

14'382 / 54'385



Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Programm
Geothermie



Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens (Pilotstudie - Wärmeleitfähigkeit)

Wärmeleitfähigkeit: Labormessungen, geophysikalische Log-Berechnungen, sedimentäre Architekturen und Einfluss auf Wärmeentzugsrechnungen

ausgearbeitet durch Forschungs-
gemeinschaft:

Dr. E. Greber, Dr. W. Leu (Koord.)
Geoform AG
Anton Graffstr. 6, 8401 Winterthur

Prof. Dr. L. Rybach, B. Bucher
Institut für Geophysik
ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

Dr. R.J. Hopkirk, Dr. W.J. Eugster
Polydynamics Engineering
(Männedorf)
Bahngasse 3, 8708 Männedorf

Dr. B. Keller
R. Mengis + H.G. Lorenz AG
Schlossstrasse 3, 6005 Luzern

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

August 1996

Schlussbericht

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Résumé	2
Summary	3
1. Einleitung	4
1.1 Ausgangslage.....	4
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Vorgehen.....	5
2. Datengrundlage und Dateneinsicht	7
2.1 Tiefenbrunnen: Obere Meeresmolasse (OMM)	7
2.2 Bassersdorf: Untere Süsswassermolasse (USM)	7
2.3 Weiach: Untere Süsswassermolasse (USM)	7
2.4 Weggis: Untere Süsswasser- und Meeresmolasse (USM / UMM)	7
3. Sedimentologie (B. Keller)	8
3.1 Methodik	8
3.2 Architektur-Elemente in den Bohrungen	8
3.2.1 <i>Untere Süsswassermolasse (USM)</i>	8
3.2.2 <i>Obere Meeresmolasse (OMM)</i>	10
4. Labormessungen (B. Bucher / L. Rybach)	11
4.1 Messmethodik	11
4.1.1 <i>Messgerät</i>	11
4.1.2 <i>Verfahren</i>	11
4.1.3 <i>Wärmeleitfähigkeits-Definitionen</i>	11
4.2 Resultate	12
4.2.1 <i>Messungen an den Bohrkernen von Bassersdorf und Tiefenbrunnen</i>	12
4.2.2 <i>Messungen an den Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis</i>	12
4.2.3 <i>Vergleich der Messwerte Bohrkern-Cuttings</i>	14
5. Log-Berechnungen und Kalibration mit Messwerten (E. Greber / W. Leu)	16
5.1 Methodik	16
5.1.1 <i>Empirische Berechnungsgrundlagen</i>	16
5.1.2 <i>Berechnung der Porosität</i>	17
5.2 Kalibration mit Laborwerten	18
5.2.1 <i>Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen</i>	19
5.2.2 <i>Bohrung Weiach</i>	19
5.2.3 <i>Bohrung Weggis</i>	19
5.2.4 <i>Kalibration der Berechnungsformeln (Logs)</i>	19
5.3 Resultate der Log-Berechnungen	20
5.3.1 <i>Bassersdorf (Fig. 8):</i>	20
5.3.2 <i>Tiefenbrunnen (Fig. 9):</i>	21
5.3.3 <i>Weiach (Fig. 10):</i>	21
5.3.4 <i>Weggis (Fig. 11a/b):</i>	22
6. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur (E. Greber / B. Keller / W. Leu)	23
6.1 Auswertungsmethode	23
6.2 Resultate	23
6.2.1 <i>Bohrung Bassersdorf (Fig. 12)</i>	23
6.2.2 <i>Bohrung Weiach (Fig. 13)</i>	24
6.2.3 <i>Folgerungen</i>	24

7. Modellrechnungen des Wärmeentzuges über eine Sonde mittlerer Tiefe (R.J. Hopkirk / W.J. Eugster)	25
7.1 Einleitung und Modellbeschreibung	25
7.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit	26
7.3 Einfluss der spezifischen Wärmekapazität	27
8. Schlussfolgerungen / Nutzen für die Praxis	28
9. Empfehlungen für das weitere Vorgehen	30
Literaturverzeichnis	31

Figurenverzeichnis

Fig. 1:	Geologische Übersichtskarte des Molassebeckens
Fig. 2:	Stratigraphisches Sammelprofil der Molasseeinheiten
Fig. 3:	Messapparatur
Fig. 4:	Vergleich der Labormesswerte Kerne (trocken) vs. Cuttings
Fig. 5:	Vergleich Labormesswerte Kerne (feucht) vs. Cuttings
Fig. 6:	Korrelation K_{II} -gemessen vs. $K_{1N}/K_{2N}/K_3$ (Bassersdorf-Tiefenbrunnen)
Fig. 7:	Korrelation K_{II} -gemessen vs. $K_{1N_{neu}}/K_{3_{neu}}/K_{4_{neu}}$ (Bassersdorf- Tiefenbrunnen)
Fig. 8:	Sammelprofil Bassersdorf (USM) 1:1000
Fig. 9:	Sammelprofil Tiefenbrunnen (OMM) 1: 2000
Fig. 10:	Sammelprofil Weiach (USM) 1:1000
Fig. 11a/b:	Sammelprofil Weggis (USM/UMM) 1: 5000
Fig. 12:	Korrelation der berechneten Werte (K-log) mit den Architektur-Elementen (Bassersdorf)
Fig. 13:	Korrelation der berechneten Werte (K-log) mit den Architektur-Elementen (Weiach)
Fig. 14:	Langzeitabkühlungskurven der Produktions- und Injektionstemperaturen der modellierten Erdwärmesonden

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse (USM)
Tab. 2:	Architektur-Elemente der Oberen Meeresmolasse (OMM)
Tab. 3:	Messergebnisse Bohrkern Bassersdorf und Tiefenbrunnen
Tab. 4:	Messergebnisse der Cuttings-Proben Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis
Tab. 5:	Mittlere Wärmeleitfähigkeit der Proben Tiefenbrunnen
Tab. 6:	Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierenden Wärmeleitfähigkeiten im 2-Schichten-Modell
Tab. 7:	Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierender Wärmekapazität des Wirtgesteins

Beilagenverzeichnis

Beilage 1:	Kompilation der Wärmeleitfähigkeitsdaten Daten von Schweizer Molasse-Gesteinen.
Beilage 2:	Petrophysikalische und geothermische Daten von Proben der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis.

Zusammenfassung

Zielsetzung der Arbeit:

Für die Nutzung geothermischer Ressourcen mit tiefen Erdwärmensonden und saisonalen Speicheranlagen werden detaillierte Kenntnisse der geothermischen Eigenschaften des Untergrundes zunehmend notwendig. Ziele dieser Pilotstudie sind i) die Demonstration des Einflusses dieser Parameter bei Wärmeentzugsrechnungen, ii) eine Inventarisierung bereits vorhandener Wärmeleitfähigkeits-Daten der Schweizer Molasse (ergänzt mit neuen Labormessungen), iii) die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit geophysikalischen Logs sowie iv) die Untersuchung der Beziehung zwischen sedimentären Architektur-Elementen und der Wärmeleitfähigkeit.

Methodik:

Im Anschluss an eine Kompilation von sämtlichen verfügbaren Wärmeleitfähigkeits-Daten der Molasse-Gesteine (publiziert und unpubliziert) wurde an 8 Kernen der Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen sowie an 24 Cuttings-Proben der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis die Wärmeleitfähigkeit neu gemessen. In einem zweiten Schritt wurden mit diesem Datensatz verschiedene Berechnungsmethoden, welche auf Porositäten, Sonic-Geschwindigkeiten und Dichte-Werten aus geophysikalischen Bohr-Logs beruhen, geeicht. Die damit berechneten, durchgehenden Wärmeleitfähigkeits-Profile wurden anschliessend für eine Sensitivitätsanalyse einfacher Wärmeentzugsmodelle eingesetzt.

Hauptergebnisse:

- Für die Obere Meeresmolasse (OMM, Bohrung Tiefenbrunnen) und Untere Süsswassermolasse (USM, Bohrung Bassersdorf) wurden im Labor an nassen Bohrkernen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2.5 und 3.0 (trocken 1.7 bis 2.75 W/mK) gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit von entsprechenden nassen Cuttings weicht davon weniger als $\pm 10\%$ ab.
- Mit drei für den Raum Bassersdorf - Zürich geeichten Berechnungsmethoden (Funktion der Porosität, der Sonic-Geschwindigkeit und der Gesteinsdichte aus geophysikalischen Bohr-Logs) konnte für die OMM- und USM-Intervalle durchgehende Wärmeleitfähigkeitsprofile berechnet werden. Diese Profile zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Lithologie. Speziell in der OMM wird eine intervallweise (~ 50 m) Änderung der Wärmeleitfähigkeit von bis zu 1 W/mK beobachtet.
- In der distalen USM (ton-reicher, nördliche Position im Ablagerungsbereich) ist nur eine schwache Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur vorhanden, wogegen in den sandigeren Architektur-Elementen eine deutliche Unterscheidung möglich ist (Porositätswechsel).
- Die Modellierung einer fiktiven 750 m tiefen Erdwärmesonde zeigt, dass der mögliche Wärmeentzug bereits bei Variation der Wärmeleitfähigkeit von ± 0.5 W/mK um bis zu 20 % ab- oder zunehmen kann. Der Einfluss der Wärmekapazität ist viel geringer, gewinnt jedoch an Bedeutung bei der untiefen (0-100 m), saisonalen Wärmespeicherung oder untiefen Erdwärmesonde.

Anwendung in der Praxis:

Die kompilierten Wärmeleitfähigkeits-Daten können direkt bei der Planung geothermischer Anlagen in der Schweizer Molasse eingesetzt werden. Sind in der Nähe eines Projektes geophysikalische Bohrlogs vorhanden, können schnell und kostengünstig, durchgehende Wärmeleitfähigkeit-Profile berechnet werden. Damit werden bereits in der Planungsphase Berechnungen des potentiellen Wärmeentzugs präziser (=Kostenoptimierung).

Weiteres Vorgehen:

Die bereits vielversprechenden Resultate dieser Pilotstudie sollten mit zusätzlichen Labormessungen verbessert und ergänzt werden (z.B. Probleme in der Eichung mit Daten von trockenen/nassen Proben, Messung der Wärmekapazität). Mit den vorhandenen geophysikalischen Bohrlogs (ca. 35 Bohrungen) sollten anschliessend die Berechnungen im ganzen Schweizer Molassebecken flächendeckende durchgeführt werden. Zusätzlich drängt sich auch eine weitere Untersuchung des Einflusses von sedimentären Architektur-Elementen in anderen Ablagerungsbereichen (N-S oder E-W Trends) auf. Zudem sollte der Einfluss von detaillierteren Wärmeentzugsrechnungen (einschliesslich Wärmekapazität bei Wärmespeicherung) auf die Wirtschaftlichkeit an konkreten Projekten getestet werden.

Résumé

Buts du projet:

Avec l'exploitation croissante de l'énergie géothermique, soit par des sondes géothermiques ou par des systèmes de stockage saisonnier, la connaissance détaillée des propriétés géothermiques du sous-bassement devient un facteur crucial dans l'évaluation économique d'un projet géothermique. Les buts du projet sont les suivants: i) démonstration de l'influence des propriétés thermiques sur les calculs d'extraction de chaleur, ii) compilation des données sur la conductivité thermique du bassin molassique suisse (complété par de nouvelles mesures en laboratoire), iii) détermination de la conductivité thermique à l'aide des diagraphies, et iv) étude de la relation entre les éléments architecturaux sédimentaires et la conductivité thermique.

Méthodes:

Après avoir compilé toutes les données sur les valeurs sur la conductivité thermique des sédiments du bassin molassique suisse (publiées et non-publiées), des nouvelles valeurs ont été déterminées dans huit carottes provenant des forages de Bassersdorf et de Zurich-Tiefenbrunnen ainsi que dans 24 échantillons de cuttings des forages de Bassersdorf, Tiefenbrunnen et Weggis. Dans une deuxième phase, plusieurs méthodes d'estimation de la conductivité thermique basées sur les données des diagraphies (porosité, vitesse sonic et densité) ont été calibrées avec les valeurs mesurées. Ces techniques ont permis de calculer des profils de conductivité thermique utilisés par la suite pour des analyses de sensibilité des modèles simples d'extraction de chaleur.

Principaux résultats:

- La conductivité thermique déterminées en laboratoire sur les carottes saturées en eau provenant de la Molasse marine supérieure (OMM, forage Tiefenbrunnen) et de la Molasse d'eau douce inférieure (USM, forage Bassersdorf) se situe entre 2.5 et 3.0 W/mK (1.7-2.75 W/mK pour des carottes séchées). Les valeurs mesurées sur les cuttings correspondants se corrélaient bien ($\pm 10\%$) avec celles des carottes saturées.
- Des profils de conductivité thermique établis dans les intervalles de l'OMM et USM de la région de Zurich-Bassersdorf montrent une forte influence de la lithologie. Une variation importante de la conductivité thermique, atteignant 1 W/mK a été observée d'un intervalle (~ 50 -200 m) lithologique à l'autre, particulièrement dans l'OMM.
- Dans les parties distales de l'USM (lithofaciès argileux, partie septentrionale) la conductivité thermique dépend peu de l'architecture sédimentaire. Malgré tout, une variation systématique associée à des changements de porosité est observée dans les faciès gréseux.
- La modélisation théorique d'une sonde géothermique d'une longueur de 750 m montre que le potentiel de chaleur extractible peut varier de $\pm 20\%$ avec un changement de conductivité thermique de ± 0.5 W/mK. L'influence de la capacité calorifique est moins importante pour une sonde géothermique profonde que pour un système de stockage saisonnier ou une sonde géothermique peu profonde (< 100 m).

Application pratique:

La compilation des données sur la conductivité thermique peut être utilisée directement pour des projets géothermiques dans le bassin molassique suisse. Des profils de conductivité thermique peuvent être calculés rapidement et avec un budget modeste, dans la mesure où des diagraphies dans des forages proches sont disponibles. Cette approche permet de mieux limiter les incertitudes quant à l'estimation de la chaleur extractible dans la phase de planification (optimisation des frais).

Recommandations:

Les résultats prometteurs de cette étude pilote devraient être optimisés par des mesures complémentaires en laboratoire (p. ex. problèmes avec la calibration des données des échantillons saturés/séchés, mesure de la capacité calorifique). Dans le bassin molassique suisse les diagraphies de 35 forages existent. Elles pourront être utilisées pour calculer la conductivité thermique sur une plus grande surface („cartographie"). Avec ces résultats, une étude approfondie de l'influence de l'architecture sédimentaire dans d'autres environnements de dépôt (tendances N-S et E-W) pourrait être entreprise. L'influence de calculs détaillés d'extraction de chaleur devrait être testée dans des projets concrets.

