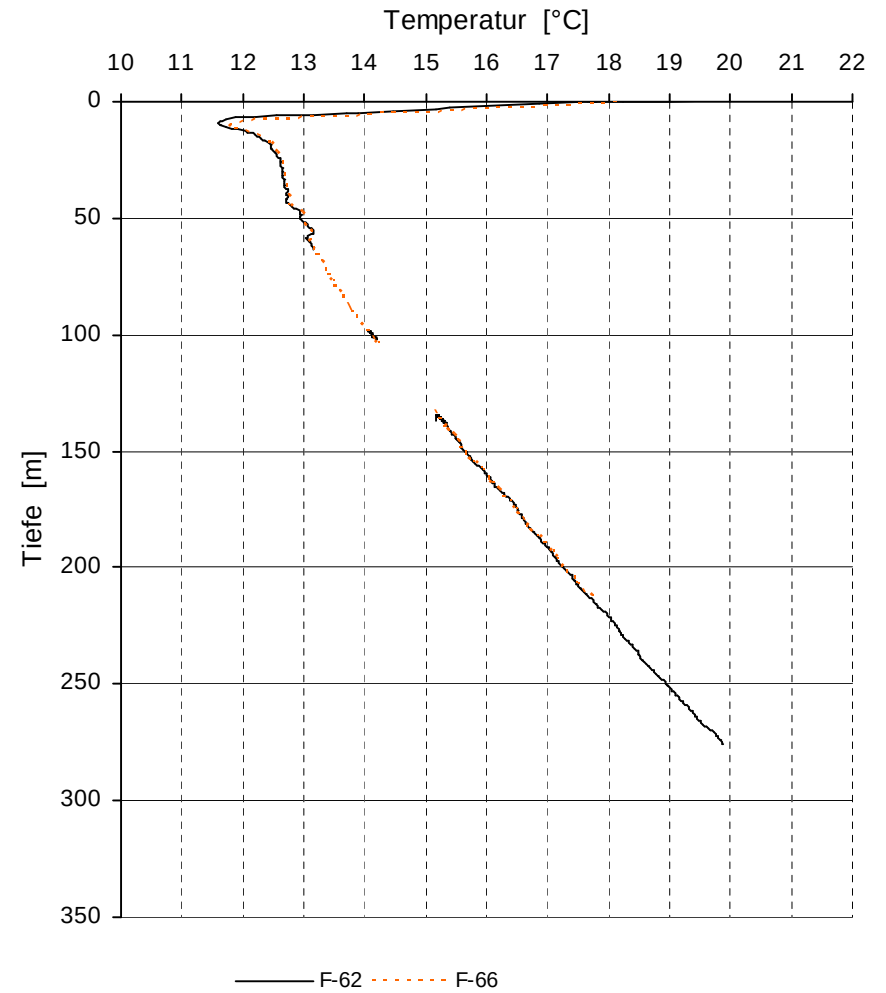
Figur C-23: [24] Benken, Rötlistrasse, Temperaturlog



