

***Mai 2006***

**Schlussbericht**

# **Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500 m)**

Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, spezifische  
Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität

Überarbeitung 2006

ausgearbeitet durch

Werner Leu  
Thomas Mégel  
Ulrich Schärli

Geoform AG, Via San Gottardo 56; 6648 Minusio  
Dohlenweg 28, Geowatt, 8050 Zürich  
Giblenstrasse 3, Geologie+Geophysik, 8049 Zürich

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die geothermischen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität sowie die Dichte für typische Gesteine des Schweizer Molassebeckens flächendeckend bereitzustellen (Tiefenbereich 0-500 m). In einem Parallelprojekt wird zudem das PC-Werkzeug SwEWS entwickelt, das die Auswertung der Daten für die direkte Anwendung in der Praxis erlaubt (Leu et al. 2006).

Der eingeschlagene Lösungsweg umfasst folgende Arbeitsschritte: Entwicklung einer Messapparatur für die Wärmekapazität, Labormessungen der geothermischen Eigenschaften an Gesteinsproben, Berechnung der geothermischen Parameter mit geophysikalischen Bohrlogs und statistische Auswertung der neuen Daten.

Am Institut für Geophysik (ETH-Zürich) konnte eine neue Messapparatur für die Wärmekapazität entwickelt werden. Nach erfolgreicher Kalibration unter Mithilfe von anderen Labors wurde die Messvorrichtung direkt im Rahmen des Projekts eingesetzt.

Im Anschluss an eine umfangreiche Beprobung von Tiefbohrungen im Untersuchungsgebiet (Fig. 1) konnten 282 konsistente Datensätze mit geothermischen Eigenschaften gemessen werden. Diese Labordaten erlaubten anschliessend die Kalibration von Berechnungsmethoden zur Ableitung der Wärmeleitfähigkeit von Sonic-Logdaten und der Wärmekapazität vom Dichte-Log. Damit konnten 374 weitere Datenpunkte generiert werden.

Bei der Überarbeitung der Datenbank (2006) wurden neue Daten (6 Lokalitäten im Grossraum Zentralschweiz-Nordschweiz) integriert und bestehende Fehler korrigiert. Gleichzeitig wurde auch die Software überarbeitet (SwEWS Version 2.0, Leu et al 2006), wobei die Benutzerfreundlichkeit verbessert und die Kompatibilität mit den heutigen Betriebssystemen neu programmiert wurde.

Die resultierende Gesamtdatenbank (Anhang 4) umfasst geothermische Eigenschaften für 74 verschiedene Lokalitäten im Schweizerischen Mittelland. Die Daten charakterisieren die sechs typischen Hauptgesteinsarten in den drei Molassegruppen Obere Süsswassermolasse (OSM), Obere Meeresmolasse (OMM) und Untere Süsswassermolasse.

Die statistische Auswertung aller Daten demonstriert, dass sich die geothermischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Typ und Alter der Gesteine sowie der Lage im Molassebecken deutlich unterscheiden.

Die mittlere Gesteinsdichte variiert für die verschiedenen Molasse- oder Lithologiegruppen im Bereich von 2420 bis 2623 kg/m<sup>3</sup> (Standardabweichung  $\pm 2$ -12%), die Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 2.25 bis 3.14 W/m/K ( $\pm 6$ -25%) und die spezifische Wärmekapazität im Bereich von 864 bis 1037 J/kg/K ( $\pm 3$ -16%).

Mit zunehmender Distanz vom Alpennordrand nehmen die Gesteinsdichte und die Wärmeleitfähigkeit generell ab. Die spezifische Wärmekapazität hingegen zeigt generell einen gegenläufigen Trend und nimmt in dieselbe Richtung zu (Anhang 5). Nur die Wärmeleitfähigkeit zeigt eine deutliche Zunahme mit der Tiefe, unabhängig von Gesteinsart und Molassegruppe.

Diese neuen Daten und kalibrierten Methoden können direkt bei der Planung von geothermischen Anlagen (insbesondere EWS) im Gebiet der Schweizer Molasse eingesetzt werden. Dies erlaubt eine Kostenoptimierung, da spezifisch für den jeweiligen Standort genauere Berechnungen mit bestehenden Simulationsprogrammen wie COSOND, TRNSYS, EWS oder WPcalc durchgeführt werden können.

In Zukunft sollte die Datenbank für die Westschweiz vervollständigt sowie auf die schweizerischen Lockergesteine oder den Jura und die Alpen ausgedehnt werden.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.
--

## Verdankungen

Neben den im Anhang 1 erwähnten Institutionen, die bei der Datenbeschaffung behilflich waren, möchten wir speziell folgenden Personen und Institutionen für die Unterstützung danken:

Dr. Erich Blumer (SGD, Bern), Dr. Marc Weidmann (Géologue, Jongy), Dr. Georges Gorin (Univ. Genf), Herr Moreno Sella (Office cantonale de l'énergie Genève), Herr Jean-Paul Burri (Géologie-Géophysique, Genf), Dr. Jean-Pierre Berger (Univ. Fribourg), Dr. Roland Schegg (Petroconsultants S.A., Genf), Nagra (Wettingen), Dr. Pat Lahusen (SEAG, Winterthur), Dr. Nick Sieber (Sieber & Cassina, Zürich), Hr. D. Schildknecht (ETH, Zürich), M. Schärer (ETH, Zürich), Dr. M. Maciejewski (ETH, Zürich), Prof. P. Uggowitzer (ETH, Zürich), Herren H. Fischer, B. Ramseier und B. Nussbaumer (ETH, Höggerberg), Hr. D. Annaheim (Mettler-Toledo AG, Greifensee), Dr. D. Pribnow (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover).

Weiter danken wir Herrn Dr. Harald Gorhan und Herrn Rudolf Minder (Programmleiter Geothermie BfE), Herrn Max Keller (EWE), Herrn Dr. Martin Zogg (Programmleiter UAW BfE) und der Begleitgruppe mit den Herren Ernst Rohner (Grundag AG, Gossau) und Arthur Huber (Huber Energietechnik, Zürich) für ihre Unterstützung und konstruktiven Hinweise.

## Haftungsausschluss

Die Verwendung der Software und der generierten Daten geschieht auf alleinige Verantwortung des Benutzers. In keinem Falle sind die Autoren ersatzpflichtig für irgendwelche direkten oder indirekten Folgeschäden (eingeschlossen sind Schäden aus entgangenem Gewinn oder Verlust von Daten), die aufgrund der Benutzung der Software entstehen, selbst wenn die Autoren von der Möglichkeit solcher Schäden nicht unterrichtet sind.

## Projektbearbeitung:

<b>Projektleitung:</b>	<b>Leu W.</b> , Geoform AG, 6648 Minusio, Tel. 091 744 69 70
<b>Softwareprogrammierung:</b>	<b>Mégel Th.</b> , GEOWATT AG, 8050 Zürich, Tel. 044 242 14 54
<b>Geophysikalische Laborarbeiten:</b>	<b>Schärli U.</b> , Geologie+Geophysik, 8049 Zürich, Tel. 044 341 12 27
<b>Geophysikalische Logauswertung:</b>	<b>Leu W.</b> , Geoform AG, 6648 Minusio, Tel. 091 744 69 70
<b>Sedimentologie:</b>	<b>Keller B.</b> , Mengis + Lorenz AG, 6005 Luzern, Tel. 041 310 51 02
<b>Regionale Geologie u. Auswertung:</b>	<b>Keller B. und Leu W.</b>

## Abstract

The main aim of this project is the preparation of a specific data base of geothermal properties for typical rocks of the Swiss Molasse Basin (depth interval 0- 500 m). The project includes the development of a new laboratory tool for efficient heat capacity measurements on rock samples, numerous new measurements of geothermal rock properties in the laboratory and calculation of such data from geophysical borehole logs.

Within the study area (Fig. 1) 282 rock samples, mainly from deep boreholes, were analyzed with the successfully calibrated new heat capacity device and conventional thermal conductivity measuring techniques (cuttings and cores). Based on sonic and density log data from exploration wells, 374 additional data points were generated.

This new data base (Appendix 4, upgraded and revised in 2006) characterizes in detail the six main lithological rock types in the three Molasse groups OSM, OMM and USM within the Swiss Plateau Molasse. The statistical evaluation of all data illustrates the regional variation of the petrophysical and geothermal parameters. Bulk rock density and thermal conductivity increase, whereas heat capacity decreases in the direction towards the Alpine front for most data groups (Appendix 5). Thermal conductivity shows a distinct increase with depth.

Based on this new information and with the aid of the evaluation software tool SwEWS (Leu et al. 2006), the costs of planned geothermal installations can be optimized by more precise heat extraction simulations with existing software packages like COSOND, TRNSYS, EWS or WPcalc.

## Résumé

Le but principal de ce projet est la préparation d'une banque de données caractéristiques des propriétés géothermiques des roches du bassin molassique suisse (intervalle de profondeur 0-500m). Au cours du projet un nouvel appareil pour mesurer la capacité de chaleur spécifique a été développée et testée. En plus, un grand nombre de valeurs géothermiques a été mesuré au laboratoire et des techniques pour calculer ces propriétés avec des diagraphies ont été appliquées.

Pour 282 échantillons de puits profonds dans la région du plateau molassique (Fig. 1) la capacité de chaleur et la conductivité thermique ont été analysées. En plus, avec des vitesses soniques et des valeurs de densité extrait des diagraphies, pour 374 points ces propriétés géothermiques ont été calculées.

Cette nouvelle banque de données compréhensive (appendice 4, révision totale des données en 2006)) caractérise en détail les différences géothermiques entre les six lithologies principales dans les trois groupes de la molasse (OSM, OMM, USM). L'évaluation statistique de toutes les données démontre l'existence de variations horizontales des caractéristiques pétrophysiques et géothermiques d'une région à l'autre. La densité totale de la roche et de la conductivité thermique en général augmente tandis que la capacité de chaleur diminue en direction du front des Alpes (appendice 5). Seulement la conductivité thermique est caractérisée par une augmentation substantielle avec la profondeur.

Avec ces données et l'évaluation sur ordinateur en utilisant le logiciel nouveau SwEWS (Leu et al. 2006) pour des sites spécifiques, une planification orientée vers des économies améliorées devient possible. Les données peuvent être importées directement dans des outils de simulations de la chaleur extractible comme COSOND, TRNSYS, EWS ou WPcalc.

Inhaltsverzeichnis	Seite
<b>Zusammenfassung</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	3
<b>Résumé</b> .....	3
Figurenverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	6
Anhangsverzeichnis .....	6
<b>1. Einleitung</b> .....	7
1.1 Ausgangslage .....	7
1.2 Zielsetzung .....	7
1.3 Allgemeiner Lösungsweg und Parallelprojekt .....	7
<b>2. Untersuchungsgebiet und Datengrundlage</b> .....	8
2.1 Untersuchungsgebiet .....	8
2.2 Bestehende Datenbank und Gesteinsarchiv ETH .....	10
2.3 Neubeprobung Tiefbohrungen und Oberfläche .....	10
2.4 Geophysikalische Bohrlogs .....	11
<b>3. Methodik</b> .....	12
3.1 Überblick Analysen und Labors .....	12
3.2 Labormessungen geothermische Parameter .....	13
3.2.1 Wärmeleitfähigkeitsmessungen .....	13
QTM-Messsonde: .....	13
TK04 - Messgerät .....	13
3.2.2 Wärmekapazitätsmessungen .....	17
3.3 Labormessungen petrophysikalische Parameter .....	18
3.3.1 Gesteinsdichte .....	18
Messungen Institut für Geophysik (ETHZ) .....	18
Messungen Geol. Inst. (Univ. Bern) .....	19
3.3.2 Porosität .....	19
Messungen Institut für Geophysik (ETHZ) .....	19
Messungen Geol. Inst. (Univ. Bern) .....	19
3.4 Laboranalysen mineralogische Gesteinszusammensetzung .....	20
3.5 Auswertung geophysikalische Logs .....	20
3.5.1 Datenaufbereitung .....	20
3.5.2 Bestimmung der Lithologie und der Berechnungsintervalle .....	20
3.5.3 Gesteinsdichte .....	21
3.5.4 Porosität .....	21
3.5.5 Berechnung Wärmeleitfähigkeit .....	22
3.5.6 Berechnung Wärmekapazität .....	24
3.8 Datenbankstruktur .....	27
3.8.1 Erfasste Parameter .....	27
3.8.2 Zwischenberechnungen .....	28
3.8.3 Lithologieklassen .....	28
3.8.4 Molassegruppen .....	28
<b>4. Resultate</b> .....	32

4.1 Datenbankinhalt .....	32
4.2 Gesteinsdichte .....	35
4.3 Wärmeleitfähigkeit .....	38
4.4 Wärmekapazität .....	39
<b>5. Interpretation der regionalen Trends.....</b>	<b>43</b>
5.1 Gesteinsdichte: .....	44
5.2 Wärmeleitfähigkeit: .....	44
5.3 Wärmekapazität: .....	44
<b>6. Programm für die Datenbank-Abfrage "SwEWS".....</b>	<b>44</b>
<b>7. Schlussfolgerungen .....</b>	<b>45</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>46</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>48</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>50</b>
Anhang 1: Kontaktierte Institutionen für Datenbeschaffung .....	51
Anhang 2: Wärmekapazitäts-Messapparatur ("Misch-Kalorimeter").....	52
Anhang 3: Fehlerrechnungen der Labormessungen .....	55
Anhang 4: Datenbankauszug .....	57
Anhang 5: Trendkarten .....	70

## Figurenverzeichnis

Fig. 1:	Untersuchungsgebiet mit beprobten Tiefbohrungen (Gesteine und geophysikalische Logs) und weiteren Lokalitäten der Laboranalysen.
Fig. 2:	Herkunft und Art der Gesteinsproben.
Fig. 3:	Verteilung und Messmethode der untersuchten Parameter in den verschiedenen Labors.
Fig. 4:	QTM-Messsonde.
Fig. 5:	Tk04-Messsonde (Thermoelement).
Fig. 6:	TK04-Messsonde mit Druckbehälter.
Fig. 7:	Schematische Skizze der Wärmekapazitäts-Messvorrichtung.
Fig. 8:	Vergleich zwischen Gesteinsdichte ( $\rho_{wg}$ ) des Dichtelogs und von Labormessungen abgeleitet für die Bohrung Burgdorf M1400.
Fig. 9:	Beziehung zwischen der Sonic-Geschwindigkeit und der im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten.
Fig. 10:	Vergleich zwischen der im Labor gemessenen und mit dem Sonic Log berechneten Wärmeleitfähigkeit für Schlamm-Siltsteine der Molassegruppen OSM und USM.
Fig. 11:	Beziehung von Logdichte ( $RHOB_{log}$ ) und der im Labor gemessenen Wärmekapazität für sandige Gesteinstypen der Molasse.
Fig. 12:	Beziehung von Logdichte ( $RHOB_{log}$ ) und der im Labor gemessenen Wärmekapazität für Schlamm- und Siltsteine der Molasse.
Fig. 13:	Vergleich zwischen der im Labor gemessenen und mit dem Dichte-Log berechneten Wärmekapazität für Molassegesteine.
Fig. 14:	Geologische Karte des schweizerischen Mittellandes mit der Verbreitung der Molassegruppen OSM, OMM und USM.
Fig. 15:	Verteilung der Datensätze auf die verschiedenen Quellen.
Fig. 16:	Verteilung der Datensätze auf die Molassegruppen (Labor – Log).

- Fig. 17: Verteilung der Gesteinstypen in den Datensätze der Oberen Süsswassermolasse OSM.  
Fig. 18: Verteilung der Gesteinstypen in den Datensätze der Oberen Meeresmolasse OMM.  
Fig. 19: Verteilung der Gesteinstypen in den Datensätze der Unteren Süsswassermolasse USM.  
Fig. 20: Anzahl gemessene Parameter in der Gesamtdatenbank.  
Fig. 21: Mittelwert und Standardabweichung aller Datensätze ( $\lambda_{wg}$ ,  $c_{wg}$ ,  $\rho_{wg}$ ) gegliedert nach Molassegruppen und Lithologieklassen.  
Fig. 22: Gesteinsdichte  $\rho_{wg}$  aller Daten relativ zu ihrer Tiefe.  
Fig. 23: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  aller Daten relativ zu ihrer Tiefe.  
Fig. 24: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  der grobkörnigeren Gesteinstypen der OMM relativ zu ihrer Tiefe (nur mit Log berechnete Daten).  
Fig. 25: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  der feinkörnigeren Gesteinstypen der USM relativ zu ihrer Tiefe (nur mit Log berechnete Daten).  
Fig. 26: Wärmekapazität  $c_{wg}$  aller Daten relativ zu ihrer Tiefe.

## Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Verwendete Bohrungen mit Tiefenbereich der vorhandenen geophysikalischen Logs.  
Tab. 2: Faktor  $A$  für die verschiedenen Molassegruppen und Lithologieklassen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit der Sonic-Geschwindigkeit.  
Tab. 3: Berechnungsmethoden und Fehler für die geothermischen oder petrophysikalischen Parameter in der Datenbank.  
Tab. 4: Definition der Lithologieklassen, die in der Datenbank verwendet werden.  
Tab. 5: Mittelwerte, Standardabweichung und Anzahl Datensätze der Wärmeleitfähigkeit, -kapazität und Gesteinsdichte geordnet nach Lithologiekategorie und Molassegruppe.

## Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Für die Datenergänzung kontaktierte Institutionen.  
Anhang 2: Beschreibung der neuen Apparatur für Wärmekapazitätsmessungen.  
Anhang 3: Fehlerrechnungen der verschiedenen Berechnungsmethoden.  
Anhang 4: Datenbankauszug  
Anhang 5: Trendkarten der geothermischen Parametern im Untersuchungsgebiet.

# 1. Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Mit der zunehmenden Nutzung geothermischer Ressourcen im Schweizer Molassebecken werden auch detaillierte Kenntnisse über die geothermischen Eigenschaften des Untergrundes unabdingbar (SIA 1996, Burkart 1989, Sanner 1992). Für die heute oft eingesetzte Simulation des thermischen Verhaltens des Untergrundes sowie des Energiepotentials solcher Anlagen besteht ein grosses Interesse an Methoden und Werkzeugen, mit welchen sich die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Gesteinsdichte des Untergrundes kostengünstig und zuverlässig voraussagen lassen. Der heutige Wissensstand über die geothermischen Eigenschaften der verschiedenen Gesteinstypen des Schweizer Mittellandes stützt sich weitgehend auf eine Ansammlung punktueller Daten unterschiedlichster Projekte und Bedeutung (Bodmer & Rybach 1984). In einer Pilotstudie wurde 1996 gezeigt (Greber et al. 1996, Leu et al. 1997, Rybach et al. 1997), dass heute mit neuen Methoden eine breiter abgestützte Datenbasis geschaffen werden kann.

Beim vorgelegten Projekt geht es im Wesentlichen darum, für Planer von geothermischen Speichieranlagen, Sondenfeldern und Erdwärmesonden die relevanten geothermischen Eigenschaften für den Tiefenbereich bis 500 m flächendeckend für das schweizerische Mittelland bereitzustellen.

## 1.2 Zielsetzung

Die Ziele der vorliegenden Arbeit sind:

- Mit neuen Labormessungen sollen die relevanten geothermischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Gesteinsdichte) für den Tiefenbereich bis ca. 500 m flächendeckend erfasst werden.
- Die Daten der Labormessungen sollen durch die Anwendung der in der Pilotstudie entwickelten Berechnungsmethoden mit geophysikalischen Bohrlogs verdichtet werden (regional und tiefenbezogen).
- Alle relevanten Informationen sollen in einer Datenbank (teilweise bestehend) integriert und anschliessend ausgewertet werden.
- Weiter soll ein einfaches PC-Werkzeug für den Praktiker entwickelt werden, das erlaubt, die vorhandenen Daten für anwenderspezifische Tiefenprofile auszuwerten (Teil 2: siehe unten und Leu et al. 2006).

## 1.3 Allgemeiner Lösungsweg und Parallelprojekt

Der gewählte Lösungsansatz geht von den bestehenden Messdaten aus, ergänzt diese mit Neumessungen und Berechnungen und stellt abschliessend eine vereinheitlichte Datenbasis in einer allgemein verständlichen Weise zur Verfügung.

Das Gesamtprojekt war in zwei Teilprojekte gegliedert: Im Rahmen des BfE Programms "Geothermie" wurden die Labormessmethoden vervollständigt, die Messungen durchgeführt und die Resultate in einer neuen Datenbank integriert. Im Rahmen des BfE Forschungsprogramms "Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)" wurden zusätzliche Daten mit geophysikalischen Logs generiert sowie ein PC-Werkzeug zur Auswertung des Gesamtdatensatzes entwickelt.

Das Gesamtprojekt wurde in folgende Arbeitsschritte unterteilt:

### a) Inventarisierung bestehender Daten

Die im Rahmen des Pilotprojektes (Greber et al. 1996) erstellte Datenbasis für die Molasse wurde mit allen bis zum Projektbeginn im Dezember 1997 zur Verfügung stehenden und



zugänglichen Daten vervollständigt. Mit einer ersten Auswertung konnten Datenlücken für die spätere Ergänzungsmessungen lokalisiert werden.

**b) Dateneinsichtsgesuche**

Rund 45 öffentliche Ämter und private Institutionen (Anhang 1) wurden für neue Beprobungsmöglichkeiten oder eine bewilligte Verwendung von bestehenden Daten (geologische Berichte, geophysikalische Logs etc.) kontaktiert.

**c) Probenahme**

Neue Proben für die Labormessungen stammen von bereits archivierten Gesteinsproben der ETH sowie von Kernmaterial und Bohrklein (Cuttings) der Tiefbohrungen der schweizerischen Erdöl/Erdgasindustrie.

**d) Labormessungen**

Labormessungen wurden einerseits am Institut für Geophysik der ETH Zürich (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Gesteinsdichte) und andererseits am geologischen Institut der Universität Bern durchgeführt (Gesteinsdichte, Porosität).

**e) Berechnung geothermischer Eigenschaften mit geophysikalischen Logs**

Mit Hilfe der geophysikalischen Bohrlogs wurden für zusätzliche Lokalitäten und Tiefenpunkte die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität sowie teilweise die Gesteinsdichte und Porosität berechnet.

**f) Datenbank**

Sämtliche Labormessdaten und geophysikalischen Werte für die notwendigen Zwischenberechnungen und Endresultate wurden in einem Microsoft-Excel Datenblatt einheitlich zusammengefasst.

**g) Auswertung regionaler Trends**

Nach einer Sortierung der geothermischen Daten nach Molassegruppen und Gesteinstypen wurden die regionalen Trends statistisch erfasst und in Gebiete mit Datenlücken extrapoliert.

**h) Entwicklung der Datenbank-Abfragehilfe**

Das Abfragemodul für den Anwender wurde als Microsoft-Access Anwendung entwickelt. Dabei wird eine selbstlaufende Programmversion verwendet, in der die wichtigsten Erklärungen und Hilfestellungen für die richtige Anwendung integriert sind (Leu et al. 2006).

## **2. Untersuchungsgebiet und Datengrundlage**

### **2.1 Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet des Projekts umfasst das Schweizerische Mittelland im Bereich des Molassebeckens zwischen Jura Südfuss im Nordwesten und der Subalpinen Molasse im Südosten (Fig. 1). Für die Neumessungen im Labor sowie die anschliessende Auswertung aller Daten wurde nur dieses Gebiet berücksichtigt. Dies impliziert, dass der Geltungsbereich der bereitgestellten geothermischen Parameter nur innerhalb dieses Untersuchungsgebietes angewendet werden sollte. Das Untersuchungsgebiet beinhaltet die grössten Schweizer Agglomerationen, in denen in Zukunft die intensivste Nutzung der Geothermie erwartet wird.

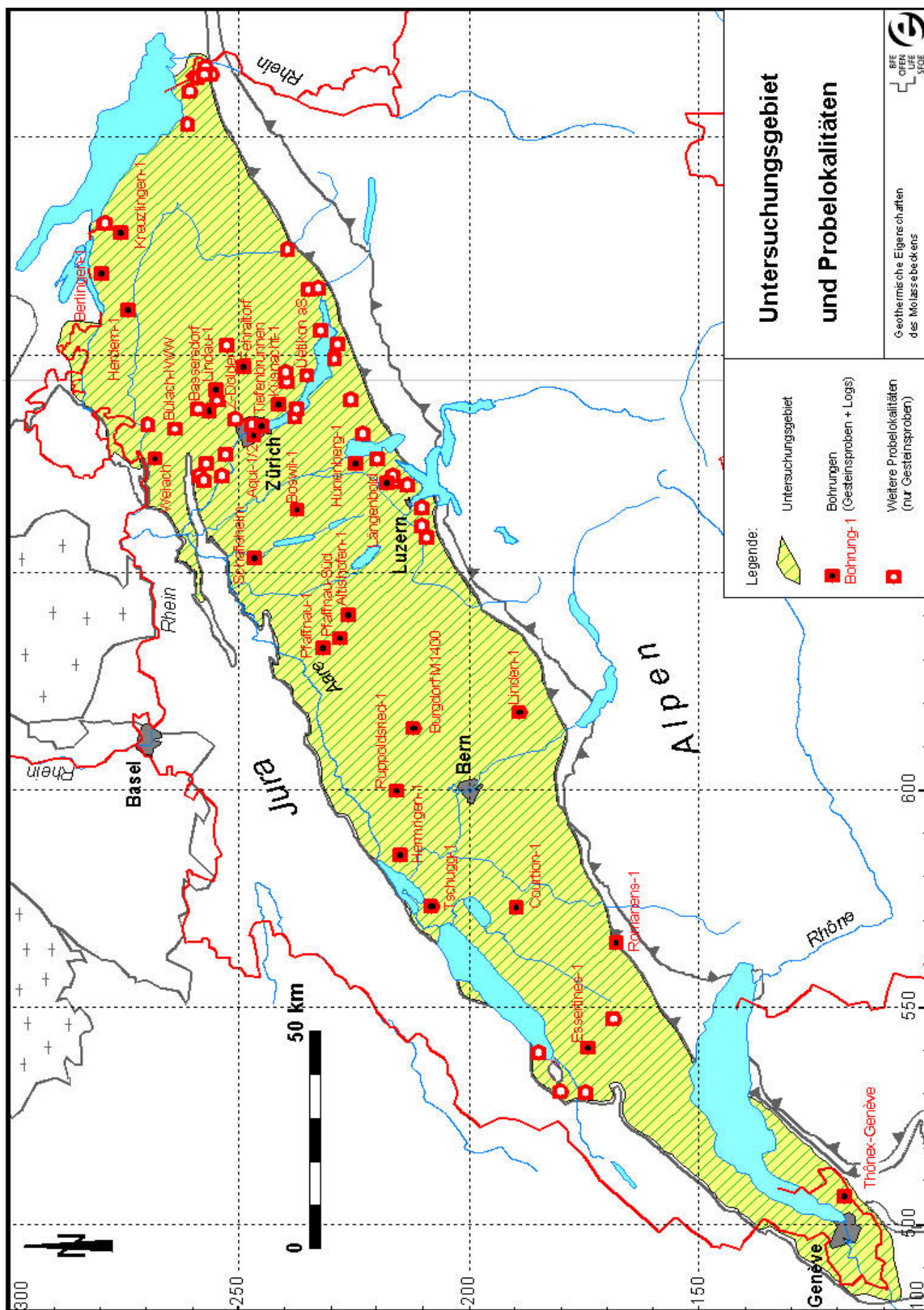


Fig. 1: Untersuchungsgebiet mit beprobten Tiefbohrungen (Gesteine und geophysikalische Logs) und weitere Lokalitäten mit Laboranalysen.

## 2.2 Bestehende Datenbank und Gesteinsarchiv ETH

Vor Beginn des Projektes standen bereits diverse Messwerte von mehreren Molassegesteinen zur Verfügung. Dabei handelt es sich vor allem um Wärmeleitfähigkeitsmessungen und teilweise auch Porositäts- und Dichtebestimmungen, welche am Institut für Geophysik der ETH-Zürich während der letzten 20 Jahre im Rahmen verschiedener Projekte durchgeführt worden waren (Rybach et al. 1995, Ph. Bodmer 1978, U. Schärli 1980; U. Schärli 1989). Insgesamt konnten so Daten von 80 Molasseproben aus dieser Datenbank übernommen werden. Sie stammen vorwiegend von Oberflächenaufschlüssen des südlichen Randgebietes der mittelländischen Molasse zwischen Luzern und Rorschach (Fig. 1). Wenige Oberflächenproben wurden im westlichen Mittelland entnommen. Diese bereits vorhandenen Kernproben stammen aus Nagra-Bohrungen, Erdöl-Bohrungen und anderen Sondierbohrungen oder Stollen. Dabei wurden - wie im Projekt festgelegt - nur Proben bis 500m Tiefe berücksichtigt. 4 Proben (Bohrklein, Cuttings) konnten aus Geothermiebohrungen, die in der vorgängigen Pilotstudie gemessen wurden, übernommen werden.

## 2.3 Neubeprobung Tiefbohrungen und Oberfläche

Die Proben, welche nach Projektbeginn neu gesammelt wurden, stammen vorwiegend aus Tiefbohrungen im Schweizer Mittelland (Fig. 1, Kerne oder Bohrklein/Cuttings). Dabei standen Proben aus Bohrungen mit unterschiedlichem Untersuchungszweck zur Verfügung, nämlich: Explorationsbohrungen der Erdöl/Erdgasindustrie, Geothermiebohrungen, Sondierbohrungen für radioaktive Endlager (Nagra), Sondierbohrungen für Tunnel oder Stollen.

Als wertvolle Datenquelle erwiesen sich die archivierten Gesteinsproben der Schweizerischen Erdölgesellschaft SEAG, da damit auch Probelokalitäten ausserhalb der Agglomerationsgebiete zugänglich wurden (Fig. 1).

Bestimmt durch die Zielsetzungen des Projekts unterlag die Beprobungskampagne folgenden Kriterien:

- Regelmässige Abdeckung des Untersuchungsgebiets
- Nur Molassegesteine bis in 600 m Tiefe
- Ausreichende Probemenge für Analyse
- Falls möglich aus Bohrungen mit geophysikalischen Logs
- Ausgewogene Beprobung der Molassegruppen
- Ausgewogene Beprobung der Gesteinstypen (Lithologien)
- Ausgewogene Beprobung des Tiefenbereichs

Zusätzlich zu den 84 bereits vorhandenen Proben des ETH-Archivs (Instituts für Geophysik, siehe auch 2.2) konnten neu 170 Bohrklein- und 28 Kernproben für Analysen und zur Ergänzung der Datenbank verwendet werden.

Die so beprobten Tiefenintervalle sind abhängig vom Probenmaterial und dem Grad der Wechsellagerung der vorkommenden Gesteinstypen. Bei Kernmaterial sind die Proben repräsentativ für Intervalle von 2-20 cm und bei Bohrklein (Cuttings) von 2 – 20 m, mit wenigen Ausnahmen von bis zu 50 m.

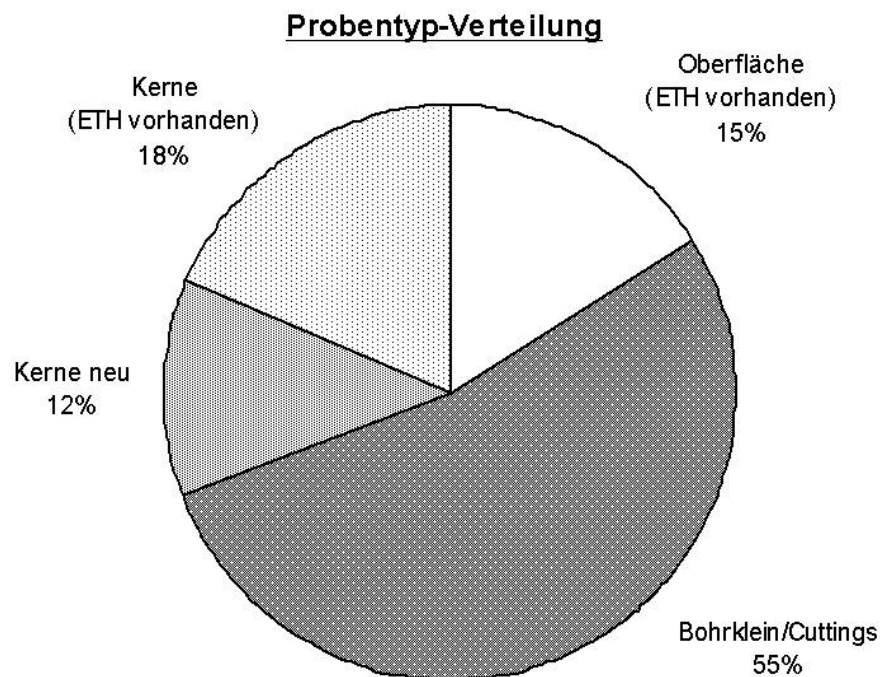


Fig. 2: Herkunft und Art der Gesteinsproben.

## 2.4 Geophysikalische Bohrlogs

Aus über 30 Tiefbohrungen wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit und regionalen Verteilung 24 geeignete Bohrungen ausgewählt (Fig. 1, Tab. 1), die in die Auswertung der geophysikalischen Logs einbezogen wurden. Aufgrund der Resultate der Pilotstudie (Greber et al. 1996) wurden für die Berechnung der geothermischen Parameter das Gamma-Ray (GR), das Sonic (BHC) und das Dichtelogs (RHOB) ausgewertet. Nur bei Bohrungen wo kein BHC-Log vorhanden war wurde teilweise auf das Neutron und/oder Dichte-Log zurückgegriffen.

Da die Exploration in der Schweiz vorwiegend auf tiefere Intervalle ausgerichtet war, sind in einigen Bohrungen keine Logs für die obersten 200 m vorhanden (Tab. 1).

Tab. 1: Verwendete Bohrungen mit Tiefenbereich der vorhandenen geophysikalischen Logs.

Bohrung	Gamma Ray GR [API]	Sonic BHC [ms/m]	Neutronen NPHI [API/%]	Dichte RHOB [kg/m <sup>3</sup> ]
Aqui-2	>110 m	>300 m	>300 m	>300 m
Bassersdorf	>264 m	>264 m	>264 m	>264 m
Berlingen-1	0-600 m	>80 m		
Boswil-1	0-600 m	0-600 m	0-600 m	
Burgdorf M1400	40-243 m		40-243 m	40-243 m
Courtion-1	0-600 m	>215 m		
Essertines-1	0-336 m	90-336 m		
Fehrltorf	0-600 m	>447 m	>447 m	>447 m
Herdern-1	>450 m	0-600 m		0-600 m
Hermrigen-1	250-395 m	250-395 m	350-395 m	350-395 m
Hünenberg-1	0-600 m	0-600 m	0-600 m	0-600 m
Kreuzlingen-1	0-600 m	0-600 m		
Küsnacht-1	>45 m	>131 m		
Längenbold D4	0-160 m	0-160 m	0-160 m	
Lindau-1	0-600 m	0-600 m		
Linden-1	0-600 m	>310 m		
Pfaffnau-1	0-600 m	0-600 m		
Pfaffnau-Süd-2	0-600 m	>202 m	0-600 m	>375 m
Romanens-1	>266 m	>266 m	0-600 m	>266 m
Ruppoldsried	15-315 m	0-600 m	>310 m	>310 m
Schafisheim	>245 m	>315 m	>245 m	>315 m
Thônex-Genève	>74 m	>146 m		
Tiefenbrunnen	>330 m	>330 m	>330 m	>330 m
Tschugg-1	0-600 m	0-600 m	>270 m	>270 m
Weiach	45-176 m	45-176 m	45-176 m	45-176 m

### 3. Methodik

#### 3.1 Überblick Analysen und Labors

Es wurden folgende petrophysikalischen Parameter im Labor gemessen:

- Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ )
- Wärmekapazität ( $c_p$ )
- Gesteinsdichte ( $\rho$ )
- Porosität ( $\phi$ )
- Mineralogische Gesteinszusammensetzung

Diese Parameter ermöglichen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Anisotropie (Schichtung) und der Porenfüllung (Wasser/Luft) eine vollständige Beschreibung der thermischen Eigenschaften von Gesteinen.

An der ETH (IG ETHZ) wurden die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und teilweise auch die Porosität und Dichte bestimmt.

Am Geologischen Institut der Universität Bern (GIUB) wurden die Gesteinsdichte, die Porosität sowie die mineralogische Zusammensetzung gemessen. Diese Messungen dienten der Kalibration der Analysen an der ETH und der Berechnungsmethoden mit den geophysikalischen Bohrlogs.

Figur 3 illustriert die Verteilung und Anzahl der einzelnen Messmethoden, die in den verschiedenen Labors zur Anwendung kamen.

## 3.2 Labormessungen geothermische Parameter

### 3.2.1 Wärmeleitfähigkeitsmessungen

Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit standen 2 Messgeräte zur Verfügung, ein Quick Thermal Conductivity Meter und ein TK04-Messgerät. Beide Geräte (siehe unten) arbeiten nach der transienten Messmethode, d.h. es wird mittels eines geradlinigen Heizdrahtes ein Wärmeimpuls an eine ebene Fläche einer Gesteinsprobe abgegeben. Die Aufheizung der Probe wird durch ein Thermoelement unmittelbar neben dem Heizdraht während 20 bis 90 Sekunden erfasst. Aus dieser Heizkurve lässt sich die Wärmeleitfähigkeit der Probe bestimmen (U. Schärli 1989, D. Pribnow 1994). Die Eindringtiefe des Heizimpulses beträgt ca. 5 - 15 mm.