Summary

Project aims

Detailed knowledge of the geothermal properties of the underground becomes more and more important with increasing exploitation of geothermal resources by deep vertical tube heat exchangers or by seasonal storage installations. Main aims of this pilot study are: i) the demonstration of the influence of these parameters on heat extraction calculations, ii) a compilation of already existing thermal conductivity data of the Swiss Molasse (supplemented with new lab measurements), iii) the calculation of the thermal conductivity with geophysical logs, and iv) the study of the relationships between sedimentary architecture and the thermal conductivity.

Methods:

After compiling all available thermal conductivity data of the Molasse sediments (published and unpublished), further measurements on 8 cores from wells at Bassersdorf and Zurich-Tiefenbrunnen as well as on 24 cuttings samples from the wells at Bassersdorf, Tiefenbrunnen and Weggis were carried out. In a second step, several techniques to estimate thermal conductivity from well logs (porosities, sonic velocities and densities) were calibrated with this data set. The thermal conductivity profiles calculated with these methods were used for a sensitivity analysis of simple heat extraction models.

Main results:

- Laboratory measurements on wet cores from the Upper Marine Molasse (OMM, well Tiefenbrunnen) and from the Lower Freshwater Molasse (USM, well Bassersdorf) yield thermal conductivities between 2.5 and 3.0 W/mK (1.7-2.75 W/mK on dry cores). The thermal conductivities of the corresponding wet cuttings are within a range of $\pm 10\%$ of the wet core values.
- Top to bottom conductivity profiles calculated for the OMM and USM intervals of the area Zurich - Bassersdorf show a clear dependence on lithology. Especially in the OMM changes of the thermal conductivity up to 1 W/mK are observed from one interval to another (~ 50 - 200 m thick).
- In distal parts of the USM (clay rich lithofacies, external depositional environment) the thermal conductivity is generally only slightly dependent on the sedimentary architecture. However, in sandy facies obvious distinctions are possible, related to porosity changes.
- The modelling of a theoretical 750 m long vertical tube heat exchanger shows that the potential quantity of extractable heat increases or decreases by up to 20 % by varying the thermal conductivity with ± 0.5 W/mK. The influence of the heat capacity is less important. However, this parameter is getting more important if shallow (0-100 m) seasonal heat storage or shallow heat exchangers are considered.

Practical applications:

The compiled thermal conductivity data can directly be used in the planning of geothermal installations in the Swiss Molasse. If geophysical logs are available from nearby wells, fast and low-budget top to bottom conductivity profiles can be calculated. This provides better constrained assumptions for estimations of extractable heat already in the planning phase (optimisation of the costs).

Recommendations:

The promising results of this pilot study should be optimised with additional laboratory measurements (e.g. calibration problems with data from wet/dry samples, heat capacity measurements). With the available geophysical logs of some 35 wells, heat conductivity calculations should be carried out for the whole Swiss Molasse Basin. With these results a further study of the influence of sedimentary architecture in other depositional environments (N-S and E-W trends) could be analysed. In addition, the influence of detailed heat extraction calculations on actual projects should be tested.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das vorgelegte Projekt nutzt die interdisziplinären Synergien der Fachbereiche Geologie, Geophysik und mathematische Modellierung für eine verbesserte Erfassung der geothermischen Eigenschaften im Schweizer Mittelland (Schwergewicht Molasse).

Das schweizerische Molasse Becken umfasst etwa 30% der Fläche der Schweiz (Fig. 1) und beherbergt die am dichtesten besiedelten Zonen. Die zunehmende Nutzung geothermischer Ressourcen verlangt nach immer detaillierten Kenntnissen der geothermischen Eigenschaften des Untergrundes.

Insbesondere bei der Planung und der Dimensionierung von geothermischen Speicheranlagen, Sondenfeldern und tiefen Erdwärmesonden sind die Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten der durchteuften Gesteinsschichten die entscheidenden Grössen (SCHÄRLI 1989, HOPKIRK et al. 1994, GEOFORM 1994a). Für die heute oft eingesetzte Simulation des thermischen Verhaltens des Untergrundes solcher Anlagen müssen mangels geeigneter Datengrundlagen stark vereinfachende Annahmen dieser Parameter gemacht werden (BURKART et al. 1989, EUGSTER et al. 1992, SANNER 1992, SEIFERT et al. 1992, STADLER et al. 1995b).

Der heutige Wissensstand über die geothermischen Eigenschaften der verschiedenen Gesteinstypen des Schweizer Mittellandes stützt sich weitgehend auf eine Ansammlung punktueller Daten unterschiedlichster Projekte (BODMER & RYBACH 1984). Da die geothermischen Eigenschaften eine Funktion von Gesteinszusammensetzung, Gesteinstextur, Porosität, Porenfluidtyp und Temperatur sind, können solche Richtwerte oft nur bedingt auf andere Gebiete und Tiefenbereiche übertragen werden. Um den Variationen betreffend Lithologie, Sedimentfazies und Kompaktion gerecht zu werden, wären oft für grössere Projekte lokalspezifische Neumessungen (Labor) notwendig, worauf jedoch in der Regel aus Kostengründen verzichtet wird. Mit Labormessungen geeichte Methoden, die eine kostengünstige Berechnung der geothermischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) aufgrund der Sedimentarchitektur und der geophysikalischen Messungen erlauben, fehlen weitgehend.

Dieser limitierte Kenntnisstand führt dazu, dass quantifizierende Modelle für geplante geothermische Anlagen mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Mit zunehmender Grösse der geothermischen Anlage nimmt jedoch die Relevanz dieser Eigenschaften zu.

Die Integration von verschiedenen neuen Forschungsentwicklungen der letzten Jahre würde es heute erlauben, diese Basis für die Schweiz zu schaffen. Dazu zu zählen ist insbesondere die Bestimmung der sedimentären Architektur mit Bohrlogs (KELLER 1992, AMMAN et al. 1993, BLASER et al. 1994), die direkte Berechnung der geothermischen Eigenschaften aufgrund von geophysikalischen Bohrlochmessungen sowie der Seismik (BLACKWELL & STEELE 1989, HOUBOLT & WELLS 1980) oder die Messung der Wärmeleitfähigkeit an Cuttings-Proben im Labor bei fehlendem Kernmaterial (HOPKIRK et al. 1994, SASS et al. 1971).

Am 26. September 1995 wurde die vorliegende Pilotstudie (Auswertungen und Labormessungen an den Bohrungen Tiefenbrunnen und Bassersdorf) vom BEW bewilligt, mit einer Projektdauer vom 15. Oktober 1995 bis 15. Juli 1996.

1.2 Zielsetzung

Die Ziele dieses Projektes sind:

- Inventarisierung bestehender Wärmeleitfähigkeits-Daten von Gesteinen aus dem Schweizer Molassebecken für eine direkte Nutzung bei der Planung und Konzipierung von geothermischen Anlagen.
- Messungen der Wärmeleitfähigkeiten an Kernen sowie Cuttings und Vergleich der Messungen.
- Berechnungen der Wärmeleitfähigkeiten mit Hilfe von geophysikalischen Logs sowie Kalibration der dabei verwendeten Methoden.
- Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeleitfähigkeits-Werte der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis.
- Analyse der Korrelation zwischen den Wärmeleitfähigkeiten und den sedimentologischen Architektur-Elementen.
- Abschätzung des Einflusses der in einer Bohrung vorhandenen Wärmeleitfähigkeiten auf den geothermischen Wärmeentzug (Sensitivitätsanalyse mit Modellierungen).

1.3 Vorgehen

In Anbetracht des beschränkten finanziellen Rahmens dieses Projektes wurde das Schwergewicht der Arbeiten auf eine Kalibration und Verbesserung der anzuwendenden Methoden gesetzt. Damit soll die Basis geschaffen werden, diese kostengünstigen Hilfsmittel in Zukunft flächendeckend im Schweizer Mittelland einsetzen zu können. Das Projekt wurde wie folgt gegliedert:

a) Inventarisierung bestehender Daten

Basierend auf der von Prof. Dr. L. Rybach, Dr. F. Medici und Dr. U. Schärli erstellten „Petrophysikalischen Datenbank von Gesteinen aus der Schweiz und den angrenzenden Gebieten“, kurz „PETRODAT“ (Rybach et al. 1995), sowie aufgrund publizierter Literatur wurden die Wärmeleitfähigkeits-Daten der schweizerischen Molassegesteine in einer Tabelle zusammengestellt (siehe Beilage 1: Tabelle und Karte).

b) Dateneinsichtsgesuche

Für die Verwendung der geophysikalischen Bohrlogs von Tiefenbrunnen und Bassersdorf sowie die Beprobung der Untersuchungsintervalle wurden bei den Dateneigentümern (Stadt und Kanton Zürich, respektive Nagra) Gesuche gestellt.

c) Probenahme

Bei den Bohrungen Bassersdorf (USM) und Tiefenbrunnen (OMM) wurden Kernproben, bei der Bohrung Weggis (USM und UMM) Cuttings-Proben aus Intervallen mit charakteristischen Architektur-Elementen entnommen.

d) Labormessungen

An 5 Kernproben der Bohrung Bassersdorf und an 3 Kernproben der Bohrung Tiefenbrunnen wurden die Wärmeleitfähigkeiten der trockenen und der feuchten Probe parallel zur Bohrachse im Labor gemessen ($K_{||}$ -trocken respektive $K_{||}$ -feucht). Bei den Kernproben der Bohrung Tiefenbrunnen wurde zusätzlich auch die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Bohrachse gemessen ($K_{\perp}$ -trocken und $K_{\perp}$ -feucht). Nachdem die Messungen an den Kernen abgeschlossen waren, wurden sie zu Cuttings zerkleinert. Anschliessend wurde die Wärmeleitfähigkeit des Cutting/Wasser-Gemisches gemessen und daraus die Matrix-Wärmeleitfähigkeit berechnet. Analoge Messungen an Cuttings wurden an 16 Proben der Bohrung Weggis durchgeführt.

e) Wärmeleitfähigkeits-Berechnung mit geophysikalischen Logs

Mit Hilfe der geophysikalischen Logs der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis wurde die Wärmeleitfähigkeit mit verschiedenen Methoden als Funktion von Gesteinsdichte, -porosität und -schallgeschwindigkeit berechnet und mit den Messwerten verglichen. Anschliessend wurden die Berechnungs-Algorithmen mit den Labormessungen kalibriert und für typische Molassegesteine geeicht.

f) Geothermische Charakterisierung der Architektur-Elemente

Mit Hilfe dieser geeichten Berechnungsmethoden wurden anschliessend für verschiedene Architektur-Elemente die Wärmeleitfähigkeiten als Funktion der Tiefe bestimmt.

g) Modellrechnungen

Durch eine Modellrechnung mit Sensitivitätsanalyse wurde anschliessend der Einfluss der Wärmeleitfähigkeits-Verteilung im Untergrund auf die zu entnehmende Menge an geothermischer Energie analysiert.

2. Datengrundlage und Dateneinsicht

Für die Verwendung der geophysikalischen Bohrlogs von Tiefenbrunnen und Bassersdorf sowie die Beprobung der Untersuchungsintervalle wurde bei den Dateneigentümern (Stadt und Kanton Zürich, respektive Nagra) ein Gesuch gestellt.

2.1 Tiefenbrunnen: Obere Meeresmolasse (OMM)

Herr B.-F. Iseli (Effretikon, Verwalter der Daten von Tiefenbrunnen), im Auftrag der Wasserversorgung Zürich, und Herr K. Fehr (AGW Zürich) haben uns freundlicherweise bei der Datenbeschaffung geholfen. Die geologischen und petrophysikalischen Daten der Bohrung sind in den Gutachten von Dr. U.P. Büchi Nr. 1094, 1282 und 1441 zusammengefasst.

Es wurden 3 Kernproben für neue Labormessungen entnommen. Die geophysikalischen Bohr-Logs wurden für die Bearbeitung im Intervall 340 bis 736 m (Endtiefe) digitalisiert. Davon wurde speziell der OMM-Bereich von 340 bis 716 m untersucht.

2.2 Bassersdorf: Untere Süsswassermolasse (USM)

Die Daten der Bohrung Bassersdorf (Geologie, Petrophysik, Roh-Logs) sind in einem technischen Bericht der Nagra (BLASER et al. 1994) publiziert. Um die Vorbereitungsarbeiten zeitlich zu reduzieren, wurden mit einem Gesuch bei der Nagra die digitalen Daten der geophysikalischen Bohrlogs und das Beprobungsrecht am Kernmaterial angefragt.

Es wurden 5 Kernproben für neue Labormessungen entnommen. Die geophysikalischen Bohr-Logs wurden im USM-Intervall 552 bis ca. 790 m bearbeitet.

2.3 Weiach: Untere Süsswassermolasse (USM)

Sämtliche für das Projekt notwendigen Daten der Bohrung Weiach sind publiziert (MATTER et al. 1988a). Eine Neubeprobung wurde nicht vorgenommen, da bereits 9 Wärmeleitfähigkeits-Messungen an an USM-Kernen (51.93 - 137.06 m) vorhanden waren. Die Logs des USM-Abschnittes wurden neu digitalisiert.

2.4 Weggis: Untere Süsswasser- und Meeresmolasse (USM / UMM)

Sämtliche für das Projekt notwendigen Daten der Bohrung Weggis sind publiziert (GREBER et al. 1994). Für die vorliegende Studie wurden 16 Cutting-Proben entnommen. Die Bohr-Logs waren im Intervall zwischen 70 und ca. 2130 m bereits in digitaler Form vorhanden.

3. Sedimentologie

(B. Keller)

3.1 Methodik

Für die Charakterisierung der geothermischen Eigenschaften eines Gesteinsstapels ist eine Gliederung in seine hauptsächlichen Lithologien sinnvoll. Traditionell wird diese nach den verschiedenen Gesteinstypen oder Fazies (siltiger Feinsandstein, roter Schlammstein etc.) vorgenommen. Dabei resultieren oftmals Schwierigkeiten bezüglich einer einheitlichen Abgrenzung und Unterteilung (z.B. Fining- oder Coarsening-upward Sequenzen), und es besteht die Gefahr, dass die Anzahl Gesteinstypen zu gross und unübersichtlich (splitting) oder aber zu gering und wenig aussagekräftig gerät.

Neue Arbeiten aus dem Molasse-Becken haben überdies gezeigt, dass sehr ähnliche Lithologien je nach Ablagerungstyp (z.B. dünne Überschwemmungssandsteine, mächtige Sandsteine von Rinnengürteln) nicht nur verschiedene Petrographien, sondern ebenso sehr unterschiedliche petrophysikalische Eigenschaften (Porosität, Permeabilität etc.) aufweisen (z.B. KELLER et al. 1990).