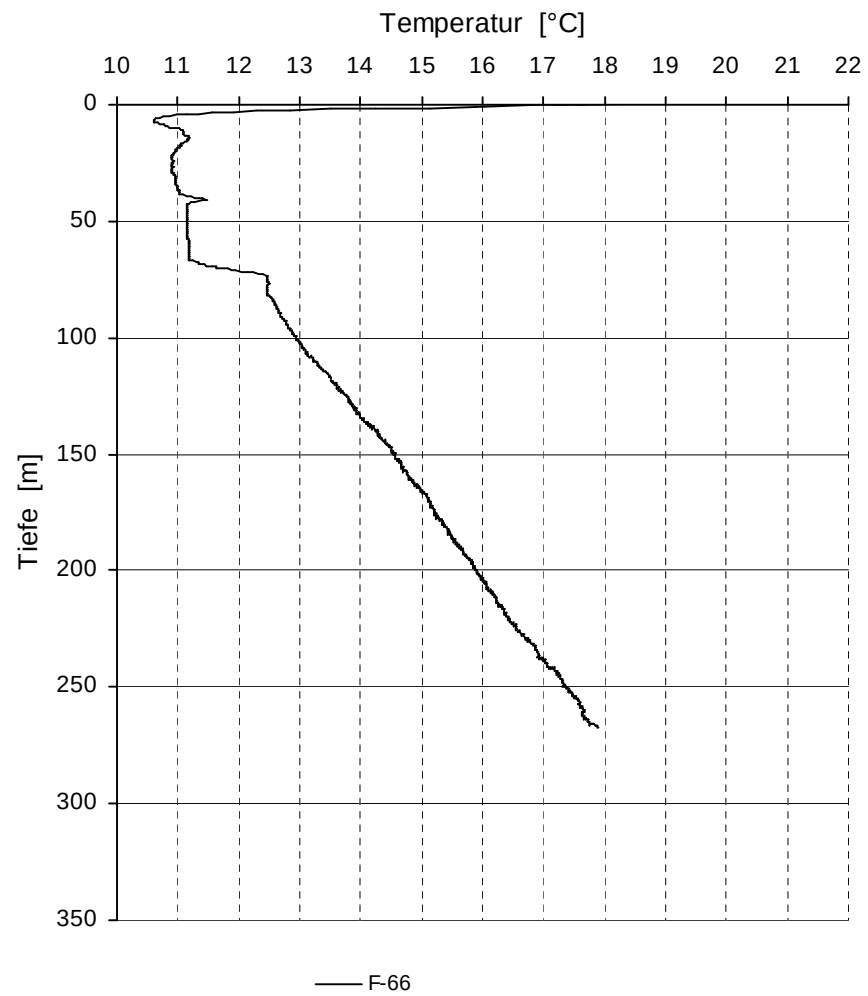
Figur C-24: [25] Hombrechtikon Eichwisweg, Temperaturlog



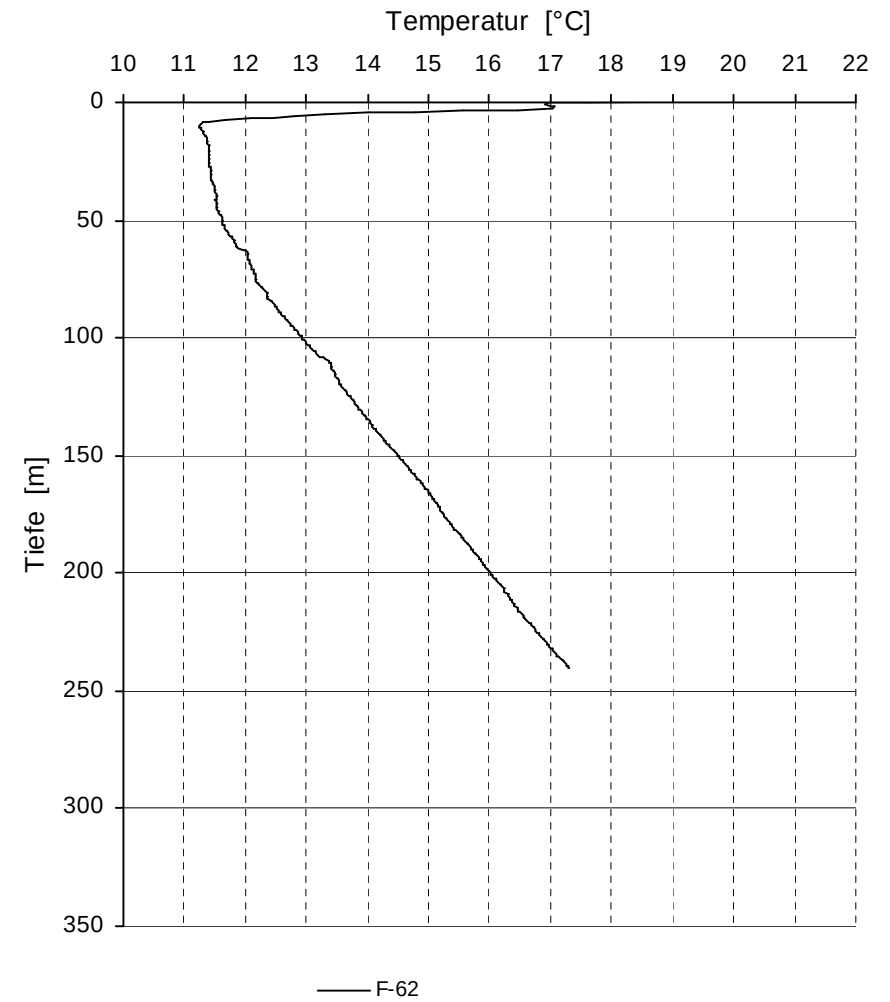
Figur C-25: [26] Erlenbach Lerchenbergstrasse, Temperaturlog