#### QTM-Messsonde:

Die Messsonde des QTM-Gerätes besteht aus einer 4 x 10 cm grossen Asbestplatte, auf deren Unterseite in der Mitte ein 10 cm langer, dünner Heizdraht aufgespannt ist. In der Mitte, unmittelbar neben dem Heizdraht, ist ein Thermoelement angebracht, welches die Temperatur misst. Die ganze Anordnung liegt – durch zwei mit Spiralfedern gespannten Schrauben befestigt - in einem nach unten offenen Metallgehäuse. Durch ein kleines Gewicht wird die Sonde auf eine ebene Gesteinsfläche gedrückt, sodass der Heizdraht in gutem Kontakt mit dem Gestein steht. Eine dünne Folie deckt die Fussplatte mit dem Heizdraht und Thermoelement ab. Dies ist nötig beim Messen von wassergesättigten Proben.

Das QTM eignet sich zum Messen von festen Gesteinstücken wie Bohrkern oder Handstücke. In jedem Fall ist eine ebene Fläche von ca. 5 x 10 cm notwendig. Die Messung an einem Punkt dauert 20 sec und erfasst etwa 5 - 10 mm Gesteinsmaterial um den Heizdraht. Um einen repräsentativen Wärmeleitfähigkeitswert der Gesteinsprobe zu erhalten, werden ca. 10 Messungen an verschiedenen Punkten der Gesteinsoberfläche durchgeführt. Die Abweichung der Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert (Standardabweichung) ist ein Mass für die Inhomogenität der Probe bezüglich der Wärmeleitfähigkeit (verschiedene Minerale, Poren, Schichtung etc.). Erfahrungsgemäss liegt dieser Streubereich innerhalb von etwa 5 bis 15 % des Mittelwertes. Das Gerät wird vor jeder Messreihe mit drei Standardproben bekannter Wärmeleitfähigkeit (0.229, 1.32, 1.609 W/m/K) kontrolliert und nötigenfalls neu kalibriert.

#### TK04 - Messgerät

Mit dem TK04-Messgerät können - wie mit dem QTM - feste Proben gemessen werden. Mit einem speziell angefertigten Probenzylinder und einer hydraulischen Druckvorrichtung kann aber auch die Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix von Bohrklein (Cuttings) bestimmt werden. Dafür wird die Wärmeleitfähigkeit eines künstlich erzeugten Bohrklein-Wasser-Gemischs gemessen.

Das Messgerät besteht aus einem Plexiglaszylinder von 8.8 cm Durchmesser und 3 cm Höhe. Auf der Unterseite ist ein dünner ca. 70 mm langer Heizdraht mitsamt einem Thermoelement in das Plexiglas eingegossen. Der Wärmeimpuls dauert in der Regel 90 sec.

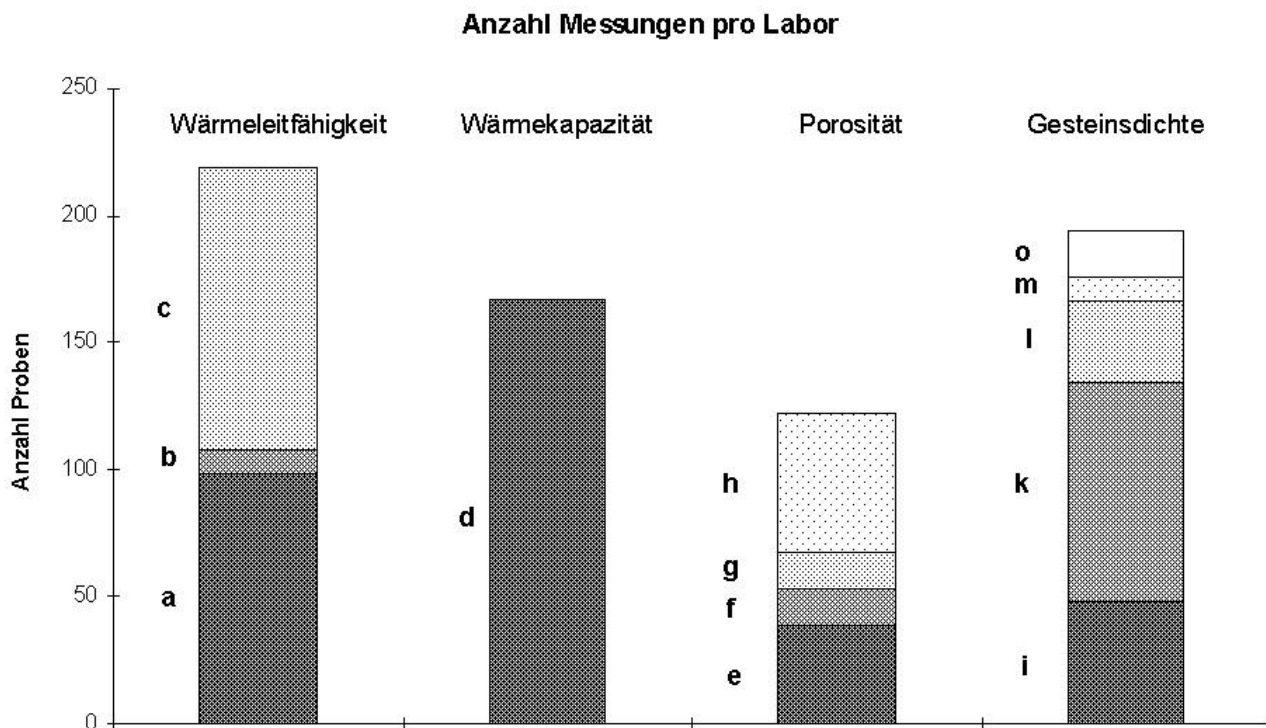


Fig. 3: Verteilung und Messmethode der untersuchten Parameter in den verschiedenen Labors.

#### Legende:

##### Wärmeleitfähigkeit (WLF)

- a von wassergesättigten Gesteinen, direkt gemessen (IG ETHZ)
- b von trockenen Bohrkernen / Oberflächenproben (IG ETHZ)
- c von Bohrklein-Wassergemisch → Matrixwärmeleitfähigkeit (IG ETHZ)

##### Wärmekapazität

- d Mit neuer Wärmekapazitätsapparatur gemessen (IG ETHZ)

##### Gesteinsporosität

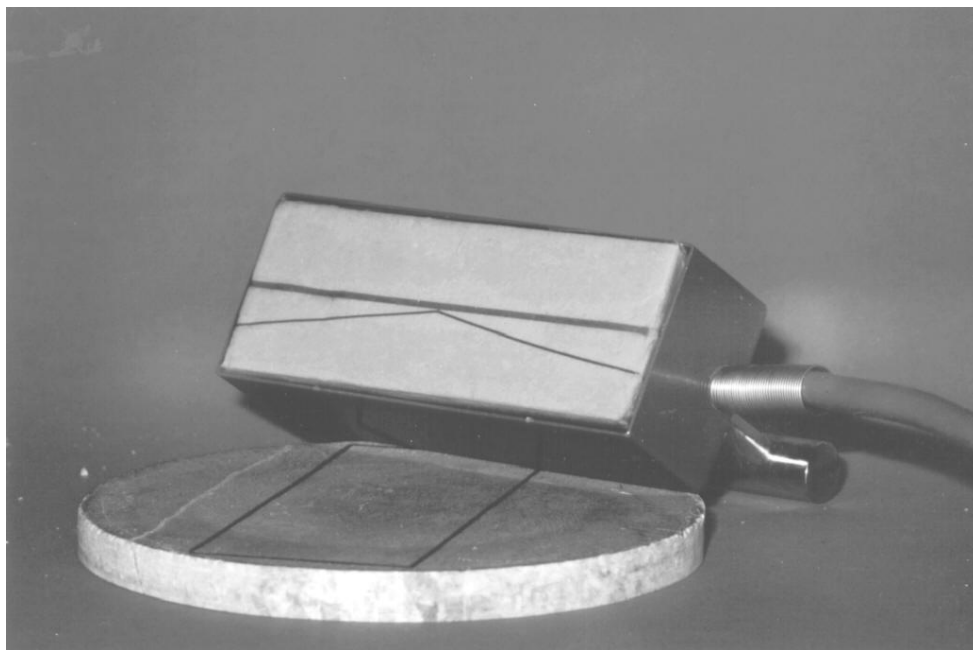
- e Totale Porosität (GIUB)
- f Effektive Porosität (GIUB)
- g Effektive Porosität (IG ETHZ)
- h Mit Dichte-Log bestimmt (Geoform AG)

##### Gesteinsdichte

- i Korndichte (GIUB)
- k Korndichte (IG ETHZ)
- l Gesamtdichte (IG ETHZ)
- m Messungen in anderen Labors
- o Abgeleitet aus Dichte-Log (Geoform AG)

(für Beschreibung der Einzelparameter siehe folgende Kapitel)





Figur 4: QTM-Messsonde.

Die besondere Messtechnik besteht aus folgenden Arbeitsschritten. Zuerst wird das Bohrklein in einem Ofen vollständig getrocknet. Danach wird das Trockengewicht ( $m_m$ ) bestimmt und das Material in den Probenbehälter eingefüllt (300 bis 500 g). Dann wird die Probe mit Wasser gesättigt und der Messzylinder auf das Gemisch gedrückt (Druck < 15 bar). Die Messung der Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_{gem}$ ) des Gemisches wird durch ein Computerprogramm automatisch gesteuert (ca. 5 Wiederholungen am gleichen Ort). Nach Ende der Messungen wird die Messsonde aus dem Probenbehälter gezogen. An der Sonde haftendes Material wird wieder zur Probe gebracht und überschüssiges Wasser von dieser entfernt. Durch Wägen des Bohrklein-Wassergemisches wird das Gewicht des Wasseranteils ( $m_w$ ) bestimmt. Zur Berechnung der Matrixwärmeleitfähigkeit ( $\lambda_m$ ) ist noch die Korndichte ( $\rho_m$ ) zu bestimmen. Dies kann entweder durch eine Auftriebswägung des trockenen Gesteinsmaterials oder durch Abmessen des Volumens des Bohrklein-Wasser-Gemisches bestimmt werden. Die Matrixwärmeleitfähigkeit berechnet sich wie folgt:

$$\lambda_m = \lambda_{gem} \cdot \left( \frac{\lambda_{gem}}{\lambda_w} \right)^{\frac{m_w \cdot \rho_m}{m_m \cdot \rho_w}} \quad (1)$$

wobei:

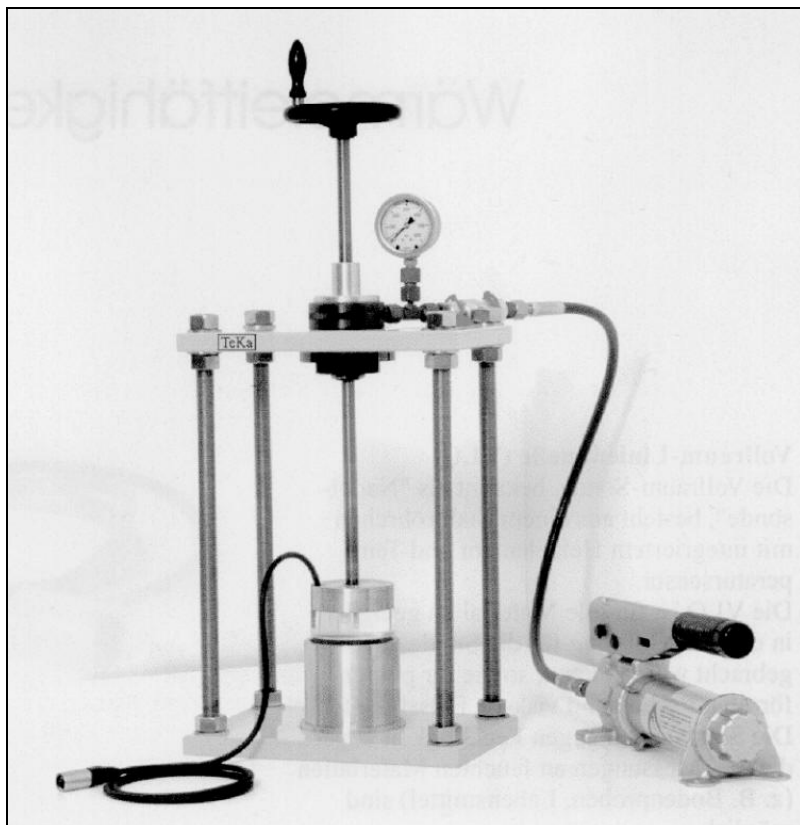
$\lambda_w$	Wärmeleitfähigkeit von Wasser bei 20 °C [W/m/K]
$\lambda_m$	Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix [W/m/K]
$\lambda_{gem}$	Wärmeleitfähigkeit gemessen [W/m/K]
$\rho_m$	Dichte der Gesteinsmatrix [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	Dichte von Wasser bei 20 °C [kg/m <sup>3</sup> ]

Der Messfehler liegt meistens zwischen 4 bis 10 % des Messwertes. Er rührt hauptsächlich von der relativ ungenauen Korndichte- bzw. Volumenbestimmung des Bohrklein-Wassergemisches her (siehe auch Anhang 3 für Details der Fehlerrechnung).





Figur 5 Tk04-Messsonde (Thermoelement).



Figur 6: TK04-Messsonde mit Druckbehälter.

### 3.2.2 Wärmekapazitätsmessungen

Die Messung der spezifischen Wärmekapazität an Gesteinsproben beruht auf dem Prinzip der Mischung von zwei Stoffen mit unterschiedlichen Temperaturen. Unter der Annahme, dass die gesamte thermische Energie der beiden Stoffe konstant bleibt und die Wärmekapazität einer der beiden Stoffe bekannt ist, kann die Wärmekapazität des anderen Stoffes berechnet werden. Im vorliegenden Fall sind diese Stoffe das Gesteinsmaterial und das Wasser. Die Energiebilanz ohne Wärmetransport über die Systemgrenzen dieses Wasser-Gesteins-Gemisches und unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität  $c(T)$  lautet:

$$c_c(T_c) \cdot T_c \cdot m_c + c_w(T_w) \cdot T_w \cdot m_w = [c_c(T_m) \cdot m_c + c_w(T_m) \cdot m_w] \cdot T_m \quad (2)$$

wobei:

$T_c$	Temperatur der abgekühlten Gesteinsprobe	[°C]
$T_w$	Wassertemperatur vor der Mischung	[°C]
$T_m$	Minimale Mischtemperatur	[°C]
$m_c$	Gewicht des Probenmaterials	[g]
$m_w$	Gewicht des Wassers	[g]
$c_c$	Wärmekapazität des Gesteins (Matrix*)	[J/kg/K]
$c_w$	Wärmekapazität von Wasser	[J/kg/K]

\* Gewichtsanteil der Luft in den Poren ist < 0.05 %

In Wirklichkeit ist die Messapparatur nicht vollständig nach aussen thermisch isoliert, so dass ein geringer, unbekannter Energieaustausch während der Messung über die Systemgrenzen stattfinden kann. Diese Störelemente können durch Kalibration der Messungen mit Stoffen bekannter Wärmekapazität weitgehend durch Bestimmung des Faktors  $f$  in Gleichung (4) eliminiert werden (siehe Anhang 2).

Zur Auflösung der Gleichung 4 wird die Wärmekapazität temperaturunabhängig gemacht. Der Effekt innerhalb 0 bis 25 °C wird durch den Kalibrationsfaktor weitgehend ausgeschaltet. Für Gesteine beträgt die Abnahme der Wärmekapazität von 25 auf 0 °C ca. 5 % des Wertes bei 25 °C. Für Wasser kann die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität im Bereich von 20 bis 25 °C vernachlässigt werden ( $\Delta c_w < 0.1 \%$ ).

Somit errechnet sich die Wärmekapazität der Gesteinsmatrix  $c_{gem}$  (Anteil der Luft <0.05 Gew.-%) wie folgt:

$$c_{gem} = \frac{m_w \cdot c_w \cdot (T_w - T_m)}{m_c \cdot (T_m - T_c)} \quad (3)$$

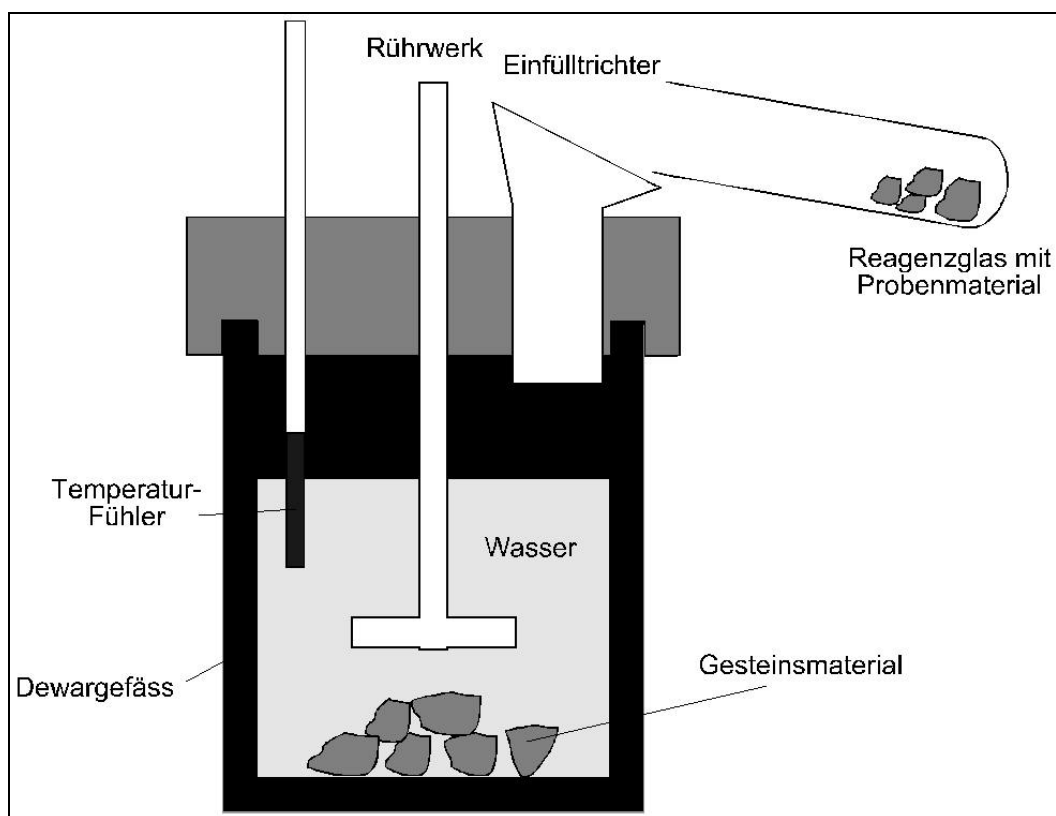
Infolge der Störelemente gilt:

$$c_c = f \cdot c_{gem} \quad (4)$$

wobei:

f: Kalibrationsfaktor

Die Messvorrichtung und die Messmethode wurden im Rahmen dieses Projekts vom Institut für Geophysik (ETH-Zürich) neu entwickelt. Für Details betreffend der Messapparatur (Fig. 7), des Messvorgangs, der Probenaufbereitung, der Kalibration und der Fehlerabschätzung wird auf den Anhang 2 verwiesen.



Figur 7: Schematische Skizze der Wärmekapazitäts-Messvorrichtung. Für Details siehe Anging 2.

### 3.3 Labormessungen petrophysikalischer Parameter

#### 3.3.1 Gesteinsdichte

Bei der Bestimmung der Dichte von Gesteinen ( $\rho$ ) muss zwischen der Korndichte (auch Feststoffdichte oder Matrixdichte genannt) und der Gesamtgesteinsdicht ( $\rho_{wg}$ ) unterschieden werden. Die Korndichte ist das spezifische Gewicht der Gesteinsfestmasse ohne Poren und Porenfüllung (Luft, Wasser, Öl oder Erdgase). Die Gesamtgesteinsdichte ist das spezifische Gewicht eines unveränderten Gesteinsvolumens inklusive Porenfüllung hier Wasser.

#### Messungen Institut für Geophysik (ETHZ)

Zur Bestimmung der Matrixwärmeleitfähigkeit von Bohrklein-Proben (Cuttings) mussten auch Annahmen betreffend die Korndichte gemacht werden. An der ETH bestehen zwei Messmethoden für diese Korndichtebestimmung. Einerseits kann die Korndichte durch eine Auftriebswägung des trockenen Materials im Wasser bestimmt werden, andererseits durch Abmessen des Volumens des Bohrklein-Wasser-Gemisches im Messbehälter der Tk04-Messanlage zu. Verfälschungen kann es bei Proben mit hohem Tongehalt kommen (Quellung, Schweben im Wasser).

Diese Korndichtebestimmungen sind relativ ungenau, da auch eingeschlossene, nichtkommunizierende Porenräume gemessen werden. Zudem ist oft nicht genau bekannt ob diese isolierten Poren gänzlich mit Wasser gefüllt sind.

Einige Werte von Gesteinsdichten wurden aus der an der ETH bestehenden Datenbank übernommen. Die Messungen wurden vor mehr als 20 Jahren gemacht. Die verwendete Messmethode beruht auf dem Prinzip der oben beschriebenen Auftriebswägung.

#### Messungen Geol. Inst. (Univ. Bern)

Zwecks Kalibration der Dichtebestimmung an der ETHZ und der Berechnungen mit den geophysikalischen Bohrlogs wurden im sedimentologischen Labor des geologischen Instituts der Universität Bern verschiedene Dichtemessungen vorgenommen.

An 50 Molasseproben (Kerne und Cuttings) wurde mit einem Multiplikometer die Korndichte bestimmt. Dabei wird in einem Probenbehälter mit präzise bekanntem Volumen das Gewicht des getrockneten und gemahlten Gesteinspulvers gewogen und somit das spezifische Gewicht der Kornmasse bestimmt.

Die Messungen nach der klassischen Methode haben eine grosse Genauigkeit (< 1%).

Die Gesamtgesteinsdichte wurde an 38 Gesteinsproben gemessen. Dies ist zurzeit nur an grösseren Proben (> 1 cm<sup>3</sup>) möglich. Dabei wird die Dichte mittels Quecksilberverdrängung bei bekannter Labortemperatur bestimmt.

### **3.3.2 Porosität**

Die Gesteinsporosität ist ein wichtiger Parameter in der Berechnung oder Messung der geothermischen Parameter (siehe oben). Durch den grossen Kontrast der geothermischen Eigenschaften von gesteinsbildenden Mineralien verglichen mit der Porenfüllung (Luft, Wasser oder Kohlenwasserstoffe) hat der Anteil an Hohlräumen im Gestein einen grossen Einfluss auf die geothermischen Eigenschaften des Gesamtgesteins. Bei der Porosität ( $\phi$ ) muss zwischen Gesamtporosität (auch totale oder absolute Porosität genannt) und Nutzporosität (auch effektive Porosität genannt) unterschieden werden. Erstere ist der Volumenanteil der Hohlräume am Gesamtvolumen, zweitens das frei kommunizierende Porenvolumen. Unter Nutzporosität versteht man dasjenige Porenvolumen das kommuniziert und eine Bewegung des Grundwassers zulässt.

#### Messungen Institut für Geophysik (ETHZ)

Die Porosität wurde zusammen mit der Dichtebestimmung durchgeführt (siehe 3.3.1). Sie kann aus der Differenz zwischen dem Gewicht des Gesteins in 'wassergesättigten' und 'trockenen' Zustand sowie des Volumen der Probe berechnet werden (Schärli, 1980).

#### Messungen Geol. Inst. (Univ. Bern)

An 38 Molasseproben wurde die Porosität bestimmt. Aus der Gesamtgesteinsdichte mittels Quecksilber-Auftriebs-Methode (siehe 3.3.1) und der Bestimmung des Porenvolumens mittels Helium-Pyknometer respektive Korndichtemessung, wurde die Gesamt- und Nutzporosität bestimmt. Die Genauigkeit der Messungen liegt bei ca. 1 %. Diese beiden Porositätsarten können sich bis zu 50% unterscheiden.

### 3.4 Laboranalysen mineralogische Gesteinszusammensetzung

Zwecks Kalibration der Berechnungen geothermischer Parameter mit geophysikalischen Bohrlogs (siehe unten) und der Bestimmung des Gesteinstyps (Lithologie) wurden am geologischen Instituts der Universität Bern an 12 Gesteinsproben (Kernmaterial) mittels Dünnschliffanalyse und an 16 Gesteinsproben mit Röntgenanalysen die mineralogische Zusammensetzung, die Korngrösse und die Gesteinstextur (Rundung der Körner, Sortierung des Korngefüges etc.) bestimmt.

Bei der Dünnschliffanalyse wird ein dünn geschnittenes und poliertes Gesteinsplättchen optisch in einem Polarisationsmikroskop analysiert. Dabei können die verschiedenen Mineraltypen durch ihre charakteristischen optischen Eigenschaften bestimmt und ihr prozentualer Anteil ausgezählt werden. Bei dieser Methode werden auch diagenetische Veränderungen des ursprünglich abgelagerten Gesteins sichtbar. Insbesondere sekundäre Zementierung oder Vergrösserung von Porenraum kann bestimmt werden.

Bei der Röntgenanalyse (XRD) wird an einem gemahlenen Gesteinsvolumen mittels Anregung mit Röntgenstrahlen und der Auswertung der resultierenden Energiediffraktogramme die Gesamtzusammensetzung analysiert. Mit dieser Methode können bis zu sieben Hauptkomponenten relativ kostengünstig bestimmt werden. Die Fehlergrenze erreicht je nach Zusammensetzung  $\pm 10\%$ .

Die Detailresultate sind im Laborbericht von Kempf (1998) zusammengefasst.

### 3.5 Auswertung geophysikalische Logs

#### 3.5.1 Datenaufbereitung

Die geophysikalischen Logs von 24 Bohrungen wurden in einem ersten Schritt im Tiefenintervall 0-600 m digital aufbereitet. Rund 50% dieser Bohrmeter musste neu digitalisiert werden. Der Rest war bereits aus früheren Projekten vorhanden oder wurde von andern Institutionen zur Verfügung gestellt.

Folgende Logs, falls vorhanden, wurden bearbeitet:

- Gamma Ray log, GR [API]
- Sonic log, BHC [m/s]
- Neutronen log, NPHI [API oder %]
- Dichte-Log, RHOB [kg/m<sup>3</sup>]

Die Logs wurden in einem konstanten Intervall von 20 oder 25 cm digitalisiert und anschliessend im Massstab 1:2'000 zu Kontrollzwecken ausgedruckt.

#### 3.5.2 Bestimmung der Lithologie und der Berechnungsintervalle

Eine erste Auswertung der Labormessdaten sowie die Resultate der Pilotstudie (Greber et al. 1996) zeigten bereits, dass die Lithologie (Gesteinstyp, mineralogische Zusammensetzung) einer der bestimmenden Faktoren für die geothermischen Eigenschaften ist.

Da die Auswertung der Datenbank (siehe auch 3.7) unter anderem auch auf der Zuordnung von Lithologieklassen basiert, wurden die Logberechnungen nur über lithologisch eindeutige Intervalle vorgenommen. Dies bedeutet, dass im Gegensatz zur Pilotstudie, keine durchgehenden Berechnungen (top-to-bottom) für jeweils eine Bohrung gemacht wurden.

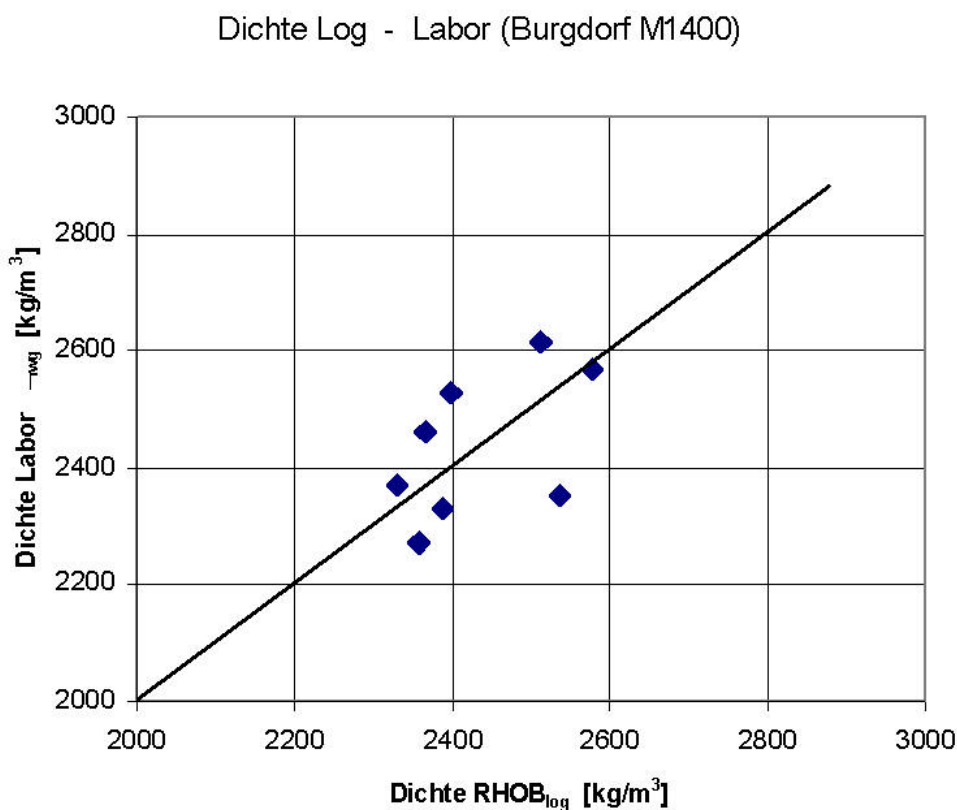
Aus Kostengründen musste im Rahmen dieses Projekts auf eine automatisierte Berechnung der Lithologie für die 24 Bohrungen verzichtet werden. Stellvertretend wurden manuell, unter Beizug der geophysikalischen Logdaten sowie von Angaben aus den Bohrrapporten, Mudlogs und Kernbeschreibungen Intervalle definiert, die sich eindeutig den vorgegebenen Lithologieklassen zuordnen liessen.

Dabei wurden 6 Lithologieklassen unterschieden (Schlamm-Siltsteine, Siltsteine, Feinsandsteine, Mittelsandsteine, Grobsandsteine und Grobsandsteine mit Konglomeraten, siehe auch 3.7). Die so für die späteren Berechnungen ausgewählten Intervalle variieren zwischen 0.8 m und maximal 20 m.

Nach der Definition der Lithologieintervalle wurden die geophysikalischen Einzelwerte extrahiert und jeweils für die anschließenden Berechnungen gemittelt. Dasselbe Prozedere wurde über alle für Laboranalysen beprobten Abschnitte durchgeführt.

### 3.5.3 Gesteinsdichte

Die Gesteinsdichte wurde direkt aus dem Dichte Log ( $\text{RHOB}_{\log}$ ), über die definierten Intervalle gemittelt, abgelesen. Vergleiche von im Labor gemessenen Gesteinsdichten (oder berechnet aus Korndichte und Porosität) mit aus Logs abgeleiteten Werten ergab für die untersuchten Molassegesteine eine zufrieden stellende Korrelation (Fig. 8).



Figur 8: Vergleich zwischen Gesteinsdichte ( $\rho_{\text{wg}}$ ) des Dichtelogs und von Labormessungen abgeleitet für die Bohrung Burgdorf M1400. Die Laborwerte wurden aus Korndichte und Porosität berechnet.

### 3.5.4 Porosität

Zur Berechnung von Gesamtgesteinsparametern aufgrund der Labormesswerte (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Gesteinsdichte im wassergesättigten Zustand, siehe auch 3.6) muss die Gesamtporosität bekannt sein. Für Proben ohne solche Messwerte wurde ein entsprechender Wert mit Hilfe der geophysikalischen Daten berechnet (Asquith & Gibson 1982).

Dabei wurde in erster Linie die Methode nach Wyllie angewendet, die erlaubt mit dem Sonic Log eine Gesamtporosität  $\phi$  zu berechnen (siehe auch 3.3.2). Bei einigen Bohrungen ohne Sonic Log wurde ein Porositätswert mit Hilfe des Neutron Logs berechnet oder wie bei der Bohrung Bassersdorf bestehende Berechnungen übernommen (z.B. Blaser et al. 1994).

### 3.5.5 Berechnung Wärmeleitfähigkeit

Zu den wichtigsten physikalischen Parametern, die die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen zählen die Dichte (als Funktion von zahlreichen Parametern wie Druck, primäre und sekundäre Porosität oder Zementation), die Textur, die Korngrössenverteilung, der Sättigungsgrad der Poren und die Temperatur eines Gesteins. Je dichter ein Gestein ist oder je kleiner die Porosität ist, desto besser ist tendenziell seine Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt auch generell mit zunehmender Korngrösse zu (Beziat et al. 1992). Gesteine, welche von kristallinen Mineralien aufgebaut werden, zeigen mit zunehmender Temperatur meist abnehmende thermische Leitfähigkeiten.

Zahlreiche empirische Beziehungen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit geophysikalischen Bohrlochmessungen sind publiziert worden (z.B. Dachnov & Djakonov 1952, Cermak & Rybach 1982, Blackwell & Steele 1989, Evans 1977, Goss & Combs 1976, Schmitz 1990, Vasseur et al. 1995 oder Brigaud et al. 1990, Sattel 1982, Schön 1996, Midttomme & Roaldset 1998). Diese Berechnungen beruhen in erster Linie darauf, dass die Wärmeleitfähigkeit - wie oben beschrieben - von vielen primären oder sekundären Eigenschaften des Gesteins abhängig ist. Bei den in der Literatur beschriebenen Anwendungen zeigt es sich, dass es selten gelingt, dieselben Formeln auf Gesteine von unterschiedlichen Ablagerungsmilieus oder geologischen Alter anzuwenden. In der Regel müssen die Koeffizienten einer Formel zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit eines Gesteins für ein bestimmtes Gebiet mit vergleichbarer geologischer Geschichte (Versenkungsgeschichte, Zementation, Porenwasserzirkulation, etc.) und mit ähnlichen Sedimentabfolgen zuerst empirisch bestimmt werden. Dies wird in der Regel aufgrund einer Kalibration der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit im Labor gemessenen Werten durchgeführt.

Im Rahmen der Pilotstudie (Greber et al. 1996, Leu et al. 1997, Rybach et al. 1997) wurden drei Methoden, die das Neutron, das Sonic, das Dichte Log oder eine Kombination derselben verwendet. Bei diesem Test an Molassegesteinen im Raum Zürich zeigte sich, dass die effektivste Methode auf einer einfachen linearen Beziehung von Wärmeleitfähigkeit und Sonic-Geschwindigkeit (an den Achsenursprung gebunden) beruht:

$$\lambda_{wg} = A \cdot v_p \quad (\text{durch den Ursprung}) \quad (5)$$

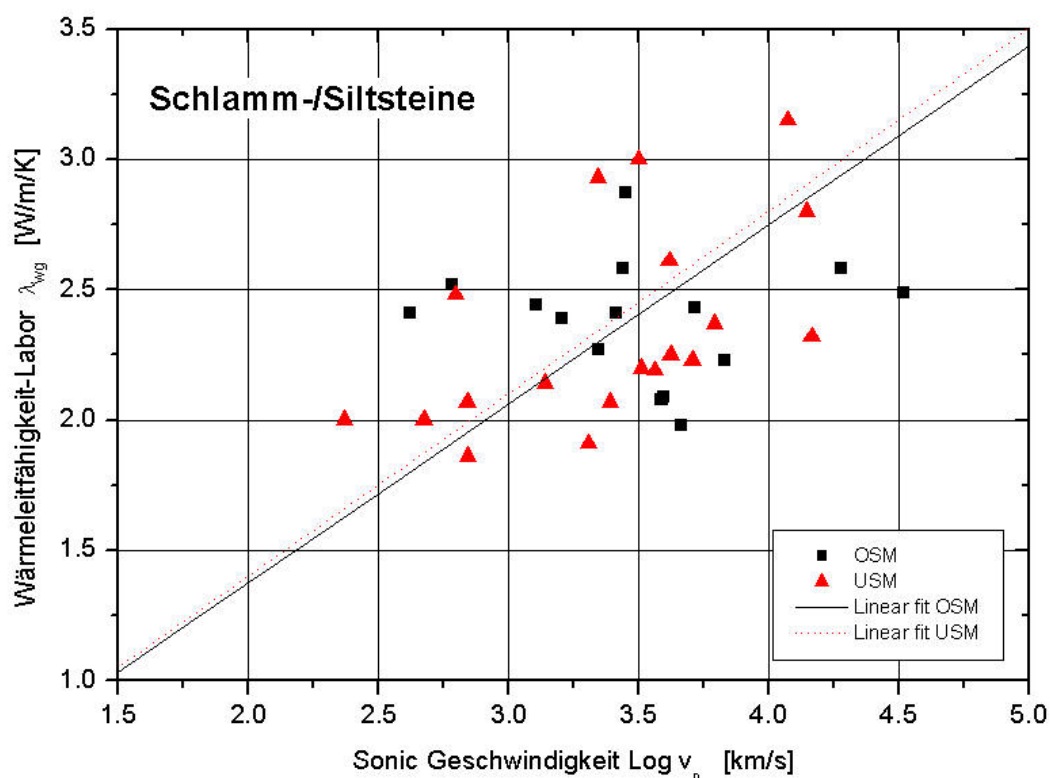
wobei:

$\lambda_{wg}$ :	Wärmeleitfähigkeit wassergesättigt [W/m/K]
$A$ :	Konstante
$v_p$ :	Sonic Geschwindigkeit [km/s]

Aufgrund von relativ wenigen Laborkalibrationsdaten wurde in der Pilotstudie für die Konstante  $A$  ein Wert von 0.54 bestimmt. Es zeigte sich bereits damals, dass die Kalibration mit mehr Daten und unter der Berücksichtigung der Molassegruppe und der Gesteinsart (siehe 3.7) durchgeführt werden müsste. Sattel (1982) konnte an Daten des Rheintalgrabens zeigen (Tone, Sandsteine, Kalke, Dolomite, Anhydrite), dass bei einer "freien" Regression von Wärmeleitfähigkeit und Sonic-Geschwindigkeit ein parabolischer Ansatz einem rein linearen vorzuziehen ist. Da jedoch die parabolische Regressionsgerade fast linearen Charakter hat und bei beiden Methoden sehr kleine Achsenabschnitte auftreten ist bei wenig Daten eine durch den Ursprung (0/0) gezwungene lineare Regression vertretbar.