Um diese Unzulänglichkeiten zu eliminieren, wurde von KELLER et al. (1990) für die hydrogeologische Charakterisierung der distalen Unteren Süsswassermolasse das Konzept der Architektur-Elemente angewendet. Dieses Konzept ist in KELLER (1992) eingehend beschrieben und basiert auf folgenden Grundlagen:

- Architektur-Elemente sind die prinzipiellen sedimentären Bausteine eines Lithosoms.
- Architektur-Elemente sind Gesteinskörper mit
 - bezeichnender 3-D Geometrie,
 - charakteristischem fazielltem Aufbau,
 - spezifischer Grössenordnung und
 - typischer Genese.

Einzelne Architektur-Elemente zeichnen sich jeweils durch recht homogene Petrographien, Diagenesen (Zementation) und petrophysikalische Eigenschaften wie Porosität und Permeabilität aus, wie KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) nachgewiesen haben. Die Publikation von BLASER et al. (1994) sowie interne Weiterbearbeitungen der NAGRA belegten überdies charakteristische geophysikalische Log-Fazies einzelner Architektur-Elemente.

Wegen der verschiedenen beschriebenen Vorteile wurde auch in der vorliegenden Arbeit das Konzept der Architektur-Elemente angewendet. Darüber hinaus soll geprüft werden, ob, aus den sehr ähnlichen, bis anhin untersuchten petrophysikalischen Eigenschaften einzelner Architektur-Elemente auch gut unterscheidbare, *charakteristische geothermische Eigenschaften* resultieren. Als vorteilhaft erwies sich auch der Umstand, dass von den im vorliegenden Bericht abgehandelten vier Bohrungen bereits zwei (Weiach [KELLER et al. 1990] und Bassersdorf [BLASER et al. 1994]) unter dem Gesichtspunkt der Architektur-Elemente bearbeitet wurden.

3.2 Architektur-Elemente in den Bohrungen

3.2.1 Untere Süsswassermolasse (USM)

Die Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse sind in den Arbeiten von KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) ausführlich beschrieben, weshalb wir uns hier mit einer

zusammenfassenden Darstellung begnügen (Tab. 1). Während in der distalen Unteren Süsswassermolasse der Bohrungen Weiach und Bassersdorf die Architektur-Elemente sandige Rinnengürtel (RGs), Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR), distale Überschwemmungssandsteine (US), Uferwälle (UW), Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) und lakustrische Ablagerungen (LAK) vorkommen, gesellen sich im proximalen Ablagerungsraum bei Weggis auch konglomeratistische Rinnengürtel (RGk) dazu. Die bis anhin untersuchten petrophysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Architektur-Elemente sind ebenfalls in KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) sowie in BLASER et al. (1994) eingehend charakterisiert.

Tab. 1: Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse.

RGk	Konglomeratistische Rinnengürtel Bunte Konglomerate (meist Mittel- bis Grobkonglomerate) mit gut gerundeten Komponenten, mit Mittel- bis Grobsandsteinbänken wie RGs sowie trogförmigen und flachwinkligen Schrägschichtungen, viele Erosionsdiskordanzen, generell mehr als 10% Konglomerate, Mächtigkeiten > 2 m, häufig amalgamierte Abfolgen.
RGs	Sandige Rinnengürtel Mittelsandsteine mit unterschiedlichen Fein- und bis Grobsandstein-Anteilen, über scharfen Erosionsdiskordanzen gelegentlich Sohlenpflaster aus gerundeten extraformationellen Geröllen oder aus Schlammstein-Intraklasten, häufig trogförmige, flachwinklige und tabulare Schrägschichtung, Mächtigkeiten generell > 2 m, häufig amalgamierte Abfolgen.
DFR	Durchbruchsfächer und -rinnen Fein- bis Grobsandsteine, gelegentlich geröllführend oder mit Schlammstein-Intraklasten, mit scharfen Erosionsdiskordanzen wie RGs, häufig trogförmige und planare Schrägschichtungen, tw. Fining-upwards Sequenzen, Mächtigkeiten generell < 2 m.
US / UW	Distale Überschwemmungssandsteine (US) und Uferwälle (UW) Fein- bis Mittelsandsteine, häufig siltig, tw. rötlich pedogenisiert oder mit Rhizolithen (Wurzelspuren), tw. erosive Basis oder mit flachwinkliger Schrägschichtung, tw. Fining-upwards Sequenzen, geringe Mächtigkeiten von generell <1 m. Gelegentlich kommen über Rinnengürteln auch heterolithische Wechsellagerungen dünnbankiger Sandsteine vom Typ US mit Zwischenschichten aus Peliten vom Typ UPS vor, die als Uferwälle (UW) interpretierbar sind. Charakteristisch sind in diesem Element Kletterrippeln und Wulstschichtungen.
UPS	Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen Diese Gruppe pelitischer Gesteine umfasst Silt- und Schlammsteine unterschiedlicher Zusammensetzung sowie gelegentlich eigentliche Mergel sowie siltige Feinst- und Feinsandsteine und bildet häufig heterolithische Abfolgen. Häufig sind Pedoturbation und Rhizolithe (Wurzelspuren), gelegentlich kommen auch Caliche (Kalk-Knöllchen) vor.
LAK	Lakustrische Ablagerungen Graue und olivbraune Schlamm- und Siltsteine sowie Mergel, gelegentlich mit dünnen Feinsandstein-Bänken.

Die aufgrund von in 2m-Abstand gewonnenen Cuttings sowie von geophysikalischen Logs bearbeitete Bohrung Weggis erlaubt nicht eine derart detaillierte Aufgliederung in einzelne

Architektur-Elemente wie die gekernten Bohrungen Weiach und Bassersdorf. Gut unterscheiden liessen sich in Weggis lediglich mächtigere arenitische und psephitische Abfolgen der sandigen (RGs) und konglomeratischen Rinnengürtel (RGk) einerseits sowie pelitische Abfolgen der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) mit dünneren Sandsteinen der Architektur-Elemente Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) sowie distale Überschwemmungssandsteine (US) als Mischgruppe andererseits.

3.2.2 Obere Meeresmolasse (OMM)

Anders als für die Untere Süsswassermolasse existiert für die Obere Meeresmolasse kein publiziertes Architektur-Element Konzept in vergleichbarer Grössenordnung. Basierend auf der Arbeit von KELLER (1989) liegt jedoch eine unpublizierte Gliederung in Architektur-Elemente vor, die für die Bohrung Tiefenbrunnen auszugsweise verwendet wurde (Tab. 2). Nebst diesen kommen in regressiven Intervallen auch Architektur-Elemente der Süsswassermolasse (Strand-, resp. Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen UPS sowie konglomeratische Rinnengürtel RGk der Deltas) vor.

In der Unteren Meeresmolasse (UMM) der Bohrung Weggis finden sich davon die Architektur-Elemente Strandebene (STE) und Beckenablagerungen (BE).

Tab. 2: Architektur-Elemente der Oberen Meeresmolasse.

STE	Strandebene Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Feinst- oder Grobsandsteine, gut bis sehr gut sortiert, mit Parallellamination, Strömungs- und Wellenrippeln sowie gelegentlicher Schräg- oder Flaserschichtung.
GD	Rinnen von Gezeitendeltas Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Grobsandsteine, mässig- bis gut sortiert, häufig Schlammstein-Intraklasten (Schlickgerölle), häufige Schrägschichtung, gelegentlich Muschelschille.
SW	Schlickwatten Schlamm- und Siltsteine, häufig laminiert, tw. heterolithisch, tw. massiv bioturbiert.
MW	Mischwatten Silt- und Sandsteine (Feinst- bis Mittelsandstein), häufig als bankige bis laminierte heterolithische Abfolgen mit Rippeln, Sandsteine mässig bis gut sortiert.
SWP	Sandwatt und Platen Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Feinst- oder Grobsandsteine, mässig bis gut sortiert, gelegentlich Siltstein-Laminae, Schrägschichtungen und Rippeln, untergeordnet heterolithische Wechschichtungen mit Schlammsteinen (wie MW).
GR	Grossrinnen Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Grobsandsteine, mässig- bis gut sortiert, tw. mit Geröllen und Schlammstein-Intraklasten (Schlickgerölle), häufige Schrägschichtung, untergeordnet heterolithische Wechschichtungen mit Schlammsteinen (wie MW).
BE	Beckenablagerungen Silt- und Schlammsteine, bioturbiert massiv oder laminiert, tw. heterolithische Wechschichtung mit Feinsandsteinen, gelegentlich Rippeln.

4. Labormessungen

(B. Bucher / L. Rybach)

4.1 Messmethodik

4.1.1 Messgerät

Für die Labormessungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten wurde das Messgerät TK04 der Firma TeKa GmbH aus Berlin verwendet (Fig. 3). Diese Messanlage wendet die Methode des instationären Wärmestroms an. Dabei wird eine Linienquelle konstant beheizt und gleichzeitig die Änderung der Quellentemperatur registriert. Aus dieser Heizkurve wird die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnet. Die Daten der Halbraum-Linienquelle (HLQ) werden auf einem Rechner aufgezeichnet und ausgewertet.

Um einen guten Kontakt zwischen der Halbraum-Linienquelle (Messsonde) und der Probe zu erreichen, wird die Messsonde mit Hilfe einer Kurbel oder einer hydraulischen Presse an die Probe gedrückt (maximal 30 bar).

4.1.2 Verfahren

Nach der vollständigen Trocknung im Ofen wurden die Proben (Bohrkerne und Cuttings) wurden in trockenem und in wassergesättigtem Zustand („feucht“) gemessen (BODMER & RYBACH 1984). Bei der Messung der Bohrkerne wurde die Sonde auf die aufgeschnittene Fläche gepresst. Aufgrund der Dimension der Messsonde muss bei der Messung von Bohrkerne die Probe eine plan geschliffene Fläche von minimal ca. 5 cm x 10 cm aufweisen. Nach der Messung in trockenem Zustand wurden die Bohrkerne während 24 Stunden in Wasser eingelegt. Um ein Austrocknen der Bohrkerne zu verhindern, wurden die anschliessenden Messungen in einem Behälter unter Wasser durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit wurde je nach Grösse der vorhandenen, plan geschliffenen Fläche sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung gemessen.

In einem nächsten Schritt wurden die Bohrkerne mit Hilfe einer Hydraulikpresse zu künstlichen Cuttings verkleinert. Bei der Messung der Cuttings wurde eine abgewogene Menge der Proben in einen Druckbehälter gegeben und mit Wasser gesättigt. Dabei bleibt das Cutting-Material mit Wasser überdeckt und die Messsonde wird mit 30 bar auf das Gemisch aus Probenmaterial und Wasser gedrückt.

Bei jeder Messung wurde die Wärmeleitfähigkeit 7 mal bestimmt. Aus diesen sieben Werten wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

4.1.3 Wärmeleitfähigkeits-Definitionen

Bei den Kern-Messungen werden folgende Abkürzungen für die Wärmeleitfähigkeiten verwendet:

- $K_{||}$: Wärmeleitfähigkeit **parallel** zur Schichtung oder senkrecht zur Bohrachse (Sonde parallel zur Bohrachse).
- $K_{\perp}$: Wärmeleitfähigkeit **senkrecht** zur Schichtung oder parallel zur Bohrachse ($K_{\perp}$ ist nicht direkt messbar aber mit K_{gs} berechenbar, siehe 4.2.1).

- K_{gs} : **Mischwert** der Wärmeleitfähigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung (siehe 4.2.1, Sonde senkrecht zur Bohrachse).
- $\underline{K}$: **Mittlere** Wärmeleitfähigkeit (Berechnung mit $K_{||}$ und K_s , siehe 4.2.3), entspricht *nicht* K_{gs} .

4.2 Resultate

4.2.1 Messungen an den Bohrkernen von Bassersdorf und Tiefenbrunnen

An den Bohrkernen von Bassersdorf konnte nur eine Messung mit Sondenorientierung parallel zur Bohrachse vorgenommen werden, während die Bohrkern von Tiefenbrunnen Messungen sowohl parallel als auch senkrecht zur Bohrachse erlaubten. Bis auf eine Ausnahme (BA-595.21) konnten alle Bohrkern in trockenem und nassem Zustand gemessen werden (siehe Tab. 3). Der Bohrkern BA-595.21 zerfiel beim Einlegen in Wasser und liess sich deshalb nur in trockenem Zustand messen.

Je nach Orientierung der Messsonde auf der Probe sagt die gemessenen Wärmeleitfähigkeit etwas anderes aus. Liegt die Messsonde parallel zur Bohrachse, d.h. in unserem Fall senkrecht zur Schichtung, wird die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung gemessen ($K_{||}$ in Tab. 3). Liegt die Messsonde aber senkrecht zur Bohrachse (parallel zur Schichtung bei horizontaler Lagerung), wird ein Mischwert aus der Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung und aus der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung gemessen (K_{gs} in Tab. 3). Mit Hilfe der Beziehung $K_s = K_{gs}^2 / K_{||}$ und den gemessenen Werten lässt sich die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung berechnen (K_s in Tab. 3) (BODMER & RYBACH 1984). Die Anisotropie entspricht dem Verhältnis $K_{||} / K_s$. Sie ist bei den Proben der Bohrung Tiefenbrunnen als klein einzustufen.

4.2.2 Messungen an den Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis

Die Cuttings der Proben von Bassersdorf und Tiefenbrunnen wurden künstlich aus den entsprechenden Bohrkernen hergestellt. Die gemessene Wärmeleitfähigkeitswerte (K_G) wurden mit Hilfe weiterer Parameter zu einer Matrix-Wärmeleitfähigkeit (K_M , entspricht der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins ohne Wasser) umgerechnet (siehe Tab. 4 und PRIBNOW 1994):

$$K_M = K_G * (K_G / K_W)^{(mw*dc)/(mc*dw)}$$

wobei K_W : Wärmeleitfähigkeit des Wassers (0.62 W/mK)
mw: Masse Wasser im Gemisch
mc: Masse des trockenen Bohrkleins
dw: Dichte des Wassers
dc: Dichte des trockenen Bohrkleins

Eine theoretisch notwendige, zusätzliche Korrektur für den effektiven Porensättigungsgrad der Cutting wurde hier nicht vorgenommen. Auch der Tatsache, dass die künstliche Erzeugung von Cuttings aus Bohrkernen den Feinanteil erhöht (Diskussion siehe STADLER 1995), konnte in Anbetracht des beschränkten Aufwandes der Pilotstudie nicht Rechnung getragen werden.

Tab. 3: Messergebnisse der Bohrkerne von Bassersdorf und Tiefenbrunnen. Abkürzungen: K_{gs} = Mischwert aus der Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung und aus der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Mischung, K_{II} = Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung, K_s = Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung.