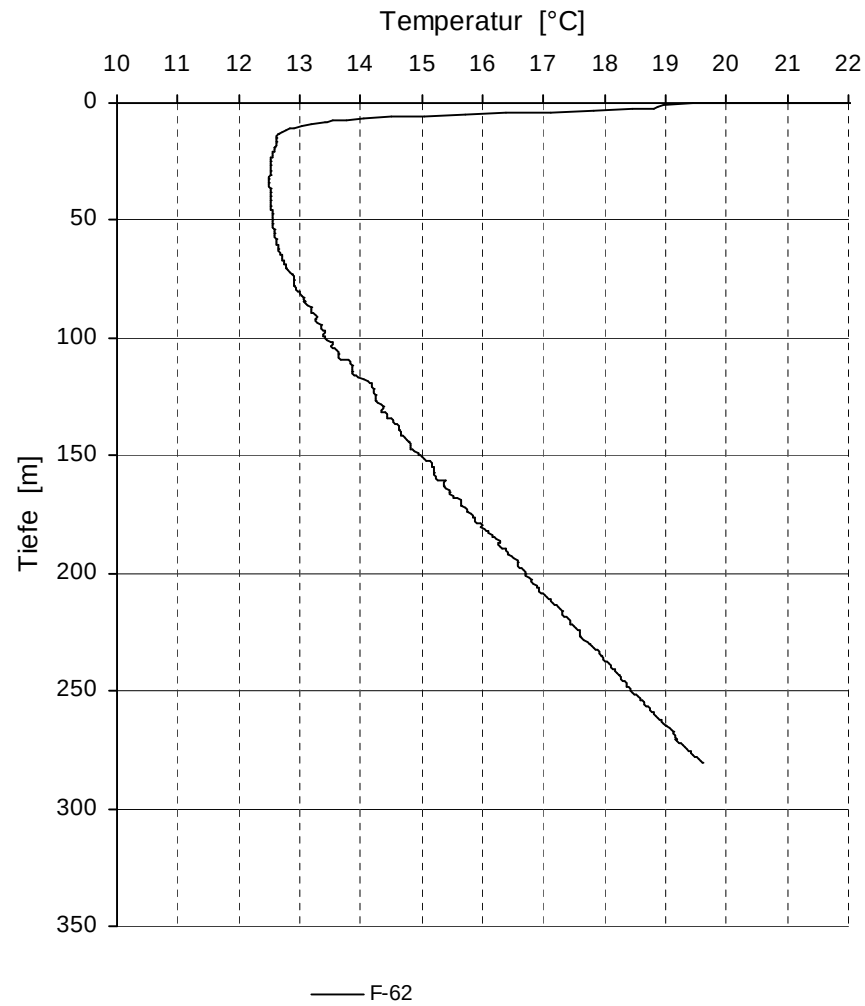
Figur C-26: [27] Eggenwil Im Rebhügel, Temperaturlog