Im vorliegenden Projekt wurden folgende Kalibrations- und Berechnungsschritte angewendet:

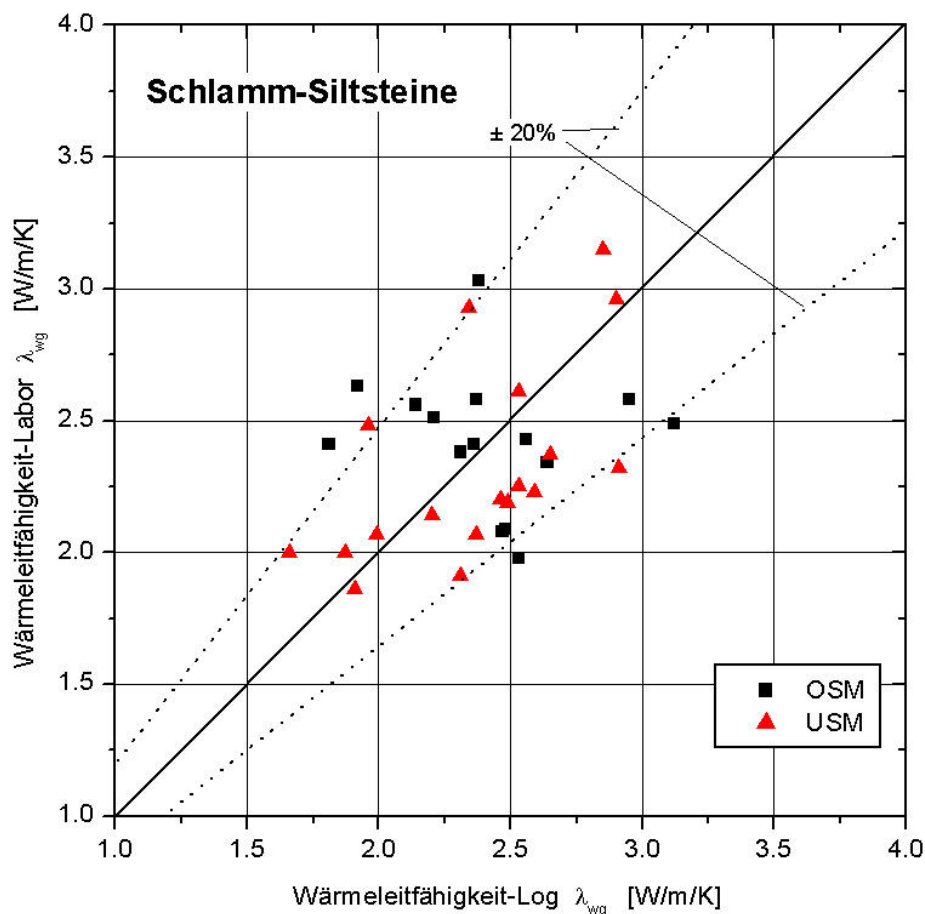
- Korrelation und lineare Regression von Wärmeleitfähigkeit (Labor) und Sonic-Geschwindigkeit (Log) durch den Ursprung, zwecks Bestimmung des Faktors  $A$  für jede Molassegruppe und Lithologie (Tab. 2 und Fig. 9).
- Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit Formel 5 für Datenpunkte mit Labormessung.
- Vergleich zwischen den im Labor und mit Logdaten ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerten. Siehe Beispiel in Fig. 10.
- Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit den kalibrierten Beziehungen nach Formel 5 für Intervalle, wo keine Labordaten vorhanden waren.
- Integration der neuen Wärmeleitfähigkeiten (Log) in der Gesamtdatenbank (siehe 3.7).



Figur 9: Beispiel der Beziehung zwischen der Sonic-Geschwindigkeit und der im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten.

Wenn für die untersuchten Gruppen zuwenig oder keine Korrelationsdaten vorhanden waren, wurde teilweise der Faktor von ähnlichen Lithologien übernommen oder basierend auf Gruppenkombinationen berechnet (Tab. 2).





Figur 10: Vergleich zwischen der im Labor gemessenen und mit dem Sonic Log berechneten Wärmeleitfähigkeit für Schlamm-Siltsteine der Molassegruppen OSM und USM.

### 3.5.6 Berechnung Wärmekapazität

Detaillierte Untersuchungen an Lockergesteinen durch Kersten (1949) sowie an konsolidierten Sedimenten des Rheintalgrabens durch Sattel (1982) haben gezeigt, dass die spezifische massenbezogene Wärmekapazität  $c$  oder oft auch  $c_p$  genannt ( $p$  = bei konstantem Druck) überwiegend durch die Temperatur und die Wassersättigung bestimmt werden (siehe auch 3.2.2). Es werden keinerlei deutliche Abhängigkeiten von mineralogischer Zusammensetzung der Gesteinsmatrix oder der Korndichte festgestellt.

Der Einfluss der Temperatur kann im schweizerischen Mittelland im Tiefenintervall 0-500 m vernachlässigt werden, da der mögliche Temperaturunterschied von 5 bis 25°C die Wärmekapazität um weniger als 5% beeinflussen.

Da angenommen wird, dass der Porenraum in Molassegesteinen im Tiefenintervall 0-500 m überwiegend mit Wasser gesättigt ist, bleibt also nur eine Abhängigkeit der Wärmekapazität  $c_{wg}$  von der Porosität  $\phi$  und Matrixdichte. Dieser Effekt ist bedingt durch den grossen Kontrast der spezifischen Wärmekapazität von Wasser (4190 J/kg/K) und den boden- oder gesteinsbildenden Komponenten (700 – 1000 J/kg/K).

Tab. 2: Faktor  $A$  für die verschiedenen Molassegruppen und Lithologieklassen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit der Sonic-Geschwindigkeit nach Formel (5). Kursiv = Faktor teilweise abgeleitet aus andern Klassen, da zuwenig Daten. Für die Abfrage der Datenbank mit der Software SwEWSv2 (Leu et al. 2006) wurden die Daten für „Grobsandsteine“ und „Grobsandsteine mit Konglomerat“ in einer Klasse zusammengefasst.

Lithologiekategorie	OSM Obere Süss-wassermolasse	OMM Obere Meeresmolasse	USM Untere Süsswassermolasse
Schlamm-Siltsteine	<b>0.69</b>	<i>0.70</i>	<b>0.70</b>
Siltsteine	<i>0.70</i>	<i>0.70</i>	<i>0.70</i>
Feinsandsteine	<b>0.64</b>	<b>0.72</b>	<b>0.75</b>
Mittelsandsteine	<i>0.75</i>	<b>0.8</b>	<b>0.75</b>
Grobsandsteine	<i>0.75</i>	<i>0.75</i>	<i>0.75</i>
Grobsandsteine mit Konglomerat.	<i>0.73</i>	<b>0.73</b>	<i>0.73</i>

Da das geophysikalische Dichte-Log die Gesamtgesteinsdichte, d.h. eine Funktion der Korndichte, der Porosität und der Dichte des porenfüllenden Mediums (hier Wasser) ist, wurde für dieses Projekt die Beziehung zwischen Wärmekapazität und Dichte-Log ( $RHOB_{log}$ ) verwendet, um zusätzlich zu den Labormessungen Werte für die Datenbank zu berechnen.

Folgende Kalibrations- und Berechnungsschritte wurden durchgeführt:

- (f) Korrelation und lineare Regression von spezifischer Wärmekapazität  $c_{wg}$  (Labor) mit Dichte-Log zwecks Bestimmung der mathematischen Beziehung für verschiedene Lithologien (Fig. 11+12).
- (g) Berechnung der spezifischen Wärmekapazität mit Formel 6 für Datenpunkte mit Labormessung.
- (h) Vergleich von Wärmekapazität ( $c_{wg}$  Labor) mit Wärmekapazität ( $c_{wg}$  Log) und falls notwendig Korrektur (Fig. 13).
- (i) Berechnung von Wärmekapazität ( $c_{wg}$  Log) mit den kalibrierten Beziehungen nach Formel 6 für Intervalle ohne Labordaten.
- (j) Integration der neuen Wärmekapazität ( $c_{wg}$  Log) in der Gesamtdatenbank (siehe 3.7).

Die Auswertung zeigt, dass die Beziehung der Wärmekapazität  $c_{wg}$  zur Logdichte ( $RHOB$ ) für Gesteine der Molasse mit folgender linearen Gleichung umschrieben werden kann:

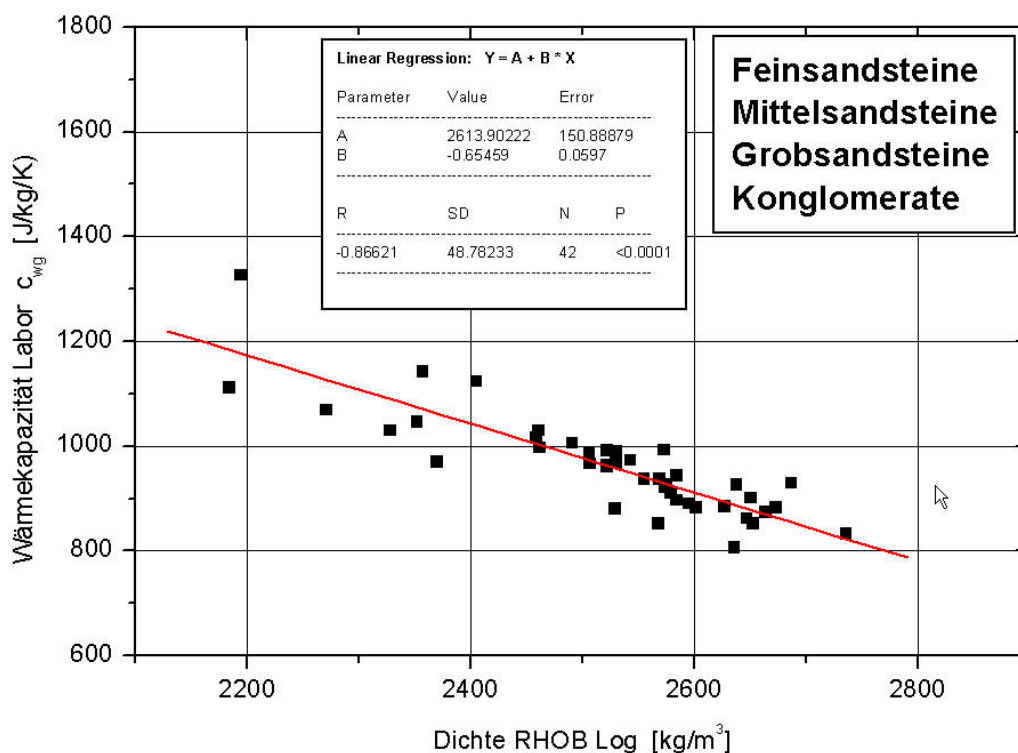
$$c_{wg} = B + C \cdot RHOB_{log} \quad (6)$$

wobei:

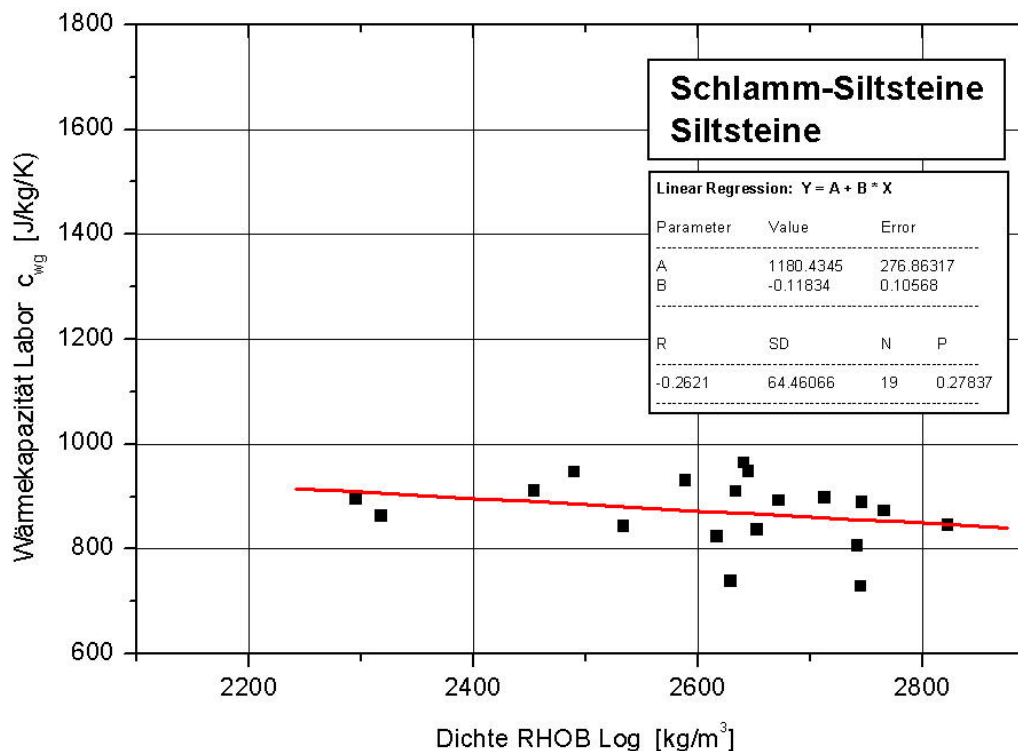
$c_{wg}$ : Wärmekapazität, wassergesättigt [J/kg/K]  
 $B, C$ : Konstanten  
 $RHOB_{log}$ : Dichte von geophysikalischem Log [kg/m<sup>3</sup>]

Aufgrund der relativ kleinen Datenmenge war keine Unterscheidung der Molassegruppen möglich. Hingegen ist deutlich eine Abhängigkeit von der Korngrösse (Lithologieklassen) feststellbar. Die statistische Auswertung ergab für die sandigen Lithologien (Feinsandstein – Konglomerat Fig. 11) für den Faktor  $B$  einen Wert von 2614 und für  $C$   $-0.65$  (siehe auch Fig. 11). Für die Gruppe der Schlamm-Siltsteine (Fig. 12) ist die Beziehung zur Logdichte schwächer (Faktor  $B = 1180$ ,  $C = -0.12$ ), was sich aufgrund der kleinen Porositätsunterschiede erklären lässt.

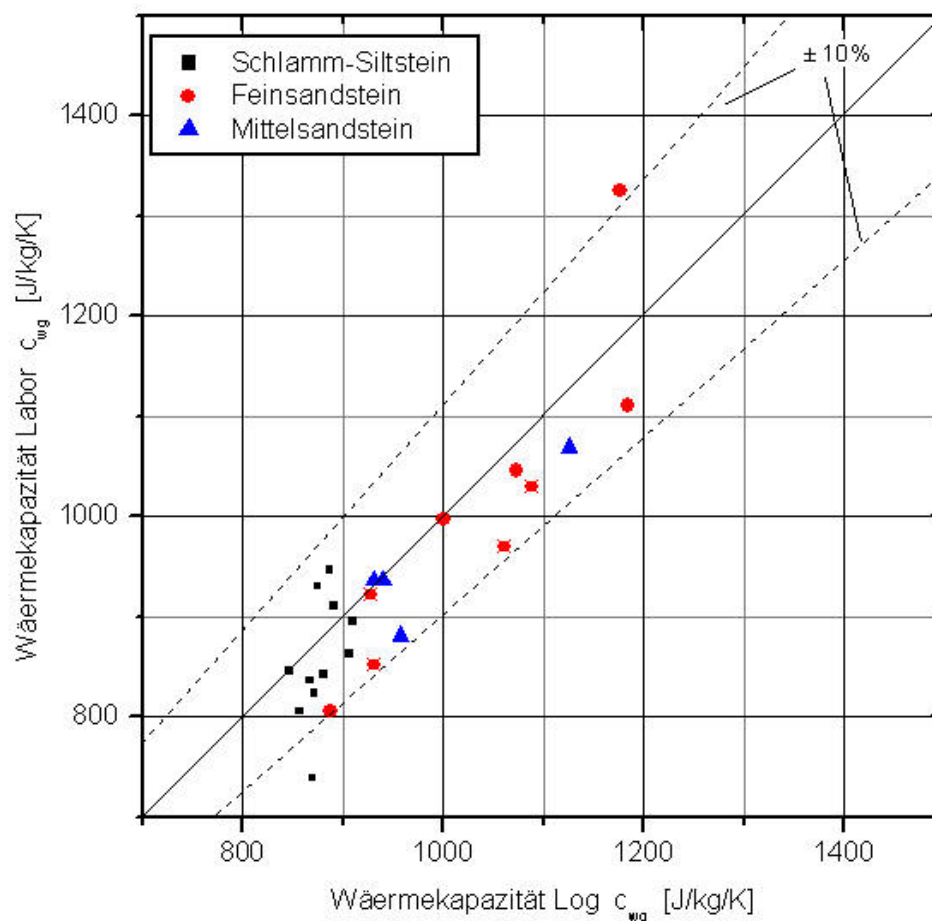
Die Übereinstimmung von im Labor gemessenen und mit dem Dichte-Log berechneten Werte ist befriedigend und liegt innerhalb eines Bereichs von 10% (Fig. 13).



Figur 11: Beziehung zwischen Logdichte ( $RHOB_{log}$ ) und der im Labor gemessenen Wärmekapazität für sandige Gesteinstypen der Molasse.



Figur 12: Beziehung zwischen Logdichte ( $RHOB_{log}$ ) und der im Labor gemessenen Wärmekapazität für Schlamm- und Siltsteine der Molasse.



Figur 13: Vergleich zwischen der im Labor gemessen und mit dem Dichte-Log berechneten Wärmekapazität für Molassegesteine.

### 3.8 Datenbankstruktur

#### 3.8.1 Erfasste Parameter

Alle bereits vorhandenen sowie neu mit Labormessungen und geophysikalischen Logs generierten Daten wurden laufend in einem Microsoft-Excel Datenblatt erfasst. Da die Daten von verschiedenen Quellen stammen (Messungen verschiedener Labors, Messungen an Kernen oder Bohrklein, Daten mit geophysikalischen Logs berechnet etc.) mussten neben den eigentlichen geothermischen Parametern auch Zusatzdaten für Zwischenberechnungen erfasst werden (siehe 3.8.2).

Für jeden Datensatz wurden folgende Parameter erfasst:

- Datensatzschlüssel
- Name der Lokalität
- Probenart (Bohrkern, Bohrklein/Cuttings, Logs)
- Koordinaten
- Kote der Probe (m ü.M. oder Bohrtiefe)
- Intervalllänge Probe, sofern > 20 cm
- Geologische Gliederung (Quartär, Molassegruppen OSM, OMM, USM)
- Gesteinsklasse (6 Lithologie-Klassen, siehe 3.8.3)
- Wärmeleitfähigkeit (trocken, wassergesättigt, Matrix, Log, Anisotropie)
- Wärmekapazität pro Masse (Matrix, wassergesättigt, Log)
- Gesamt- und Nutzporosität

- Gesteinsdichte (Matrix, Gestein wassergesättigt, Gestein trocken)
- Datenquelle, Referenz

### 3.8.2 Zwischenberechnungen

Für alle Datensätze wurden die geothermischen Parameter für den wassergesättigten Zustand berechnet (Parameterbezeichnung " $_{wg}$ "). Je nach Datenquelle waren dazu Zwischenberechnungen notwendig (Tab. 3). Die Werte wurden z.B. teilweise direkt an wassergesättigten Gesteinen gemessen oder aufgrund von Messungen an trockenen Proben (Kerne, Bohrklein) sowie der Porosität (Labor / Log) berechnet. Waren genügend Informationen für verschiedene Berechnungsarten vorhanden, so wurde die Methode mit dem kleinsten Fehlerpotential angewandt.

Die Berechnungsmethoden für  $\lambda_{wg}$ ,  $\rho_{wg}$ ,  $\phi$  und  $c_{wg}$  ist für jeden Datensatz gemäss Tabelle 3 definiert.

### 3.8.3 Lithologieklassen

In der Datenbank sowie bei der Auswertung werden sechs Lithologieklassen (=Gesteinstypen) unterschieden. Obschon vom geologischen Standpunkt aus beliebig viele Gesteinsarten als Funktion von Korngrösse, mineralogischer Zusammensetzung, Schichtung (Textur) und Farbe definiert werden können, ermöglicht diese Vereinfachung in sechs Hauptklassen eine einfache Klassierung der Gesteinstypen für die Bestimmung der geothermischen Eigenschaften im Molassebecken.

Tabelle 4 fasst die Gesteinstypen und ihre wichtigsten Merkmale zusammen (siehe auch Keller 1992).

### 3.8.4 Molassegruppen

In der Datenbank wurde jeder Datensatz der entsprechenden Molassegruppe zugeordnet.

Der Untergrund des Mittellandes wird generell durch vier geologische Grosseinheiten (Molassegruppen) aufgebaut. Von oben nach unten, d.h. von jünger nach älter werden unterschieden:

- Obere Süsswassermolasse (OSM)
- Obere Meeresmolasse (OMM)
- Untere Süsswassermolasse (USM)
- Untere Meeresmolasse (UMM, kommt nicht vor im Untersuchungsgebiet)

Die einzelnen Einheiten unterscheiden sich durch die vorkommenden Gesteinstypen, als Folge der vorherrschenden Verhältnisse während der Ablagerung (Land, Meer, Klima etc.).

Die Verbreitung der Molassegruppen im schweizerischen Mittelland (Fig. 14) ist eine direkte Folge der Abtragungsprozesse (Erosion durch Flüsse und Gletscher) nach der Ablagerung.

In Tälern liegen generell ältere Einheiten an der Oberfläche, wogegen auf Hügelzügen die jüngeren Molassegruppen angetroffen werden. Zudem hat eine grossräumige Kippung und Hebung des Molassebeckens dazu geführt, dass von Westen nach Osten immer jüngere Molassegruppen an der Oberfläche anstehen.

Tab. 3: Berechnungsmethoden und Fehlerbereich für die geothermischen und petrophysikalischen Parameter in der Datenbank. Die Methode der Fehlerrechnung für die Labormessungen ist in Anhang 3 beschrieben.

Datenbank Code	Beschreibung	Formel	Fehler (%) (Anhang 3)
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>			
1	gemessen an wassergesättigten Proben		1.4 - 22.7
2	berechnet aus $\lambda_t$ und $\phi$	$\lambda_{wg} = \left( \frac{\lambda_w}{\lambda_l} \right)^\phi \cdot \lambda_t$	0.3 - 11.4
3	berechnet aus $\lambda_m$ und $\phi$	$\lambda_{wg} = \lambda_w^\phi \cdot \lambda_m^{1-\phi}$	2.4 - 26.1
4	aus Log, berechnet mit Sonic-Log $v_p$	$\lambda_{wg} = A \cdot v_p$	
<b>Wärmekapazität</b>			
1	pro Masse: berechnet aus $c_m$ und $\phi$	$c_{wg} = \frac{c_m \cdot \rho_m \cdot (1-\phi) + c_w \cdot \rho_w \cdot \phi}{\rho_{wg}}$	1.9 - 22.6
2	aus Log, berechnet mit Dichte-Log	$c_{wg} = B + C \cdot RHOB_{log}$	
<b>Porosität</b>			
1	$\phi_{tot}$ : Gesamtporosität Univ. Bern		~1.0
2	$\phi_{eff}$ : Nutzporosität ETHZ		~5.0
3	andere Labors		~5.0
4	aus Log, mit Sonic oder Neutronen-Log	3.7- 15.0 (je nach Lithologie)	1.5 - 5.7
5	Mittelwert pro Lithologie aus 1 - 4		
<b>Dichte</b>			
1	berechnet aus $\rho_{t(ETH)}$ und $\phi$	$\rho_{wg} = \rho_t + \rho_w \cdot \phi$	1.0 - 3.3
2	berechnet aus $\rho_{t(Bern)}$ und $\phi$	$\rho_{wg} = \rho_t + \rho_w \cdot \phi$	
3	berechnet aus $\rho_{m(ETH)}$ und $\phi$	$\rho_{wg} = \rho_m \cdot (1-\phi) + \rho_w \cdot \phi$	0.9 - 5.2
4	berechnet aus $\rho_{m(Bern)}$ und $\phi$	$\rho_{wg} = \rho_m \cdot (1-\phi) + \rho_w \cdot \phi$	0.9 - 5.1
5	berechnet aus $\rho_{m(andere)}$ und $\phi$		5.2 - 5.8
6	aus Log, von RHOB-Log		

Tab. 4: Definition der Lithologieklassen, die in der Datenbank verwendet werden. Für die Abfrage der Datenbank mit der Software SwEWSv2 (Leu et al. 2006) wurden die Daten für „Grobsandsteine“ und „Grobsandsteine mit Konglomerat“ in einer Klasse zusammengefasst.

Name	Hauptkomponenten	Sieb-Korngrösse	Bemerkungen
Schlamm-Siltstein	Tonminerale, Karbonate, organisches Material, (untergeordnet Quarz)	< 0.002 mm	Stark variierender Karbonatanteil, oft auch als Tonstein oder Mergel bezeichnet
Siltstein	Quarz, Feldspat, Glimmer, Tonminerale, (untergeordnet Karbonate)	0.002 - 0.063 mm	
Feinsandstein	Quarz, Feldspat, Glimmer, (untergeordnet Karbonate, Tonminerale)	0.063 – 0.2 mm	
Mittelsandstein	Quarz, Feldspat, Glimmer, (untergeordnet Karbonate, Tonminerale)	0.2 - 0.63 mm	
Grobsandstein	Quarz, Feldspat, Glimmer, (untergeordnet Karbonate, Tonminerale)	0.63 – 2 mm	
Grobsandstein mit Konglomerat	Quarz, Feldspat, Glimmer, (untergeordnet Karbonate, Tonminerale)	> 2 mm	Bei Konglomeraten kann Zusammensetzung stark schwanken



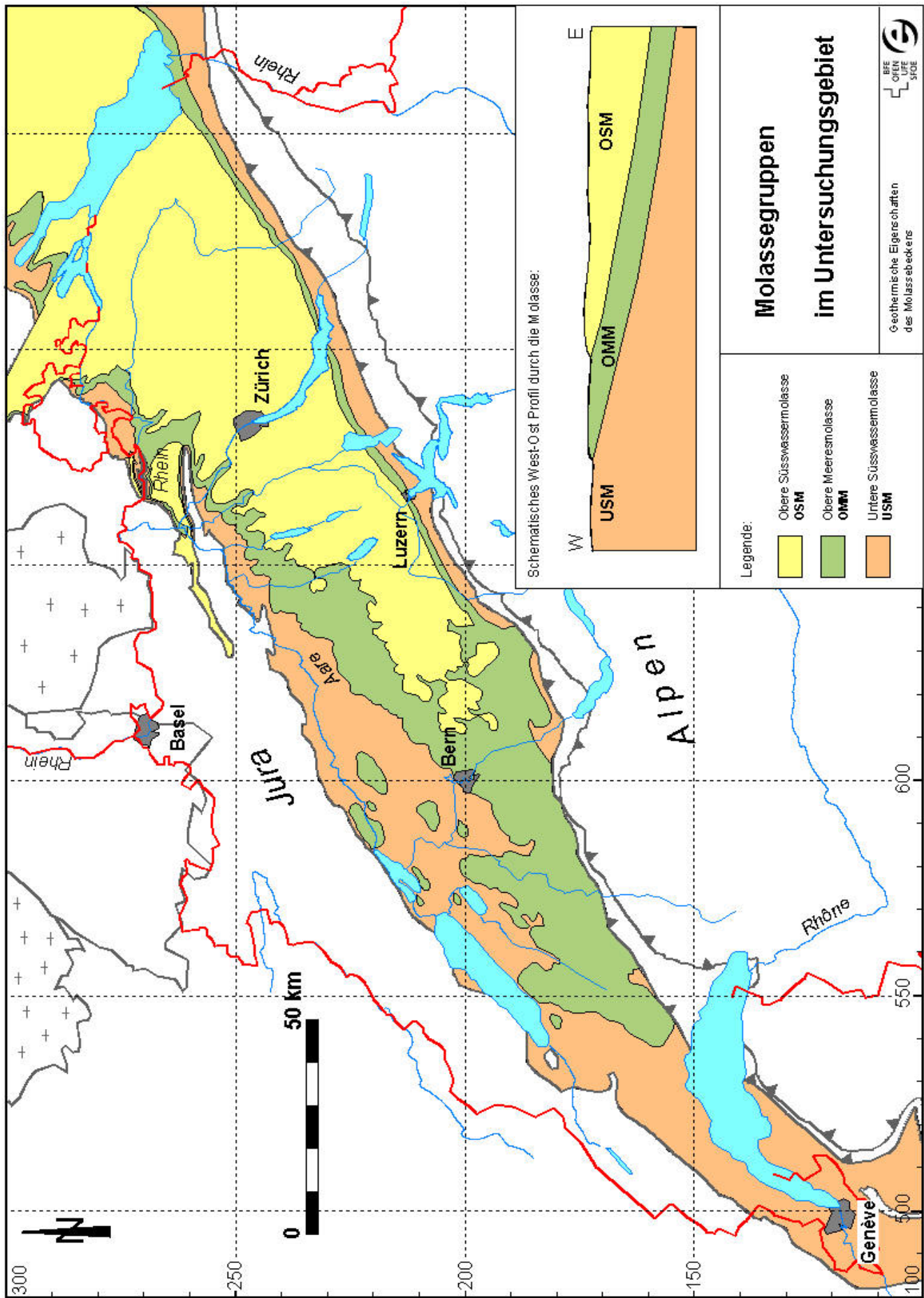


Fig. 14 Geologische Karte des schweizerischen Mittellandes mit der Verbreitung der Molassegruppen OSM, OMM und USM.



## 4. Resultate

### 4.1 Datenbankinhalt

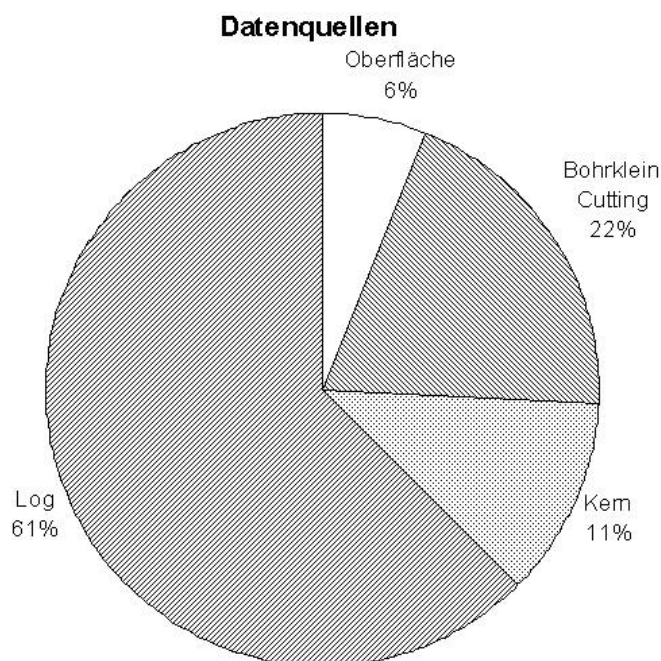
Insgesamt enthält die Datenbank 656 Datensätze von 74 Lokalitäten (siehe auch Fig. 1 und Anhang 4).

282 Datensätze wurden im Labor an Gesteinsproben gemessen und 374 wurden mit geophysikalischen Logs berechnet. Figuren 15 – 20 illustrieren den Datenbankaufbau sowie die Verteilung innerhalb der Molassegruppen und Lithologieklassen. Mit Hilfe der Logs konnte die Datenmenge rund verdreifacht werden.

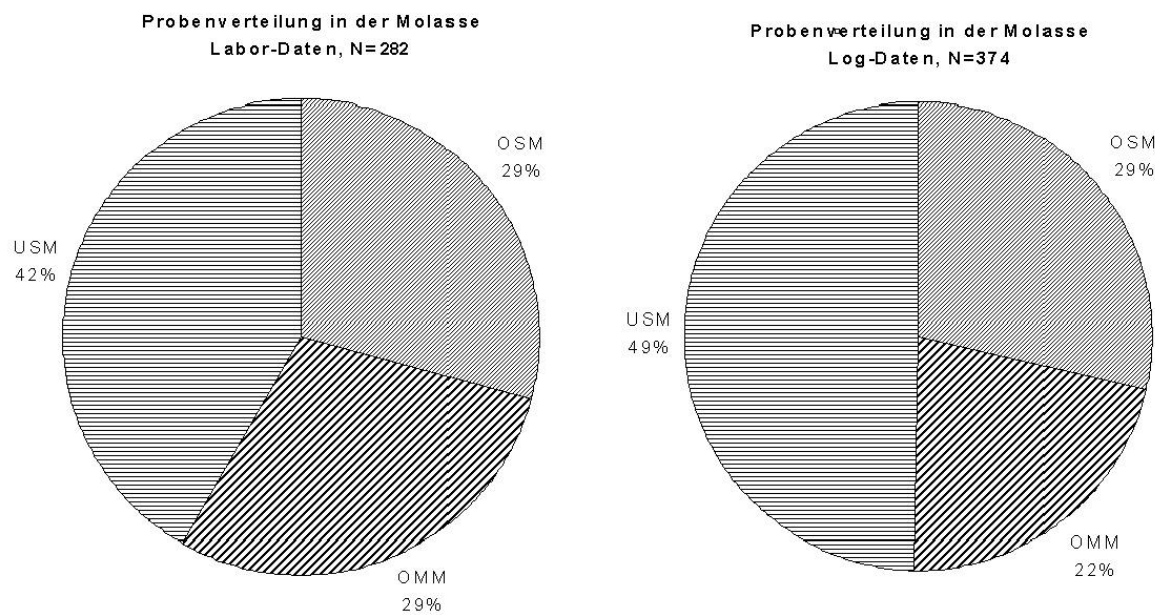
Die Datenbank ist repräsentativ für die Molassegruppen im Schweizer Molassebecken (exklusive Subalpine Molasse und Jura).

Die Datenmenge ist zudem gross genug, um die Gesteinstypen innerhalb der Molassegruppen realistisch wiederzugeben. So überwiegen zum Beispiel die feinkörnigen Schlamm- und Siltsteine in der Oberen und Unteren Süsswassermolasse, wogegen die Obere Meeresmolasse mit bis zu einem Drittel aus Mittel- und Grobsandsteinen aufgebaut ist.

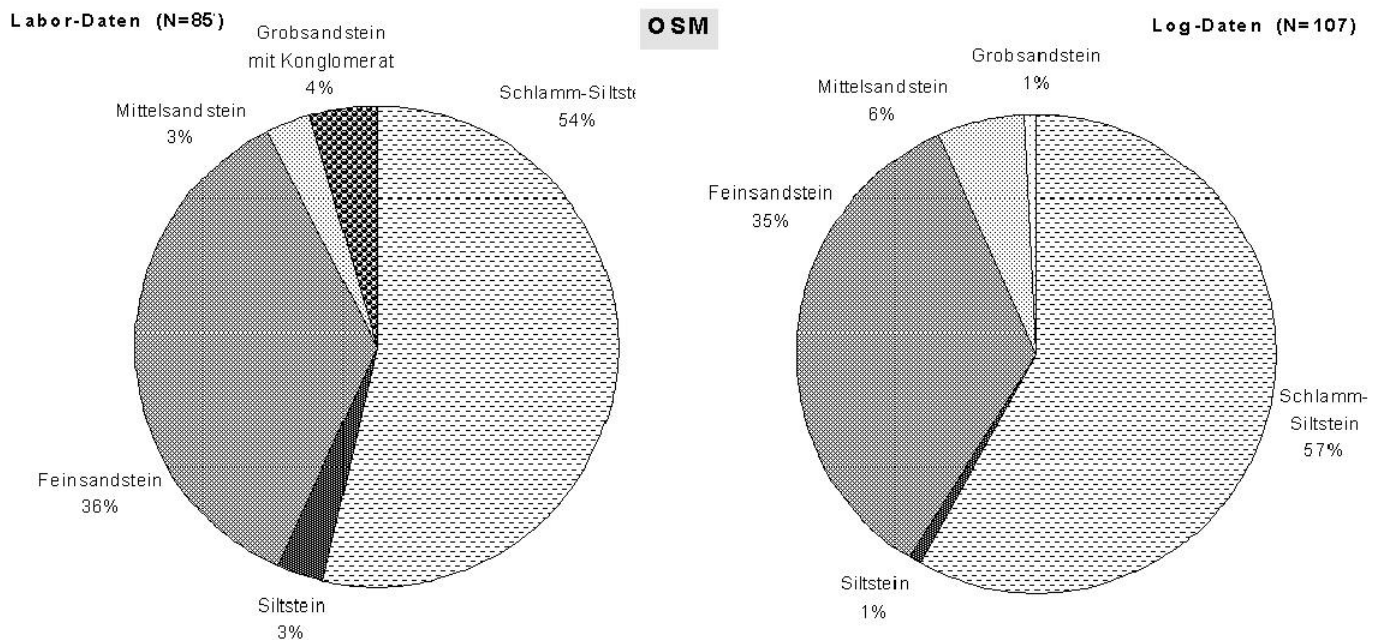
Gesamthaft besteht die Datenbank aus 618 Wärmeleitfähigkeits- und 402 Wärmekapazitätswerten.