Bohrung	Probe	Proben- zustand	K_{gs} [W/mK]	K_{II} [W/mK]	K_s [W/mK]	Standard- abweichung	Anisotropie
Bassersdorf	BA-595.21	trocken		2.52		0.067	
	BA-602.75	trocken		2.64		0.020	
		feucht		3.0		0.148	
	BA-658.39	trocken		2.68		0.054	
		feucht		2.68		0.041	
	BA-742.55	trocken		2.75		0.076	
Tiefenbrunnen		feucht		2.67		0.094	
	BA-762.26	trocken		1.71		0.036	
		feucht		2.56		0.080	
	TI-519.00	trocken	1.88	1.78	1.99	0.025	0.896 (trocken)
		trocken				0.036	
		trocken	2.79	2.8	2.8	0.101	1.007 (feucht)
		feucht				0.094	
	TI-591.93	feucht	2.02	2.1	1.99	0.144	1.081 (trocken)
		trocken				0.048	
		trocken	2.7	2.9	2.5	0.107	1.154 (feucht)
		feucht				0.161	
	TI-657.91	feucht	2.0	1.98	2.02	0.027	0.980 (trocken)
		trocken				0.109	
		trocken	2.90	2.98	2.82	0.061	1.056 (feucht)
		feucht				0.067	

Bei der Wärmeleitfähigkeit von WG-310 aus der Bohrung Weggis handelt es sich um das Messresultat einer Mischung der Proben WG-310 und WG-320, da von der Probe WG-310 zu wenig Material vorhanden war. Anstelle der Proben WG-875 und WG-940, von denen kein Material vorhanden war, wurden die Proben WG-880, WG-888, WG-938 und WG-950 gemessen.

Die Wärmeleitfähigkeiten sind unter anderem auch abhängig von der Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit lässt sich durch die Beziehung $K(T) = 1.84 + 365.75 \cdot (K_{20} - 1.84) \cdot (1/(T + 273) - 1/1473)$ beschreiben, wobei T für die Temperatur T(z) in °C und K_{20} für die Wärmeleitfähigkeit bei Zimmertemperatur (20 °C) steht (SEKIGUCHI 1984). Die aus dieser Beziehung resultierenden Ergebnisse für die Proben von Weggis sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tab. 4: Wärmeleitfähigkeit der Cutting-Proben aus den Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis.

Bohrung	Probe	K gemessen [W/mK]	Standard- abweichung	K-Matrix [W/mK]	K-Matrix T-korrigiert [W/mK]	Temperatur [°C]
Bassersdorf	BA-595.21	1.87	0.030	2.20		
	BA-602.75	2.06	0.017	2.65		
	BA-658.39	1.91	0.058	2.34		
	BA-742.55	1.91	0.078	2.32		
	BA-762.26	1.93	0.068	2.58		
Tiefenbrunnen	TI-519.00	1.97	0.048	2.59		
	TI-591.93	2.10	0.073	2.66		
	TI-657.91	1.88	0.040	2.30		
Weggis	WG-220	1.71	0.013	2.57	2.60	16.5
	WG-310	1.73	0.066	2.15	2.16	19.1
	WG-380	1.70	0.111	2.20	2.20	21.2
	WG-590	1.87	0.027	2.67	2.66	27.4
	WG-720	1.86	0.020	2.36	2.34	31.2
	WG-880	1.93	0.052	2.52	2.49	36.0
	WG-888	1.61	0.057	1.94	1.93	36.2
	WG-938	1.79	0.036	2.59	2.55	37.7
	WG-950	1.91	0.071	2.36	2.33	38.0
	WG-1090	1.80	0.100	2.50	2.50	42.2
	WG-1140	1.70	0.102	2.10	2.10	43.6
	WG-1350	1.75	0.024	2.53	2.46	49.8
	WG-1520	1.72	0.027	2.36	2.29	54.8
	WG-1620	1.80	0.220	2.40	2.30	57.8
	WG-2070	1.75	0.048	2.25	2.18	71.1
	WG-2240	1.66	0.024	2.20	2.13	76.1

4.2.3 Vergleich der Messwerte Bohrkerne-Cuttings

Da für Wärmeleitfähigkeitsmessungen in der Praxis in vielen Fällen nur Cuttings zur Verfügung stehen, ist eine generelle Prüfung der Aussagekraft von Cuttings-Messungen von besonderem Interesse. Hier kann jedoch angesichts des beschränkten Probenmaterials nur ein erster, orientierender Vergleich angestellt werden.

Für die Weggis-Proben standen keine Kerne zur Verfügung und von Bassersdorf keine Angaben über die Anisotropie. Für die Tiefenbrunnen-Bohrkerne wurde als Vergleichswert eine mittlere Wärmeleitfähigkeit $\underline{K}$ wie folgt berechnet (Tab. 5):

$$\underline{K} = (K_{\parallel}^2 \cdot K_s)^{1/3}$$

Die Vergleichsresultate sind in den Figuren 4 und 5 gegeben. Bei Gleichheit der Bohrkern- und Cuttings-Werte sollten die Punkte nahe der 45 °-Geraden liegen. Die Resultate weisen Streuungen bis über ± 20 % auf. Die Streuung ist bei den trockenen Proben bedeutend grösser als bei den feuchten Proben. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass im ersten Fall der Kontakt Messsonde/Gestein schlechter ist.

Tab. 5: Mittlere Wärmeleitfähigkeiten $\underline{K}$ der Bohrung Tiefenbrunnen.

Probe	K_{II} [W/mK]	K_s [W/mK]	$\underline{K}$ [W/mK]
TI-519.00 trocken	1.78	1.99	1.85
TI-519.00 feucht	2.80	2.80	2.80
TI-591.93 trocken	2.1	1.9	2.03
TI-591.93 feucht	2.9	2.5	2.76
TI-657.93 trocken	1.98	2.02	1.99
TI-657.93 feucht	2.98	2.82	2.93

Aufgrund der sehr beschränkten Datenbasis lässt sich nur aussagen, dass die Abweichungen zwischen Kern-Messungen (feucht) und Cuttings-Messungen (berechneter Matrixwert) im Mittel unter $\pm 10 - 15 \%$ bleiben. Dies ist ein ermutigendes Resultat und legt weitere, umfangreichere Vergleichsmessungen nahe (siehe auch STADLER 1995).

5. Log-Berechnungen und Kalibration mit Messwerten (E. Greber / W. Leu)

5.1 Methodik

Die Wärmeleitfähigkeit eines Gesteines ist von zahlreichen chemischen und (petro)physikalischen Parametern abhängig (siehe z.B. SCHÖN 1996).

Bei den *chemischen* Parametern sind die Mineralzusammensetzung und die Zusammensetzung des Porenfluids von besonderer Bedeutung. Jedes Mineral wird durch eine eigene Wärmeleitfähigkeits-Bandbreite charakterisiert, z.B. variiert die Wärmeleitfähigkeit von Calcit zwischen 3.30 und 3.9 W/mK, jene von Quarz zwischen 6.5 und 13.0 W/mK oder jene von Tonmineralien zwischen 1.7 und 5.2 W/mK (Ref. in SCHÖN 1996). Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Porenfluids, desto höher ist erwartungsgemäss auch die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtgesteins. Allgemein nimmt die Wärmeleitfähigkeit auch mit zunehmendem Wassergehalt zu (SCHÖN 1996). Die chemische Zusammensetzung und die Gesamtmineralisationen der Molasse-Formationswässer sind je nach Lokalität und Tiefenbereich sehr unterschiedlich.

Zu den wichtigsten *physikalischen* Parametern 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). Bei einem Gestein mit einer sedimentär, tektonisch oder metamorph bedingten schichtförmigen Anordnung der Minerale ist die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung/Schieferung meist besser als senkrecht dazu. Gesteine, welche von kristallinen Mineralien aufgebaut werden, zeigen mit zunehmender Temperatur meist abnehmende thermische Leitfähigkeiten.

5.1.1 Empirische Berechnungsgrundlagen

In der Literatur finden sich zahlreiche empirische Formeln, mit denen sich mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen („Logs“) Wärmeleitfähigkeiten berechnen lassen (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). Diese Vielzahl von Berechnungsgrundlagen beruht in erster Linie wohl 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. Dies ist gut nachvollziehbar, wenn man in Betracht zieht, wie z.B. gebirgsbildende Vorgänge die Gesteine eines regionalen Gebietes sekundär in ihren petrophysikalischen Eigenschaften (und damit in ihrer Wärmeleitfähigkeit) wesentlich verändern können. In der Regel müssen deshalb 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 mit einer Kalibrierung der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit im Labor gemessenen Werten durchgeführt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Labormessungen oft nicht unter in-situ Bedingungen (Temperatur, Porenflüssigkeitstyp, Druck, Porosität) gemessen werden können und deshalb vor einem Vergleich korrigiert werden müssen (siehe Kap. 4).

In der vorliegenden Studie wurden mit folgenden empirischen Beziehungen gerechnet:

BLACKWELL & STEELE (1989), basierend auf GOSS & COMBS (1976):

$$K1 = 0.84 - 0.04 * \Phi + 0.000695 * v_p \quad (1)$$

wobei $K1$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 Φ = Porosität in %
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in m/s

Diese Beziehung basiert auf einer Evaluation von vorwiegend Sandstein-, sowie einigen Siltstein- und Kalk-Proben aus dem Imperial Valley in Kalifornien. GOSS & COMBS (1976) beobachteten auch Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeiten vom geologischen Milieu.

EVANS (1977):

$$K2 = -0.049 * \Phi - 0.160 * v_p + 3.60 * p_b - 5.50 \quad (2)$$

wobei $K2$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 Φ = Porosität in %
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in km/s
 p_b = bulk density in g/cm⁻³ (aus RHOB-Log = Brutto-Dichte Log = f(Dichte Gesteinsmatrix, Porosität und Dichte Porenflüssigkeit))

Diese Beziehung wurde aus einem breiten Spektrum von Nordseeproben abgeleitet.

Bohrung Weiach (statistische Auswertung Geoform AG):

$$K3 = 0.7 * v_p \quad (3)$$

wobei $K3$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in km/s

Diese stark vereinfachende Berechnung basiert auf einer statistischen Auswertung der Bohrung Weiach. Dabei wurde die Korrelation zwischen allen Wärmeleitfähigkeits-Messungen (Labor, MATTER et al. 1988a) und den entsprechenden Sonic-Geschwindigkeiten untersucht. Der Faktor 0.7 resultiert aus einer Regression durch den Nullpunkt unter Einbezug aller Datenpunkte (Tertiär, Mesozoikum, Permokarbon, ohne Kristallin) sämtlicher Lithologietypen. Einen vergleichbaren Faktor von 0.72 ± 0.2 ermittelte auch Sattel (1982) für Sedimentgesteine des Rheingrabens.

5.1.2 Berechnung der Porosität

Bei den ersten beiden Ansätzen ($K1$ und $K2$) spielt die Porosität (Φ) eine wichtige Rolle. Sie lässt sich auf verschiedene Arten mit geophysikalischen Logs berechnen. Bei den Wärmeleitfähigkeits-Berechnungen der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weiach wurde die (Gesamt- oder totale) Porosität N_{poro} nach BLASER et al. (1994) folgendermassen berechnet:

$$N_{\text{Poro}} = N_{\text{PHI}} - (\text{Clay} * P_{\text{sh}})$$

wobei

NPHI	=	Neutron-Porosität (Fraktion, aus Log)
Clay	=	Tongehalt (Fraktion)
P _{sh}	=	scheinbare Porosität eines reinen Tones (Fraktion)

Der Tongehalt Clay wird folgendermassen berechnet:

$$\text{Clay} = A * (GR - GR_{cl}) / (GR_{sh} - GR_{cl})$$

wobei

GR	=	Gamma Ray Wert aus Log (in API-Einheit = Kalibrations-Standard)
Gr _{cl}	=	GR-Wert der tonfreien Formation (API): für Bassersdorf: 50 API, Tiefenbrunnen und Weiach: 20 API
Gr _{sh}	=	GR-Wert eines reines Tons (API), Bassersdorf und Weiach: 200 API, Tiefenbrunnen: 180 API
A	=	Skalierungsfaktor (hier: = 1)

Die scheinbare Porosität eines reinen Tones P_{sh} lässt sich bei Bassersdorf aus der Korrelation zwischen Tongehalt und Neutron-Porosität ermitteln. Sie beträgt 0.35 im USM-Abschnitt. Ein Wert von 0.3 wurde bei den Berechnungen der Bohrungen Tiefenbrunnen und Weiach verwendet.

Die Porositäts-Berechnung bei Tiefenbrunnen konnte im Abschnitt 656 bis 661 m mit im Labor gemessenen Porositäten geeicht werden.

Im Fall der Bohrung Weggis wurde die Porosität nicht neu berechnet und basiert auf den Werten von GEOFORM (1994b) und GREBER et al. (1994). Dabei handelt es sich um die aus dem Sonic-Log errechneten Porosität PHIA und die effektive Porosität PHIE, welche für den Tongehalt korrigiert ist.

Im weiteren werden folgende Notationen verwendet:

K1N: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, als Porosität wird N_{poro} verwendet

K1: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität aus PHIA (siehe oben)

K1E: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität aus PHIE (siehe oben)

K2N: mit Formel (2) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität wird N_{poro} (siehe oben)

K3: mit Formel (3) berechnete Wärmeleitfähigkeit

5.2 Kalibration mit Laborwerten

Die Wärmeleitfähigkeiten wurden in einer ersten Phase mit den Formeln (1) bis (3) berechnet und mit den im Labor gemessenen Werten verglichen. Dabei wurden pro Probtiefe 5 berechnete Wärmeleitfähigkeits-Werte gemittelt. Beispielsweise wurden für die Probe Tiefenbrunnen TI-519.00 die berechneten Wärmeleitfähigkeiten über das Tiefenintervall 518.6 - 518.8 - 519.0 - 519.2 - 519.4 gemittelt. Bei den Bohrungen Bassersdorf und Weggis betragen die Messdaten-Abstände 0.1 m, bei den Bohrungen Tiefenbrunnen und Weiach 0.2 m.

5.2.1 Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der trockenen Proben parallel zur Bohrachse $K_{||}$ zeigen eine gute positive (lineare) Korrelation mit den mit der Formel (1) und (3) berechneten Werten (Fig. 6). Die Korrelationsfaktoren betragen 0.93 resp. 0.86. Erstaunlicherweise wurden zwischen den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der feuchten Proben $K_{||}$ und den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Werten keine linearen Korrelationen festgestellt. Ein Vergleich zwischen den Messwerten von feuchten und trockenen Proben ist generell problematisch, da v.a. die Messung an feuchten Proben mit schwer beizukommenden Fehlerquellen (z.B. durch das Einpressen von Wasser) verbunden ist.

Hingegen eine gute positive Korrelation wurde zwischen $K_{||}$ (trocken) und den gemittelten Dichtewerten aus dem kompensierten Dichte-Log RHOB festgestellt ($R = 0.86$).

Bei der Bohrung Tiefenbrunnen wurde interessanterweise auch zwischen den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten senkrecht zur Schichtung (K_s , trocken und feucht) und den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Leitfähigkeiten eine gute Korrelation festgestellt. Allerdings ist dabei zu beachten, dass nur 3 Messwerte vorhanden sind.