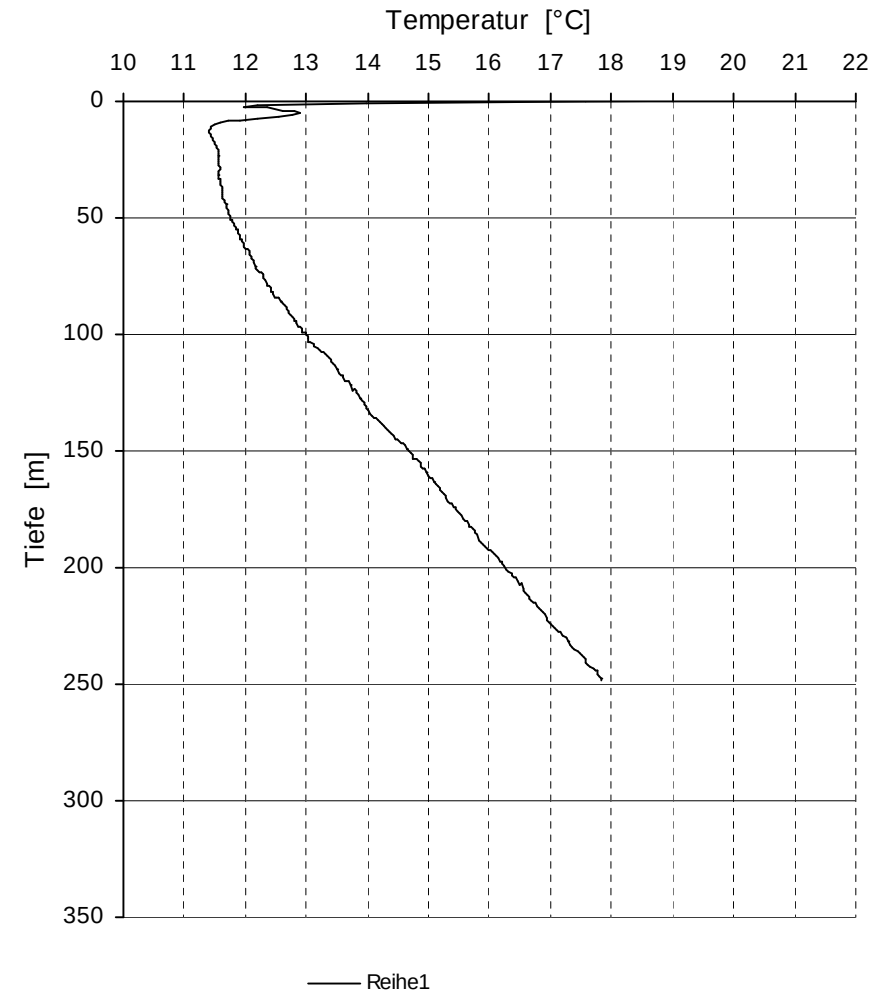
Figur C-27: [28] Wollerau Heiniweidstrasse, Temperaturlog



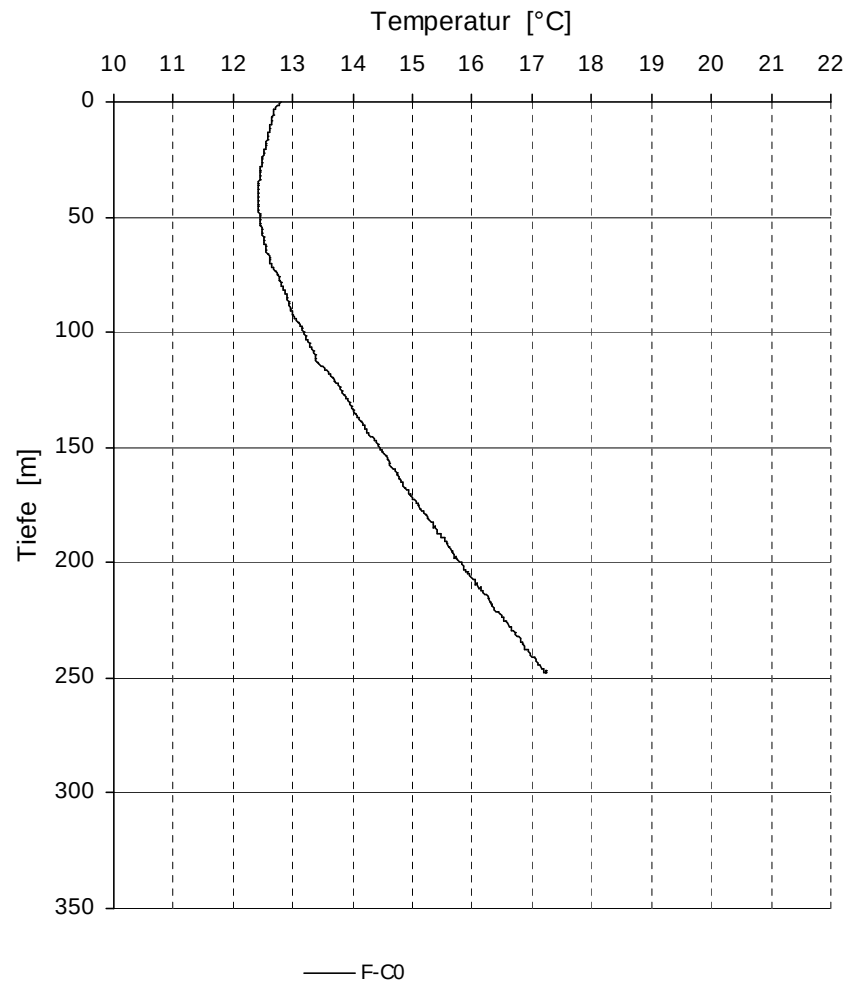
Figur C-28: [29] Zürich-Affoltern Wolfswinkel, Temperaturlog