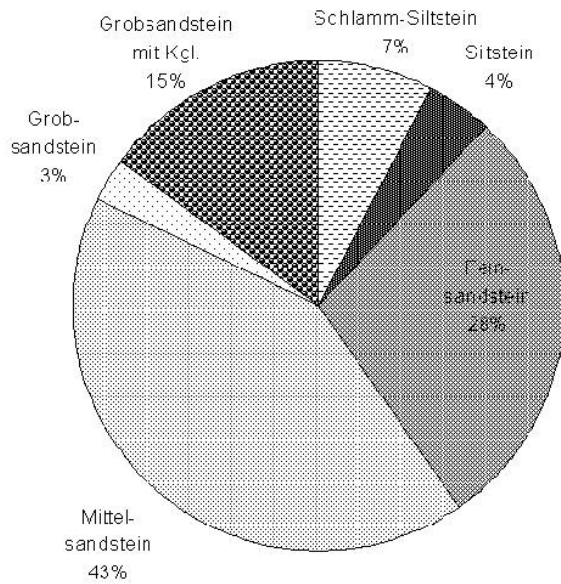
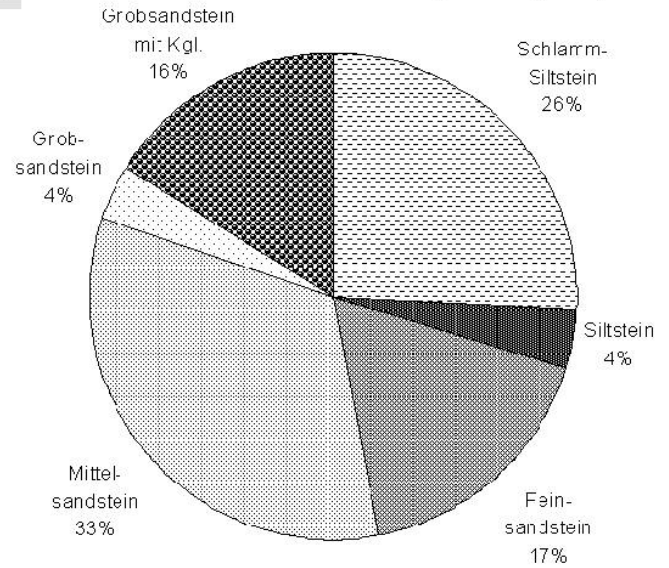
Figur 15: Verteilung der Datensätze auf die verschiedenen Quellen.



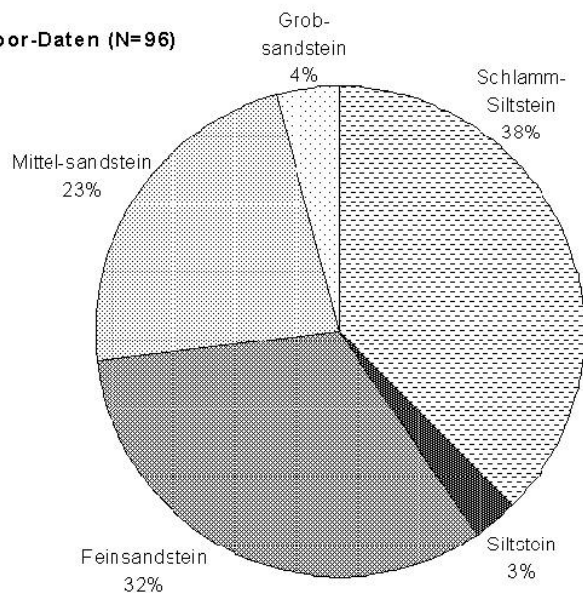
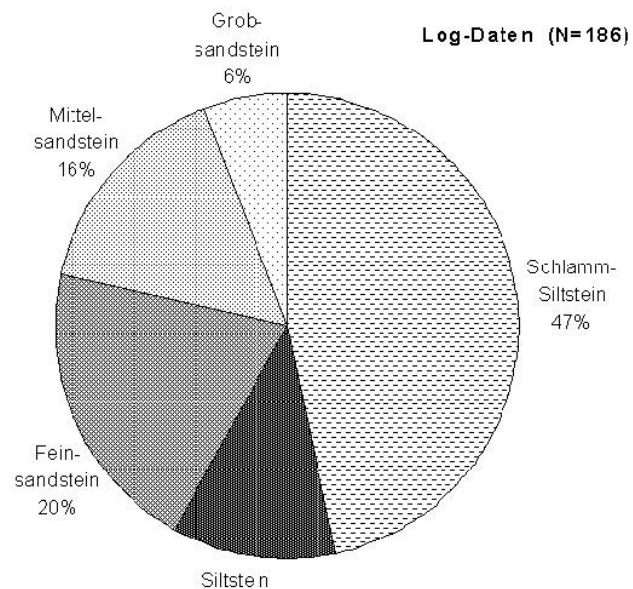
Figur 16: Verteilung der Datensätze auf die Molassegruppen (Labor – Log).



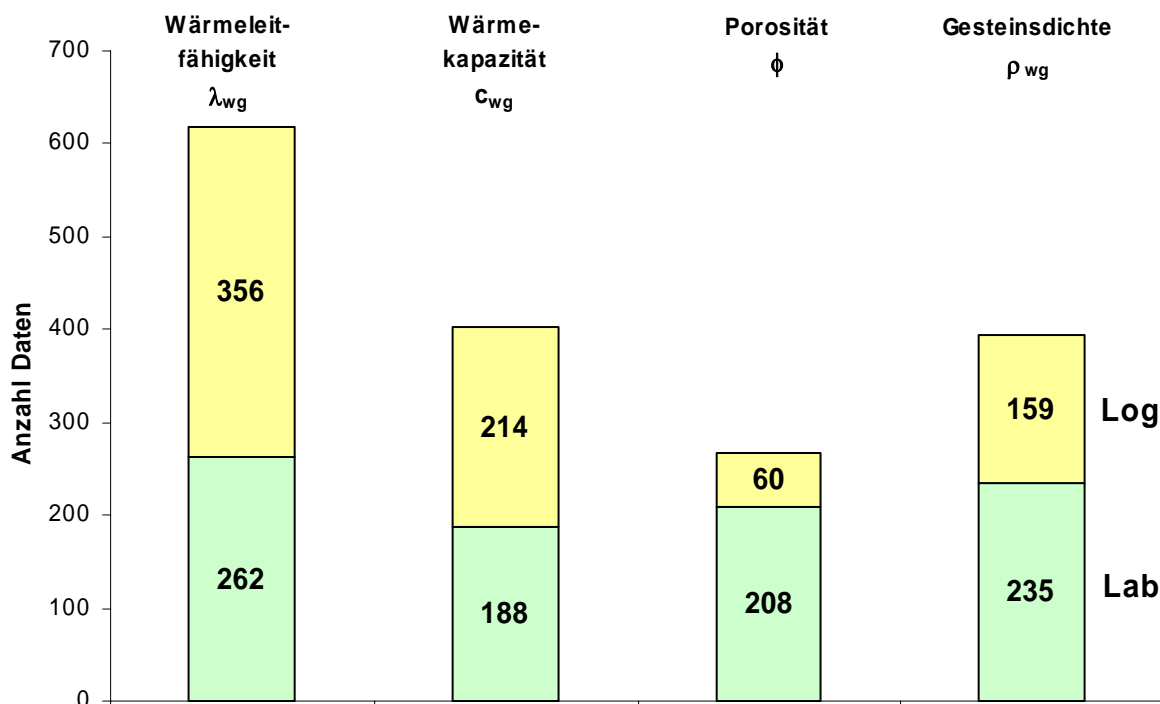
Figur 17: Verteilung der Gesteinstypen in den Datensätzen der Oberen Süsswassermolasse OSM.

**Labor-Daten (N=97)****OMM****Log-Daten (N=81)**

Figur 18: Verteilung der Gesteinstypen in den Datensätzen der Oberen Meeresmolasse OMM.

**Labor-Daten (N=96)****USM****Log-Daten (N=186)**

Figur 19: Verteilung der Gesteinstypen in den Datensätzen der Unteren Süsswassermolasse USM.



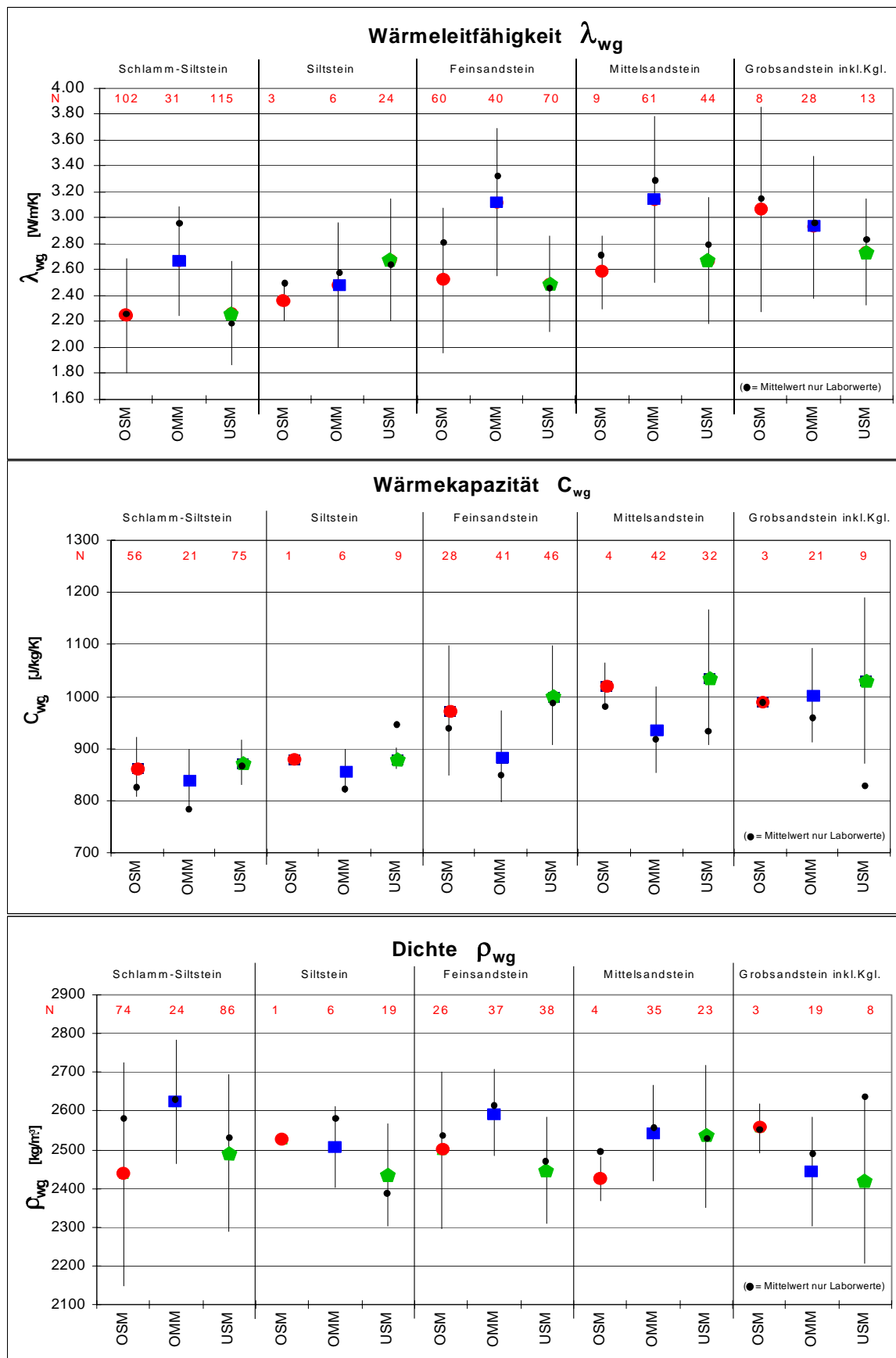
Figur 20: Anzahl gemessene Parameter in der Gesamtdatenbank gegliedert nach Laboranalysen und Logberechnungen.

## 4.2 Gesteinsdichte

Die 394 Messwerte der Gesamtgesteinsdichte  $\rho_{wg}$  in der Datenbank (Fig. 20 und Anhang 4) zeigen deutlich unterscheidbare Mittelwerte und Standardabweichungen innerhalb der Molassegruppen und Lithologieklassen (Fig. 21 unten und Tab. 5). Die Mittelwerte bewegen sich im Bereich von 2420 kg/m<sup>3</sup> (Grobsandstein/Konglomerat der USM) bis zu 2623 kg/m<sup>3</sup> (Schlamm-Siltsteine der OSM). Innerhalb der Lithologieklassen ist teilweise ein abnehmender Trend von dichteren zu leichteren Gesteinen von der OSM über die OMM zur USM zu beobachten.

Je nach Datengruppe schwankt die Standardabweichung im Bereich von  $\pm 5\%$  bis  $\pm 12\%$  um den jeweiligen Mittelwert. Der reine Messfehler der Laboranalysen bewegt sich zwischen 1 und 6% (Tab. 3) und ist abhängig von der Messmethode.

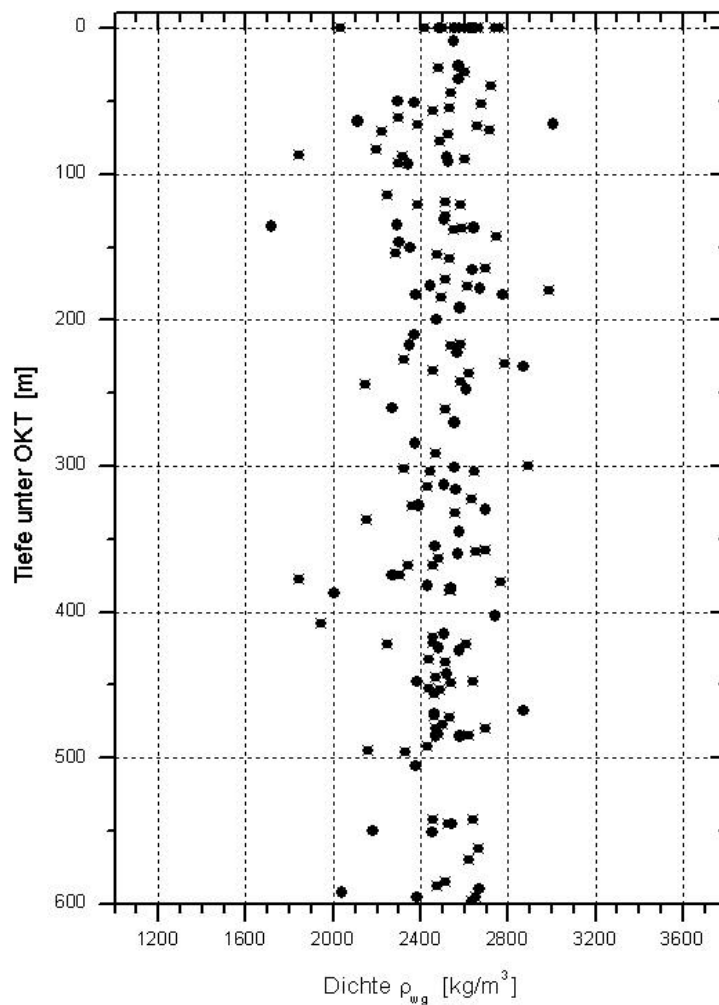
Die Gesteinsdichte zeigt keine deutlichen Tiefentrends (Fig. 22) in der gesamten Datenmenge, auch wenn einzelne Molassegruppen oder Lithologieklassen betrachtet werden. Regional werden jedoch, wo genügend Daten vorhanden sind, im Verbreitungsgebiet der jeweiligen Molassegruppe schwache Trends beobachtet (Anhang 5, Figs. A-5-1 bis A-5-3). Ausser bei den Schlamm- und Siltsteinen, nimmt die Gesteinsdichte generell in Richtung der Alpen schwach zu.



Figur 21: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung aller Datensätze ( $\lambda_{wg}$ ,  $C_{wg}$ ,  $\rho_{wg}$ ) gegliedert nach Molassegruppen und Lithologieklassen. (● = nur Labormesswerte).

Tab. 5: Arithmetischer Mittelwerte, Standardabweichung und Anzahl Datensätze der Wärmeleitfähigkeit, -kapazität und Gesteinsdichte geordnet nach Lithologieklassen und Molassegruppen.

Lithologie	Molassegruppe	Daten	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]			$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]			$C_{wg}$ [J/kg/K]		
			Mittelw.	s	n	Mittelw.	s	n	Mittelw.	s	n
Schlamm-Siltstein	OSM	Alle	<b>2.25</b>	<b>0.44</b>	<b>102</b>	<b>2436</b>	<b>288</b>	<b>56</b>	<b>864</b>	<b>57</b>	<b>74</b>
		Labor	2.25	0.43	40	2582	210	35	823	56	33
	OMM	Alle	<b>2.67</b>	<b>0.42</b>	<b>31</b>	<b>2623</b>	<b>159</b>	<b>21</b>	<b>841</b>	<b>58</b>	<b>24</b>
		Labor	2.94	0.30	10	2744	94	10	786	49	10
	USM	Alle	<b>2.27</b>	<b>0.40</b>	<b>115</b>	<b>2492</b>	<b>202</b>	<b>75</b>	<b>873</b>	<b>44</b>	<b>86</b>
		Labor	2.17	0.41	37	2538	195	37	866	62	28
Siltstein	OSM	Alle	<b>2.36</b>	<b>0.15</b>	<b>3</b>	<b>2527</b>	<b>na</b>	<b>1</b>	<b>882</b>	<b>na</b>	<b>1</b>
		Labor	2.30	0.15	2						
	OMM	Alle	<b>2.48</b>	<b>0.48</b>	<b>6</b>	<b>2507</b>	<b>105</b>	<b>6</b>	<b>858</b>	<b>42</b>	<b>6</b>
		Labor	2.38	0.42	3	2584	79	3	821	23	3
	USM	Alle	<b>2.68</b>	<b>0.47</b>	<b>24</b>	<b>2435</b>	<b>131</b>	<b>9</b>	<b>881</b>	<b>21</b>	<b>19</b>
		Labor	2.44	0.40	3	2399	127	3	947	na	1
Feinsandstein	OSM	Alle	<b>2.52</b>	<b>0.56</b>	<b>60</b>	<b>2498</b>	<b>204</b>	<b>28</b>	<b>973</b>	<b>125</b>	<b>26</b>
		Labor	2.82	0.51	23	2540	179	17	939	91	15
	OMM	Alle	<b>3.12</b>	<b>0.57</b>	<b>44</b>	<b>2596</b>	<b>111</b>	<b>41</b>	<b>885</b>	<b>88</b>	<b>37</b>
		Labor	3.29	0.60	30	2620	114	28	851	83	24
	USM	Alle	<b>2.49</b>	<b>0.37</b>	<b>70</b>	<b>2447</b>	<b>136</b>	<b>46</b>	<b>1002</b>	<b>96</b>	<b>37</b>
		Labor	2.46	0.39	32	2459	151	31	985	110	22
Mittelsandstein	OSM	Alle	<b>2.58</b>	<b>0.28</b>	<b>9</b>	<b>2425</b>	<b>57</b>	<b>4</b>	<b>1022</b>	<b>44</b>	<b>4</b>
		Labor	2.70	0.37	3	2496	na	1	964	na	1
	OMM	Alle	<b>3.14</b>	<b>0.64</b>	<b>61</b>	<b>2543</b>	<b>124</b>	<b>42</b>	<b>937</b>	<b>83</b>	<b>35</b>
		Labor	3.28	0.69	33	2558	109	32	918	68	26
	USM	Alle	<b>2.67</b>	<b>0.49</b>	<b>44</b>	<b>2535</b>	<b>184</b>	<b>32</b>	<b>1037</b>	<b>130</b>	<b>23</b>
		Labor	2.80	0.50	22	2539	141	19	931	102	10
Grobsandstein und Konglomerate	OSM	Alle	<b>3.07</b>	<b>0.79</b>	<b>8</b>	<b>2556</b>	<b>64</b>	<b>3</b>	<b>992</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
		Labor	3.14	0.82	7	2556	64	3	992	2	3
	OMM	Alle	<b>2.93</b>	<b>0.55</b>	<b>28</b>	<b>2444</b>	<b>140</b>	<b>21</b>	<b>1003</b>	<b>90</b>	<b>19</b>
		Labor	2.91	0.38	12	2496	105	12	954	35	10
	USM	Alle	<b>2.74</b>	<b>0.41</b>	<b>13</b>	<b>2420</b>	<b>215</b>	<b>9</b>	<b>1031</b>	<b>160</b>	<b>8</b>
		Labor	2.84	0.53	4	2642	71	3	819	1	2



Figur 22: Gesteinsdichte  $\rho_{wg}$  aller Daten relativ zu ihrer Tiefe.

### 4.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Messwerte der wassergesättigten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  in der Datenbank (Fig. 20 und Anhang 4) zeigen deutlich unterscheidbare arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen innerhalb der Molassegruppen und Lithologieklassen (Fig. 21 unten und Tab. 5). Die Mittelwerte bewegen sich im Bereich von 2.25 W/m/K (Schlamm-Siltsteine der USM) bis zu 3.07 W/m/K (Mittelsandsteine der OMM). Innerhalb der Lithologieklassen ist generell eine deutliche Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von fein- zu grobkörnigen Lithotypen vorhanden.

Je nach Datengruppe schwankt die Standardabweichung im Bereich von  $\pm 8\%$  bis  $\pm 26\%$  um den jeweiligen Mittelwert. Der reine Messfehler der Laboranalysen bewegt sich zwischen 0.3 und 26% (Tab. 3) und ist abhängig von der Messmethode.

Die reinen Sandsteintypen (Fein und Mittelsandsteine der OMM) haben generell die höchsten Wärmeleitfähigkeiten. Die ist deutlich bedingt durch den hohen Quarzanteil ( $\lambda_{Quarz} = 5.8-6.6$  W/m/K).

Im Tiefenbereich 0-500 m zeigt der gesamte Datensatz (Fig. 23) trotz der relativ grossen Streuung eine schwache Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von 2.4 zu 2.7 W/m/K). Dieser Trend ist kaum feststellbar wenn nur die Laborwerte (rund 1/3 der Daten) ausgewertet werden.

Auffällig ist die Tatsache, dass viele der Oberflächenproben eine Wärmeleitfähigkeit von über 3.0 W/m/K aufweisen, was deutlich höher als ein an die Oberfläche extrapolierter Wert ist. Es handelt sich dabei um viele Proben, die in den achtziger Jahren gesammelt wurden. Feldprotokolle der

Beprobungskampagnen liegen kaum vor, und zurzeit kann nur vermutet werden, dass systematisch die eher "härteren" Gesteine beprobt wurden (besser zementiert und deshalb weniger verwittert). Dies würde darauf hindeuten, dass die Oberflächenproben teilweise keine repräsentative Beprobung der verschiedenen Molassegruppen und Lithologieklassen darstellen! Teste haben jedoch gezeigt, dass die Auswirkungen auf die regional berechneten Trends (Anhang 5) gering sind. Der grösste Einfluss der eher zu grossen Mittelwerte ist ganz am Südrand des Untersuchungsgebietes zu erwarten (Fig. 1). Speziell die Trends der Gesteinsdichte und Wärmeleitfähigkeit in den Mittelsandsteinen der USM und OMM könnten durch diesen systematischen Beprobungsfehler beeinflusst worden sein.

Besonders jedoch in den mit dem Sonic-Log berechneten Daten (siehe auch 3.5.5) ist eine eindeutige Zunahme in verschiedenen Lithologieklassen der OMM und USM vorhanden (Figs. 24 + 25). Dies erstaunt nicht, da die Sonic-Geschwindigkeit mit der Tiefe zunimmt, als Funktion der schwach abnehmenden Porosität und des zunehmenden Drucks mit der Tiefe. Speziell die Druckzunahme im relativ oberflächennahen Bereich (0-500m) führt zu einer zunehmenden Schliessung der Mikrospalten und -Klüfte, was generell die Wärmeleitung erhöht (z.B. Schön 1996).

Dieser Effekt wirkt sich auch generell auf die regionalen Trends innerhalb der einzelnen Molassegruppen aus (Anhang 5, Figs. A-5-4 bis A-5-6). Speziell in der OMM und OSM nimmt die Wärmeleitfähigkeit gegen die Alpen hin zu. Gegenläufig zu diesem Trend verhalten sich die feinkörnigen und tonreichen Schlamm-Siltsteine der OSM und OMM, die generell in Oberflächennähe liegen. Interessant ist die erhöhte Wärmeleitfähigkeit der Feinsandsteine der OSM im Raum Zürichsee. Leider ist die Datendichte östlich und westlich dieser Gegend relativ gering (Fig. A-5-4), womit eine Deutung erschwert wird.

#### 4.4 Wärmekapazität

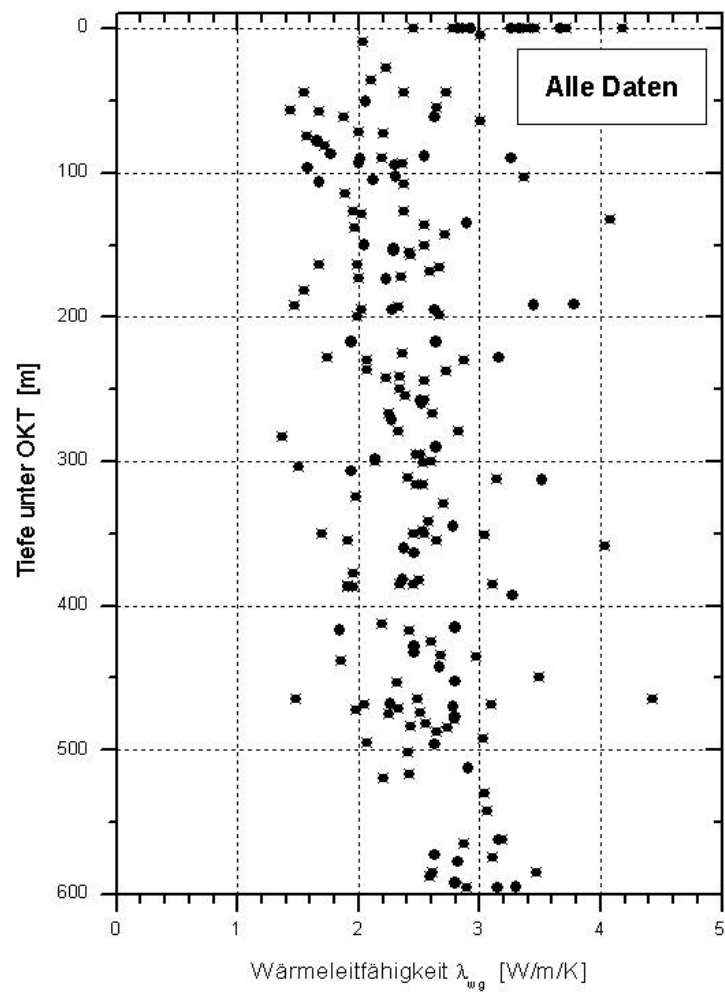
Die Messwerte der wassergesättigten Wärmekapazität  $c_{wg}$  in der Datenbank (Fig. 20 und Anhang 4) zeigen deutlich unterscheidbare Mittelwerte und Standardabweichungen innerhalb der Lithologieklassen und Molassegruppen der Feinsandsteine, Mittelsandsteinen und Grobsandsteine (Fig. 21 unten und Tab. 5). Die Mittelwerte bewegen sich im Bereich von 841 J/kg/K (Schlamm-Siltsteine der OMM) bis zu 1037 J/kg/K (Mittelsandstein der USM). Je nach Datengruppe schwankt bei diesen Lithologieklassen die Standardabweichung im Bereich von  $\pm 3\%$  bis  $\pm 16\%$  um den jeweiligen Mittelwert. Der reine Messfehler der Laboranalysen bewegt sich zwischen 2 und 23% (Tab. 3) und ist abhängig von der Messmethode.

Der Mittelwert der feinkörnigeren Lithologien Schlamm-Siltstein und Siltsteine bewegen sich in einem engen Bereich um  $871 \pm 65$  J/kg/K (siehe auch 3.5.6).

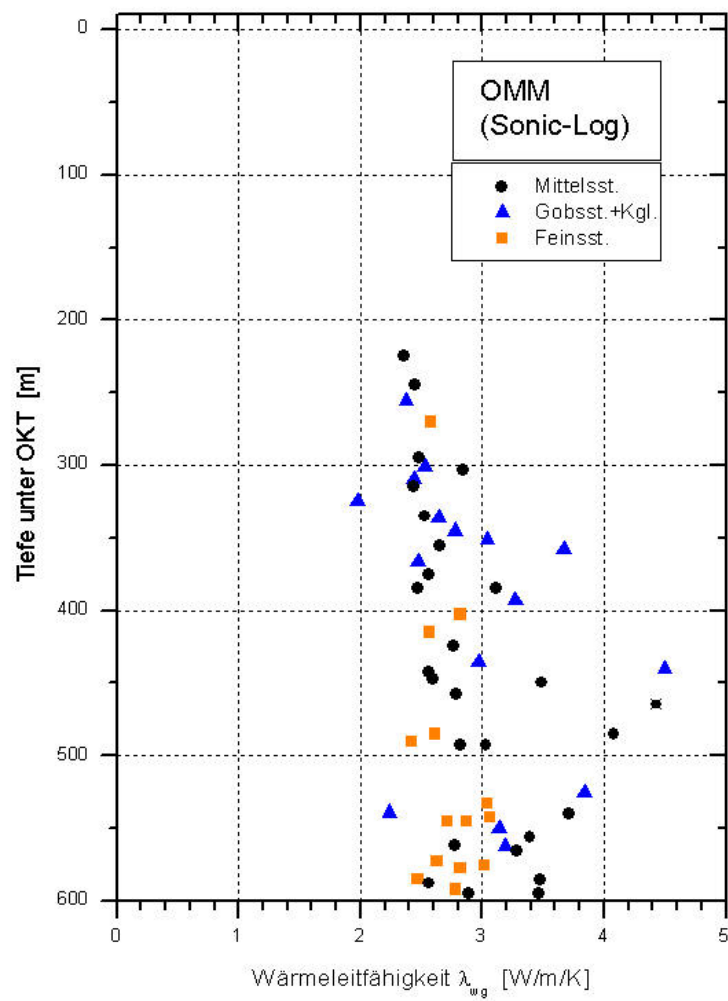
Ein Trend mit der Tiefe ist bei der Wärmekapazität nicht feststellbar (Fig. 26).

Regional ist in den Schlamm- und Siltsteinen nur eine äusserst schwache Zunahme der Wärmekapazität gegen NW zu beobachten (Anhang 5, Figs. A-5-7 bis A-5-9). Dieser Trend ist generell viel ausgeprägter in den Sandsteinen mit größerem Korn der OMM und USM. Die Zunahme kann z.B. über die Distanz von Luzern nach Aarau mehr als 300 J/kg/K für dieselbe Gesteinsart betragen.

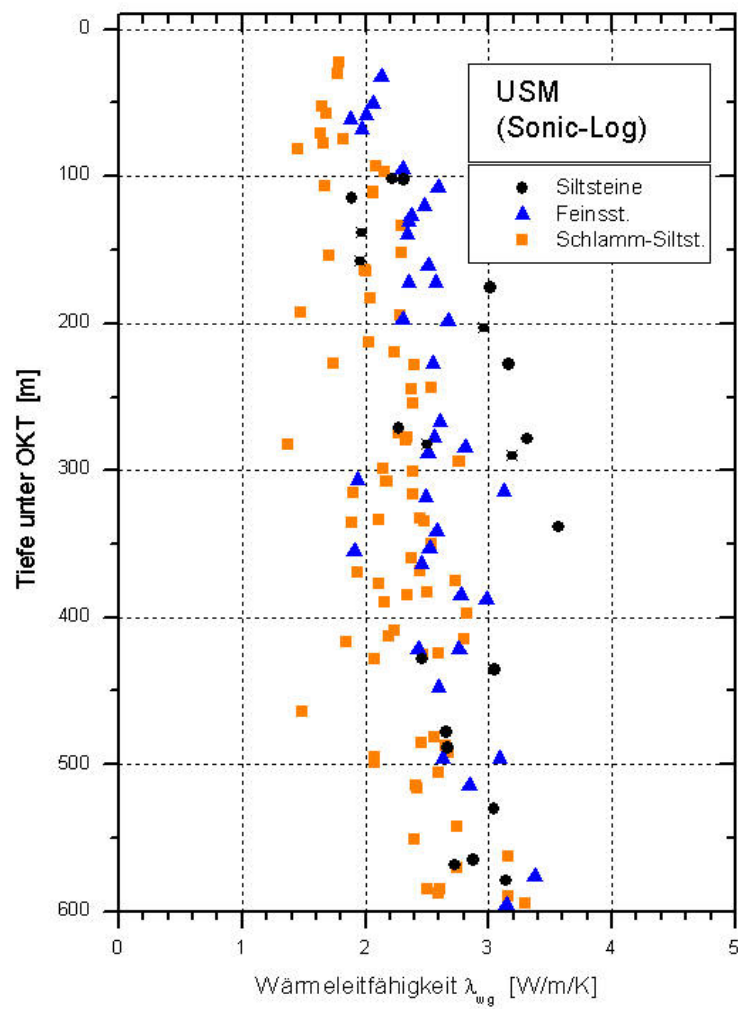




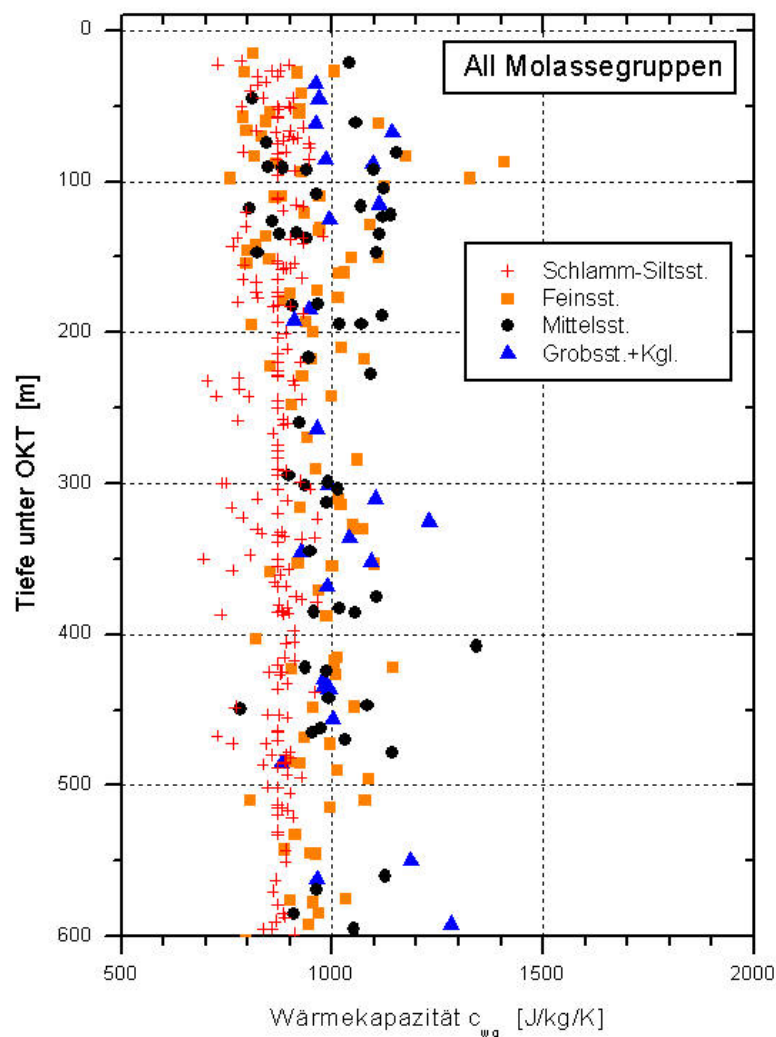
Figur 23: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  aller Daten relativ zu ihrer Tiefe (Für Erklärungen zu den erhöhten Werten an der Oberfläche wird auf Kapitel 4.3 verwiesen).



Figur 24: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  der grobkörnigeren Gesteinstypen der OMM relativ zu ihrer Tiefe (nur mit Logs berechnete Daten).