5.2.2 Bohrung Weiach

Bei dieser Bohrung wurden im Labor nur die Mittleren Wärmeleitfähigkeiten der feuchten Proben (K , siehe Beilage 2) bestimmt. Diese Werte zeigen keine Korrelationen mit den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Wärmeleitfähigkeiten.

5.2.3 Bohrung Weggis

Bei dieser Bohrung konnten die Wärmeleitfähigkeiten wegen fehlendem Kern-Material nur an Cuttings gemessen werden (Tab.2, Beilage 2). Die dabei ermittelten Matrix-Wärmeleitfähigkeiten zeigen keine lineare Korrelation mit den mit den Formeln (1) und (3) berechneten Werten. Allenfalls könnte eine bessere Korrelation erreicht werden, wenn die berechneten Wärmeleitfähigkeiten über grössere Tiefenintervalle gemittelt würden (siehe z.B. Fig. 11a).

5.2.4 Kalibration der Berechnungsformeln (Logs)

Den Resultaten ist vorzuschicken, dass bei der Kalibration der mit den Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Labormesswerten in erster Linie versucht wurde, lineare Korrelationen mit in der Literatur verwendeten empirischen Berechnungsformeln herauszufinden. Von diesen Berechnungsformeln ist nur Formel (3) linear aufgebaut. In Anbetracht der kleinen Datenmenge erschien es uns nicht gerechtfertigt, aufwendigere statistische Untersuchungen durchzuführen.

Bei den Korrelationsversuchen hat sich also gezeigt, dass sich bei Molasse-Gesteinen eine auf geophysikalische Logs gestützte Berechnung der Wärmeleitfähigkeit am zuverlässigsten mit den Formeln (1), (3) sowie mit dem Dichte-Log RHOB alleine durchführen lässt. Jedoch müssen erwartungsgemäss (siehe oben) die Koeffizienten der Gleichungen angepasst werden. Diese wurden mit einem mathematischen Fitting-Verfahren ermittelt, mit dem Ziel, eine möglichst gute Korrelation zwischen den berechneten Wärmeleitfähigkeits-Werten und den gemessenen Werten $K_{||}$ (trocken) zu erhalten (Fig. 7).

Als Ersatz für die Gleichung (1), bei welcher die Sonic-Geschwindigkeit v_p und die Porosität ϕ als Variablen auftreten, kann folgende Formel aufgestellt werden:

$$K1N_{neu} = -1.71 - 0.022 * N_{poro} + 0.97 * v_p \quad (4)$$

wobei $K1N_{neu}$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 N_{poro} = Porosität in % (Berechnung siehe oben)
 V_p = Sonic-Geschwindigkeit in km/s

Als Ersatz für die Formel (3), welche nur die Sonic-Geschwindigkeit berücksichtigt, kann Formel (5) geschrieben werden. Sie wurde mit Hilfe einer Regression durch den Nullpunkt aller K_{II} -Werte (trocken) der beiden Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen ermittelt. Im Gegensatz zu Formel (3) wurden also nur Molasse-Daten verwendet.

$$K3_{neu} = 0.54 * v_p \quad (5)$$

wobei $K3_{neu}$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 V_p = Sonic-Geschwindigkeit in km/s

Neu wurde eine Formel abgeleitet, welche auf dem Dichte-Log RHOB beruht:

$$K4_{neu} = -8.64 + 4.27 * RHOB \quad (6)$$

wobei RHOB = kompensierte Dichte in g/cm³

Solche direkten Beziehungen zwischen der Dichte eines Gesteines und dessen Wärmeleitfähigkeit wurden schon von zahlreichen Autoren festgestellt (siehe z.B. BEZIAT et al. 1992).

Mit Hilfe dieser drei für die OMM und USM im Raum Tiefenbrunnen/Bassersdorf kalibrierten Formeln (4), (5) und (6) wurden die Wärmeleitfähigkeiten anschliessend bei allen vier Bohrungen berechnet und zusammen mit der Geologie graphisch dargestellt (Fig. 8, 9, 10, 11a und 11b).

In Anbetracht der allgemeinen Unsicherheiten bei den Labormessungen, der Kalibrationsmethode sowie der unterschiedlichen Tiefenauflösung der geophysikalischen Logs wäre eine Glättung der berechneten Wärmeleitfähigkeits-Kurven für die praktische Anwendung sinnvoll (z.B. Wärmeentzugsberechnungen, siehe Kapitel 7). Diese Weiterbearbeitung ist für ein Folgeprojekt vorgesehen.

5.3 Resultate der Log-Berechnungen

5.3.1 Bassersdorf (Fig. 8):

Die drei verschiedenen Berechnungsarten führen über das gesamte untersuchte Tiefenintervall der USM zu recht ähnlichen Wärmeleitfähigkeiten. Im obersten Teil, bis ca. 604 m, fällt auf, dass die berechneten Werte ($\varnothing$ ca. 2.65 W/mK) deutlich höher liegen als im unteren Teil bis 800 m ($\varnothing$ ca. 2.3 W/mK).

Die Logs dieser Bohrung (BLASER et al. 1994) zeigen bei einer Tiefe von ca. 604 m einen markanten Wechsel in ihrem Charakter: Die natürliche Gamma-Strahlung (GR), die Sonic-Intervallzeit und auch die berechneten und gemessenen Tongehalte nehmen im unteren Intervall zu, die Porositäten ab. BLASER et al. (1994, p.122ff.) erklären diesen Umstand

damit, dass im oberen pelitischen Intervall zwischen 553 und 615 m Tiefe wegen wesentlich höheren Calcit- und Dolomitgehalten die Darstellung der totalen Porosität in scheinbaren Sandstein-Porositätseinheiten nicht angebracht ist. Dadurch erklärt sich auch, dass die aus den Dichte-Logs berechneten Porositäten wesentlich geringer sind als diejenigen aus den Neutron-Logs. Der höhere Zementierungsgrad im oberen Teil, (höhere Sonic-Geschwindigkeiten und Dichten, kleinere Porositäten) resultiert in berechneten Wärmeleitfähigkeiten, welche erwartungsgemäss höher liegen als im unteren Teil. Dies zeigt deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit unter anderem sehr stark von der lithologischen Zusammensetzung (Sand, Ton, Diagenese, Korngrösse) abhängig ist.

Innerhalb des unteren Teils wird tendenziell eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe beobachtet, was auf zunehmende Kompaktion zurückzuführen ist.

Die an trockenen Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten K_{II} stimmen gut mit den berechneten Werten überein.

Zusammenfassung:

- Alle Berechnungsarten geben übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten in der USM (~ 2.3 W/mK)
- Labormessungen stimmen mit berechneten Log-Werten überein
- Bessere Zementation mit Calcit und Dolomit im Intervall 553 und 615 m erhöht die Wärmeleitfähigkeit

5.3.2 Tiefenbrunnen (Fig. 9):

Die mit den Formeln (5,) und (6,) berechneten Wärmeleitfähigkeiten stimmen gut überein. Die mit Formel (4, $K1N_{neu}$) berechneten Werte unterscheiden sich jedoch in bestimmten Intervallen (z.B. zwischen 350 und 410 m) relativ stark von den anderen Werten ($K3_{neu}$ und $K4_{neu}$). Bei diesen Intervallen handelt es sich um vorwiegend tonig-siltige Partien mit hohen GR-Ablesungen, welche sich von übrigen, deutlich sandigeren Partien deutlich abheben. Da die $K1N_{neu}$ -Werte vermutlich zu tief liegen (bei ca. 400 m wurden sogar negative Werte berechnet), wird vermutet, dass in den tonigen Partien zu hohe Porositäten berechnet wurden. Die Porositäts-Berechnung müsste deshalb noch besser kalibriert werden.

In den sandigeren Partien sind verschiedene Tiefenintervalle mit relativ konstanten Wärmeleitfähigkeiten zu beobachten. OMM-Durchschnittswerte liegen um ca. 2.0 W/mK, also tendenziell etwas tiefer als in der USM der Bohrung Bassersdorf.

Die an trockenen Proben aus vorwiegend sandigen Partien gemessenen Wärmeleitfähigkeiten K_{II} stimmen gut mit den berechneten Werten überein.

Zusammenfassung:

- Die Berechnungsmethoden $K3_{neu}$ und $K4_{neu}$ geben in der OMM übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten von durchschnittlich ~ 2.0 W/mK)
- Labormessungen stimmen mit berechneten Log-Werten überein
- Der Einfluss der Porosität hat grossen Einfluss auf berechnete Wärmeleitfähigkeiten

5.3.3 Weiach (Fig. 10):

Die mit der $K1N_{neu}$ -Methode berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte sind auffallend tief. Bei dieser Berechnungsmethode sind die berechnete Porosität (N_{poro}) und die Intervallgeschwindigkeit von Bedeutung. Vergleiche mit dem Sonic- und Dichte-Log deuten darauf hin, dass mit der oben beschriebenen Methode (siehe Kap. 5.1) zu hohe Porositäten berechnet

wurden. Die mit den anderen Methoden (Formeln (5) und (6)) berechneten Wärmeleitfähigkeiten sind durchgehend höher, aber immer noch tiefer als die im Labor an feuchten Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten. Die mit (5) und (6) berechneten Wärmeleitfähigkeiten unterscheiden sich z.T. relativ stark voneinander und schwanken zwischen ca. 0.75 und 2.5 W/mK. Es können verschiedene Tiefenbereiche mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten unterschieden werden.

Bei der Interpretation der Resultate ist jedoch zu berücksichtigen, dass das bei Weiach untersuchte Molasse-Intervall sehr unteuf liegt. Die oberflächennahe Auflockerungszone (Entspannung) wird durch die geophysikalischen Logs besser erfasst, da generell grössere Tiefenintervalle abgetastet werden (Logs: 0.3-0.6 m) als bei punktuellen Messungen im Labor (dm-Bereich).

Zusammenfassung:

- Die Labormesswerte sind generell ca. 1 W/mK höher als die mit Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten (Einfluss oberflächennaher Auflockerungszone!)
- Für untiefe Bereiche (0-200 m) müssen mehr Kalibrationswerte gemessen werden

5.3.4 Weggis (Fig. 11a/b):

Alle drei verwendeten Berechnungsmethoden liefern ähnliche Wärmeleitfähigkeiten, welche durchschnittlich im Bereich zwischen 1.8 und 2.8 W/mK liegen. Deutlich können diskrete Tiefenabschnitte (50 - 200 m mächtig) mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden. Die Wärmeleitfähigkeiten aus den Cuttings-Messungen (durchschnittlich 1.9 - 2.7 W/mK) stimmen vor allem im oberen Teil der Bohrung bis ca. 1200 m recht gut mit den berechneten Werten überein. Hier sei daran erinnert, dass einerseits die Labormessmethode noch verbessert werden muss (Kap. 4.2.2) und andererseits die Kalibrationsversuche mit den Labormessungen von Weggis (Cuttings) erfolglos verliefen (siehe 5.2). Die hier angewandten Berechnungsmethoden wurden konnten nur mit Daten von Tiefenbrunnen und Bassersdorf kalibriert werden. Diese Bohrungen liegen jedoch relativ weit entfernt, in einem deutlich distaleren (nördlicheren) Ablagerungsmilieu des Molassebeckens mit unterschiedlichem lithologischem Charakter und höheren diagenetischen Reifegrad.

Zusammenfassung:

- Alle Berechnungsarten geben übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten in der USM (~1.8 - 2.8 W/mK)
- Kalibrationsdaten standen nur von relativ weit entfernten Bohrungen zur Verfügung

6. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur (E. Greber / B. Keller / W. Leu)

Bei der folgenden Auswertung geht es im wesentlichen darum zu untersuchen, ob sedimentologisch definierte Architektur-Elemente durch bestimmte Wärmeleitfähigkeits-Bereiche charakterisiert sind.

6.1 Auswertungsmethode

Bei den Bohrungen Bassersdorf (USM) und Weiach (USM) wurden über den gesamten untersuchten Bereich die sedimentologischen Architektur-Elemente bestimmt (BLASER et al. 1994, KELLER et al. 1990).

In der Bohrung Tiefenbrunnen liessen sich diese Elemente nur im gekerntem Bereich bestimmen, womit eine durchgehende Auswertung nicht möglich war. Für die Bohrung Weggis wurde auf eine solche Auswertung vorläufig verzichtet, da keine Kerne vorhanden sind.

Für die USM (Bassersdorf und Weiach) wurden folgende Architektur-Elemente ausgeschieden (siehe auch Kap. 3): RGS (sandiger Rinnengürtel), DFR (Durchbruchsfächer- und -rinnen), US (Überschwemmungssandstein), UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) und LAK (lakustrische Ablagerungen).

Die mit den Formeln (4), (5) und (6) berechneten Wärmeleitfähigkeits-Profile wurden über den Tiefenbereich von jeweils einem Architektur-Element gemittelt und pro Architektur-Element-Typ gegen die Tiefe aufgetragen (Fig. 12 und 13, *kleine* Symbole). Ebenfalls aufgetragen auf den Figuren 12 und 13 wurden die im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (*grosse* Symbole). Im Gegensatz also zu den kleinen Symbolen, welche berechnete, gemittelte Intervallwerte darstellen, handelt es sich bei den grossen Symbolen um Einzelmesswerte. Da die berechneten Wärmeleitfähigkeiten auch innerhalb desselben Architektur-elementes starken Schwankungen unterworfen sind, ist es nicht weiter erstaunlich, dass die Messwerte (*grosse* Symbole) von den Regressionsgeraden durch die Architektur-Element-Werte meist abweichen. Bei Figur 13 (Bohrung Weiach) ist weiter darauf hinzuweisen, dass hier die Messwerte von *feuchten* Proben stammen. Diese liegen in der Regel höher als jene Werte, welche an *trockenen* Proben gemessen werden. Die berechneten, gemittelten Intervallwerte hingegen stammen aus mit *trockenen* Proben kalibrierten Berechnungsgrundlagen (siehe 5.2).

6.2 Resultate

6.2.1 Bohrung Bassersdorf (Fig. 12)

Im Bereich der gesamten Unteren Süsswassermolasse sind die verschiedenen Architektur-Elemente kaum auf der Basis der Wärmeleitfähigkeit auseinanderzuhalten: Die drei ausgewerteten Architektur-Elemente DFR, US und UPS (Box charts in Fig. 12) sind durch eine grosse Bandbreite von Wärmeleitfähigkeiten charakterisiert, deren 1σ -Abweichungen vom Mittelwert sich teilweise überlappen. Allein eine schwache Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe wird beobachtet (Fig. 12). Ausser bei der $K4_{neu}$ -Methode zeigen die Überschwemmungssandsteine (US) generell höhere Wärmeleitfähigkeiten als die Sedimen-

te der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS). Dieser Umstand spiegelt die höheren Tongehalte des Architektur-Elementes UPS wieder.