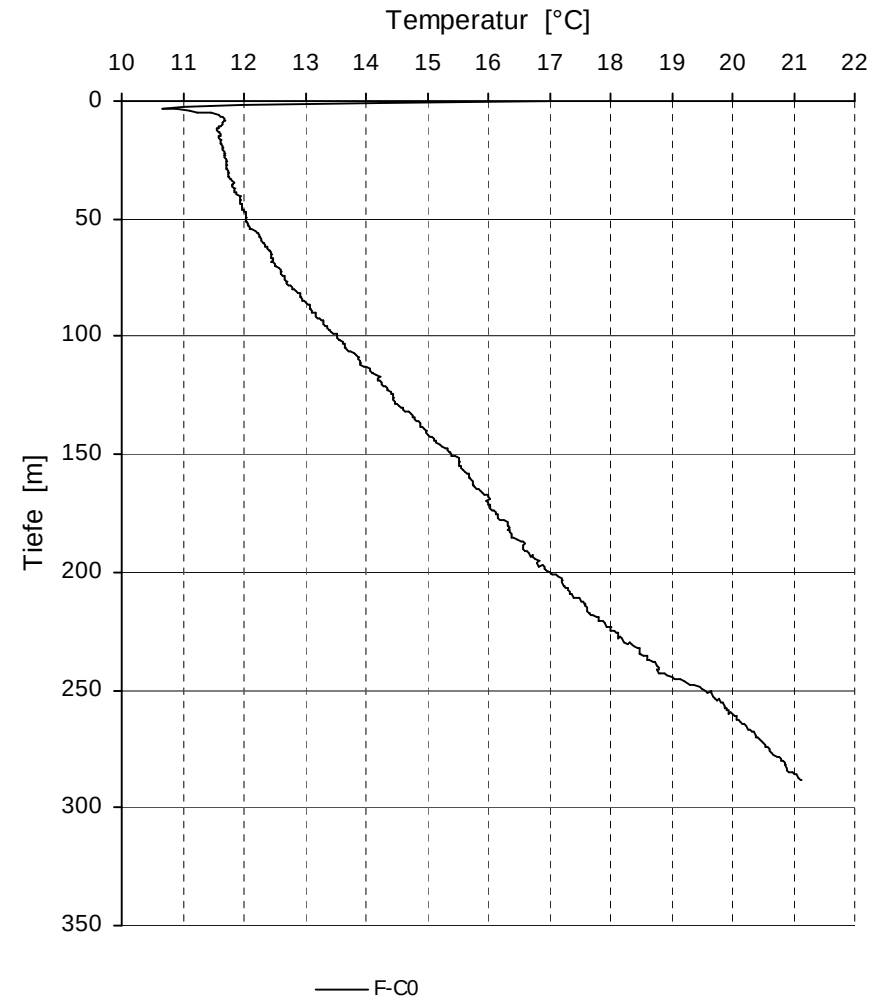
Figur C-29: [30] Weinigen Badenerstrasse, Temperaturlog



Figur C-30: [31] Zürich ETH-Hönggerberg, Temperaturlog



Figur C-31: [32] Erlenbach Seestrasse, Temperaturlog



Figur C-32: [33] Niederweningen Bimzacherweg, Temperaturlog