Figur 25: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  der feinkörnigeren Gesteinstypen der USM relativ zu ihrer Tiefe (nur mit Logs berechnete Daten).



Figur 26: Wärmekapazität  $c_{wg}$  aller Daten relativ zu ihrer Tiefe.

## 5. Interpretation der regionalen Trends

Zwischen den geologischen Verhältnissen der untersuchten Molasse des Schweizer Mittellandes und den physikalischen Parametern, die die geothermischen Stoffwerte bestimmen (siehe auch Kap. 3) bestehen gewisse Beziehungen. Einige der in den Daten vorhandenen regionalen und vertikalen Trends (siehe Kap. 4) können damit mehr oder weniger deutlich erklärt werden.

Diese geologischen Hauptfaktoren sind:

- Heutige oder frühere Versenkungstiefe (und Hebung /Erosion)
- Mineralogische Sedimentzusammensetzung (Art der Sedimentquelle)
- Schwerefraktionierung, Transportbeständigkeit im Wasser
- Deformation der Gesteine nach der Ablagerung (Klüftung etc.)
- Diagenetische Veränderung nach der Ablagerung (Zementation oder Lösung)

## 5.1 Gesteinsdichte:

Die abnehmende Gesteinsdichte mit zunehmender Distanz vom Alpennordrand (Sedimentquelle bei der Ablagerung) widerspiegelt einerseits die Schwerefraktionierung (leichtere Mineralien werden im Wasser weiter transportiert) und andererseits die generell kleineren Porositätswerte im südöstlichen Untersuchungsgebiet (höhere Sedimentkompaktion). Die Dichtezunahme gegen die Alpen verläuft teilweise parallel mit einer Zunahme der seismischen Geschwindigkeiten (z.B. Büchi & Bodmer 1983, Kälin et al. 1992).

Dass die Gesteinsdichten in den feinkörnigen Schlamm- und Siltsteinen der Oberes Süsswassermolasse am höchsten sind, könnte damit im Zusammenhang stehen, dass zur Zeit der Ablagerung zum ersten Mal das Grundgebirge (mit relativ dichten Mineralien) im Sedimentquellgebiet abgetragen wurde.

## 5.2 Wärmeleitfähigkeit:

Die höchsten Wärmeleitfähigkeiten in den Sandsteinen der Oberen Meeresmolasse (OMM) sind eine deutliche Folge der quarzreichen Gesteinszusammensetzung.

Die generelle Wärmeleitfähigkeitszunahme mit der Tiefe und somit auch gegen den Alpennordrand lassen sich mit dem zunehmenden Druck erklären (auch die seismische Geschwindigkeit nimmt generell zu, Büchi & Bodmer 1983).

Untergeordnete lokale Anomalien in den feinkörnigeren Gesteinstypen der OMM und USM könnten im Zusammenhang mit den Molassehauptschuttfächern stehen (Napf und Hörnli).

(Aufgrund der kleinen Datendichte wird auf eine Erklärung der positiven Anomalie in den Feinsandsteinen der OSM im Bereich des Zürichsees verzichtet.)

## 5.3 Wärmekapazität:

Die zunehmende Wärmekapazität in allen Sandsteinen der USM und OMM (OSM nur wenig Daten!) mit zunehmender Distanz vom Alpennordrand lässt sich mit der erhöhten Porosität in derselben Richtung erklären. In den feinkörnigen Gesteinstypen ist dieser Trend weniger ausgeprägt, da diese Lithologien heute noch am deutlichsten die Überkompaktion durch die Paläoversenkung und Erosion im Spätertertiär widerspiegeln.

# 6. Programm für die Datenbank-Abfrage "SwEWS"

Für den Anwender und Planer von Erdwärmesonden- und Speicheranlagen wurde die Datenbankabfrage-Software "SwEWS (Version 2.0)" entwickelt (siehe auch Handbuch zum Programm, Leu et al. 2006).

Die Datenbasis des Abfragemoduls ist die in diesem Bericht beschriebene Datenbank. Die Software wurde als selbstlaufende Microsoft-Access Anwendung programmiert.

Der Anwender gibt in einer Eingabemaske den Schichtaufbau der Lokalität seines Objektes ein und das Modul berechnet anschliessend die typischen geothermischen Parameter für die eingegebenen Gesteinstypen und Molassegruppen dieser Region. Für allfällige Lockergesteinsschichten kann der Anwender auf fix eingebaute Hilfen (Text und Graphiken) zurückgreifen. Mit den geothermischen Stoffwerten und dem ortsspezifischen Wärmefluss/Oberflächen-Bodentemperatur wird zusätzlich ein Temperaturprofil berechnet. Alle Rohdaten und berechneten Parameter können in Tabellenform oder als Graphik ausgedruckt oder für die Weiterverwendung exportiert werden.

## 7. Schlussfolgerungen

- Mit der neu vorliegenden Datenbank (Überarbeitet 2006) der geothermischen Eigenschaften von Schweizer Molassegesteinen wurde eine realistische Grundlage für die Wahl von Stoffwerten für EWS-Simulationen und die Wärmespeicherplanung geschaffen.
- Die über 650 Datensätze (Labormessungen und Berechnungen mit geophysikalischen Logs) erlauben eine orts- und lithologiespezifische Definition der geothermischen Eigenschaften in den drei Hauptgruppen der Molasse (OSM, OMM und USM).
- Im Rahmen des Projekts konnte an der ETH-Zürich (Institut für Geophysik) eine neue Wärmekapazitäts-Messapparatur ("Misch-Kalorimeter") entwickelt und geeicht werden. Diese Messvorrichtung erlaubt in Zukunft eine effiziente und kostengünstige Messung dieses geothermischen Parameters an Bohrklein/Cuttings.
- Weiter wurden die Berechnungsmethoden von geothermischen Parametern mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlogs neu für die Schweizer Molassegesteine kalibriert. Mit dem Sonic-Log kann in Zukunft die Wärmeleitfähigkeit und mit dem Dichte-Log die Wärmekapazität auch ohne Labormessungen berechnet werden.
- Das Datenbank-Abfrageprogramm "SwEWS (Version 2.0)" erlaubt auch dem Nichtgeologen eine effiziente Anwendung der neuen Datengrundlage.

## Literaturverzeichnis

- ASQUITH, G. B. & GIBSON, CH. R. (1982): Basic well log analysis für geologists. - American Association of Petroleum Geologists, Methods in Exploration Series, Tulsa Oklahoma, 215 p.
- BEZIAT, A., DARDAINE, M. & MOUCHE, E. (1992): Measurements of the thermal conductivity of clay-sand and clay-graphite mixtures used as engineered barriers for high-level radioactive waste disposal. - Applied Clay Science, 6, p. 245-263.
- BLACKWELL, D.D. & STEELE, J.L. (1989): Thermal Conductivity of Sedimentary Rocks: Measurements and Significance. - In: Naeser, N.D. & McCulloh, T.H. (ed.): Thermal history of sedimentary basins - methods and case histories. Springer-Verlag, p. 13-36.
- BLASER, P., GUBLER, T., KÜPFER, T., MARSCHALL, P., MATTER, A., MATYAS, J., MEIER, B.P., MÜLLER, W.H., SCHLANKE, S., SCHLUNEGGER, F., SIEBER, N. & WYSS, E. (1994): Geothermiebohrung Bassersdorf. Charakterisierung der Oberen Meeresmolasse und Unteren Süsswassermolasse. - Nagra NTB, 94-01, 138 p.
- BODMER Ph., 1982: Beiträge zur Geothermie der Schweiz. Diss ETH-Nr. 7034.
- BODMER, PH. & RYBACH, L. (1984): Geothermal map of Switzerland (heat flow density). - Matér. géol. Suisse - Géophys., 22, 48 p.
- BRIGAUD, F., CHAPMAN, D.S. & DOUARAN, S. (1990): Estimating thermal conductivity in sedimentary basins using lithologic data and geophysical well logs. - AAPG, 74/9, 1459-1477.
- BÜCHI, U.P. & BODMER, PH. (1983): Der Tiefenverlauf der seismischen Geschwindigkeit in den Molassesedimenten des schweizerischen mittellandes. - Bulletin Ver. Schweiz. Petroleumgeologen und Ingenieure, Vol. 49/116, p. 3-15.
- BURKART, R., HOPKIRK, R.J., EUGSTER, W.J. & RYBACH, L. (1989): Erdwärmesonden-Heisanlagen: Durch Messungen und Berechnungen bestimmte Auslegungs- und Betriebsgrössen. - Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, 46, 55 p.
- CERMAK, V. & RYBACH, L. (1982): Thermal properties. - In: Hellwege, K.-H. (ed.): Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series, Group V. Geophysics and Space Research, Vol. Physical Properties of Rocks, Subvolume a Springer-Verlag, p. 305-371.
- DACHNOV, W.N. & DJAKONOV, D.I. (1952): Termiceskie issledovanija skvashin. - Moscow.
- EVANS, T.R. (1976): Thermal properties of North Sea rocks. - The Log Analyst, 18/2, p. 3-12.
- GOSS, R. & COMBS, J. (1976): Thermal conductivity measurement and prediction from well log parameters with borehole application. - In: UN (ed.): Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal resources, p. 1019-1027.
- GREBER, E., LEU, W., RYBACH, L., BUCHER B., EUGSTER, W.J. & KELLER, B. (1996): Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens - Pilotstudie Wärmeleitfähigkeit (Bericht BEW Nr. 14'382.) - In: Geothermische Vereinigung e.V. & Schweizerische Vereinigung für Geothermie (ed.): Geothermie - Energie der Zukunft. Tagungsband. 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG. 18.-20. Sept. 1996 Konstanz. Bericht Bundesamt für Energiewirtschaft, 14'832, p. .Bericht Bundesamt für Energiewirtschaft, 14'832, 32 p.
- KÄLIN, B., RYBACH, L. & KEMPTER, E. H. K. (1992): Rates of deposition, uplift and erosion in the Swiss Molasse Basin, estimated from sonic - and density - logs. - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing, 58/133, p. 9-22.
- KELLER, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. - Eclogae geol. Helv., 85/3, p. 611-651.
- KELLER, B., BERCHTOLD, B., PAHUD, D. (2001): Unternehmens- und Innovationszentrum D4 in Root (LU), grösster saisonaler Diffusionsspeicher der Schweiz. Geothermie Nr. 31, November 2001, p. 2-7.
- KEMPF, O. (1998): Dünnschliff- und Röntgeanalysen Molassegesteine - Laborbericht 1998. - Bericht Geologisches Institut, Universität Bern., 20 p.

- KERSTEN, M.S. (1949): Final report laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Research laboratory investigations engineering experiment station. University of Minnesota.
- LEU, W., HOPKIRK, R.J., KELLER, B., RYBACH, L. & GREBER, E. (1997): Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens (Pilotstudie - Wärmeleitfähigkeit). - In: Geothermische Vereinigung e.V. & Schweizerische Vereinigung für Geothermie (ed.): Geothermie - Energie der Zukunft. Tagungsband. 4. Geothermische Fachtagung, 7. Fachtagung der SVG. 18.-20. Sept. 1996 Konstanz. p. 395-403.
- LEU, W., KELLER, B., MÉGEL, TH., SCHÄRLI, U. & RYBACH, L. (2006): Programm SwEWS-Version 2.0 (Berechnungsprogramm für geothermische Stoffwerte Molassegesteine) - Benutzerhandbuch Version 2.0. - Bericht Bundesamt für Energie, 33 p.
- MIDTTOMME, K. & ROALDSET, E. (1998): The effect of grain size on thermal conductivity of quartz sands and silts. - Petroleum Geoscience, 4, p. 165-172.
- PRIBNOW, D. (1994): Ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie. - Fortschr.-Ber., VDI Reihe 19, Nr. 75, Düsseldorf.
- ROHNER, E. & BASSETTI, S. (2004): Projekt Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich, BFE-Projekt Nr. 100878, Zwischenbericht September 2004
- ROHNER, E. & RYBACH, L. (2001): Projekt Lebensdauer von Erdwärmesonden inbezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung, BFE-Projekt Nr. 60137 Schlussbericht Dezember 2001
- RYBACH L., BASSETTI S., BAUMGARTNER R., ROHNER E., SCHÄRLI U. (2003): Projekt Drahtloser Minidatenlogger für Temperaturmessungen in Erdwärmesonden, BFE-Projekt Nr. 47974 Schlussbericht Dezember 2003.
- RYBACH, L., LEU, W. & GREBER, E. (1997): Sediment thermal conductivity derived from wireline logs - calibration by cores and cuttings. - EAGE, 59th Conference and Technical Exhibition, Geneva, May 26-30, 1997. - Abstract book, vol. 1.
- RYBACH, L., MEDICI, F. & SCHÄRLI, U. (1995): Petrophysikalische Datenbank von Gesteinen aus der Schweiz und angrenzenden Gebieten. - Unpublizierter Bericht.
- SANNER, B. (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen. Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. - Bericht-Informationen-Zentrum Wärmepumpen + Kältetechnik, 2, 92, 100 p.
- SASS, J.H., LACHENBRUCH, A.H. & MUNROE, R.J. (1971): Thermal conductivity of rocks from measurements on rock fragments and its application to heat-flow determinations. - J. Geophys. Res., 76, p. 3391-3401.
- SATTEL, G. (1982): In situ Bestimmung thermischer Gesteinsparameter aus ihrem Zusammenhang mit Kompressionswellengeschwindigkeit und Dichte. - Diss. Univ. Karlsruhe, 292 p.
- SCHÄRLI, U & RYBACH, L. (2001): Bestimmung thermischer Parameter für die Dimensionierung von Erdwärmesonden; Vergleich: Erfahrungswerte - Labormessungen - Response Test. In: Geothermische Response Tests, W.J. Eugster & L. Laloui editors, Schweizerische Vereinigung für HGeothermie SVG, Proceedings 25.-26.10.2001 Lausanne
- SCHÄRLI, U. (1989): Geothermische Detailkartierung (1:100'000) in der zentralen Nordschweiz mit besonderer Berücksichtigung petrophysikalischer Parameter. - Diss. ETH, Nr. 8941, 208 p.
- SCHÄRLI, U., 1980: Methodische Grundlagen zur Erstellung eines Wärmeleit-fähigkeitskataloges schweizerischer Gesteine, Diplomarbeit an der Abt. X, ETHZ.
- SCHMITZ, U. (1990): The relation of thermogradient distribution and regional Geology in NW-Germany, particularly in the Bramsche-Vlotho-Massif area. - Erdöl Erdgas Kohle, 106/5, p. 189-193.
- SCHÖN, J.H. (1996): Physical Properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. - Pergamon Press, 583 p. Handbook of geophysical exploration, Seismoc exploration., 18, 583 p.
- SIA / BFE (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. - SIA-Dok., D0136, 142 p.
- VASSEUR, G., BRIGAUD, F. & DEMONGODIN, L. (1995): Thermal conductivity estimation in dedimentary basins. - Tectonophysics, 244, 167-174.



## Glossar

Bohrkern:	Zusammenhängender Gesteinszylinder von 5 – 15 cm Durchmesser, der für eine Untersuchung des Untergrundes mit einem speziellen Hohlbohrer an die Oberfläche gefördert wird.
Bohrklein/Cuttings:	Gesteinsbruchstücke (1 – 10 mm), die beim Bohrvorgang mit einem Meisselbohrer im Gestein entstehen und mit der Bohrspülung an die Oberfläche gefördert wird.
Diagenese:	Bezeichnung für die Umbildung lockerer Sedimente zu festen Gesteinen durch mehr oder weniger langzeitige Wirkung von Druck, Temperatur, chemischer Abscheidung.
Erosion:	Die abrasive oder lösende Einwirkung von fliessendem Wasser und Chemikalien auf die Gesteinsoberfläche.
Geophysikalische Logs:	Digitale und tiefenabhängige Aufzeichnung von Messdaten (Elektrischer Widerstand, natürliche oder induzierte radioaktive Strahlung, Schallgeschwindigkeit etc.), die in einem Bohrloch mit Sonden gemessen werden können. Geophysikalische Logs geben Auskünfte über den physikalischen Aufbau des Gesteinsuntergrundes.
Gesteins-Matrix:	Festmasse des Gesteins ohne Hohlräume.
Grundwasser:	Als Grundwasser wird unterirdisches Wasser bezeichnet, das die Hohlräume (Poren, Klüfte etc.) in Fest- und Lockergesteinen zusammenhängend ausfüllt. Dessen Bewegung wird ausschliesslich durch die Schwerkraft und die dabei entstehenden Reibungskräfte bestimmt. Grundwasser fliesst, wenn ein Gefälle vorhanden ist.
Hg-Auftriebsverfahren:	Messen des Gewichts einer trockenen Gesteinsprobe, die in Quecksilber (Hg) schwimmt.
Kompaktion:	Mit steigender Überlast wird das Sediment zunehmend zusammengedrückt, was sich in einer generellen Abnahme der Porosität und Zunahme der Gesteinsdichte niederschlägt. Die Stärke dieser Zusammendrückung ist Abhängig von Zeit, Druck und der Gesteinszusammensetzung.
Lithologie:	Gesteinsart, Gesteinstyp, mineralogische Zusammensetzung eines Gesteins (von <i>lithos</i> , griech.).
Molasse:	(frz. "molasse": schlaff, weich), Ursprünglich Bezeichnung von weichen Sandsteinen. Heute allgemeiner Begriff für die Sedimente der Rand- und Innensenken von Orogenen (Gebirgskörpern). In der Schweiz und Süddeutschland vor allem als regional-geologischer Begriff für die Abtragungsprodukte nördlich der Alpen (Mittelland zwischen Alpennordrand und Jurasüdfuss). Vorwiegend Sandsteine, Schlammsteine und Konglomerate. Die Subalpine Molasse ist der südöstliche Rand, der bereits stark durch die alpine Gebirgsbildung stark deformiert ist (verfaltet und verschuppt).
Molassegruppen:	Lithostratigraphische Unterteilung der Molasse in Grosseinheiten aufgrund der Gesteinsmerkmale. Von oben nach unten (jünger zu älter) Obere Süsswassermolasse (OSM), Obere Meeresmolasse (OMM), Untere Süsswassermolasse (USM) und Untere Meeresmolasse.
Mudlog:	Englischer Begriff für das Logbuch des Bohrstellengeologen während der Bohrarbeiten. Enthält Informationen zu verwendeter Bohrspülung, Gasanzeichen und zu Tage geförderten Gesteinstypen.

Multipyknometer:	Messgerät zur Bestimmung des Gewichts einer mit Luft oder Helium gefüllten Gesteinsprobe.
Porosität:	Als Gesamtporosität wird die Gesamtheit aller Hohlräume (Poren, Klüfte und Karst) im Gestein bezeichnet. Für die Durchlässigkeit ist aber nur die nutzbare Porosität (effektive Porosität) der kommunizierenden Hohlräume wichtig.
Quartär:	Zeitbegriff (stratigraphisch) für die letzten ca. 1.64 Mio Jahre in der Erdgeschichte; bezeichnet auch die während der Eiszeiten abgelagerten Gesteine (meist Lockergesteine).
Sediment:	Das während des Transports in Wasser oder Luft durch Absetzen von Gesteinspartikel oder Mineralien entstehendes Gestein. Anfänglich handelt es sich um ein Lockergestein, das durch Kompaktion und Zementation in ein Festgestein umgewandelt wird.

## Symbolverzeichnis

$A$		Konstante in der Wärmeleitfähigkeitsberechnung mit Sonic-Log
$B$		Konstante in der Wärmekapazitätsberechnung mit RHOB-Log
BHC	ms/m	Borehole Compensated Sonic Log
$c$		Konstante in der Wärmekapazitätsberechnung mit RHOB-Log
$c_c$	J/kg/K	Wärmekapazität der Gesteinmatrix
$c_{\text{gem}}$	J/kg/K	gemessene Wärmekapazität der Gesteinsmatrix
$c_p$	J/kg/K	spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck)
$c_w$	J/kg/K	Wärmekapazität von Wasser
$c_{\text{wg}}$	J/kg/K	Wärmekapazität des wassergesättigten Gesteins
$f$		Kalibrationsfaktor bei der Wärmekapazitätsmessung
GR	API	Gamma Ray Log in API Einheiten
$m_c$	kg	Gewicht des Probenmaterials
$m_w$	kg	Masse des Wassers im Bohrklein/Wassergemisch
NPHI	API/ %	Neutron Log in API Einheiten oder %
OMM		Obere Meeresmolasse
OSM		Obere Süsswassermolasse
RHOB <sub>log</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Formation Density Log
$s$		Standardabweichung vom Mittelwert
$T_c$	°C	Temperatur der abgekühlten Gesteinsprobe im Eis/Wasserbad
$T_m$	°C	Minimale Mischtemperatur
$T_w$	°C	Wassertemperatur vor der Mischung (Raumtemperatur)
USM		Untere Süsswassermolasse
$v_p$	km/s	Sonic Log (BHC) Schallgeschwindigkeit
$\phi$	%	Porosität im Gestein
$\phi_{\text{eff}}$	%	Nutzporosität
$\phi_{\text{tot}}$	%	Gesamtporosität
$\lambda_{\text{gem}}$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit gemessen in Laborversuch
$\lambda_l$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit der Luft
$\lambda_m$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix
$\lambda_t$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Gesteins
$\lambda_w$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit von Wasser (bei 20 °C)
$\lambda_{\text{wg}}$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit des wassergesättigten Gesteins
$\lambda_{\text{wg},i}$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit Labor, punktuelle Einzelmessung
$\bar{\lambda}_{\text{wg}}$	W/m/K	Wärmeleitfähigkeit Labor, arithm. Mittelwert der Einzelmessungen
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des Gesamtgesteins (inklusive wassergesättigten Poren)
$\rho_m$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Gesteinsmatrix
$\rho_t$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der trockenen Gesteinsmatrix
$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Wasser (bei 20 °C)
$\rho_{\text{wg}}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des wassergesättigten Gesteins

## Anhang 1: Kontaktierte Institutionen für Datenbeschaffung

Institution	Region
AB Forages SA, Ecublens	Zentral/Westschweiz
ABA Géol. SA, Fribourg	Westschweiz
Amt für Umwelt Kt. Thurgau, Frauenfeld	Thurgau
Amt für Umweltschutz Kt. Luzern, Luzern	Luzern
Amt für Umweltschutz Kt. St. Gallen, St. Gallen	St. Gallen
Amt für Wasserwirtschaft Kt. Solothurn, Solothurn	Solothurn
Baudepartement Kt. Aargau	Aarau
Baudirektion Kt. Zürich, Zürich	Zürich
Bohrunternehmen Erni, Abtwil	Ostschweiz
Dr. H. Jäckli AG, Zürich	Zürich
ELF Aquitaine, Paris	Genf
Geocalor AG, Hünenberg	Zentralschweiz
Colombi, Schmutz & Dorthé, Aarau	Kanton Aargau
Colombi, Schmutz & Dorthé, Bern	Kanton Bern
Colombi, Schmutz & Dorthé, Genf	Westschweiz
Colombi, Schmutz & Dorthé, Lausanne	Westschweiz
Dr. H. Naef, Frauenfeld	Ostschweiz
Büro Dr. v Moos, Zürich	Zürich - Winterthur
Geotest AG, Bern	Bern
GG-Burri/Jenny, Genf	Genf
Kellerhals & Häfeli AG, Bern	Bern
Matousek & Partner, Baden	Zentral/Nordschweiz
Dr. M. Weidmann, Jongy	Westschweiz
Grundag AG, Gossau	Ostschweiz
Grundbauberatungs AG Kapp, St. Gallen	St. Gallen, Thurgau
Heim AG, Wärmetechnik, Wängi	Ostschweiz
Musée géologique cantonale Vaud, Lausanne	Vaud
Nagra, Wettingen	Zentral/Nordschweiz
NEK Umwelttechnik AG, Zürich	Zentral/Ostschweiz
Office cantonale de construction, Fribourg	Fribourg
Office cantonale de l'énergie, Genf	Genf
Mengis + Lorenz AG, Luzern	Luzern
Dr. U. Schärli Geologie + Geophysik, Zürich	Zürich
Schweiz. Geol. Dokumentationsstelle, Bern	Ganze Schweiz
SEAG, AG f. Schweiz. Erdöl, Winterthur	Ganze Schweiz
Service cantonale de géologie, Genf	Genf
Tonwerke Keller AG, Frick	Zentral/Ostschweiz
Univ. de Fribourg, géologie, Fribourg	Fribourg
Univ. de Genève, géologie, Genf	Genf
WEA Kt. Bern, Bern	Bern
Zürcher Ziegeleien, Zürich	Zentral/Ostschweiz

## Anhang 2: Wärmekapazitäts-Messapparatur ("Misch-Kalorimeter")

### Messapparatur

Die Messapparatur zur Bestimmung der Wärmekapazität besteht aus einem kleinen Dewargefäss von 4 cm Durchmesser und 10 cm Höhe (siehe Fig. 7). Das Messgefäss wird durch einen Korkzapfen oben abgeschlossen. Durch diesen werden ein Temperaturfühler (PT 100) sowie ein Rührwerk zur Durchmischung des Wassers geführt. Das Probenmaterial wird ebenfalls durch eine 15 mm grosse Öffnung eingebracht.

### Probenzubereitung

Viele Gesteinsproben liegen als Bohrklein vor, einige auch als Oberflächenhandstücke oder als Bohrkern. Die ideale Form für die Messungen haben Körner in der Grössenordnung von ca. 1 bis 5 mm. Der Feinanteil sollte durch Sieben des Materials entfernt werden (ohne dadurch die mineralogische Zusammensetzung der Probe zu verändern!). Experimente zeigten, dass sehr feines Material wegen seiner relativ grossen Oberfläche unerwünschte Effekte auf die Temperaturabsenkung beim Messvorgang (Verzögerung) und zu tiefe Messergebnisse liefern. Handstücke oder Bohrkern werden mit einem Brecher zerkleinert (Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Zürich) und wie oben beschrieben gesiebt.

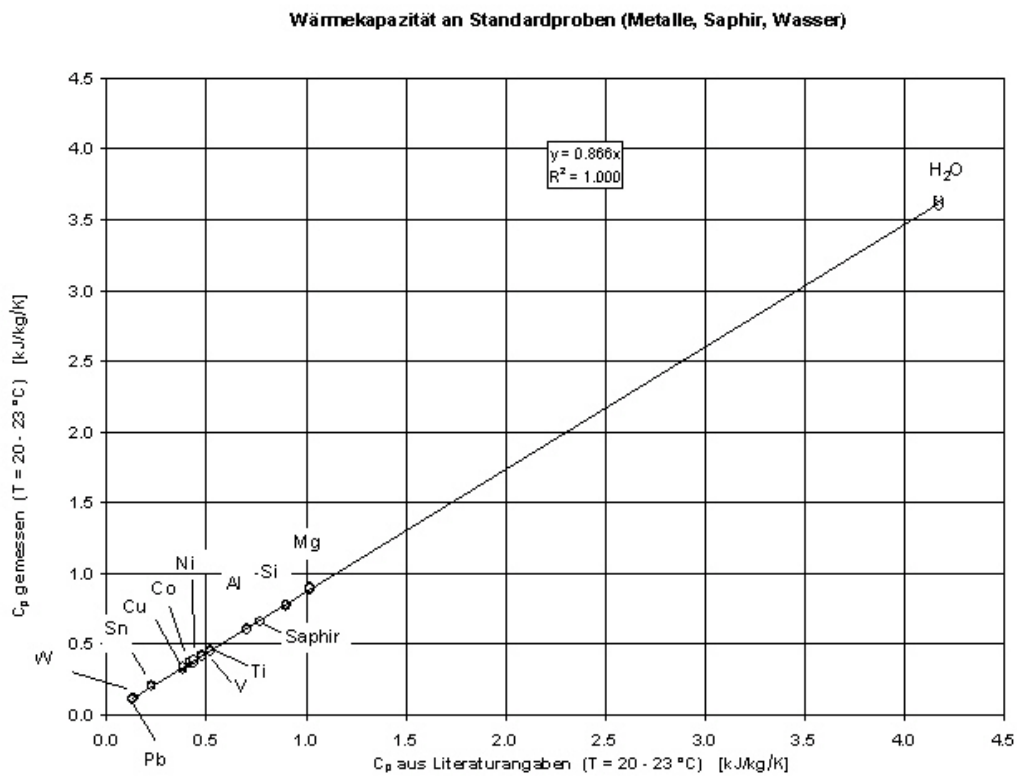
### Messvorgang

Für die Messung der Wärmekapazität einer Gesteinsprobe werden ca. 150 g Material in Form von kleinen Körnern (Bohrklein) benötigt. Das Material wird nach vollständigem Trocknen im Ofen in 4 bis 5 Reagenzgläser abgefüllt (ca. 25-35 g pro Reagenzglas). Das Gewicht  $m_c$  des Probenmaterials wird notiert und anschliessend werden die Reagenzgläser mit weichen Gummizapfen gut verschlossen und in ein Eis-Wasserbad gestellt. Nach ca. 30 Min sind die Gesteinsproben nahezu auf 0°C abgekühlt und bereit für die Messungen. Temperaturmessungen des abgekühlten Bohrkleins ergaben nicht exakt 0 °C sondern ca. 0.1 °C. Andererseits wird das leere Messgefäss auf eine Waage gestellt und tariert. Danach wird ca. 80 bis 90 gr Wasser mit Raumtemperatur in das Gefäss gefüllt und mit dem Korkzapfen verschlossen. Ein Temperaturfühler misst die Wassertemperatur des Wassers, welches durch Umrühren mit einem mechanischen Rührwerk gut vermischt wird. Der Temperatur-Zeitverlauf wird mit dem PC-Programm SmartGraph registriert und wird direkt graphisch angezeigt. Sobald die Wassertemperatur konstant ist (nach wenigen Sekunden) wird das Reagenzglas mit dem Gesteinsmaterial aus dem Eis-Wasserbad genommen und schnellstmöglich in das Wasser geschüttet. Es erfolgt ein rascher Temperaturabfall um ca. 1 bis 2 °K. Nach normalerweise 30 bis 60 Sekunden ist das Temperaturminimum erreicht, welches der Mischtemperatur  $T_m$  entspricht. Danach steigt die Temperatur sehr langsam wieder an. Die Messung ist nach Erreichen von  $T_m$  beendet. Die Temperaturdifferenz  $T_w - T_m$  beträgt etwa 1 - 2 °K und ist noch gut messbar. Das leere Reagenzglas wird nochmals gewogen, um allfällig hängen gebliebenes Gesteinsmaterial zu wägen und bei der Auswertung von  $m_c$  zu subtrahieren. Das Probenmaterial wird aus dem Messbecher entfernt und dieser wird für die nächste Messung vorbereitet (Für die mathematischen Formeln 1-4 siehe Kapitel 3.2.2).

### Kalibration der Messungen

Wie oben bereits erwähnt müssen die Messwerte kalibriert werden, weil verschiedene Störeinflüsse während des Messvorganges auftreten. Deshalb wurde die Wärmekapazität von 11 metallischen Elementen, von künstlichem Saphir und von Wasser gemessen, von allen welchen die Wärmekapazitäten genau bekannt sind, (Tab. A2-1). Zur Berechnung des Kalibrierfaktors  $f$  wird die scheinbare Wärmekapazität  $C_{gem}$  nach Formel (3) gegen die effektive Wärmekapazität bei der Temperatur  $T_m$  aufgetragen.  $T_m$  schwankt etwa zwischen 20 und 23 °C. Eine Regressionsanalyse ergab, dass die Messpunkte in einem Bereich von 0.1 bis 4.2 J/g/K auf einer Geraden mit einem Korrelationskoeffizienten von **1.000** liegen. Dabei wurde jedes Element, mit Ausnahme von Saphir und Titan, 5-mal gemessen. Der Kalibrationsfaktor  $f$  entspricht der reziproken Steigung der Geraden in Figur A2-1:

$$c_c = 1.154 \cdot c_{gem} \quad (A2-1)$$



Figur A2-1: Kalibration der Wärmekapazitätsmessapparatur

Tabelle A2-1: Kalibrationsmessungen an metallischen Elementen, Saphir und Wasser (fett = internat. Anerkannte Standards).

Material		$C_{p, \text{gem}}$	$sC_{p, \text{gem}}$	Anzahl	$C_{p, \text{Literatur}}$	$sC_{p, \text{Literatur}}$	$T_m$ -Bereich
		[J/kg/K]	[J/kg/K]	Messungen	[J/kg/K]	[J/kg/K]	[°C]
Blei	Pb	0.112	0.002	5	0.129	0.003	20.77 - 21.59
Wolfram	W	0.117	0.003	5	0.136	0.004	21.16 - 21.61
Zinn	Sb	0.205	0.005	5	0.237	0.006	21.18 - 21.41
<b>Kupfer</b>	<b>Cu</b>	0.331	0.006	5	0.382	0.007	20.95 - 21.49
Nickel	Ni	0.379	0.008	5	0.438	0.009	20.45 - 21.46
Cobalt	Co	0.367	0.005	5	0.424	0.006	20.69 - 20.84
Vanadium	V	0.420	0.007	5	0.485	0.009	21.07 - 21.42
Titan	Ti	0.450	0.003	4	0.520	0.003	20.37 - 21.55
Silizium	Si	0.606	0.003	5	0.700	0.004	20.89 - 21.41
<b>Saphir</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.656	0.002	3	0.757	0.003	21.38 - 22.14
Aluminium	Al	0.772	0.007	5	0.892	0.008	20.58 - 21.22
Magnesium	Mg	0.892	0.006	5	1.030	0.007	20.90 - 21.14
Wasser	H <sub>2</sub> O	3.616	0.021	5	4.175	0.024	20.47 - 21.09

### Auswertung und Fehlerbetrachtung

Die Auswertung der Messungen erfolgt nach den Formel (3 und 4, Kap. 3.2.2) mit dem Tabellenprogramm ALPHA. Es hat sich gezeigt, dass 4 Messungen genügend sind um einen repräsentativen Mittelwert zu erzielen. Die Streuung der Messwerte (Standardabweichung des Einzelwertes) liegt etwa zwischen 10 und 20 J/kg/K.

Der Messfehler einer einzelnen Messung beträgt:

$$\Delta c_c = \pm \sqrt{\left( \frac{m_w \cdot c_w}{m_c \cdot (T_m - T_c)} \right)^2 \cdot (\Delta T_w^2 + \Delta T_c^2)} \quad (\text{A2-2})$$

wobei:

$$\begin{aligned} \Delta T_w & \pm 0.03^\circ\text{C} \\ \Delta T_c & \pm 0.05^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Der Messfehler liegt demnach zwischen 30 und 40 J/kg/K oder ca. 3-5 % des Messwertes.

### Vergleichsmessungen

Zur Validierung des Messgerätes wurden einige Gesteinsproben in zwei verschiedenen Laboratorien mit der so genannten dynamischen Differenz-Kalorimetrie bestimmt. Tabelle A2-2 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsmessungen. Die Abweichungen der  $c_p$ -Werte betragen meist weniger als 4 %.

Tabelle A2-2: Vergleichsmessung der Wärmekapazität.

Probe	Gestein	$c_m$ ETH (1)	$\pm c_m$ ETH	$c_m$ Hannover (2)	$c_m$ Mettler (3)	Temperatur	Abweichung
		[J/kg/K]	[J/kg/K]	[J/kg/K]	[J/kg/K]	[°C]	[%]
ZW 47	Monzonit	743	36	718		21	-3.5
Ar 4	Peridotit	855	34	844		21	-1.3
Sonn 003	Schlamm-Siltstein	827	36		847	23	2.4
Aqu2002	Sandstein	755	34		814	23	7.2
	1) Neuentwickeltes Misch-Kalorimeter am Institut für Geophysik der ETH Zürich						
	2) Dynamisches Differenz-Kalorimeter bei der Mettler Toledo AG in Greifensee (CH)						
	3) Dynamisches Wärmestrom-Differenz-Kalorimeter am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung						

## Anhang 3: Fehlerrechnungen der Labormessungen

### Gesteinsdichte

Code 1,2 (berechnet aus  $\rho_{tETH}$ ,  $\rho_{tBern}$  und  $\phi$ )

$$\rho_{wg} = \rho_t + \rho_w \cdot \phi \quad (A3-1)$$

$$\Delta \rho_{wg} = \pm \sqrt{(\Delta \rho_t)^2 + (\rho_w \cdot \Delta \phi)^2} \quad (A3-2)$$

Code 3,4 (berechnet aus  $\rho_{mETH}$ ,  $\rho_{mBern}$  und  $\phi_{DB}$ )

$$\rho_{wg} = \rho_m \cdot (1 - \phi) + \rho_w \cdot \phi \quad (A3-3)$$

$$\Delta \rho_{wg} = \pm \sqrt{[(1 - \phi) \cdot \Delta \rho_m]^2 + [(\rho_w - \rho_m) \cdot \Delta \phi]^2} \quad (A3-4)$$

Code 5,6 (berechnet aus anderen Labormessungen oder aus Logs)

$$\Delta \rho_{wg} = 0.05 \cdot \rho_{wg} \text{ (1\% des Wertes, Schätzung)}$$

### Wärmeleitfähigkeit

Code 1 (Messung aus wassergesättigtem Bohrkern)

$$\Delta \lambda_{wg} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_{wg,i} - \bar{\lambda}_{wg})^2}{n-1}} \quad (A3-5)$$

Code 2 (berechnet aus  $\lambda_t$  und  $\phi$ )

$$\lambda_{wg} = \left( \frac{\lambda_w}{\lambda_l} \right)^\phi \cdot \lambda_t \quad (A3-6)$$

$$\Delta \lambda_{wg} = \pm \sqrt{\left[ \left( \frac{\lambda_w}{\lambda_l} \right)^\phi \cdot (\Delta \lambda_t) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\lambda_w}{\lambda_l} \right)^\phi \cdot \ln \left( \frac{\lambda_w}{\lambda_l} \right) \cdot \lambda_t \cdot \Delta \phi \right]^2} \quad (A3-7)$$

Code 3 (berechnet aus  $\lambda_m$  und  $\phi$ )

$$\lambda_{wg} = \lambda_w^\phi \cdot \lambda_m^{1-\phi} \quad (A3-8)$$

$$\Delta \lambda_{wg} = \pm \sqrt{\left[ \lambda_w^\phi \cdot (1 - \phi) \cdot \lambda_m^{-\phi} \cdot \Delta \lambda_m \right]^2 + \left[ \lambda_m^{1-\phi} \cdot \lambda_w^\phi \cdot \ln(\lambda_w / \lambda_m) \cdot \Delta \lambda_m \right]^2} \quad (A3-9)$$



Versuche an Kernmaterial haben gezeigt, dass Effekte wie zum Beispiel die Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit generell in Gesteinen der Schweizer Molasse vernachlässigbar oder kleiner als die Streuung der Einzelwerte sind.