Die generell höheren Wärmeleitfähigkeits-Werte oberhalb 604 m stehen mit dem höheren Karbonatanteil im Porensystem in Zusammenhang (siehe 5.3).

6.2.2 Bohrung Weiach (Fig. 13)

Die verschiedenen Architektur-Elemente sind in dieser Bohrung meist durch relativ enge Wärmeleitfähigkeits-Bereiche charakterisiert, welche alle generell mit zunehmender Tiefe grösser werden.

Die sandigen Rinnengürtel (RGS) weisen tendenziell die tiefsten Werte auf, als Folge der grössten Porositäten. Im Falle der Sedimente der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) sind die relativ tiefen Wärmeleitfähigkeit-Werte durch den höheren Tonanteil bedingt. Die 1σ -Abweichungen vom Mittelwert der Architektur-Elemente DFR, US und UPS überlagern sich stark, liegen aber über dem Bereich des Elementes RGS (Box charts in Fig. 13). Die erwähnte Überlagerung ist bis zu einem gewissen Grad auch mit der tendenziellen Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe zu erklären.

6.2.3 Folgerungen

Die zur Verfügung stehenden Daten erlauben lediglich eine detaillierte geothermische Charakterisierung der distalen Unteren Süsswassermolasse. Trotz des momentan noch spärlichen Datensatzes können folgende interessanten Beobachtungen über die geothermischen Eigenschaften gemacht werden:

Abhängigkeit von der Tiefe

Für ein bestimmtes Architektur-Element nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe generell zu. Dieser Umstand ist durch die zunehmende lithostatische Kompaktion erklärbar, die bei abnehmender Porosität eine grössere Verdichtung zur Folge hat.

Abhängigkeit von der sedimentären Architektur

Die Unterschiede der geothermischen Eigenschaften der einzelnen Architektur-Elemente sind in der distalen USM relativ gering. Sie treten in der stratigraphisch tiefer gelegenen Bohrung Weiach deutlicher zu Tage als in der höher gelegenen Bohrung Bassersdorf.

Ursache dieser eher schwachen Abhängigkeit ist die grundsätzlich recht ähnliche petrographische Zusammensetzung granulometrisch und faziell unterschiedlicher Architektur-Elemente (KELLER et al. 1990, KELLER 1992, BLASER et al. 1994). Alle Architektur-Elemente sind demnach als feldspatreiche Litharenite oder Litharenite anzusprechen, mit sehr variablen Quarzgehalten zwischen ca. 10 und 50 %. Ebenso sind die Tongehalte relativ ähnlich, da im pelitischen Architektur-Element UPS der Ton als Matrix, in der arenitischen DFR, US und RG als Bestandteil der lithischen Komponenten (kristalline Gesteine) vorliegt.

Interessanterweise sind die Unterschiede zwischen den arenitischen Architektur-Elementen DFR und US einerseits sowie RGs andererseits recht deutlich. Dieser Umstand erklärt sich dadurch, dass die Sandsteine der Rinnengürtel (RGs) wesentlich höhere Porositäten aufweisen als diejenigen der Überschwemmungssandsteine (US) und der Durchbruchfächer und -rinnen (DFR).

7. Modellrechnungen des Wärmeentzuges über eine Sonde mittlerer Tiefe (R.J. Hopkirk / W.J. Eugster)

7.1 Einleitung und Modellbeschreibung

Es ist wichtig, die Sensitivität der erreichbaren Wärmeentnahme aus dem Untergrund bezüglich Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Wirtgesteins abschätzen zu können. Um diese Sensitivität bei den hier untersuchten Materialien zu gewinnen, wurde eine Serie numerischer Simulationsrechnungen durchgeführt.

Es wurden drei Aspekte untersucht:

- die Auswirkung eines systematischen Fehlers bei der Schätzung der Wärmeleitfähigkeit von Molassegesteinen
- die Auswirkung des Eintretens eines der Extremwerte für Wärmeleitfähigkeit von Molassegesteinen
- die Auswirkung des Eintretens eines der Extremwerte für Wärmekapazität von Molassegesteinen

Die Berechnungen wurden mit dem Rechenprogramm COSOND durchgeführt. Das Finite-Differenzen Programm, geschrieben in z-r (zylindrischen) Koordinaten, ermöglicht die Simulation des Ausbaus und des Betriebes einer coaxialen Erdwärmesonde in einem horizontal geschichteten Untergrund. Der numerische Algorithmus bietet eine voll-implizite Lösung für das Temperaturfeld im zylindrischen Untergrundbereich und behandelt dabei die Strömung (laminar bzw. turbulent) und Wärmeübergänge im Sondenkreislauf, sowie allfälligen Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Bodenoberfläche. Teleskopierte Ausbaustufen des Bohrlochs und der Verrohrung werden berücksichtigt und alle thermische Belastungen dürfen beliebig zeitabhängig sein.

In den vier in der vorliegenden Studie untersuchten Bohrungen sind nur die Molasse-Ablagerungen der OMM und USM spezifisch betrachtet worden. In drei der vier Fälle (Ausnahme Weggis) beginnt der relevante Schichtenbereich erst in einer Tiefe von einigen hundert Metern. Es wurde deshalb ein möglichst einfaches Modell aufgestellt, um typische Auswirkungen von Variationen der thermischen Eigenschaften der Materialien in der Molasse zu zeigen.

Zu diesem Zweck dient für die Untersuchung von Wärmeleitfähigkeitseffekten ein 2-Schichten-Modell von 950 m Tiefe. Eine obere Schicht mit eher niedriger Wärmeleitfähigkeit reicht bis in eine Tiefe von 475 m, die zweite Schicht bis zur Modellunterkante bei 950 m. Der Modellradius beträgt 150 m. Die thermischen Eigenschaften wurden dabei nicht in jeder Tiefe über ihren theoretisch maximal möglichen Variationsbereich geändert, sondern jeweils nur in realistischem Rahmen in den beiden modellierten Schichten.

Zur Untersuchung der spezifischen Wärmekapazität wurden die thermischen Eigenschaften der beiden Schichten gleichgestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des ganzen unterirdischen Halbraumes wurde bei einem mässigen Wert (2.4 W/mK) konstant gehalten und nur die spezifische Wärmekapazität variiert.

Der Energieentzug erfolgt durch Einsatz einer mitteltiefen Erdwärmesonde in einem 750 m tiefen Bohrloch. Dabei wird die obere Schicht sowie 275 m der unteren Schicht durchbohrt.

Die Konstruktion der Sonde ist eher "konventionell":

- 7" Verrohrung zementiert in einem 8 1/2" Bohrloch ohne jegliche Art von Teleskopierung
- koaxial-angeordnete, gut zentrierte Steigleitung aus Kunststoff (PE) mit Aussendurchmesser 90 mm

Um nützliche Resultate zu erhalten, muss die modellierte Erdwärmesonde in einem möglichst typischen Flüssigkeitstemperaturbereich arbeiten. Der Grund dafür ist, dass Wärmepumpen, die bei einer solcher geothermischen Anwendung am ehesten in Frage kommen, am optimalsten in einem beschränkten Temperatur-Bereich arbeiten: Zudem ist die potentielle Entzugsleistung vom Temperatur-Unterschied zwischen der Wärmeträgerflüssigkeit und der Formation abhängig. Der Bereich wurde für sämtliche Fälle so gewählt, dass nach einem Periode von 25 Jahren in Dauerbetrieb eine Quellentemperatur (Temperatur des gelieferten Warmwassers am Sondenkopf) von ca. 10°C resultierte. Dadurch sollte es erfahrungsgemäss möglich sein, auch bei typischen saisonalen Lastschwankungen während dieser Periode mit reinem Wasser zu arbeiten. Eine Differenz zwischen der Quellen- und der Rückgabetemperatur im hydraulischen Kreislauf von 3.5K wurde in jedem Fall angenommen. Es ist zu erwähnen, dass unter diesen Voraussetzungen die Dauerleistung in den beiden Basisfällen 21.9 kW betrug (siehe Tabellen 6 und 7).

Durch iterative Änderung der Durchlaufgeschwindigkeit im Sondenkreislauf konnten die langzeitigen Abkühlungsverläufe von Variante zu Variante sehr genau dem jeweiligen Basisfall angepasst werden. Dies bedeutet, dass die zeitlichen Verläufe der Quellen- und Rückgabemperaturen in der Figur 14 auch für sämtliche weiteren Rechenläufe repräsentativ sind.

7.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit

Das Temperaturfeld im Wirtgestein wird bestimmt durch die Annahme einer mittleren Erdoberflächen-Temperatur von 10°C sowie durch ein vertikales Temperaturprofil, welches aus einem geothermischen Wärmefluss von 80 mW/m² resultiert. Die spezifische Wärmekapazität des Formationsgesteins wurde beim Wert von 850 J/kgK für die beiden Schichten belassen.

Die ersten drei Fälle in der Tabelle 6 (Basis, 022 und 032) zeigen die Auswirkungen globaler Wärmeleitfähigkeits-Änderungen in der Höhe von ± 0.5 W/mK der unteren Schicht. Die Werte sind indikativ für Auswirkungen von systematischen Fehlern bei der Schätzung der Wärmeleitfähigkeit der unteren Schicht (Molasse).

Kommen ähnliche Schätzungsfehler auch in der oberen Schicht dazu, nehmen die Änderungen bei der Entzugsleistung noch weiter bis gegen 20% zu.

Zweck der Berechnungen 043 und 053 war, die Effekte von Extremänderungen der Wärmeleitfähigkeit nach oben in der unteren Schicht und nach unten in der oberen Schicht zu zeigen, und diese mit den Auswirkungen der Schätzungsfehler zu vergleichen. Signifikant ist die grössere Wirkung auf das Leistungspotential in der unteren Schicht bei Änderung der Wärmeleitfähigkeit in ähnlicher Grössenordnung in beiden Schichten.

Tab. 6: Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierenden Wärmeleitfähigkeiten im zwei-Schicht-Modell.

Berechnung	K_{oben} [W/mK]	K_{unten} [W/mK]	Durchfluss [m ³ /h]	Entzug [MWh/a]	Veränderung [%]
Basisfall	2.0	2.7	5.4	191.7	0.0
Run 022	2.0	3.2	6.1	215.8	+12.6
Run 032	2.0	2.2	4.7	167.2	-12.8
Run 043	2.0	3.8	6.8	243.2	+26.9
Run 053	1.0	2.7	4.6	161.9	-15.5

7.3 Einfluss der spezifischen Wärmekapazität

In dieser Untersuchung wurde das Temperaturfeld wieder durch die gleichen Annahmen wie oben bestimmt, die Wärmeleitfähigkeit des Wirtgesteins jedoch wurde beim Wert von 2.4 W/mK über den gesamten Tiefenbereich des Modells belassen.

Die Resultate (Tab. 7) zeigen, dass der Einfluss der Wärmekapazitäts-Änderungen auf das Entzugspotential bei diesen Modellierungen relativ gering ist.

Tab. 7: Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierender Wärmekapazität des gesamten Wirtgesteins.

Berechnung	$C_{\text{Formation}}$ [J/kgK]	Durchfluss [m ³ /h]	Entzug [MWh/a]	Veränderung [%]
Basisfall	850.0	5.4	191.7	0.0
Run 063	700.0	5.3	189.8	-0.9
Run 073	1600.0	5.7	202.5	+5.5

8. Schlussfolgerungen / Nutzen für die Praxis

- ⇒ Die Kompilation aller zur Zeit verfügbaren geothermischen Daten von schweizerischen Molasse-Gesteinen (Beilage 1) bildet eine neue Grundlage für die Planung und Konzipierung von geothermischen Anlagen.
- ⇒ Die Wärmeleitfähigkeiten nehmen innerhalb ähnlicher Lithologien mit zunehmender Tiefe und Kompaktion tendenziell zu. Für die USM liegen die durchschnittlichen Werte bei Bassersdorf zwischen ca. 2.2 und 2.7 W/mK, bei Weiach zwischen ca. 1.1 und 1.8 W/mK und bei Weggis zwischen ca. 2.8 und 2.8 W/mK. Für die OMM der Bohrung Tiefenbrunnen wurden durchschnittliche Werte zwischen ca. 1.7 und 2.4 W/mK ermittelt. Offensichtlich liegen hier deutlich regionalgeologische (Diagenese, Kompaktion) und formationsspezifische Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten vor, die durch das spärliche Datenmaterial, aber auch in Folge des beschränkten Forschungssetats nicht genügend ergründet werden konnten.
- ⇒ Die Labormessungen (trocken und feucht) an Kernen und Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis zeigen einen bedeutenden Einfluss der Sättigung mit Porenflüssigkeit auf gemessene Wärmeleitfähigkeiten. Die Abweichungen zwischen den Wärmeleitfähigkeiten der *feuchten* Kerne und den Wärmeleitfähigkeiten der entsprechenden Cuttings liegt im Mittel unter $\pm 10 - 15 \%$.
- ⇒ Die Umrechnung der an den Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten zu Matrix-Wärmeleitfähigkeiten ist mit methodisch bedingten Schwierigkeiten verbunden und muss in Zukunft noch besser untersucht werden.
- ⇒ Geophysikalische Bohr-Logs erlauben es, ohne grossen Arbeitsaufwand durchgehende und relativ zuverlässige Wärmeleitfähigkeiten zu berechnen. Die Berechnungsmethoden, welche auf den Porositäten, den Sonic-Geschwindigkeiten und den Dichte-Werten beruhen, konnten mit den Wärmeleitfähigkeits-Messungen an den trockenen Kernen K_H kalibriert werden. Generell scheinen die Berechnungsmethoden, welche alleine auf der Sonic-Geschwindigkeit oder der Gesteinsdichte beruhen, die zuverlässigsten Resultate zu liefern. Wird auch die Porosität berücksichtigt sollten nur zuverlässig kalibrierte Log-Porositäten verwendet werden.
- ⇒ Für die Kalibrierung der Berechnungsmethoden (Logs) standen nur 8 Datenpunkte aus distalen Bereichen des Molassebeckens zur Verfügung. Vor einer flächenhaften Anwendung der Berechnungsformeln müssen unbedingt mehr Labormessungen durchgeführt werden.
- ⇒ In der distalen Unteren Süsswassermolasse ist nur eine schwache Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur feststellbar. Diese für die Praxis wichtige Erkenntnis ist durch die sehr ähnliche petrographische Zusammensetzung der verschiedenen Architektur-Elemente erklärbar. Innerhalb der sandigen Architektur-Elemente jedoch ist eine deutliche Unterscheidung infolge verschiedener Porositäten und diagenetischer Zementation erkennbar.
- ⇒ Die Wichtigkeit der Wärmeleitfähigkeit bei Wärmeentzugsmodellierungen wird sogar unter konservativ gestalteter Berechnungen deutlich. Es ist deshalb für die Auslegung jeder Edwärmesonde wichtig, die Wärmeleitfähigkeit möglichst genau zu kennen. Bei tiefen Sondenanlagen haben Fehlschätzungen der Wärmeleitfähigkeit von ± 0.5 W/mK Variationen des Wärmeentzugspotentials von bis zu 20% zur Folge.