### **Wärmekapazität**

Code 1 (berechnet aus  $c_m$  und  $\phi$ )

$$c_{wg} = \frac{c_m \cdot \rho_m \cdot (1 - \phi) + c_w \cdot \rho_w \cdot \phi}{\rho_{wg}} \quad (\text{A3-10})$$

$$\Delta c_{wg} = \pm \sqrt{\left[ \frac{c_m (1 - \phi)}{\rho_{wg}} \cdot \Delta \rho_m \right]^2 + \left[ \frac{c_m \cdot \rho_m (1 - \phi) + c_w \cdot \rho_w \cdot \phi}{\rho_{wg}^2} \right]^2 + \left[ \frac{\rho_m (1 - \phi)}{\rho_{wg}} \cdot \Delta c_m \right]^2} \quad (\text{A3-11})$$

## Anhang 4: Datenbankauszug

### Legende:

Typ:	Probentyp
O:	Oberflächenprobe
BK:	Probe Bohrkern
BC:	Probe Bohrklein/Cuttings
L:	Berechnung mit geophysikalischen Logs
OKT:	Oberkante Terrain
OSM:	Obere Süsswassermolasse
OMM:	Obere Meeresmolasse
USM:	Untere Süsswassermolasse
Cd.:	Code, verwendete Berechnungsmethode (siehe auch Kap. 3.8)

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Adli001	O	Adligenswil LU			670'200	213'300	USM	Grob-Sst.	2.9	1	6.6	2				
Alti001	BK	Altishofen	478	138.0	640'375	228'130	OMM	Mitt.-Sst.	2.9	3	12.0	5	2549	4	939	1
Alti002	BK	Altishofen	478	181.4	640'375	228'130	OMM	Mitt.-Sst.	2.9	1	15.8	1	2507	4	967	1
Alti003	BK	Altishofen	478	191.7	640'375	228'130	OMM	Grob-Sst.	3.5	1	11.8	1	2579	4	910	1
Alti004	BK	Altishofen	478	323.2	640'375	228'130	USM	Schl.-Siltst.	2.2	1	12.7	1	2641	4	964	1
Alti005	BK	Altishofen	478	598.5	640'375	228'130	USM	Schl.-Siltst.	2.3	1	9.7	1	2634	4	910	1
Aqu1001	BK	Aqui-1	417	103.3	682'125	246'560	OSM	Fein-Sst.	3.4	1	22.4	1	2405	4	1124	1
Aqu1002	BK	Aqui-1	417	178.5	682'125	246'560	OSM	Fein-Sst.	3.5	1	5.5	1	2673	4	882	1
Aqu1003	BK	Aqui-1	417	310.5	682'125	246'560	OMM	Fein-Sst.	3.7	1	18.5	1	2459	4	1016	1
Aqu1004	BK	Aqui-1	417	312.6	682'125	246'560	OMM	Mitt.-Sst.	3.5	1	16.8	1	2506	4	986	1
Aqu2001	BK	Aqui-2	415	298.9	682'202	246'823	OMM	Mitt.-Sst.	3.8	1	16.4	1	2530	4	989	1
Aqu2002	BK	Aqui-2	415	300.9	682'202	246'823	OMM	Mitt.-Sst.	3.7	1	13.6	1	2555	4	937	1
Aqu2003	L	Aqui-2	415	301.2	682'202	246'823	OMM	Grob-Sst./Kgl.	2.5	4			2479	6	990	2
Aqu2004	L	Aqui-2	415	303.8	682'202	246'823	OMM	Mitt.-Sst.	2.8	4			2443	6	1014	2
Aqu2005	L	Aqui-2	415	336.0	682'202	246'823	OMM	Grob-Sst./Kgl.	2.6	4			2403	6	1040	2
Aqu2006	L	Aqui-2	415	385.0	682'202	246'823	OMM	Mitt.-Sst.	3.1	4			2532	6	955	2
Aqu2007	L	Aqui-2	415	415.0	682'202	246'823	OMM	Fein-Sst.	2.6	4			2444	6	1013	2
Aqu2008	L	Aqui-2	415	445.0	682'202	246'823	OMM	Siltstein	2.7	4			2471	6	889	2
AUGW001	BC	Augwil	555	200.0	687'600	258'650	OMM	Fein-Sst.	2.0	3	11.0	5	2765	3	955	1
AUGW002	BC	Augwil	556	300.0	687'600	258'650	OMM	Schl.-Siltst.	2.8	3	3.5	5	2893	3	748	1
AuSG001	O	Au SG			764'800	255'820	USM	Mitt.-Sst.	3.3	1	12.0	5	2780	1		
Bäch001	O	Bäch SZ			699'200	229'100	OMM	Mitt.-Sst.	3.3	1	4.8	1	2628	1		
BASS001	BC	GTB Bassersdorf	456	28.0	687'220	256'310	OSM	Fein-Sst.	2.9	3	11.0	5	2477	3	918	1
BASS002	BC	GTB Bassersdorf	456	66.0	687'220	256'310	OSM	Schl.-Siltst.	2.8	3	3.5	5	3008	3	820	1
BASS003	BC	GTB Bassersdorf	456	94.0	687'220	256'310	OSM	Fein-Sst.	2.4	3	11.0	5	2477	3	927	1
BASS004	BC	GTB Bassersdorf	456	137.0	687'220	256'310	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	3	3.5	5	2642	3	775	1
BASS005	BC	GTB Bassersdorf	456	174.0	687'220	256'310	OSM	Fein-Sst.	2.6	3	11.0	5	2951	3	900	1
BASS006	BC	GTB Bassersdorf	456	196.0	687'220	256'310	OSM	Fein-Sst.			11.0	5				
BASS007	BC	GTB Bassersdorf	456	235.0	687'220	256'310	OSM	Fein-Sst.			11.0	5				
BASS008	BC	GTB Bassersdorf	456	251.0	687'220	256'310	OSM	Schl.-Siltst.			3.5	5				
BASS009	BK	GTB Bassersdorf	456	595.2	687'220	256'310	USM	Schl.-Siltst.	3.2	2	4.1	4	2653	6	837	1
BASS010	BK	GTB Bassersdorf	456	602.8	687'220	256'310	USM	Fein-Sst.	3.0	1	5.0	4	2647	3	796	1
BASS011	L	GTB Bassersdorf	456	270.0	687'220	256'310	OMM	Fein-Sst.	2.6	4			2555	6	941	2
BASS012	L	GTB Bassersdorf	456	325.0	687'220	256'310	OMM	Grob-Sst./Kgl.	2.0	4			2115	6	1229	2
BASS013	L	GTB Bassersdorf	456	402.7	687'220	256'310	OMM	Fein-Sst.	2.8	4			2742	6	818	2
BASS014	L	GTB Bassersdorf	456	425.0	687'220	256'310	OMM	Schl.-Siltst.	2.8	4			2808	6	849	2

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
BASS015	L	GTB Bassersdorf	456	449.5	687'220	256'310	OMM	Mitt.-Sst.	3.5	4			2797	6	782	2
BASS016	L	GTB Bassersdorf	456	485.0	687'220	256'310	OMM	Fein-Sst.	2.6	4			2581	6	924	2
BASS017	L	GTB Bassersdorf	456	515.0	687'220	256'310	OMM	Schl.-Siltst.	2.6	4			2558	6	879	2
BASS018	L	GTB Bassersdorf	456	562.5	687'220	256'310	USM	Schl.-Siltst.	3.2	4			2663	6	866	2
BASS019	L	GTB Bassersdorf	456	575.8	687'220	256'310	USM	Fein-Sst.	3.4	4			2615	6	901	2
BASS020	L	GTB Bassersdorf	456	590.0	687'220	256'310	USM	Schl.-Siltst.	3.2	4			2669	6	865	2
BASS021	L	GTB Bassersdorf	456	594.7	687'220	256'310	USM	Schl.-Siltst.	3.3	4			2729	6	858	2
Ber1002	L	Berlingen-1	593	81.7	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4					871	2
Ber1003	L	Berlingen-1	593	90.3	719'690	280'200	OSM	Fein-Sst.	2.0	4						
Ber1004	L	Berlingen-1	593	133.8	719'690	280'200	OSM	Fein-Sst.	1.4	4						
Ber1005	L	Berlingen-1	593	161.7	719'690	280'200	OSM	Fein-Sst.	2.1	4						
Ber1006	L	Berlingen-1	593	181.8	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	1.6	4					871	2
Ber1007	L	Berlingen-1	593	204.6	719'690	280'200	OSM	Fein-Sst.	1.6	4						
Ber1008	L	Berlingen-1	593	265.1	719'690	280'200	OSM	Fein-Sst.	1.7	4						
Ber1009	L	Berlingen-1	593	304.1	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	1.5	4					871	2
Ber1010	L	Berlingen-1	593	340.6	719'690	280'200	OSM	Fein-Sst.	1.7	4						
Ber1011	L	Berlingen-1	593	355.1	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4					871	2
Ber1012	L	Berlingen-1	593	385.0	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	4					871	2
Ber1013	L	Berlingen-1	593	457.3	719'690	280'200	OSM	Fein-Sst.	2.3	4						
Ber1014	L	Berlingen-1	593	463.4	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	4					871	2
Ber1015	L	Berlingen-1	593	519.2	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4					871	2
Ber1016	L	Berlingen-1	593	539.0	719'690	280'200	OMM	Grob-Sst./Kgl.	2.2	4						
Ber1017	L	Berlingen-1	593	561.6	719'690	280'200	OMM	Mitt.-Sst.	2.8	4						
Ber1018	L	Berlingen-1	593	572.4	719'690	280'200	OMM	Fein-Sst.	2.6	4						
Ber1019	L	Berlingen-1	593	587.6	719'690	280'200	OMM	Mitt.-Sst.	2.6	4						
Berl001	L	Berlingen-1	593	50.2	719'690	280'200	OSM	Schl.-Siltst.	1.7	4					871	2
Bopp001	BC	Boppelsen	540	155.0	672'380	258'460	USM	Schl.-Siltst.	2.2	3	3.5	5	2476	3	791	1
Bopp002	BC	Boppelsen	540	193.0	672'380	258'460	USM	Fein-Sst.	2.3	3	11.0	5	2531	3	938	1
Bosw001	BC	Boswil-1	648	40.0	664'845	237'415	OSM	Schl.-Siltst.	3.0	3	3.3	4	2721	3	805	1
Bosw002	BC	Boswil-1	648	130.0	664'845	237'415	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	3	3.5	5	2698	3	795	1
Bosw003	BC	Boswil-1	648	230.0	664'845	237'415	OSM	Schl.-Siltst.	2.9	3	3.5	5	2785	3	777	1
Bosw004	BC	Boswil-1	648	330.0	664'845	237'415	OSM	Fein-Sst.	2.4	3	21.6	4	2372	3	1052	1
Bosw005	BC	Boswil-1	648	467.5	664'845	237'415	OMM	Schl.-Siltst.	3.0	3	3.5	5	2872	3	728	1
Bosw006	L	Boswil-1	648	105.0	664'845	237'416	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	4						
Bosw007	L	Boswil-1	648	124.9	664'845	237'417	OSM	Mitt.-Sst.	2.4	4						
Bosw008	L	Boswil-1	648	160.7	664'845	237'418	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Bosw009	L	Boswil-1	648	168.4	664'845	237'419	OSM	Grob-Sst.	2.6	4						
Bosw010	L	Boswil-1	648	186.7	664'845	237'420	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	4						
Bosw011	L	Boswil-1	648	221.2	664'845	237'421	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	4						
Bosw012	L	Boswil-1	648	241.7	664'845	237'422	OSM	Mitt.-Sst.	2.3	4						
Bosw013	L	Boswil-1	648	267.5	664'845	237'423	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	4						
Bosw014	L	Boswil-1	648	304.7	664'845	237'424	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	4						
Bosw015	L	Boswil-1	648	348.2	664'845	237'425	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	4						
Bosw016	L	Boswil-1	648	366.1	664'845	237'426	OMM	Grob-Sst.	2.5	4						
Bosw017	L	Boswil-1	648	442.5	664'845	237'427	OMM	Mitt.-Sst.	2.6	4						
Bosw018	L	Boswil-1	648	465.0	664'845	237'428	OMM	Schl.-Siltst.	2.5	4						
Bosw019	L	Boswil-1	648	492.4	664'845	237'429	OMM	Mitt.-Sst.	2.8	4						
Bosw020	L	Boswil-1	648	575.0	664'845	237'430	OMM	Schl.-Siltst.	2.6	4						
Büa001	BC	Bülach-W	406	76.0	682'878	263'115	OMM	Mitt.-Sst.								
Büa002	BC	Bülach-W	406	105.0	682'878	263'115	USM	Schl.-Siltst.	1.7	1	10.2	2	2204	3		
Büa003	BC	Bülach-W	406	150.0	682'878	263'115	USM	Fein-Sst.	1.9	1	7.3	2	2474	3		
Büa004	BC	Bülach-W	406	262.0	682'878	263'115	USM	Schl.-Siltst.	1.8	1	8.2	2	2424	3		
Bube001	BC	Buchberg	490	45.0	684'050	269'670	OMM	Grob-Sst./Kgl.	2.7	3	15.0	5	2530	4	968	1

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Bübe001	O	Buechsberg SG			760'850	260'520	OMM	Fein-Sst.	3.1	1	6.6	2	2420	1	856	1
Bübe002	O	Buechsberg SG			759'280	260'040	OMM	Mitt.-Sst.	3.2	1	8.1	2	2342	1		
Bübe003	O	Buechsberg SG			758'500	259'900	OMM	Mitt.-Sst.	3.7	1	12.0	5	2650	1		
Buch001	BC	Buchs ZH	460	85.0	675'059	256'940	OMM	Grob-Sst./Kgl.	3.3	3	15.0	5	2343	3	983	1
Buec001	O	Buechen SG			763'900	258'600	USM	Fein-Sst.	3.3	1	6.3	2	2499	1	881	1
Buec002	O	Buechen SG			759'080	261'000	OMM	Mitt.-Sst.	2.9	1	1.7	2	2632	1		
BülW001	BC	Bülach-IW	408	119.0	682'900	263'052	USM	Schl.-Siltst.	1.7	1	8.7	2	2352	3		
BülW002	BC	Bülach-IW	408	155.0	682'900	263'052	USM	Fein-Sst.	2.2	1	5.9	2	2440	3		
BülW003	BC	Bülach-IW	408	218.0	682'900	263'052	USM	Fein-Sst.	2.2	1	6.6	2	2466	3		
BülW004	BC	Bülach-IW	408	238.0	682'900	263'052	USM	Mitt.-Sst.	2.2	1	6.6	2	2466	3		
BülW005	BC	Bülach-IW	408	288.0	682'900	263'052	USM	Schl.-Siltst.	1.7	1	8.4	2	2337	3		
Burg001	BK	Burgdorf M1400	564	91.3	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.	2.8	1	9.0	3	2529	5	881	1
Burg002	BK	Burgdorf M1400	564	109.6	613'970	211'820	USM	Fein-Sst.	2.1	1	17.0	3	2370	5	970	1
Burg003	BK	Burgdorf M1400	564	150.7	613'970	211'820	USM	Fein-Sst.	2.5	1	20.0	3	2352	5	1046	1
Burg004	BK	Burgdorf M1400	564	160.5	613'970	211'820	USM	Fein-Sst.	2.4	1	19.0	3	2328	5	1030	1
Burg005	BK	Burgdorf M1400	564	176.9	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.	2.2	1	2.0	3	2617	5	824	1
Burg006	BK	Burgdorf M1400	564	194.6	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.	2.0	1	22.0	3	2271	5	1069	1
Burg007	BK	Burgdorf M1400	564	222.1	613'970	211'820	USM	Fein-Sst.	2.8	1	5.0	3	2568	5	852	1
Burg008	BK	Burgdorf M1400	564	241.9	613'970	211'820	USM	Fein-Sst.	2.5	1	15.0	3	2462	5	997	1
Burg009	L	Burgdorf M1400	564	51.3	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2370	6	901	2
Burg010	L	Burgdorf M1400	564	60.9	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.					2378	6	1056	2
Burg011	L	Burgdorf M1400	564	66.6	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2388	6	899	2
Burg012	L	Burgdorf M1400	564	92.5	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.					2316	6	1097	2
Burg013	L	Burgdorf M1400	564	87.9	613'970	211'820	USM	Grob-Sst.					2317	6	1096	2
Burg014	L	Burgdorf M1400	564	115.3	613'970	211'820	USM	Grob-Sst.					2295	6	1111	2
Burg015	L	Burgdorf M1400	564	119.4	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2514	6	884	2
Burg016	L	Burgdorf M1400	564	123.8	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.					2280	6	1120	2
Burg017	L	Burgdorf M1400	564	135.0	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.					2293	6	1112	2
Burg018	L	Burgdorf M1400	564	140.9	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2125	6	930	2
Burg019	L	Burgdorf M1400	564	146.8	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.					2303	6	1106	2
Burg020	L	Burgdorf M1400	564	157.5	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2453	6	891	2
Burg021	L	Burgdorf M1400	564	182.7	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2378	6	900	2
Burg022	L	Burgdorf M1400	564	188.9	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.					2284	6	1118	2
Burg023	L	Burgdorf M1400	564	200.2	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2472	6	889	2
Burg024	L	Burgdorf M1400	564	210.9	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2436	6	893	2
Burg025	L	Burgdorf M1400	564	227.2	613'970	211'820	USM	Mitt.-Sst.					2325	6	1091	2
Burg026	L	Burgdorf M1400	564	231.5	613'970	211'820	USM	Schl.-Siltst.					2319	6	907	2
Chap001	BC	Chapelle-1	764	45.0	547'306	168'360	OMM	Mitt.-Sst.	2.4	3	12.0	5	2540	3	811	1
Chap002	BC	Chapelle-1	764	92.5	547'306	168'360	OMM	Mitt.-Sst.	2.5	3	12.0	5	2470	3	939	1
Chap003	BC	Chapelle-1	764	180.0	547'306	168'360	USM	Schl.-Siltst.	3.0	3	3.5	5	2988	3	776	1
Chap004	BC	Chapelle-1	764	237.5	547'306	168'360	USM	Schl.-Siltst.	2.7	3	3.5	5	2708	4		
Chap005	BC	Chapelle-1	764	330.0	547'306	168'360	USM	Schl.-Siltst.	2.6	3	3.5	5	2698	3	821	1
Chap006	BC	Chapelle-1	764	472.5	547'306	168'360	USM	Schl.-Siltst.	3.0	3	3.0	4	2901	3	763	1
Cour001	BC	Courtion	599	316.0	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	2.5	3	2.5	4	2560	3	761	1
Cour002	BC	Courtion	599	330.0	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.			20.5	4	2184	3	1074	1
Cour003	BC	Courtion	599	372.0	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.			3.8	4				
Cour004	BC	Courtion	599	387.0	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	1.9	3	1.5	4	2005	3	736	1
Cour005	BC	Courtion	599	427.0	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.	2.0	3	20.1	4	2477	3	1010	1
Cour006	BC	Courtion	599	448.0	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	2.6	3	6.0	4	2639	3	770	1
Cour007	BC	Courtion	599	468.0	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.	2.3	3	18.2	4	2396	3	934	1
Cour008	BC	Courtion	599	512.0	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.			11.9	4				
Cour009	L	Courtion	599	227.1	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.	2.6	4						
Cour010	L	Courtion	599	243.9	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	2.5	4						

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Cour011	L	Courtion	599	278.0	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.	2.6	4						
Cour012	L	Courtion	599	288.7	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.	2.5	4						
Cour013	L	Courtion	599	295.4	572'410	189'420	USM	Mitt.-Sst.	2.5	4						
Cour014	L	Courtion	599	307.9	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Cour015	L	Courtion	599	315.8	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	1.9	4						
Cour016	L	Courtion	599	363.4	572'410	189'420	USM	Fein-Sst.	2.5	4						
Cour017	L	Courtion	599	369.1	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	1.9	4						
Cour018	L	Courtion	599	408.8	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Cour019	L	Courtion	599	428.3	572'410	189'420	USM	Siltstein	2.5	4						
Cour020	L	Courtion	599	498.4	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4						
Cour021	L	Courtion	599	568.5	572'410	189'420	USM	Siltstein	2.7	4						
Cour022	L	Courtion	599	584.9	572'410	189'420	USM	Schl.-Siltst.	2.6	4						
Dier001	O	Dierikon LU			671'050	216'250	OMM	Mitt.-Sst.	3.6	1	8.9	1	2595	4	890	1
Egg1001	BC	Egg ZH	545	26.5	694'820	239'740	OSM	Schl.-Siltst.	2.7	3	3.5	5	2700	3	855	1
Egg1002	BC	Egg ZH	545	166.0	694'820	239'740	OSM	Schl.-Siltst.	2.7	3	3.5	5	2635	3	820	1
Egg1003	BC	Egg ZH	545	310.0	694'820	239'740	OSM	Schl.-Siltst.	2.6	3	3.5	5	1903	3	822	1
Egg1004	BC	Egg ZH	545	366.0	694'820	239'740	OSM	Schl.-Siltst.			3.5	5				
Egg1005	BC	Egg ZH	545	434.0	694'820	239'740	OMM	Grob-Sst. mit Konglomerat	2.7	3	15.0	5	2511	3	981	1
Egg1006	BC	Egg ZH	545	486.0	694'820	239'740	OMM	Schl.-Siltst.	2.5	3	3.5	5	2676	3	836	1
Esse001	BC	Essertines-1	661	30.0	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.2	3	3.5	5	2602	3	822	1
Esse002	BC	Essertines-1	661	129.0	539'775	173'490	USM	Fein-Sst.	2.0	3	21.4	4	2352	3	1089	1
Esse003	BK	Essertines-1	661	216.6	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	3.3	1	11.0	1	2584	4	944	1
Esse004	BK	Essertines-1	661	228.6	539'775	173'490	USM	Fein-Sst.	3.0	1	8.8	1	2687	4	929	1
Esse005	BC	Essertines-1	661	237.0	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.1	3	7.0	4	2618	3	780	1
Esse006	BC	Essertines-1	661	333.0	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.4	3	3.5	5	2785	3	832	1
Esse007	L	Essertines-1	661	97.1	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Esse008	L	Essertines-1	661	102.8	539'775	173'490	USM	Siltstein	2.3	4						
Esse009	L	Essertines-1	661	128.1	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	2.4	4						
Esse010	L	Essertines-1	661	134.0	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.3	4						
Esse011	L	Essertines-1	661	152.3	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.3	4						
Esse012	L	Essertines-1	661	161.0	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	2.3	4						
Esse013	L	Essertines-1	661	183.1	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.0	4						
Esse014	L	Essertines-1	661	194.6	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.3	4						
Esse015	L	Essertines-1	661	216.2	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	2.7	4						
Esse016	L	Essertines-1	661	226.1	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	2.8	4						
Esse017	L	Essertines-1	661	254.4	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4						
Esse018	L	Essertines-1	661	294.8	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	3.1	4						
Esse019	L	Essertines-1	661	307.3	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Esse020	L	Essertines-1	661	312.3	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	3.1	4						
Esse021	L	Essertines-1	661	316.0	539'775	173'490	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4						
Esse022	L	Essertines-1	661	320.0	539'775	173'490	USM	Mitt.-Sst.	3.2	4						
Fehr001	BC	Fehraltorf	522	195.0	698'060	249'230	OSM	Fein-Sst.	2.6	3	5.0	4	2783	3	810	1
Fehr002	BK	Fehraltorf	522	379.9	698'056	249'225	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	3	3.5	1	2766	4	873	1
Fehr003	BC	Fehraltorf	522	510.0	698'060	249'230	OMM	Fein-Sst.	2.7	3	4.0	4	2636	3	806	1
Fehr004	L	Fehraltorf	522	464.9	698'060	249'230	OMM	Mitt.-Sst.	4.4	4						
Fehr005	L	Fehraltorf	522	470.1	698'060	249'230	OMM	Schl.-Siltst.	2.8	4					871	2
Fehr006	L	Fehraltorf	522	485.1	698'060	249'230	OMM	Mitt.-Sst.	4.1	4						
Fehr007	L	Fehraltorf	522	512.4	698'060	249'230	OMM	Schl.-Siltst.	2.9	4					871	2
Fehr008	L	Fehraltorf	522	532.3	698'060	249'230	OMM	Schl.-Siltst.	2.4	4					871	2
Fehr009	L	Fehraltorf	522	550.0	698'060	249'230	OMM	Grob-Sst./Kgl.	3.1	4			2181	6	1186	2
Fehr010	L	Fehraltorf	522	585.0	698'060	249'230	OMM	Mitt.-Sst.	3.5	4			2604	6	908	2
Fehr011	L	Fehraltorf	522	595.0	698'060	249'230	OMM	Mitt.-Sst.	3.5	4			2384	6	1052	2
Gldi001	O	Goldingen SG			715'150	234'700	OMM	Mitt.-Sst.	4.0	1	12.0	5	2680	1		

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Gold001	BC	Goldach	422	88.3	753'263	260'988	OSM	Fein-Sst.	2.6	3	11.0	5	2522	3	868	1
Gold002	BC	Goldach	422	173.5	753'263	260'988	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	3	3.5	5	2602	3	820	1
Gold003	BC	Goldach	422	242.0	753'263	260'988	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	3	3.5	5	2583	3	726	1
Gold004	BC	Goldach	422	350.2	753'263	260'988	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	3	3.5	5	2747	3	695	1
Gold005	BC	Goldach	422	368.0	753'263	260'988	OMM	Grob-Sst. mit Konglomerat	2.2	3	15.0	5	2343	3	988	1
Gold006	BC	Goldach	422	464.9	753'263	260'988	OMM	Mitt.-Sst.	1.9	3	12.0	5	2461	3	953	1
Gran001	O	Grandson			539'400	184'800	USM	Fein-Sst.	2.8	1	11.0	5	2030	1		
Gran002	O	Grandson			530'500	179'950	USM	Schl.-Siltst.	2.7	1	3.5	5	2425	1		
Gubr001	BK	Gubrist	585	62.2	677'310	252'755	OSM	Siltstein	2.4	1	4.0	5				
Gubr002	BK	Gubrist	585	64.1	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.	3.0	1	11.0	5				
Gubr003	BK	Gubrist	585	67.6	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.	2.7	1	11.0	5				
Gubr004	BK	Gubrist	585	70.9	677'310	252'755	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	1	3.5	5				
Gubr005	BK	Gubrist	585	73.1	677'310	252'755	OSM	Siltstein	2.2	1	4.0	5				
Gubr006	BK	Gubrist	585	83.5	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.	3.1	1	11.0	5				
Gubr007	BK	Gubrist	585	98.9	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.	3.8	1	11.0	5				
Gubr008	BK	Gubrist	586	111.8	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.			11.0	5				
Gubr009	BK	Gubrist	585	120.9	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.	3.3	1	13.2	1	2585	4		
Gubr010	BK	Gubrist	585	153.2	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.			11.0	5				
Gubr011	BK	Gubrist	585	132.5	677'310	252'755	OSM	Fein-Sst.	4.1	1	15.0	1	2538	4		
Gubr012	BK	Gubrist	585	160.5	677'310	252'755	OSM	Schl.-Siltst.	4.0	1	3.5	5				
Gubr013	BK	Gubrist	585	177.0	677'310	252'755	OSM	Schl.-Siltst.	3.3	1	3.5	5				
Gubr014	BK	Gubrist	585	191.0	677'310	252'755	OSM	Schl.-Siltst.	3.8	1	3.5	5				
Gubr015	BK	Gubrist	585	194.8	677'310	252'755	OSM	Mitt.-Sst.	3.1	1	12.0	5				
Herd001	BC	Herdern-1	527	50.0	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	3	3.0	4	2295	6	896	1
Herd002	BC	Herdern-1	527	150.0	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	2.0	3	15.2	4	2184	6	1111	1
Herd003	BC	Herdern-1	527	235.0	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	3	3.5	5	2454	6	911	1
Herd004	BC	Herdern-1	527	365.0	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	2.6	3	3.5	5	2318	6	863	1
Herd005	BC	Herdern-1	527	472.5	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	3	3.5	5	2534	6	843	1
Herd006	L	Herdern-1	527	51.4	711'308	274'597	OSM	Siltstein	2.5	4			2527	6	882	2
Herd007	L	Herdern-1	527	63.9	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.6	4			2112	6	931	2
Herd008	L	Herdern-1	527	74.4	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.6	4			1985	6	946	2
Herd009	L	Herdern-1	527	83.1	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	1.7	4			2198	6	1175	2
Herd010	L	Herdern-1	527	85.3	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.5	4			1994	6	945	2
Herd011	L	Herdern-1	527	87.2	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	1.8	4			1842	6	1407	2
Herd012	L	Herdern-1	527	116.4	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.6	4			2114	6	931	2
Herd013	L	Herdern-1	527	135.9	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.6	4			1715	6	978	2
Herd014	L	Herdern-1	527	164.0	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.7	4			2133	6	929	2
Herd015	L	Herdern-1	527	176.7	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	2.5	4			2443	6	1014	2
Herd016	L	Herdern-1	527	187.2	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.6	4			2113	6	931	2
Herd017	L	Herdern-1	527	217.3	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	1.9	4			2349	6	1075	2
Herd018	L	Herdern-1	527	219.5	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.8	4			2176	6	924	2
Herd019	L	Herdern-1	527	244.3	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.8	4			2148	6	927	2
Herd020	L	Herdern-1	527	290.2	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	2.6	4			2522	6	962	2
Herd021	L	Herdern-1	527	336.5	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.9	4			2154	6	926	2
Herd022	L	Herdern-1	527	353.1	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	2.8	4			2588	6	919	2
Herd023	L	Herdern-1	527	378.1	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	4			1841	6	963	2
Herd024	L	Herdern-1	527	405.3	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	4			2300	6	909	2
Herd025	L	Herdern-1	527	422.6	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	3.0	4			2610	6	904	2
Herd026	L	Herdern-1	527	438.4	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.8	4			1879	6	959	2
Herd027	L	Herdern-1	527	448.7	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	2.6	4			2536	6	953	2
Herd028	L	Herdern-1	527	455.3	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	1.9	4			2432	6	893	2
Herd029	L	Herdern-1	527	484.4	711'308	274'597	OSM	Fein-Sst.	2.7	4			2620	6	898	2
Herd030	L	Herdern-1	527	520.9	711'308	274'597	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4			2323	6	906	2

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Herd031	L	Herdern-1	527	545.5	711'308	274'597	OMM	Fein-Sst.	2.7	4			2525	6	960	2
Herd032	L	Herdern-1	527	577.5	711'308	274'597	OMM	Fein-Sst.	2.8	4			2533	6	955	2
Herm001	L	Hermrigen-1	542	274.5	584'600	214'890	USM	Schl.-Siltst.	2.3	4					871	2
Herm002	L	Hermrigen-1	542	294.1	584'600	214'890	USM	Schl.-Siltst.	2.8	4					871	2
Herm003	L	Hermrigen-1	542	306.4	584'600	214'890	USM	Fein-Sst.	1.9	4						
Herm004	L	Hermrigen-1	542	317.9	584'600	214'890	USM	Fein-Sst.	2.5	4						
Herm005	L	Hermrigen-1	542	333.7	584'600	214'890	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4					871	2
Herm006	L	Hermrigen-1	542	341.9	584'600	214'890	USM	Fein-Sst.	2.6	4						
Herm007	L	Hermrigen-1	542	385.0	584'600	214'890	USM	Fein-Sst.	2.8	4						
Hüne001	BC	Hünenberg-1	461	67.5	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.6	3	2.5	4	2660	6	867	2
Hüne002	BC	Hünenberg-1	461	157.5	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	3	3.5	5	2366	6	901	2
Hüne003	BC	Hünenberg-1	461	247.5	675'522	224'593	OSM	Fein-Sst.	2.2	3	16.7	4	2609	6	905	2
Hüne004	BC	Hünenberg-1	461	347.5	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	3	1.6	4	2742	4	806	1
Hüne005	BC	Hünenberg-1	461	417.5	675'522	224'593	OMM	Fein-Sst.	2.4	3	15.0	4	2455	6	1006	2
Hüne006	L	Hünenberg-1	461	21.5	675'522	224'593	OSM	Mitt.-Sst.	2.9	4			2403	6	1040	2
Hüne007	L	Hünenberg-1	461	26.1	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	4			2573	6	877	2
Hüne008	L	Hünenberg-1	461	44.4	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	1.5	4			2322	6	906	2
Hüne009	L	Hünenberg-1	461	72.5	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	4			2525	6	882	2
Hüne010	L	Hünenberg-1	461	116.4	675'522	224'593	OSM	Mitt.-Sst.	2.3	4			2361	6	1067	2
Hüne011	L	Hünenberg-1	461	153.9	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	4			2286	6	911	2
Hüne012	L	Hünenberg-1	461	194.6	675'522	224'593	OSM	Mitt.-Sst.	2.5	4			2439	6	1017	2
Hüne013	L	Hünenberg-1	461	217.4	675'522	224'593	OSM	Fein-Sst.	2.6	4			2537	6	952	2
Hüne014	L	Hünenberg-1	461	259.8	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	4			2440	6	892	2
Hüne015	L	Hünenberg-1	461	291.8	675'522	224'593	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2470	6	889	2
Hüne016	L	Hünenberg-1	461	370.9	675'522	224'593	OSM	Fein-Sst.	2.4	4			2515	6	967	2
Hüne017	L	Hünenberg-1	461	381.8	675'522	224'593	OMM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2430	6	894	2
Hüne018	L	Hünenberg-1	461	405.4	675'522	224'593	OMM	Schl.-Siltst.	2.2	4			2460	6	890	2
Hüne019	L	Hünenberg-1	461	426.2	675'522	224'593	OMM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2576	6	877	2
Hüne020	L	Hünenberg-1	461	435.7	675'522	224'593	OMM	Grob-Sst.	3.0	4			2477	6	992	2
Hüne021	L	Hünenberg-1	461	480.0	675'522	224'593	OMM	Schl.-Siltst.	2.0	4			2469	6	889	2
Hüne022	L	Hünenberg-1	461	532.5	675'522	224'593	OMM	Fein-Sst.	3.0	4			2599	6	912	2
Hüne023	L	Hünenberg-1	461	542.5	675'522	224'593	OMM	Fein-Sst.	3.1	4			2639	6	886	2
Hüne024	L	Hünenberg-1	461	575.0	675'522	224'593	OMM	Fein-Sst.	3.0	4			2414	6	1033	2
Jona001	O	Jona			705'850	231'950	OMM	Mitt.-Sst.	3.1	1	15.3	1	2491	4	1006	1
Kre1001	L	Kreuzlingen-1	539	56.6	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	1.4	4					871	2
Kre1002	L	Kreuzlingen-1	539	73.0	729'200	276'170	OSM	Fein-Sst.	2.0	4						
Kre1003	L	Kreuzlingen-1	539	83.8	729'200	276'170	OSM	Fein-Sst.	2.1	4						
Kre1004	L	Kreuzlingen-1	539	96.1	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	1.6	4					871	2
Kre1005	L	Kreuzlingen-1	539	111.5	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	1.7	4					871	2
Kre1006	L	Kreuzlingen-1	539	130.9	729'200	276'170	OSM	Fein-Sst.	1.6	4						
Kre1007	L	Kreuzlingen-1	539	173.0	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	4					871	2
Kre1008	L	Kreuzlingen-1	539	181.2	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	4					871	2
Kre1009	L	Kreuzlingen-1	539	225.1	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4					871	2
Kre1010	L	Kreuzlingen-1	539	250.0	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	4					871	2
Kre1011	L	Kreuzlingen-1	539	286.2	729'200	276'170	OSM	Fein-Sst.	2.8	4						
Kre1012	L	Kreuzlingen-1	539	319.5	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	4					871	2
Kre1013	L	Kreuzlingen-1	539	350.2	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	1.7	4					871	2
Kre1014	L	Kreuzlingen-1	539	412.4	729'200	276'170	OSM	Fein-Sst.	2.6	4						
Kre1015	L	Kreuzlingen-1	539	420.0	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4					871	2
Kre1016	L	Kreuzlingen-1	539	474.1	729'200	276'170	OSM	Fein-Sst.	2.5	4						
Kre1017	L	Kreuzlingen-1	539	488.2	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	1.9	4					871	2
Kre1018	L	Kreuzlingen-1	539	494.7	729'200	276'170	OSM	Fein-Sst.	2.5	4						
Kre1019	L	Kreuzlingen-1	539	501.6	729'200	276'170	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	4					871	2

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Kre2001	BC	Kreuzlingen-2	417	80.0	730'650	278'850	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	3	3.5	5	2660	3	789	1
Kre2002	BC	Kreuzlingen-2	417	165.0	730'650	278'850	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	3	3.5	5	2698	3	789	1
Kre2003	BC	Kreuzlingen-2	417	257.5	730'650	278'850	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	3	3.5	5	2689	3	883	1
Kre2004	BC	Kreuzlingen-2	417	357.5	730'650	278'850	OSM	Schl.-Siltst.	2.6	3	3.5	5	2698	3	764	1
Kre2005	BK	Kreuzlingen-2	417	461.9	730'650	278'850	OMM	Mitt.-Sst.	3.3	1	14.3	1	2543	4	973	1
Kre2006	BK	Kreuzlingen-2	417	470.0	730'650	278'850	OMM	Mitt.-Sst.	2.8	1	19.3	1	2461	4	1030	1
Kre2007	BC	Kreuzlingen-2	417	472.5	730'650	278'850	OMM	Fein-Sst.	2.4	3	11.0	5	2388	3	994	1
Krie001	O	Kriens LU			660'870	210'000	OMM	Fein-Sst.	3.3	1	4.1	2	2601	1		
Krie002	O	Kriens LU			661'070	209'700	OMM	Fein-Sst.	2.9	1	11.0	5	2460	1		
Krie003	O	Kriens LU			660'360	208'940	USM	Grob-Sst.	3.1	1	6.6	2	2626	1	819	1
Krie004	O	Kriens LU			662'930	209'870	USM	Fein-Sst.	2.2	1	12.3	2	2563	1		
Küsn001	BC	Küsnacht-1	642	55.0	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.6	3	11.0	5	2531	3	922	1
Küsn002	BC	Küsnacht-1	642	132.5	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.4	3	12.6	4	2557	3	968	1
Küsn003	BC	Küsnacht-1	642	261.3	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	3	4.4	4	2511	3	884	1
Küsn004	BC	Küsnacht-1	642	316.3	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.5	3	8.3	4	2596	3	925	1
Küsn005	BC	Küsnacht-1	642	480.0	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	3	3.5	5	2698	3	856	1
Küsn006	L	Küsnacht-1	642	139.3	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	4						
Küsn007	L	Küsnacht-1	642	142.9	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.7	4						
Küsn008	L	Küsnacht-1	642	155.3	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.7	4						
Küsn009	L	Küsnacht-1	642	161.0	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.4	4						
Küsn010	L	Küsnacht-1	642	173.5	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Küsn011	L	Küsnacht-1	642	178.1	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.6	4						
Küsn012	L	Küsnacht-1	642	197.3	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	4						
Küsn013	L	Küsnacht-1	642	217.2	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.6	4						
Küsn014	L	Küsnacht-1	642	219.7	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	4						
Küsn015	L	Küsnacht-1	642	255.4	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	2.6	4						
Küsn016	L	Küsnacht-1	642	279.6	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.8	4						
Küsn017	L	Küsnacht-1	642	326.9	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	3.2	4						
Küsn018	L	Küsnacht-1	642	353.5	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	3.2	4						
Küsn019	L	Küsnacht-1	642	387.3	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	4						
Küsn020	L	Küsnacht-1	642	433.5	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	3.1	4						
Küsn021	L	Küsnacht-1	642	449.9	689'296	241'485	OSM	Fein-Sst.	3.4	4						
Küsn022	L	Küsnacht-1	642	468.3	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	4						
Küsn023	L	Küsnacht-1	642	512.0	689'296	241'485	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	4						
Küsn024	L	Küsnacht-1	642	565.0	689'296	241'485	OMM	Mitt.-Sst.	3.3	4						
Küsn025	L	Küsnacht-1	642	595.0	689'296	241'485	OMM	Mitt.-Sst.	2.9	4						
Lind001	BC	Lindau-1	516	22.5	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.5	3	3.0	4	2745	4	729	1
Lind002	BC	Lindau-1	516	142.5	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	3	3.5	5	2747	3	763	1
Lind003	BC	Lindau-1	516	242.5	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	3	3.5	5	2660	3	802	1
Lind004	BC	Lindau-1	516	322.5	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	3	3.5	5	2631	3	787	1
Lind005	BC	Lindau-1	516	382.5	692'815	255'098	OMM	Mitt.-Sst.	2.6	3	15.6	4	2334	3	1016	1
Lind006	BC	Lindau-1	516	442.5	692'815	255'098	OMM	Mitt.-Sst.	2.7	3	18.6	4	2522	4	992	1
Lind007	L	Lindau-1	516	34.9	692'815	255'098	OSM	Fein-Sst.	2.1	4						
Lind008	L	Lindau-1	516	55.0	692'815	255'098	OSM	Fein-Sst.	2.1	4						
Lind009	L	Lindau-1	516	90.0	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Lind010	L	Lindau-1	516	127.2	692'815	255'098	OSM	Fein-Sst.	1.5	4						
Lind011	L	Lindau-1	516	213.5	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Lind012	L	Lindau-1	516	229.7	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.1	4						
Lind013	L	Lindau-1	516	246.0	692'815	255'098	OSM	Fein-Sst.	2.5	4						
Lind014	L	Lindau-1	516	316.5	692'815	255'098	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Lind015	L	Lindau-1	516	329.5	692'815	255'098	OSM	Mitt.-Sst.	2.7	4						
Lind016	L	Lindau-1	516	410.2	692'815	255'098	OMM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Lind017	L	Lindau-1	516	457.5	692'815	255'098	OMM	Mitt.-Sst.	2.8	4						



Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Lind018	L	Lindau-1	516	492.5	692'815	255'098	OMM	Mitt.-Sst.	3.0	4						
Lind019	L	Lindau-1	516	540.0	692'815	255'098	OMM	Mitt.-Sst.	3.7	4						
Lind020	L	Lindau-1	516	556.0	692'815	255'098	OMM	Mitt.-Sst.	3.4	4						
Line001	BC	Linden-1	881	61.5	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst. mit Konglomerat	2.6	3	15.0	5	2522	4	960	1
Line002	BC	Linden-1	881	184.5	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst. mit Konglomerat	2.9	3	15.0	5	2496	3	945	1
Line003	BC	Linden-1	881	263.5	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst. mit Konglomerat	2.9	3	15.0	5	2522	4	963	1
Line004	BC	Linden-1	881	358.5	617'705	188'567	OMM	Fein.-Sst.	4.0	3	6.6	4	2653	4	852	1
Line005	BC	Linden-1	881	485.5	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst. mit Konglomerat	3.3	3	9.6	4	2654	3	879	1
Line006	L	Linden-1	881	357.5	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst./Kgl.	3.7	4						
Line007	L	Linden-1	881	392.5	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst./Kgl.	3.3	4						
Line008	L	Linden-1	881	418.9	617'705	188'567	OMM	Schl.-Siltst.	2.5	4						
Line009	L	Linden-1	881	440.0	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst./Kgl.	4.5	4						
Line010	L	Linden-1	881	468.4	617'705	188'567	OMM	Schl.-Siltst.	3.1	4						
Line011	L	Linden-1	881	525.0	617'705	188'567	OMM	Grob.-Sst./Kgl.	3.8	4						
Line012	L	Linden-1	881	551.9	617'705	188'567	OMM	Schl.-Siltst.	3.5	4						
Line013	L	Linden-1	881	574.8	617'705	188'567	OMM	Schl.-Siltst.	3.1	4						
Litt001	O	Littau LU			660'860	210'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.7	1	12.0	5	2760	1	819	1
Litt002	O	Littau LU			660'900	210'220	OMM	Fein.-Sst.	3.5	1	1.5	2	2695	1	668	1
Litt003	O	Littau LU			660'900	210'280	OMM	Mitt.-Sst.	4.2	2	6.4	1	2664	4	874	1
Lngb001	BK	Längenbold LU	418	15.3	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.7	1	4.2	2	2692	3	813	1
Lngb002	BK	Längenbold LU	418	19.7	671'043	217'340	OMM	Schl.-Siltst.	3.2	1	5.5	2	2680	3	784	1
Lngb003	BK	Längenbold LU	418	27.5	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.4	1	3.4	2	2718	3	791	1
Lngb004	BK	Längenbold LU	418	33.9	671'043	217'340	OMM	Schl.-Siltst.	2.9	1	5.3	2	2683	3	842	1
Lngb005	BK	Längenbold LU	418	36.1	671'043	217'340	OMM	Schl.-Siltst.	2.9	1	4.7	2	2700	3	822	1
Lngb006	BK	Längenbold LU	418	44.8	671'043	217'340	OMM	Schl.-Siltst.	3.3	1	4.6	2	2678	3	835	1
Lngb007	BK	Längenbold LU	418	50.6	671'043	217'340	OMM	Schl.-Siltst.	3.4	1	5.2	2	2720	3	786	1
Lngb008	BK	Längenbold LU	418	54.4	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	4.0	1	5.7	2	2678	3	854	1
Lngb009	BK	Längenbold LU	418	57.3	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.1	1	5.3	2	2687	3	789	1
Lngb010	BK	Längenbold LU	418	66.4	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	2.7	1	7.3	2	2656	3	797	1
Lngb011	BK	Längenbold LU	418	74.0	671'043	217'340	OMM	Mitt.-Sst.	4.3	1	7.3	2	2650	3	844	1
Lngb012	BK	Längenbold LU	418	83.3	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.8	1	4.9	2	2646	3	817	1
Lngb013	BK	Längenbold LU	418	90.0	671'043	217'340	OMM	Mitt.-Sst.	4.6	1	7.6	2	2633	3	849	1
Lngb014	BK	Längenbold LU	418	98.0	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.6	1	1.2	2	2735	3	757	1
Lngb015	BK	Längenbold LU	418	110.3	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.9	1	7.8	2	2618	3	865	1
Lngb016	BK	Längenbold LU	418	117.6	671'043	217'340	OMM	Mitt.-Sst.	4.1	1	5.3	2	2664	3	805	1
Lngb017	BK	Längenbold LU	418	126.1	671'043	217'340	OMM	Mitt.-Sst.	3.8	1	8.2	2	2632	3	857	1
Lngb018	BK	Längenbold LU	418	134.1	671'043	217'340	OMM	Mitt.-Sst.	3.9	1	11.8	2	2569	3	916	1
Lngb019	BK	Längenbold LU	418	136.2	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.4	1	6.4	2	2691	3	842	1
Lngb020	BK	Längenbold LU	418	142.1	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.5	1	5.2	2	2705	3	818	1
Lngb021	BK	Längenbold LU	418	145.8	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	4.6	1	4.3	2	2706	3	798	1
Lngb022	BK	Längenbold LU	418	147.3	671'043	217'340	OMM	Mitt.-Sst.	4.7	1	7.4	2	2602	3	823	1
Lngb023	BK	Längenbold LU	418	151.2	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.5	1	6.5	2	2618	3	851	1
Lngb024	BK	Längenbold LU	418	154.0	671'043	217'340	OMM	Fein.-Sst.	3.8	1	3.0	2	2688	3	797	1
Lufi001	BC	Lufingen	470	35.0	686'900	260'550	OSM	Schl.-Siltst.								
Lufi002	BC	Lufingen	470	75.0	686'900	260'550	OSM	Schl.-Siltst.								
Lufi003	BC	Lufingen	470	111.0	686'900	260'550	OMM	Grob.-Sst./Kgl.								
Lufi004	BC	Lufingen	470	162.0	686'900	260'550	OMM	Mitt.-Sst.								
Lufi005	BC	Lufingen	470	216.0	686'900	260'550	OMM	Mitt.-Sst.								
Lufi006	BC	Lufingen	470	246.0	686'900	260'550	OMM	Mitt.-Sst.								
Made001	BC	Madetswil ZH	670	125.0	702'330	252'440	OSM	Grob.-Sst. mit Konglomerat	2.8	3	15.0	5	2573	4	993	1
Malt001	O	Malters LU			658'150	209'020	OMM	Grob.-Sst.	3.2	1	7.5	2	2555	1		
Marg001	O	St. Margrethen			766'580	257'000	USM	Mitt.-Sst.	3.5	1	6.2	1	2647	4	862	1

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Marg002	O	St. Margrethen			765'560	256'500	USM	Mitt.-Sst.	3.3	1	11.7	2	2637	1		
Meie001	O	Meierskappel LU			676'070	219'830	OMM	Fein-Sst.	3.8	2	10.0	1	2575	4	927	1
Meie002	O	Meierskappel LU			676'150	220'700	OMM	Fein-Sst.	3.7	1	11.0	5	2740	1		
Menz001	O	Menzingen ZG			689'870	225'600	OMM	Mitt.-Sst.	3.5	1	12.0	5	2670	1		
Mona001	BC	Mönchaltorf ZH	446		697'020	241'125	OSM	Grob-Sst. mit Konglomerat	2.2	3	15.0	5	2485	3	994	
Mona002	BC	Mönchaltorf ZH	446		697'020	241'125	OSM	Grob-Sst. mit Konglomerat	2.8	3	15.0	5	2611	3	990	
Oetw001	BC	Oetwil a.L.	430	121.0	672'380	253'510	OMM	Fein-Sst.	2.6	3	11.0	5	2387	3	933	1
Orbe001	O	Orbe			530'250	174'500	USM	Grob-Sst.	3.2	1	12.0	5	2720	1		
Orbe002	O	Orbe			529'300	175'300	USM	Fein-Sst.	2.9	1	11.0	5	2770	1		
Otf001	BC	Otelfingen	455	45.0	671'450	257'550	OMM	Fein-Sst.			11.0	5				
Otf002	BC	Otelfingen	455	102.0	671'450	257'550	OMM	Fein-Sst.			11.0	5				
Pfa1001	BK	Pfaffnau-1	500	475.5	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.3	1	15.5	4				
Pfa1002	BK	Pfaffnau-1	500	475.5	632'708	231'789	USM	Fein-Sst.	3.0	1	15.5	4				
Pfa1003	BK	Pfaffnau-1	500	478.5	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.5	1	14.9	4				
Pfa1004	BK	Pfaffnau-1	500	478.5	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.8	1	25.9	1	2357	4	1142	1
Pfa1005	BK	Pfaffnau-1	500	481.2	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	1.8	1	18.9	4				
Pfa1006	BK	Pfaffnau-1	500	481.2	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.7	1	18.9	4				
Pfa1007	L	Pfaffnau-1	500	35.8	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.1	4						
Pfa1008	L	Pfaffnau-1	500	52.5	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	1.7	4						
Pfa1009	L	Pfaffnau-1	500	65.0	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.2	4						
Pfa1010	L	Pfaffnau-1	500	78.2	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	1.7	4						
Pfa1011	L	Pfaffnau-1	500	81.2	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	1.5	4						
Pfa1012	L	Pfaffnau-1	500	86.1	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.3	4						
Pfa1013	L	Pfaffnau-1	500	106.4	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	1.7	4						
Pfa1014	L	Pfaffnau-1	500	108.2	632'708	231'789	USM	Fein-Sst.	2.6	4						
Pfa1015	L	Pfaffnau-1	500	139.0	632'708	231'789	USM	Fein-Sst.	2.3	4						
Pfa1016	L	Pfaffnau-1	500	163.9	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.0	4						
Pfa1017	L	Pfaffnau-1	500	186.3	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.6	4						
Pfa1018	L	Pfaffnau-1	500	196.1	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.6	4						
Pfa1019	L	Pfaffnau-1	500	227.8	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	1.7	4						
Pfa1020	L	Pfaffnau-1	500	248.2	632'708	231'789	USM	Grob-Sst.	2.8	4						
Pfa1021	L	Pfaffnau-1	500	263.7	632'708	231'789	USM	Grob-Sst.	2.5	4						
Pfa1022	L	Pfaffnau-1	500	279.1	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.3	4						
Pfa1023	L	Pfaffnau-1	500	300.8	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4						
Pfa1024	L	Pfaffnau-1	500	318.0	632'708	231'789	USM	Grob-Sst.	2.6	4						
Pfa1025	L	Pfaffnau-1	500	382.5	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.5	4						
Pfa1026	L	Pfaffnau-1	500	389.8	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Pfa1027	L	Pfaffnau-1	500	395.1	632'708	231'789	USM	Grob-Sst.	2.8	4						
Pfa1028	L	Pfaffnau-1	500	412.5	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.2	4						
Pfa1029	L	Pfaffnau-1	500	428.2	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4						
Pfa1030	L	Pfaffnau-1	500	478.5	632'708	231'789	USM	Grob-Sst.	2.9	4						
Pfa1031	L	Pfaffnau-1	500	487.5	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.6	4						
Pfa1032	L	Pfaffnau-1	500	541.1	632'708	231'789	USM	Mitt.-Sst.	2.7	4						
Pfa1033	L	Pfaffnau-1	500	570.1	632'708	231'789	USM	Schl.-Siltst.	2.7	4						
Pfä001	O	Pfäffikon SZ	616		702'550	228'500	USM	Grob-Sst.	2.1	1	16.1	2	2581	1	820	1
PfaS001	L	Pfaffnau-Süd	616	225.0	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.4	4						
PfaS002	L	Pfaffnau-Süd	616	255.9	634'950	228'120	OMM	Grob-Sst.	2.4	4						
PfaS003	L	Pfaffnau-Süd	616	245.0	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.5	4						
PfaS004	L	Pfaffnau-Süd	616	295.0	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.5	4						
PfaS005	L	Pfaffnau-Süd	616	315.0	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.4	4						
PfaS006	L	Pfaffnau-Süd	616	335.0	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.5	4						
PfaS007	L	Pfaffnau-Süd	616	355.0	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.7	4						
PfaS008	L	Pfaffnau-Süd	616	375.0	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.6	4			2305	6	1104	2

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
PfaS009	L	Pfaffnau-Süd	616	385.2	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.5	4			2384	6	1053	2
PfaS010	L	Pfaffnau-Süd	616	432.6	634'950	228'120	OMM	Schl.-Siltst.	2.5	4			2435	6	893	2
PfaS011	L	Pfaffnau-Süd	616	447.3	634'950	228'120	OMM	Mitt.-Sst.	2.6	4			2338	6	1083	2
PfaS012	L	Pfaffnau-Süd	616	492.5	634'950	228'120	USM	Schl.-Siltst.	2.7	4			2430	6	894	2
PfaS013	L	Pfaffnau-Süd	616	516.3	634'950	228'120	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2420	6	895	2
PfaS014	L	Pfaffnau-Süd	616	542.5	634'950	228'120	USM	Schl.-Siltst.	2.7	4			2458	6	890	2
PfaS015	L	Pfaffnau-Süd	616	559.9	634'950	228'120	USM	Mitt.-Sst.	2.6	4			2276	6	1124	2
PfaS016	L	Pfaffnau-Süd	616	587.4	634'950	228'120	USM	Schl.-Siltst.	2.6	4			2475	6	888	2
Pfs2001	BC	Pfaffnau-Süd-2	697	35.0	635'408	228'782	OMM	Grob.-Sst. mit Konglomerat	3.1	3	15.0	5	2573	3	961	1
Pfs2002	BC	Pfaffnau-Süd-2	697	135.0	635'408	228'782	OMM	Mitt.-Sst.	2.9	3	12.0	5	2531	3	874	1
Pfs2003	BC	Pfaffnau-Süd-2	697	260.0	635'408	228'782	OMM	Mitt.-Sst.	2.4	3	18.7	4	2269	3	923	1
Pfs2004	BC	Pfaffnau-Süd-2	697	345.0	635'408	228'782	OMM	Mitt.-Sst.	2.5	3	17.6	4	2525	3	948	1
Pfs2005	BC	Pfaffnau-Süd-2	697	452.5	635'408	228'782	USM	Fein-Sst.	2.8	3	12.1	4	2438	6		
Roma001	BC	Romanenes-1	947	182.0	564'200	167'400	OMM	Mitt.-Sst.	3.0	3	12.0	5	2683	3	905	1
Roma002	BC	Romanenes-1	947	232.0	564'200	167'400	OMM	Schl.-Siltst.	2.8	3	3.5	5	2870	3	703	1
Roma003	BC	Romanenes-1	947	258.0	564'200	167'400	OMM	Schl.-Siltst.	2.5	3	3.5	5	2665	3	776	1
Roma004	BC	Romanenes-1	947	302.0	564'200	167'400	OMM	Grob.-Sst. mit Konglomerat	2.4	3	19.6	4	2323	6		
Roma005	BC	Romanenes-1	947	412.0	564'200	167'400	USM	Siltstein	2.0	3	4.9	4	2453	6		
Roma006	BC	Romanenes-1	947	477.0	564'200	167'400	USM	Schl.-Siltst.	2.8	3	3.5	5	2502	6		
Roma007	L	Romanenes-1	947	310.0	564'200	167'400	OMM	Grob.-Sst./Kgl.	2.4	4			2308	6	1102	2
Roma008	L	Romanenes-1	947	327.3	564'200	167'400	OMM	Siltstein	3.1	4			2361	6	902	2
Roma009	L	Romanenes-1	947	351.5	564'200	167'400	OMM	Grob.-Sst./Kgl.	3.0	4			2322	6	1093	2
Roma010	L	Romanenes-1	947	375.0	564'200	167'400	USM	Schl.-Siltst.	2.7	4			2270	6	913	2
Roma011	L	Romanenes-1	947	397.5	564'200	167'400	USM	Schl.-Siltst.	2.8	4			2299	6	909	2
Roma012	L	Romanenes-1	947	415.0	564'200	167'400	USM	Schl.-Siltst.	2.8	4			2508	6	885	2
Roma013	L	Romanenes-1	947	429.5	564'200	167'400	USM	Grob.-Sst.	2.9	4			2495	6	980	2
Roma014	L	Romanenes-1	947	456.0	564'200	167'400	USM	Grob.-Sst.	3.1	4			2462	6	1002	2
Roma015	L	Romanenes-1	947	481.7	564'200	167'400	USM	Schl.-Siltst.	2.6	4			2371	6	901	2
Roma016	L	Romanenes-1	947	505.0	564'200	167'400	USM	Schl.-Siltst.	2.6	4			2377	6	900	2
Roma017	L	Romanenes-1	947	569.2	564'200	167'400	USM	Mitt.-Sst.	3.5	4			2523	6	962	2
Roma018	L	Romanenes-1	947	592.0	564'200	167'400	USM	Grob.-Sst.	2.8	4			2036	6	1281	2
Root001	BK	Root LU	420	8.7	671'100	217'300	OMM	Siltstein	2.8	2	4.0	5	2674	1	847	1
Root002	BK	Root LU	420	8.9	671'100	217'300	OMM	Siltstein	2.3	2	4.0	5	2552	1	812	1
Root003	BK	Root LU	420	9.4	671'100	217'300	OMM	Siltstein	2.0	2	4.0	5	2526	1	805	1
Rupp006	BK	Ruppoldsried	481	383.9	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.9	1	3.0	4	2537	6	881	2
Rupp007	L	Ruppoldsried	481	30.0	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	1.8	4					871	2
Rupp008	L	Ruppoldsried	481	57.8	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	1.7	4					871	2
Rupp009	L	Ruppoldsried	481	68.5	599'450	215'600	USM	Fein-Sst.	2.0	4						
Rupp010	L	Ruppoldsried	481	102.0	599'450	215'600	USM	Siltstein	2.2	4					871	2
Rupp011	L	Ruppoldsried	481	127.0	599'450	215'600	USM	Fein-Sst.	2.4	4						
Rupp012	L	Ruppoldsried	481	164.8	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.0	4					871	2
Rupp013	L	Ruppoldsried	481	172.0	599'450	215'600	USM	Fein-Sst.	2.6	4						
Rupp014	L	Ruppoldsried	481	198.8	599'450	215'600	USM	Fein-Sst.	2.7	4						
Rupp015	L	Ruppoldsried	481	213.3	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.0	4					871	2
Rupp016	L	Ruppoldsried	481	225.0	599'450	215'600	USM	Mitt.-Sst.	2.6	4						
Rupp017	L	Ruppoldsried	481	271.1	599'450	215'600	USM	Siltstein	2.3	4					871	2
Rupp018	L	Ruppoldsried	481	282.5	599'450	215'600	USM	Siltstein	2.5	4					871	2
Rupp019	L	Ruppoldsried	481	335.0	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.5	4			2488	6	887	2
Rupp020	L	Ruppoldsried	481	385.0	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.3	4			2537	6	881	2
Rupp021	L	Ruppoldsried	481	425.0	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.5	4			2533	6	881	2
Rupp022	L	Ruppoldsried	481	485.0	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.5	4			2471	6	889	2
Rupp023	L	Ruppoldsried	481	565.0	599'450	215'600	USM	Siltstein	2.9	4			2594	6	874	2
Rupp024	L	Ruppoldsried	481	585.0	599'450	215'600	USM	Schl.-Siltst.	2.5	4			2516	6	884	2

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Scha001	BK	Schafisheim	412	294.4	653'620	246'760	USM	Mitt.-Sst.	3.0	1	9.5	1	2584	4	897	1
Scha002	BK	Schafisheim	412	300.2	653'620	246'760	USM	Fein-Sst.	2.6	1	11.0	5				
Scha003	BK	Schafisheim	412	303.7	653'620	246'760	USM	Schl.-Siltst.	2.0	1	9.6	1	2645	4	948	1
Scha004	BK	Schafisheim	412	309.7	653'620	246'760	USM	Schl.-Siltst.			3.5	5				
Scha005	BK	Schafisheim	412	311.4	653'620	246'760	USM	Schl.-Siltst.	2.4	1	10.6	1	2672	4	892	1
Scha006	L	Schafisheim	412	332.5	653'620	246'760	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2556	6	879	2
Scha007	L	Schafisheim	412	353.2	653'620	246'760	USM	Fein-Sst.	2.5	4			2312	6	1099	2
Scha008	L	Schafisheim	412	360.3	653'620	246'760	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2572	6	877	2
Scha009	L	Schafisheim	412	387.6	653'620	246'760	USM	Fein-Sst.	3.0	4			2484	6	987	2
Scha010	L	Schafisheim	412	421.4	653'620	246'760	USM	Fein-Sst.	2.4	4			2455	6	1006	2
Scha011	L	Schafisheim	412	424.7	653'620	246'760	USM	Schl.-Siltst.	2.6	4			2591	6	875	2
Scha012	L	Schafisheim	412	448.0	653'620	246'760	USM	Fein-Sst.	2.6	4			2384	6	1052	2
Scha013	L	Schafisheim	412	488.7	653'620	246'760	USM	Siltstein	2.7	4			2594	6	874	2
Scha014	L	Schafisheim	412	495.6	653'620	246'760	USM	Fein-Sst.	2.6	4			2331	6	1087	2
Scha015	L	Schafisheim	412	514.5	653'620	246'760	USM	Fein-Sst.	2.8	4			2471	6	996	2
Scha016	L	Schafisheim	412	550.6	653'620	246'760	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2453	6	891	2
Sonn001	ST	Sonnenberg LU		5.0	664'975	210'100	OMM	Mitt.-Sst.	3.0	1	12.0	5				
Sonn002	ST	Sonnenberg LU		10.0	664'925	210'225	OMM	Fein-Sst.	3.1	1	11.0	5				
Sonn003	BK	Sonnenberg LU		80.0	664'850	210'460	USM	Schl.-Siltst.	2.7	2	5.1	1	2746	4	889	1
Sonn004	BK	Sonnenberg LU		90.0	664'770	210'660	USM	Mitt.-Sst.	3.3	1	10.0	1	2602	4	883	1
Sonn005	BK	Sonnenberg LU		70.0	664'600	211'080	OMM	Fein-Sst.	3.6	1	4.6	1	2736	4	833	1
Sonn006	BK	Sonnenberg LU		70.0	664'560	211'200	USM	Schl.-Siltst.	3.2	2	6.9	1	2713	4	898	1
Thal001	BC	Thalwil	445	127.0	685'960	237'730	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	3	3.5	5				
Thon001	BC	Thônex	428	85.5	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	1.9	3	3.5	5	2614	3	870	1
Thon002	BC	Thônex	428	183.0	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.2	3	3.5	5	2776	3	861	1
Thon003	BC	Thônex	428	267.0	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.3	3	3.5	5	2654	3	860	1
Thon004	BC	Thônex	428	327.0	505'270	117'450	USM	Fein-Sst.	1.9	3	16.7	4	2391	3	1049	1
Thon005	BC	Thônex	428	387.0	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.2	3	3.5	5	2656	3	884	1
Thon006	BC	Thônex	428	453.0	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.3	3	3.5	5	2490	3	846	1
Thon007	BC	Thônex	428	510.0	505'270	117'450	USM	Fein-Sst.	2.0	3	19.8	4	2491	3	1078	1
Thon008	BC	Thônex	428	570.0	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.2	3	3.5	5	2618	3	860	1
Thon009	BC	Thônex	428	630.0	505'270	117'450	USM	Fein-Sst.	2.3	3	11.0	5	2640	3	948	1
Thon010	L	Thônex	428	154.0	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	1.7	4					871	2
Thon011	L	Thônex	428	175.9	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.0	4					871	2
Thon012	L	Thônex	428	192.5	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	1.5	4					871	2
Thon013	L	Thônex	428	203.2	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.0	4					871	2
Thon014	L	Thônex	428	219.4	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.2	4					871	2
Thon015	L	Thônex	428	228.1	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.2	4					871	2
Thon016	L	Thônex	428	244.7	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4					871	2
Thon017	L	Thônex	428	278.5	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.3	4					871	2
Thon018	L	Thônex	428	282.7	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	1.4	4					871	2
Thon019	L	Thônex	428	290.0	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.2	4					871	2
Thon020	L	Thônex	428	338.5	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.6	4					871	2
Thon021	L	Thônex	428	350.0	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.5	4					871	2
Thon022	L	Thônex	428	368.4	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4					871	2
Thon023	L	Thônex	428	435.8	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.1	4					871	2
Thon024	L	Thônex	428	464.3	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	1.5	4					871	2
Thon025	L	Thônex	428	495.9	505'270	117'450	USM	Fein-Sst.	3.1	4						
Thon026	L	Thônex	428	514.5	505'270	117'450	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4					871	2
Thon027	L	Thônex	428	530.3	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.0	4					871	2
Thon028	L	Thônex	428	579.1	505'270	117'450	USM	Siltstein	3.1	4					871	2
Thon029	L	Thônex	428	595.2	505'270	117'450	USM	Fein-Sst.	3.1	4						
Tief001	L	Tiefenbrunnen	408	345.0	684'200	245'350	OMM	Grob-Sst./Kgl.	2.8	4			2578	6	926	2

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Tief002	L	Tiefenbrunnen	408	357.0	684'200	245'350	OMM	Schl.-Siltst.	1.8	4			2406	6	897	2
Tief003	L	Tiefenbrunnen	408	368.0	684'200	245'350	OMM	Siltstein	1.9	4			2458	6	890	2
Tief004	L	Tiefenbrunnen	408	386.2	684'200	245'350	OMM	Schl.-Siltst.	1.9	4			2407	6	896	2
Tief005	L	Tiefenbrunnen	408	424.3	684'200	245'350	OMM	Mitt.-Sst.	2.8	4			2482	6	988	2
Tief006	L	Tiefenbrunnen	408	453.4	684'200	245'350	OMM	Schl.-Siltst.	2.7	4			2615	6	872	2
Tief007	L	Tiefenbrunnen	408	483.9	684'200	245'350	OMM	Schl.-Siltst.	2.4	4			2483	6	887	2
Tief008	L	Tiefenbrunnen	408	490.1	684'200	245'350	OMM	Fein-Sst.	2.4	4			2445	6	1013	2
Tief009	L	Tiefenbrunnen	408	545.0	684'200	245'350	OMM	Fein-Sst.	2.9	4			2542	6	949	2
Tief010	L	Tiefenbrunnen	408	561.8	684'200	245'350	OMM	Grob-Sst./Kgl.	3.2	4			2519	6	964	2
Tief011	L	Tiefenbrunnen	408	585.0	684'200	245'350	OMM	Fein-Sst.	2.5	4			2513	6	968	2
Tief012	L	Tiefenbrunnen	408	592.0	684'200	245'350	OMM	Fein-Sst.	2.8	4			2549	6	945	2
Tsch001	BC	Tschugg-1	462	27.0	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.2	3	20.5	4	2481	3	1005	1
Tsch002	BC	Tschugg-1	462	110.0	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.4	3	9.0	4	2453	3	878	1
Tsch003	BC	Tschugg-1	462	210.0	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.0	3	16.2	4	2371	3	1023	1
Tsch004	BC	Tschugg-1	462	300.0	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.1	3	3.5	5	2629	3	739	1
Tsch005	BK	Tschugg-1	462	363.6	572'610	207'910	USM	Mitt.-Sst.	2.9	1	6.2	4	2482	5		
Tsch006	BK	Tschugg-1	462	422.0	572'610	207'910	USM	Mitt.-Sst.	2.7	1	10.8	1	2569	4	937	1
Tsch007	BK	Tschugg-1	462	471.6	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.3	3	6.2	4	2462	5		
Tsch008	BC	Tschugg-1	462	501.0	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.1	3	3.5	5	2823	3	846	1
Tsch009	L	Tschugg-1	462	32.6	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.1	4						
Tsch010	L	Tschugg-1	462	50.8	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.1	4						
Tsch011	L	Tschugg-1	462	58.6	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.0	4						
Tsch012	L	Tschugg-1	462	74.7	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	1.8	4					871	2
Tsch013	L	Tschugg-1	462	94.9	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.3	4						
Tsch014	L	Tschugg-1	462	111.1	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4					871	2
Tsch015	L	Tschugg-1	462	120.1	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.5	4						
Tsch016	L	Tschugg-1	462	155.0	572'610	207'919	USM	Mitt.-Sst.	2.4	4						
Tsch017	L	Tschugg-1	462	197.5	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.3	4						
Tsch018	L	Tschugg-1	462	228.7	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.4	4					871	2
Tsch019	L	Tschugg-1	462	266.8	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.6	4						
Tsch020	L	Tschugg-1	462	277.7	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.3	4					871	2
Tsch021	L	Tschugg-1	462	284.3	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.8	4			2374	6	1059	2
Tsch022	L	Tschugg-1	462	298.6	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4			2185	6	923	2
Tsch023	L	Tschugg-1	462	314.3	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	3.1	4			2434	6	1020	2
Tsch024	L	Tschugg-1	462	336.0	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	1.9	4			1875	6	959	2
Tsch025	L	Tschugg-1	462	354.7	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	1.9	4			2465	6	1000	2
Tsch026	L	Tschugg-1	462	376.9	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4			2140	6	928	2
Tsch027	L	Tschugg-1	462	407.7	572'610	207'919	USM	Mitt.-Sst.	2.8	4			1942	6	1342	2
Tsch028	L	Tschugg-1	462	416.9	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	1.8	4			2290	6	910	2
Tsch029	L	Tschugg-1	462	422.0	572'610	207'919	USM	Fein-Sst.	2.8	4			2246	6	1143	2
Tsch030	L	Tschugg-1	462	478.0	572'610	207'919	USM	Siltstein	2.7	4			2383	6	899	2
Tsch031	L	Tschugg-1	462	495.0	572'610	207'919	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4			2159	6	926	2
Udli001	O	Udligenswil LU			672'450	216'400	OMM	Fein-Sst.	2.6	1	9.4	2	2564	1		
Ueti001	BC	Uetikon a.S.	455	36.0	694'525	235'565	OSM	Grob-Sst./Kgl.	2.6	1						
Ueti002	BC	Uetikon a.S.	455	72.0	694'525	235'565	OSM	Fein-Sst.	2.6	1						
Ueti003	BC	Uetikon a.S.	455	123.0	694'525	235'565	OSM	Fein-Sst.	2.4	1						
Ueti004	BC	Uetikon a.S.	455	156.0	694'525	235'565	OSM	Mitt.-Sst.	2.6	1						
Ueti005	BC	Uetikon a.S.	455	213.0	694'525	235'565	OSM	Grob-Sst./Kgl.	4.7	1						
Ueti006	BC	Uetikon a.S.	455	243.0	694'525	235'565	OSM	Grob-Sst./Kgl.	3.3	1						
Ueti007	BC	Uetikon a.S.	455	267.0	694'525	235'565	OSM	Grob-Sst./Kgl.	3.4	1						
Uzna001	O	Uznach SG			715'500	232'540	USM	Mitt.-Sst.	3.0	1	6.9	2	2559	1	797	1
Uzna002	O	Uznach SG			715'100	232'800	USM	Mitt.-Sst.	2.5	1	12.0	5	2690	1		
Uzna003	O	Uznach SG			715'580	232'300	USM	Mitt.-Sst.	3.3	1	4.9	2	2619	1		