⇒ Obwohl nur eine kleine Auswirkung der spezifischen Wärmekapazität auf Wärmeentzugsrechnungen demonstriert werden konnte, ist die volle Signifikanz dieses Parameters noch nicht klar. Es ist hier jedoch zu berücksichtigen, dass im Rahmen dieser Pilotstudie (limitierter Datensatz und Aufwand) nur eine tiefe Erdwärmesonde in Dauerbetrieb simuliert wurde. Die Berechnung verschiedener dynamischer Lastfälle liegt ausserhalb des Rahmens des vorliegenden Projektes. Dies nicht zuletzt deshalb, weil konkrete Erfahrungen mit der Temperaturdynamik tieferer, in Betrieb stehender Erdwärmesonden, erst beim Projekt Weggis gesammelt werden. Die Wärmekapazität ist jedoch relevant für Speicheranlagen und sich saisonal voll regenerierende Erdwärmesonden im untiefen Bereich (0 - 100 m).

Die vorliegende Studie zeigt somit, dass es möglich ist, die geothermischen Eigenschaften der Molasse-Gesteine im Schweizer Molassebecken mit kostengünstigen und kalibrierten Methoden auf zuverlässige Weise zu berechnen. Dies sind positive Signale im Hinblick auf eine möglichst wirtschaftliche Nutzung der Geothermie in der Schweiz.

9. Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Um ein wirksames Planungsinstrument für geothermische Anlagen im gesamten Schweizer Molassebecken zu erhalten, sollten in einem Folgeprojekt folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Flächendeckende Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten bis in Tiefen von ca. 2 km mit Hilfe geophysikalischer Logs. Glättung der berechneten Wärmeleitfähigkeiten über praktisch anwendbare Tiefenintervalle.
- Die Methode der Wärmeleitfähigkeitsmessung an Cuttings im Labor sollte weiter optimiert und mittels Eichung mit einer viel grösseren Anzahl von Kern- und Log-Daten abgesichert werden.
- Zusätzliche Wärmeleitfähigkeits-Messungen an Kernen (bisher nur 8 Messungen), um die in diesem Bericht beschriebenen Berechnungsmethoden mittels Logs abzusichern. Vor allem im untiefen Bereich (0 bis 300 m) fehlen gute Messdaten. Möglich wäre z.B. eine Neubeprobung der Bohrung Weiach. Die bisherige Kalibration konnte nur relativ punktuell, im Raum Bassersdorf / Tiefenbrunnen, durchgeführt werden. Wichtig wäre aber, dass auch Molasse-Kerne aus anderen Regionen (z.B. Zentral- und Westschweiz) kalibriert werden können.
- Die regionalgeologischen Unterschiede infolge unterschiedlicher Diagenese sollten detaillierter untersucht werden. Hierzu ist eine Ausdehnung eines Folgeprojektes auf das ganze Molasse-Becken erforderlich.
- Die grosse Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Petrographie und der Petrophysik konnte zwar für die distale USM anhand der Architektur-Elemente nachgewiesen werden. Wie sich dieser Einfluss in den quarzreichen Gruppen OMM und OSM niederschlägt, müsste durch weitere Untersuchungen analog zu den vorliegenden geklärt werden. Weitere Untersuchungen müssten demnach auch die Sedimentpetrographie und die Petrophysik berücksichtigen, wie dies im ursprünglichen Projektvorschlag vorgesehen war.
- Es sollte versucht werden, die Wärmeleitfähigkeit, basierend auf der mineralogischen Zusammensetzung zu berechnen (bei sehr geringer Porosität oder genauer Kenntnis der Porosität, des Sättigungsgrades und der Art der Porenfüllung).
- Es sollte getestet werden, ob die Wärmeleitfähigkeiten auch mit seismischen Profilen, respektive mit den seismischen Geschwindigkeiten, berechnet werden können.
- Labormessungen der Wärmekapazität sowie Entwicklung neuer Messmethoden. Es bestehen bereits vielversprechende Ansätze zur Messung dieses Parameters, welcher bei der Konzipierung geothermischer Anlagen ebenso wichtig wie die Wärmeleitfähigkeit ist.
- Weitere Berechnungen von dynamischen Belastungen an Erdwärmesonden in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität sollten durchgeführt werden. Zudem sollte auch der untiefere Bereich (0-100 m, heute grösste Dichte von Speicheranlagen und Erdwärmesonden) berücksichtigt werden, wo generell grosse Variationen der oben genannten Parameter auftreten.

Verdankungen

Die Autoren danken Frau Heidi Haas (Universität Bern, Beprobung Weggis), Herrn B.-F. Iseli (Effretikon, Beprobung Tiefenbrunnen), Herrn K. Fehr (AGW Zürich), Herrn Dr. P. Blümling (Nagra, Logs Bassersdorf) sowie den Herren R. Schegg und B. Loup (Résumé français) für ihre zuvorkommende Mitarbeit.

Literaturverzeichnis

- AMMANN, M., BIRKHÄUSER, P., BLÄSI, H.R., LAVANCHY, J.-M., LÖW, S., MEIER, B. & MÜLLER, W.H. (1993): Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf. Charakterisierung mittels Geologie, Petrophysik und Fluid Logging. - NTB, 92-03, 76 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. & 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.
- 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 issledovaniya skvashin. - Moscow.
- EUGSTER, W. J., HOPKIRK, R. J., KÄLIN, B., RYBACH, L. & SEIFERT, P. (1992): Das Betriebsverhalten der Erdwärmesonde. Dezentrales Heizen durch Nutzung der untiefen Geothermie. - SIA, 46, 6 p..
- EVANS, T.R. (1976): Thermal properties of North Sea rocks. - The Log Analyst, 18/2, p. 3-12.
- GEOFORM (1994a): Bestandesaufnahme bestehender Tiefbohrungen in der Schweiz. - Bericht Geoform AG, gf-156-1, p. 13.
- GEOFORM (1994b): Geothermiebohrung Weggis - Schlussbericht Geologie/Geophysik/Bohrtechnik. - Bericht Geoform AG, gf-138-1, p.31.
- GIOVANOLI, F. & HSÜ, K. J. (1981): Die wissenschaftliche Sondierbohrung im tiefsten Teil des Zürichsees. - Neue Zürcher Zeitung Nr. 155 (8.7.1981).
- 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., GRÜNENFELDER, T., KELLER, B. & WYSS, R. (1994): Die Geothermie-Bohrung Weggis, Kanton Luzern. - Bull. schweiz. Ver. Petroleum-Geol. u. -Ing., 61/138, p. 17-43.
- HOPKIRK, R. J., RYBACH, L. & STADLER, T. (1994): Tiefe Erdwärmesonden. - In: Sanner, B. & Lehmann, A. (ed.): Tagungsbericht 2. Symposium 'Erdgekoppelte Wärmepumpen'. Informationszentrum Wärmepumpen+Kältetechnik, Karlsruhe. IWZ-Bericht 1/94, p. 265-274.
- HOUBOLT, J.J.H.C. & WELLS, P.R.A. (1980): Estimation of heat flow in oil wells based on a relation between heat conductivity and sound velocity. - Geol. Mijnbouw, 59/3, p. 215-224.
- KELLER, B. (1989): Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. - Dissertation, Bern, 403 p.

- KELLER, B., BLÄSI, H.-R., PLATT, N.H., MOZLEY, P.S. & MATTER, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysik. Eigenschaften am Beispiel der Bohrung Langenthal. - Nagra NTB 90-41, 100 p.
- KELLER, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. - *Eclogae geol. Helv.*, 85/3, p. 611-651.
- MATTER, A., PETERS, T., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., ISCHI, H. & MEYER, CH. (1988a): Sondierbohrung Weiach, Geologie (Text- und Beilagenband). - Nagra NTB 86-01, 438 p.
- MATTER, A., PETERS, T., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F. & WEISS, H.-P. (1988b): Sondierbohrung Schafisheim, Geologie. Test- und Beilagenband. - Nagra NTB, 86-03, 321 p.
- MENGIS & LORENZ (1994): Sanierung des Krienbaches (Kriens-Luzern). - Bericht über die geologische Aufnahme des Gütschstollens. Bauherrschaft GALU (Stadt Luzern und Gemeinde Kriens), Landeshydrologie und -geologie (Bern) und Geologisches Institut der Universität Bern. 19 p. + Fig./Profile.
- PRIBNOW, D. (1994): Ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie. - *Fortschr.-Ber., VDI Reihe 19*, Nr. 75, Düsseldorf.
- 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-InformationsZentrum 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. (1989): Geothermische Detailkartierung (1:100000) in der zentralen Nordschweiz mit besonderer Berücksichtigung petrophysikalischer Parameter. - Diss. ETH, Nr. 8941, 208 p.
- 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, Seismic exploration., 18, 583 p.
- SEIFERT, P.K., EUGSTER, W.J., KÄLIN, B. & HOPKIRK, R.J. (1992): Auswirkung von Bergklima und Bodentypen auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden. - Polydynamics Ltd. im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW.
- SEKIGUCHI, K. (1984): A method for determining terrestrial heat flow in basinal areas. - *Tectonophysics*, 103, 67-79.
- STADLER, T. (1995): Messung der Wärmeleitfähigkeit an Bohrkern mit dem TK04 der Gruppe für Geothermie am Institut für Geophysik, ETH Hönghenberg. - Interner Bericht.
- STADLER, T., HOPKIRK, R.J. & HESS, K. (1995b): Auswirkungen von Klima, Bodentyp und Standorthöhe auf die Dimensionen von Erdwärmesonden in der Schweiz. - Polydynamics Ltd. im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW.
- VASSEUR, G., BRIGAUD, F. & DEMONGODIN, L. (1995): Thermal conductivity estimation in sedimentary basins. - *Tectonophysics*, 244, 167-174.

Figuren 1 - 14

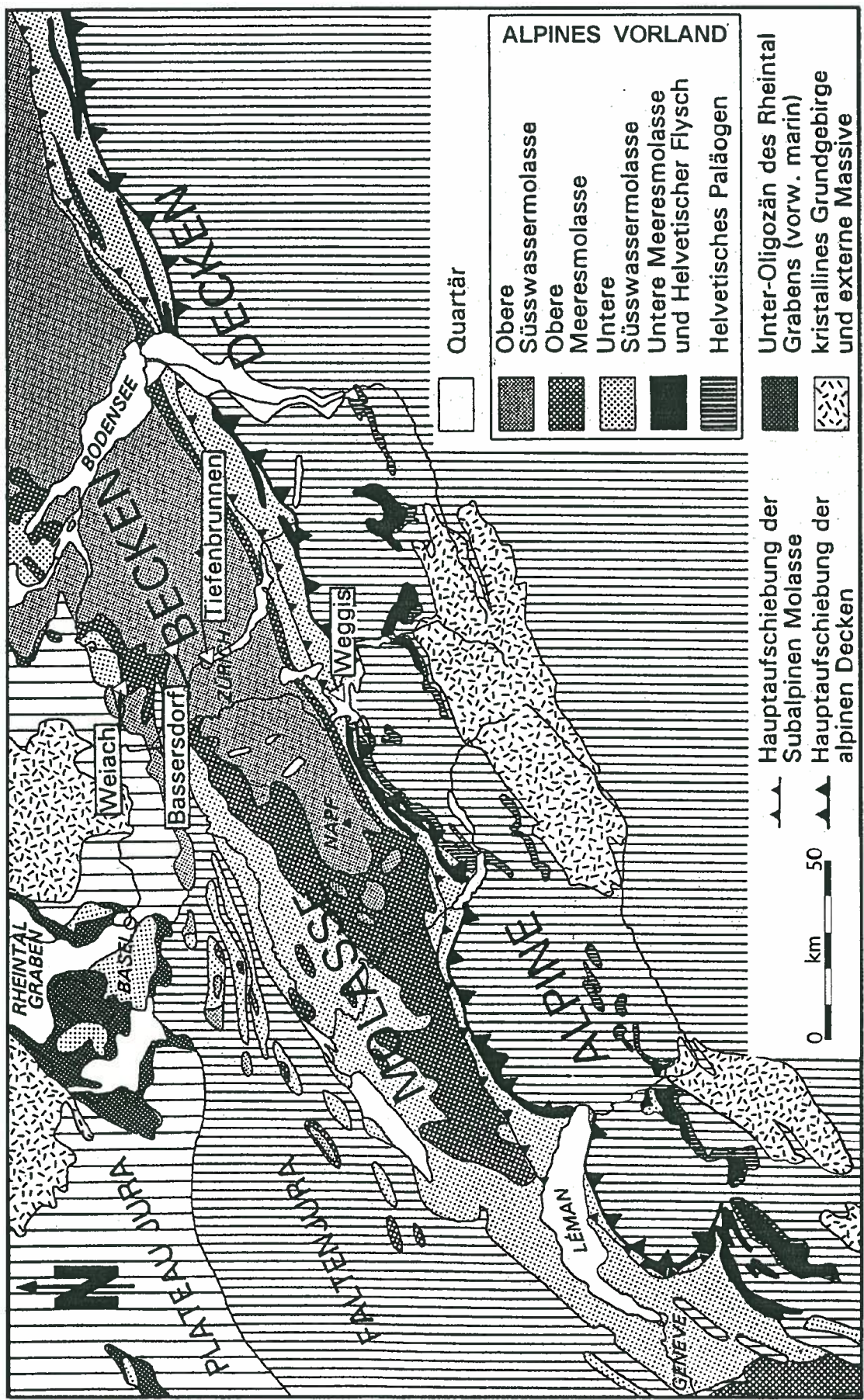


Fig 1: Geologische Übersichtskarte des Molasse-Beckens mit den Lokalitäten der beprobten Bohrungen (nach KELLER 1992).