Index	Typ	Lokalität	OKT [mü.M.]	Tiefe [m u.OKT]	X [m]	Y [m]	Molasse- gruppe	Lithologie	$\lambda_{wg}$ [W/m/K]	Cd.	$\phi$ [%]	Cd.	$\rho_{wg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cd.	$c_{wg}$ [J/kg/K]	Cd.
Walz001	O	Walzenhausen SG			764'800	257'420	USM	Mitt.-Sst.	3.3	1	12.0	5	2550	1		
Watt001	O	Wattwil SG			724'450	239'350	USM	Mitt.-Sst.	3.3	1	7.6	1	2651	4	901	1
Weia001	BK	Weiach	369	51.9	676'750	268'620	USM	Fein-Sst.	2.8	1	11.1	1	2574	4	922	1
Weia002	BK	Weiach	369	56.6	676'750	268'550	USM	Mitt.-Sst.	2.0	1	15.2	4	2455	6		
Weia003	BK	Weiach	369	71.5	676'750	268'620	USM	Schl.-Siltst.	2.0	1	19.5	4	2231	6		
Weia004	BK	Weiach	369	77.6	676'750	268'620	USM	Siltstein	2.8	1	17.7	1	2490	4	947	1
Weia005	BK	Weiach	369	82.5	676'750	268'620	USM	Mitt.-Sst.			17.6	4	2212	6		
Weia006	BK	Weiach	369	93.3	676'750	268'620	USM	Schl.-Siltst.	2.0	1	9.8	4	2343	6		
Weia007	BK	Weiach	369	98.0	676'750	268'620	USM	Fein-Sst.	2.1	1	35.1	1	2194	4	1326	1
Weia008	BK	Weiach	369	128.5	676'750	268'620	USM	Fein-Sst.	2.3	1	15.7	4	2513	6		
Weia009	BK	Weiach	369	136.3	676'750	268'620	USM	Siltstein	2.6	1	22.9	4	2254	6		
Weia010	BK	Weiach	369	137.1	676'750	268'620	USM	Schl.-Siltst.	1.9	1	10.2	1	2589	4	931	1
Weia011	L	Weiach	369	23.0	676'750	268'620	USM	Schl.-Siltst.	1.8	4			2393	6	898	2
Weia012	L	Weiach	369	61.6	676'750	268'620	USM	Fein-Sst.	1.9	4			2297	6	1110	2
Weia013	L	Weiach	369	67.3	676'750	268'620	USM	Grob-Sst.	1.8	4			2247	6	1142	2
Weia014	L	Weiach	369	71.4	676'750	268'620	USM	Schl.-Siltst.	1.6	4			2222	6	918	2
Weia015	L	Weiach	369	81.2	676'750	268'620	USM	Mitt.-Sst.	1.7	4			2234	6	1151	2
Weia016	L	Weiach	369	92.8	676'750	268'620	USM	Schl.-Siltst.	2.1	4			2299	6	909	2
Weia017	L	Weiach	369	104.4	676'750	268'620	USM	Mitt.-Sst.	1.7	4			2276	6	1123	2
Weia018	L	Weiach	369	115.0	676'750	268'620	USM	Siltstein	1.9	4			2248	6	915	2
Weia019	L	Weiach	369	122.0	676'750	268'620	USM	Mitt.-Sst.	2.0	4			2254	6	1138	2
Weia020	L	Weiach	369	131.0	676'750	268'620	USM	Fein-Sst.	2.4	4			2508	6	971	2
Weia021	L	Weiach	369	138.5	676'750	268'620	USM	Siltstein	2.0	4			2370	6	901	2
Weia022	L	Weiach	369	157.7	676'750	268'620	USM	Siltstein	2.0	4			2531	6	882	2
Weia023	L	Weiach	369	161.0	676'750	268'620	USM	Fein-Sst.	2.5	4			2441	6	1015	2
Weia024	L	Weiach	369	172.0	676'750	268'620	USM	Fein-Sst.	2.3	4			2516	6	966	2
Zü07001	BC	Zürich 7	426	42.0	684'225	247'000	OSM	Fein-Sst.	3.0	3	11.0	5	2638	4	926	1
Zü12001	BC	Zürich 12	443	52.0	685'515	250'510	OSM	Schl.-Siltst.	2.9	3	3.5	5	2679	3	873	1
Zü12002	BC	Zürich 12	443	108.0	685'515	250'510	OSM	Mitt.-Sst.	2.4	3	12.0	5	2496	3	964	1
ZüboO001	BK	Zürichsee	270	95.0	687'610	237'300	OMM	Fein-Sst.	2.5	1	11.0	5				
Züdo001	BC	Zürich-Dolder	590	34.0	685'545	247'535	OSM	Schl.-Siltst.	2.0	3	9.0	2	2186	3		
Züdo002	BC	Zürich-Dolder	590	60.0	685'545	247'535	OSM	Fein-Sst.	2.6	3	8.5	2	2281	3	844	1
Züdo003	BC	Zürich-Dolder	590	72.0	685'545	247'535	OSM	Schl.-Siltst.	2.9	3	9.5	2	2398	3	907	1
Züdo004	BC	Zürich-Dolder	590	120.0	685'545	247'535	OSM	Schl.-Siltst.	2.4	3	6.5	2	2478	3	795	1
Züdo005	BC	Zürich-Dolder	590	152.0	685'545	247'535	OSM	Schl.-Siltst.	2.3	3	5.0	2	2473	3	870	1
Züdo006	BC	Zürich-Dolder	590	192.0	685'545	247'535	OSM	Schl.-Siltst.	2.2	3	2.0	2	2259	3		
Zug001	O	Zug			682'220	222'950	USM	Fein-Sst.	3.1	1	8.8	1	2627	4	885	1
Zug002	O	Zug			682'900	224'200	OMM	Mitt.-Sst.	3.4	1	12.0	5	2700	1		

## Anhang 5: Trendkarten

### Methode der Kartengenerierung:

Die Trendkarten wurden mit dem Computer berechnet, da eine manuelle Interpolation vom Bearbeiter durch Kenntnis der topographischen und geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet subjektiv beeinflusst worden wäre. Nach eingehenden Tests mit verschiedenen Interpolationsmethoden wurden folgende Bearbeitungsschritte angewendet:

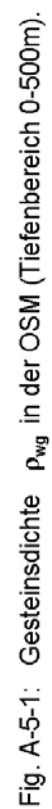
1. Datenklassierung: Der Datenbankinhalt wurde nach Molassegruppen, Lithologien und geothermischen Parametern sortiert.
2. Statistik an allen Daten für Klassenmittelwert und Standardabweichung.
3. Datenprioritäten: Falls für den gleichen geothermischen Parameter mehrere Messwerte vorhanden sind, wird für die Wärmeleitfähigkeit der Laborwert-ETH, für Gesteinsdichte der Laborwert-Bern und für die Wärmekapazität der Laborwert-ETH verwendet.
4. Tiefenmittelwert: Falls für die gleiche Lokalität mehrere Werte pro Klasse vorhanden sind, wird nur ein Mittelwert für die Berechnung der Isolinien verwendet.
5. Datengruppierung: Bei Klassen die zu wenig Daten enthalten ( $n < 7$ ), wird der gemeinsame Trend berechnet. Dies betrifft speziell die Schlamm-Siltsteine/Siltsteine und Mittelsandsteine/Grobsandsteine/Konglomerate.
6. Eliminierung von extremen Ausreissern: Gewisse Anomalien konnten auf schlechte Messwerte und Fehler in den Zwischenrechnungen zurückgeführt werden. Speziell bei Bassersdorf und Fehraltorf wurden so wenige Datensätze nicht verwendet oder sogar aus der Datenbank gelöscht.
7. Korrektur von Ausreissern: Vor der Interpolation für die Kartengenerierung wurden Extremwerte innerhalb des Bereichs einer Standardabweichung "zurückgestutzt".
8. Gridding mit SURFER™: Kriging, linear, Suchsektor=360°, Zellengrösse 5'000 x 5'000 m, Bereich x-y = 460'000-790'000/90'000-310'000 m, 66 x 44 Zellen.
9. Datenglättung: Gewichtet über den Abstand von 10 km (2 Zellen).
10. Geltungsbereich Daten: Die generierten Datenmatrizen werden nur innerhalb des Verbreitungsgebietes der verschiedenen Molassegruppen verwendet.
11. Isolinien: Mit SURFER™ werden die resultierenden Datenmatrizen konturiert.

### Kartenverzeichnis Anhang 3:

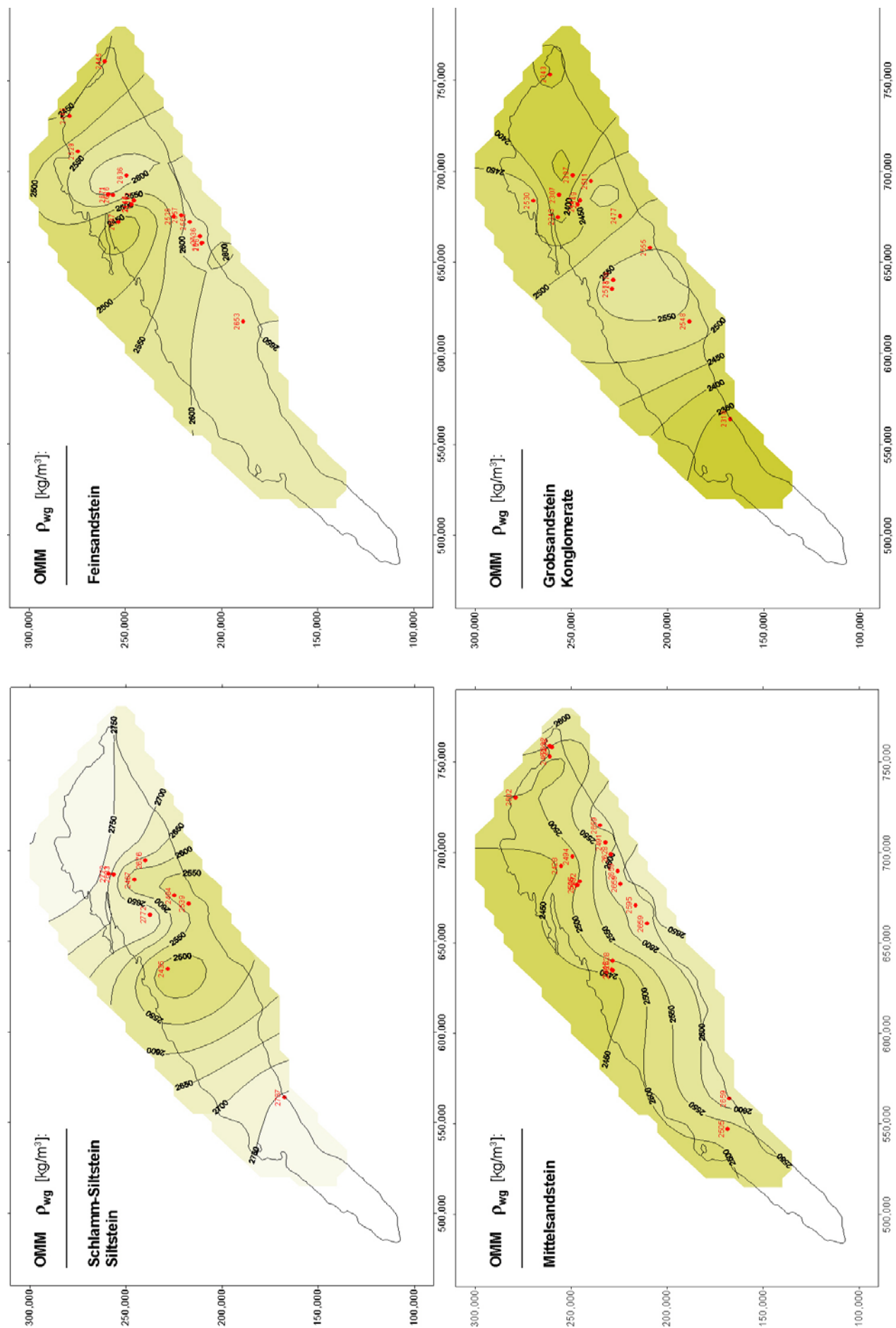
- Fig. A-5-1: Gesteinsdichte  $\rho_{wg}$  in der OSM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-2: Gesteinsdichte  $\rho_{wg}$  in der OMM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-3: Gesteinsdichte  $\rho_{wg}$  in der USM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-4: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  in der OSM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-5: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  in der OMM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-6: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  in der USM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-7: Wärmekapazität  $c_{wg}$  in der OSM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-8: Wärmekapazität  $c_{wg}$  in der OMM (Tiefenbereich 0-500m).  
Fig. A-5-9: Wärmekapazität  $c_{wg}$  in der USM (Tiefenbereich 0-500m).

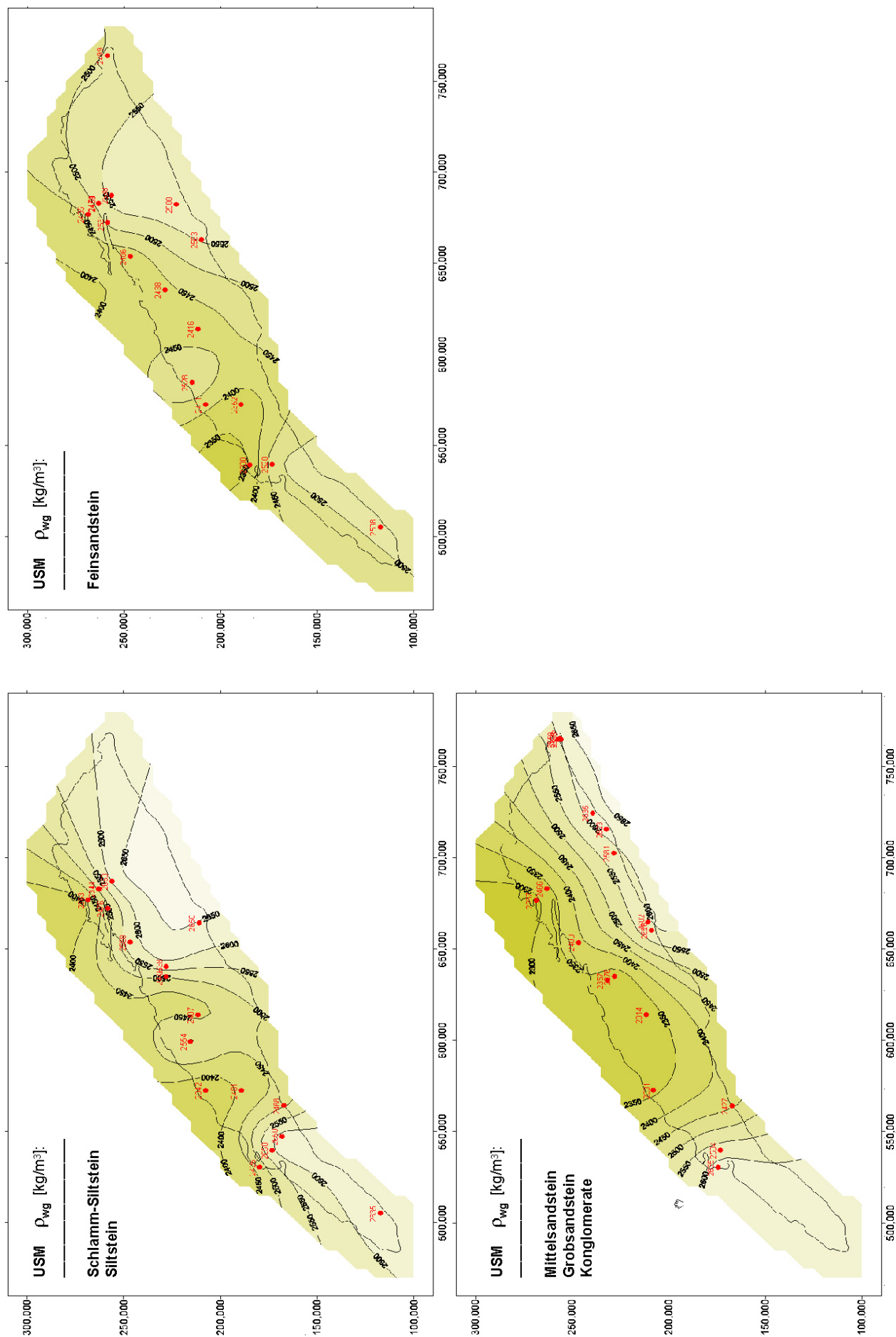


**Werden auf den Karten Werte ausserhalb von Datenpunkten abgelesen, so ist mindestens ein Streubereich einer Standardabweichung (Tabelle 5) in Betracht zu ziehen!**





Fig. A-5-2: Gesteinsdichte  $\rho_{wg}$  in der OMM (Tiefenbereich 0-500m).

Fig. A-5-3: Gesteinsdichte  $\rho_{wg}$  in der USM (Tiefenbereich 0-500m).

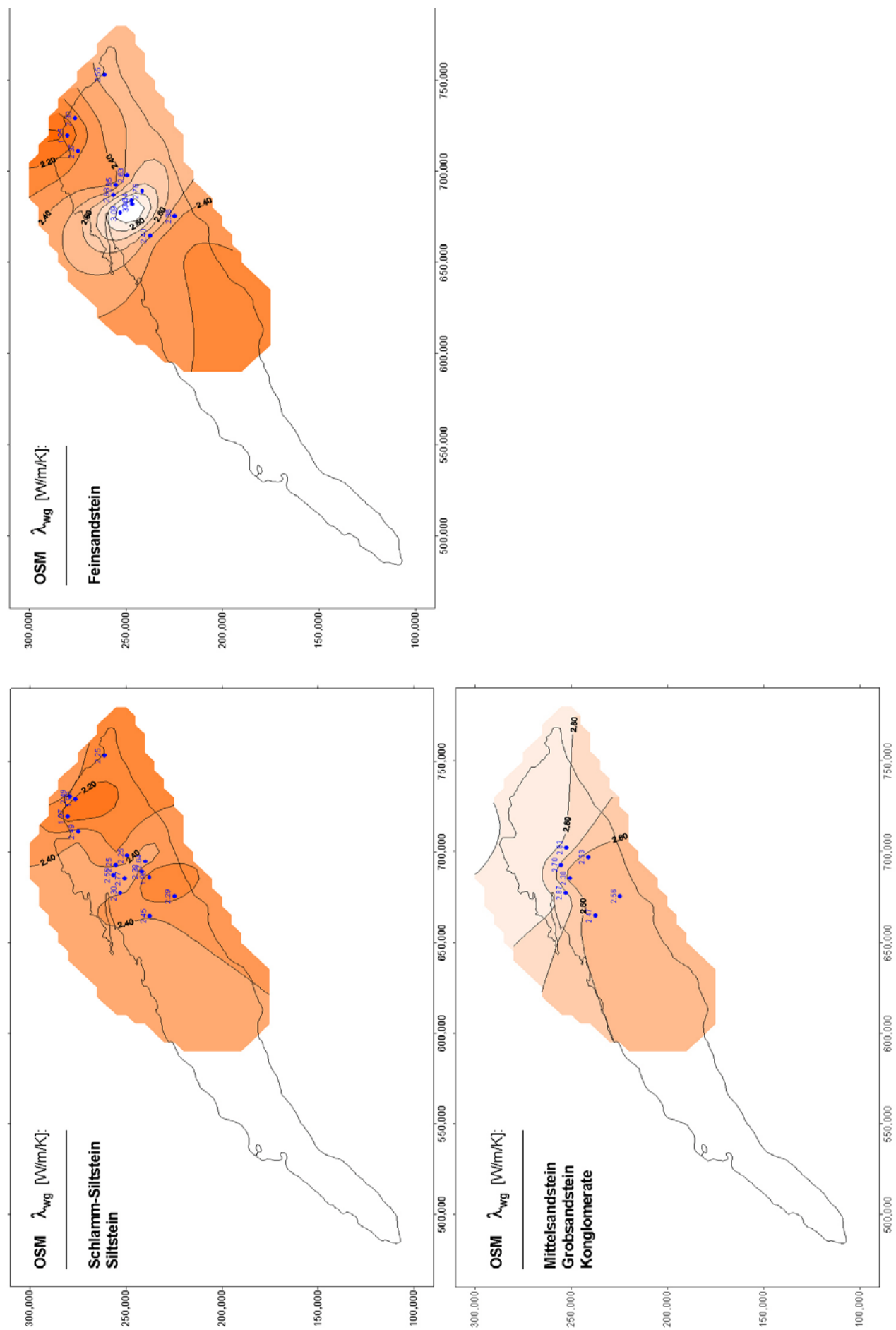


Fig. A-5-4: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  in der OSM (Tiefenbereich 0-500m).

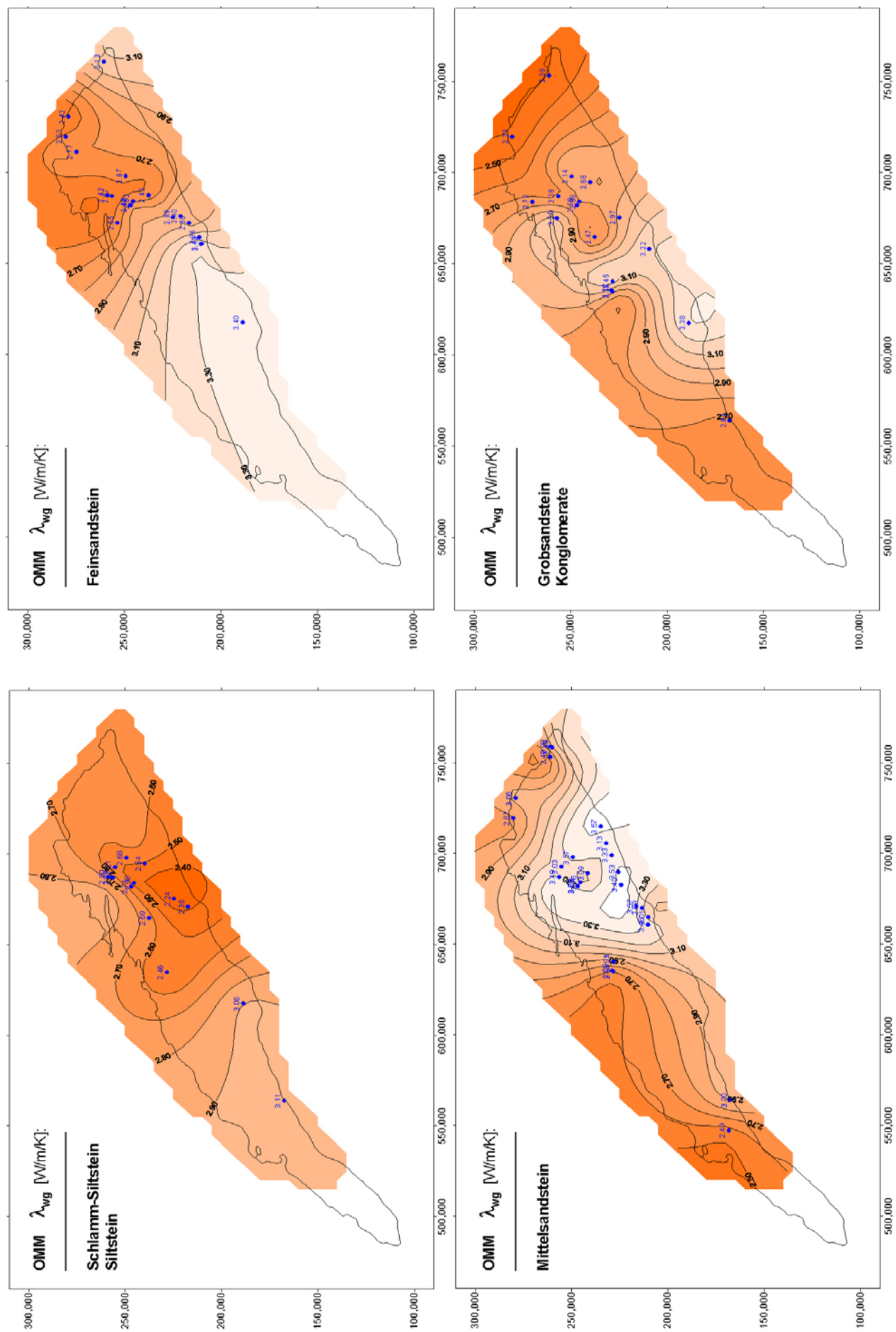


Fig. A-5-5: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  in der OMM (Tiefenbereich 0-500m).

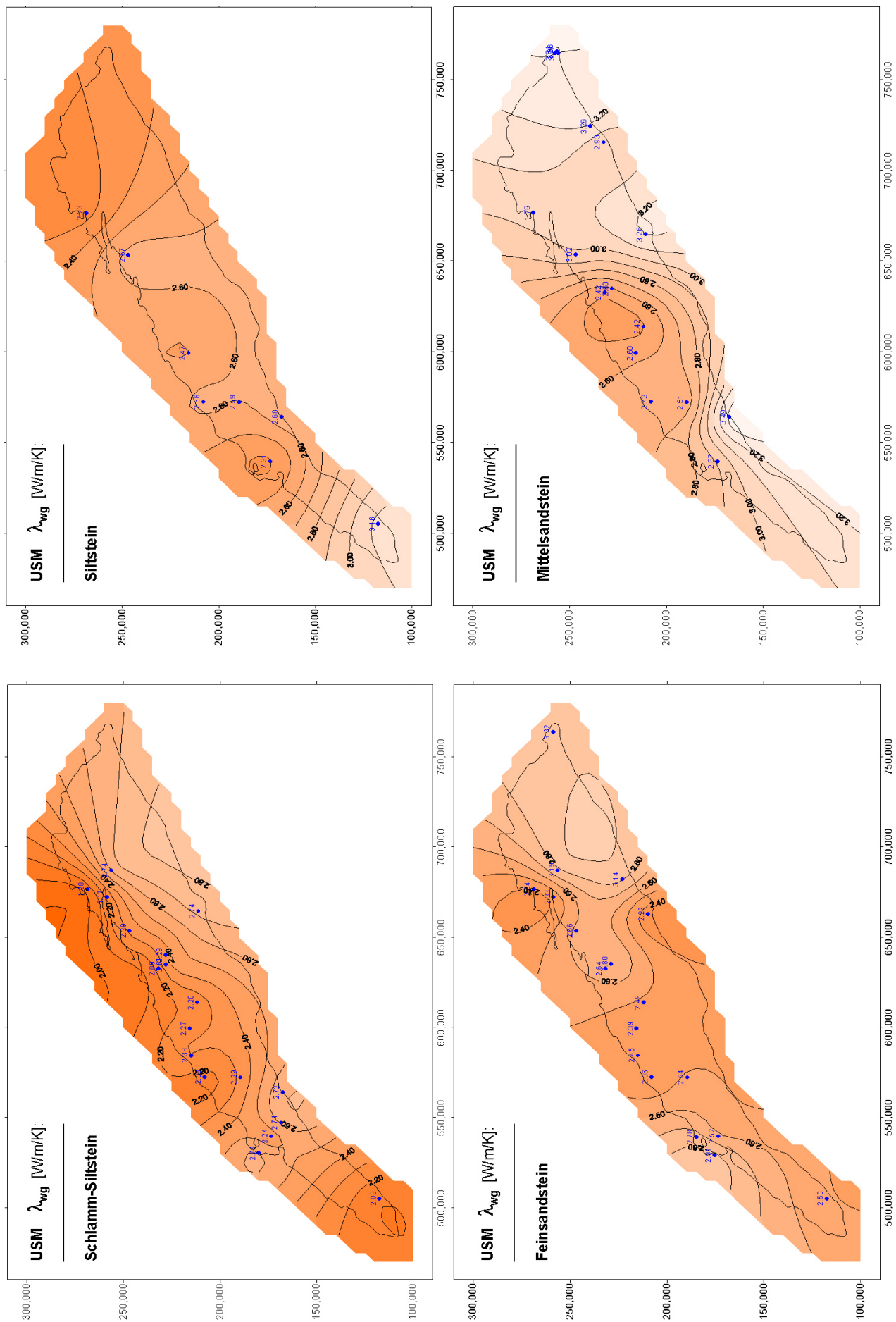
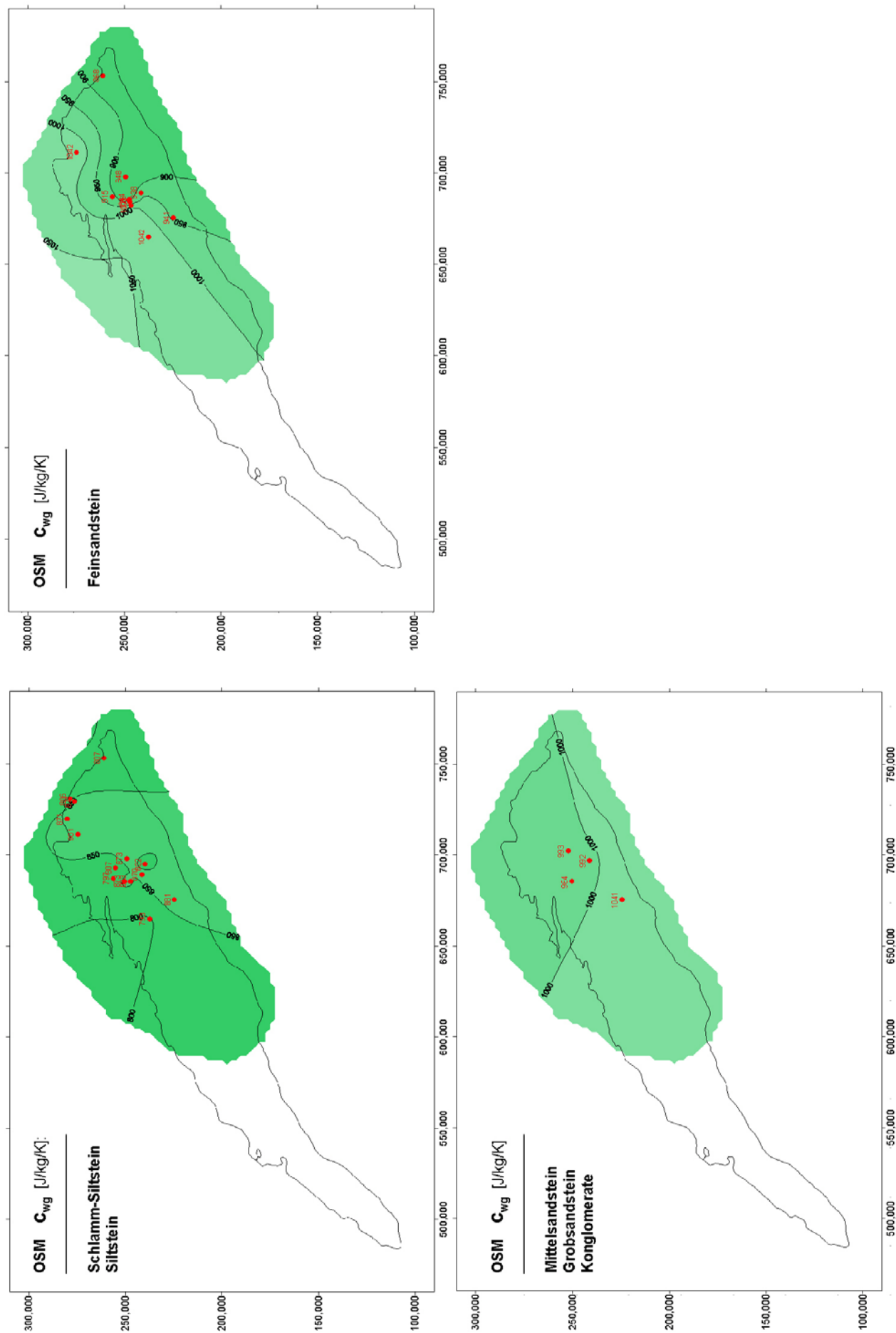
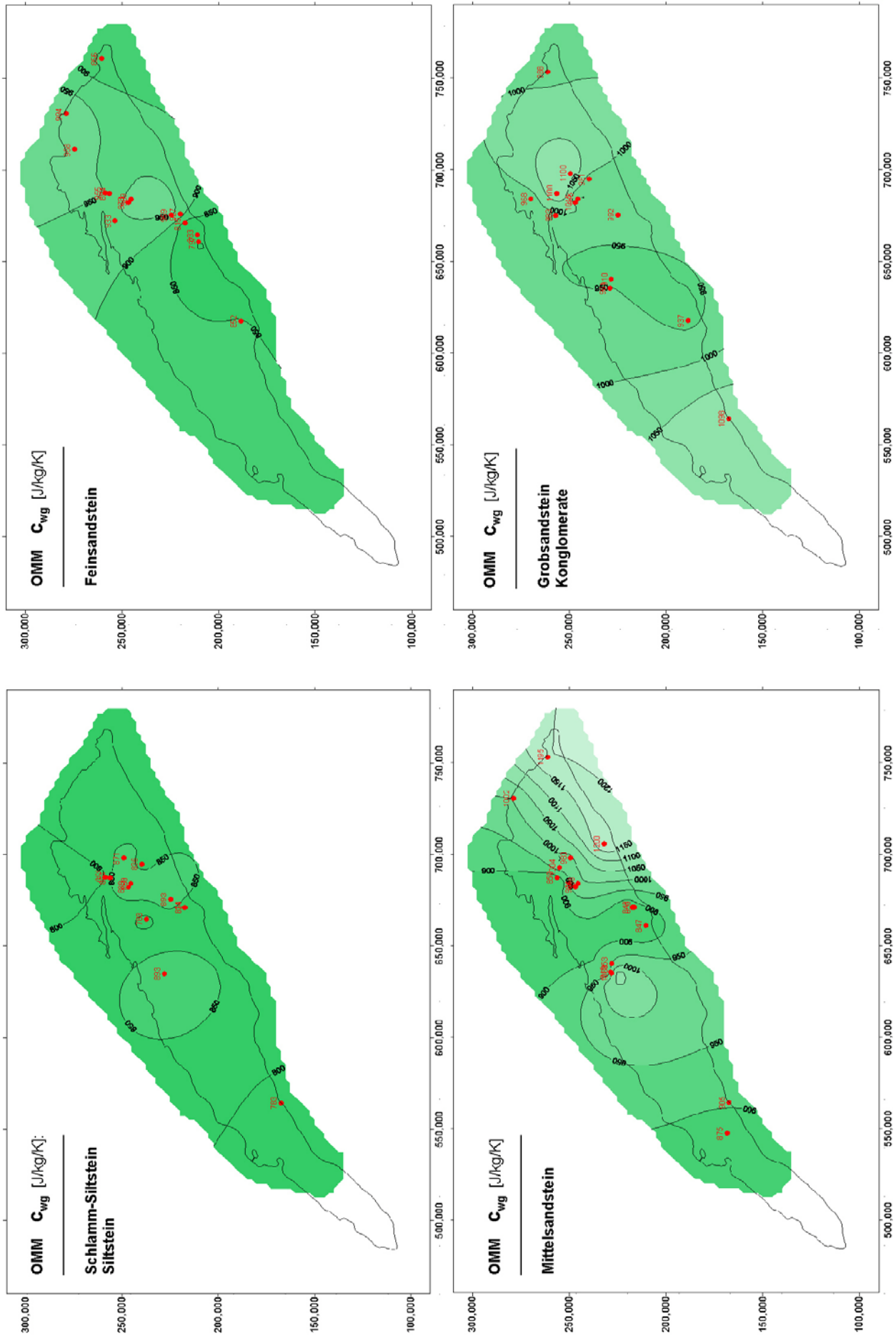


Fig. A-5-6: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{wg}$  in der USM (Tiefenbereich 0-500m).

Fig. A-5-7: Wärmekapazität  $c_{wg}$  in der OSM (Tiefenbereich 0-500m).



Fig. A-5-8: Wärmekapazität  $c_{wg}$  in der OMM (Tiefenbereich 0-500m).

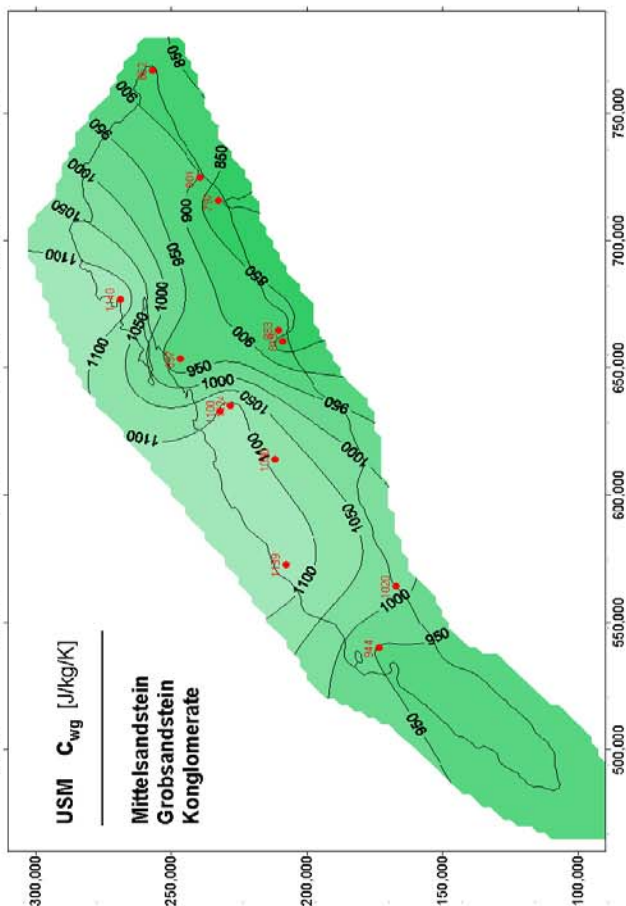


Fig. A-5-9: Wärmekapazität  $c_{wg}$  in der USM (Tiefenbereich 0-500m).