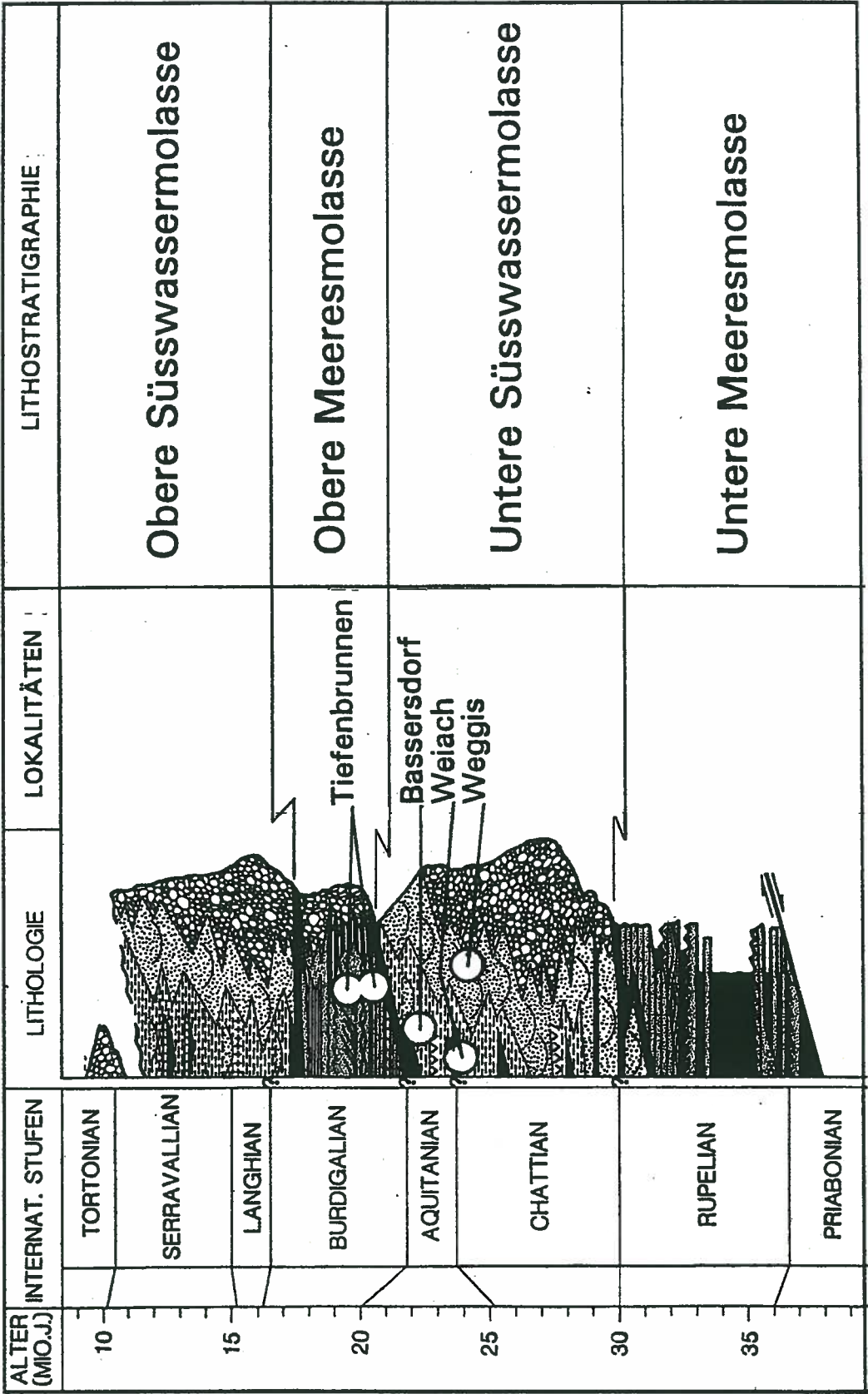


Fig 2: Stratigraphisches Sammelprofil der untersuchten Molasseeinheiten mit relativer Position der beprobten Intervalle (nach KELLER 1992).

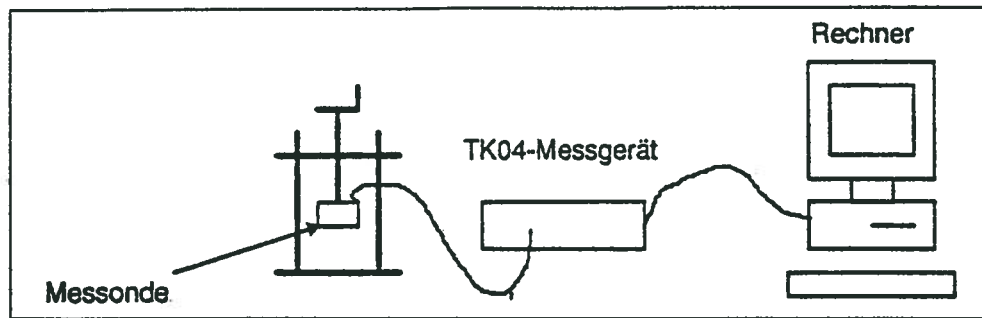


Fig 3: Schematische Darstellung der Messapparatur

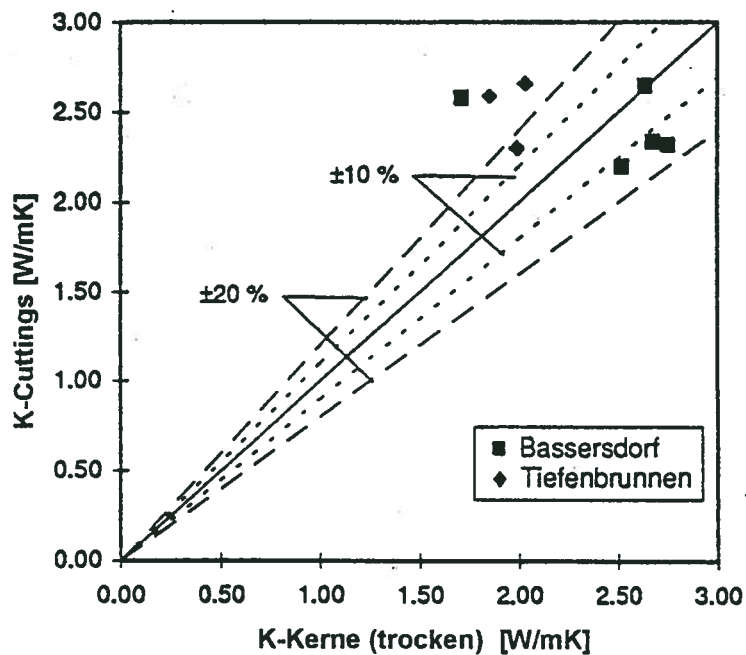


Fig 4: Vergleich zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Kerne (trocken) und der Cuttings (Matrixwert, siehe Text).

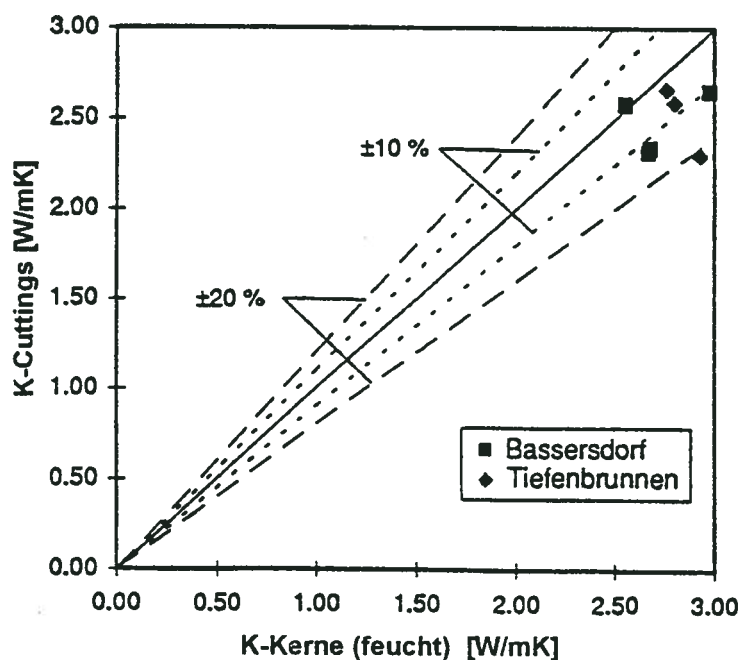


Fig 5: Vergleich zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Kerne (feucht) und der Cuttings (Matrixwert, siehe Text).

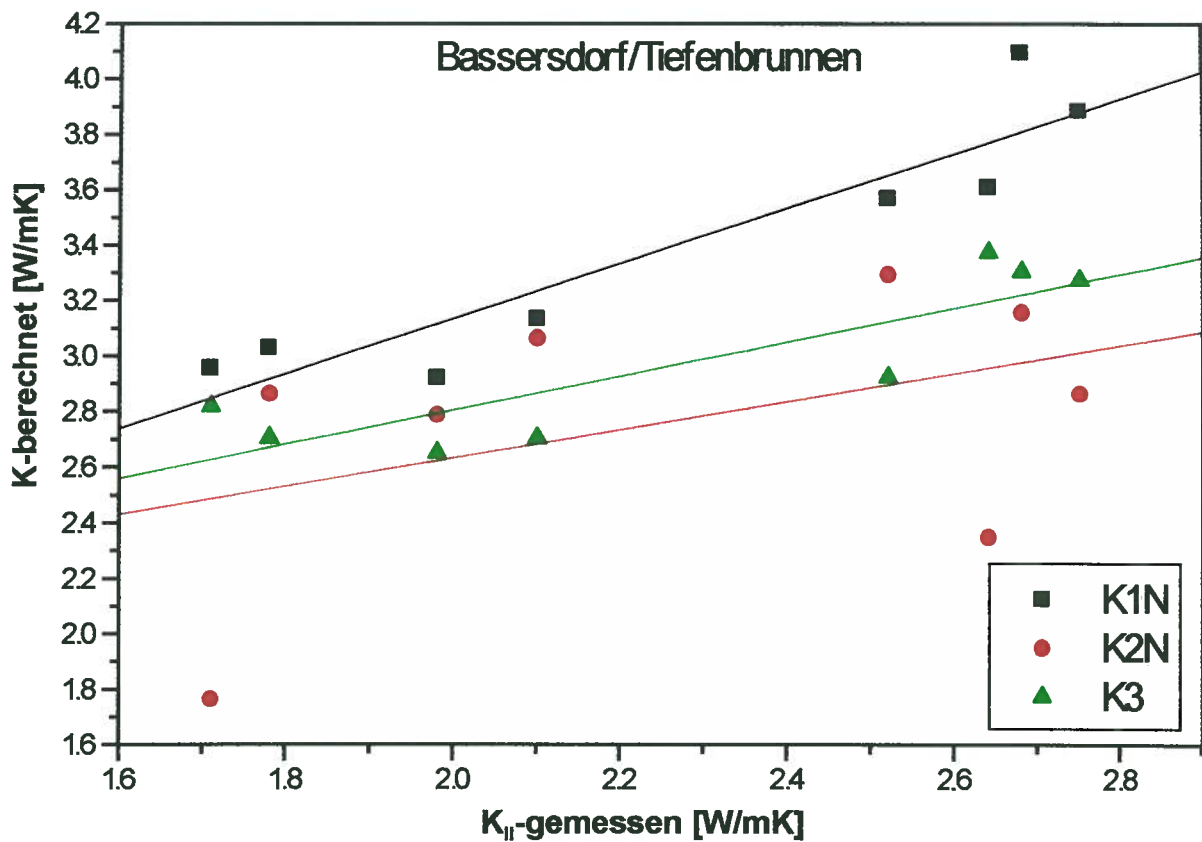


Fig 6: Korrelation von K_{II} -gemessen (trocken) vs. K1N/K2N/K3-Logs (Korrelationsgeraden: $y=A+B \cdot x$) für die Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen (für Berechnungsmethode siehe Text).

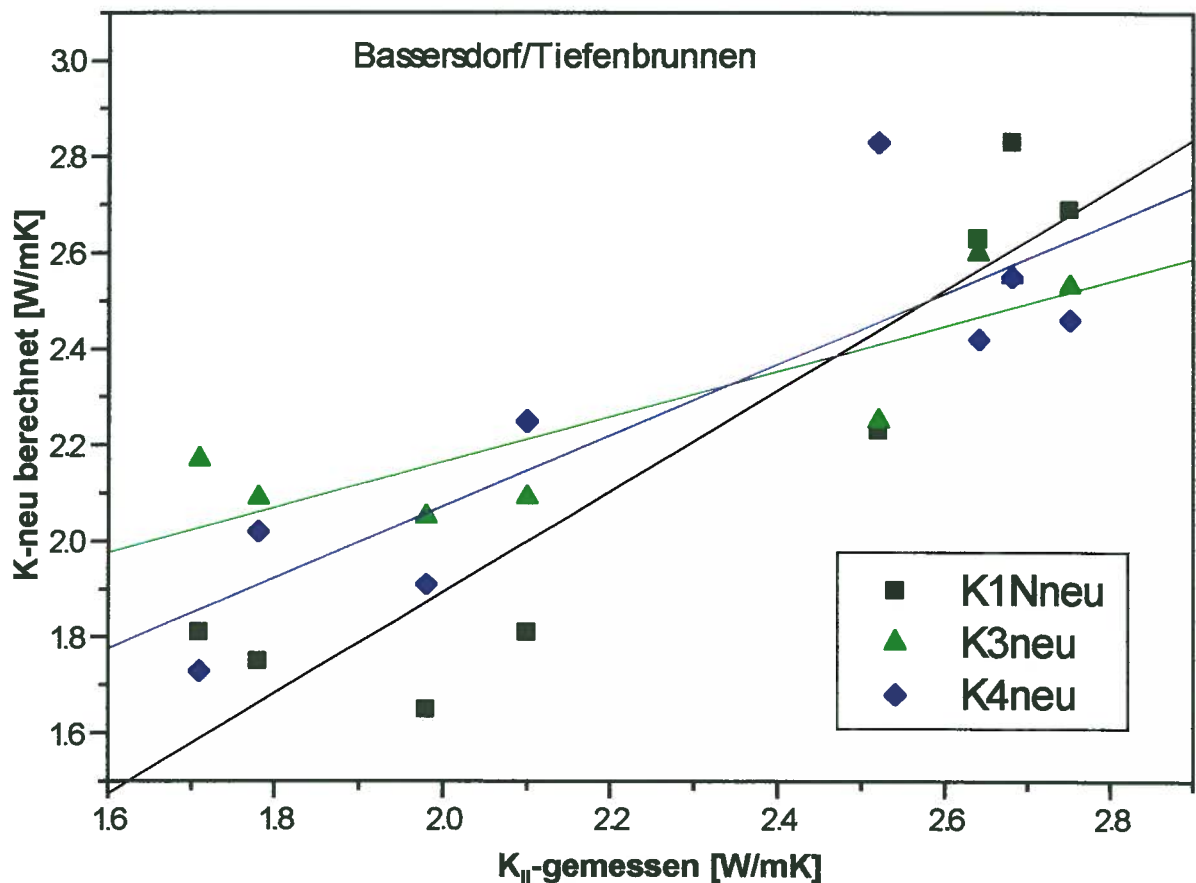


Fig 7: Korrelation von K_{II} -gemessen (trocken) vs. $K1N_{neu}/K3_{neu}/K4_{neu}$ -Logs (Korrelationsgeraden: $y=A+B \cdot x$, neu kalibriert) für die Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen (für Berechnungsmethode siehe Text).

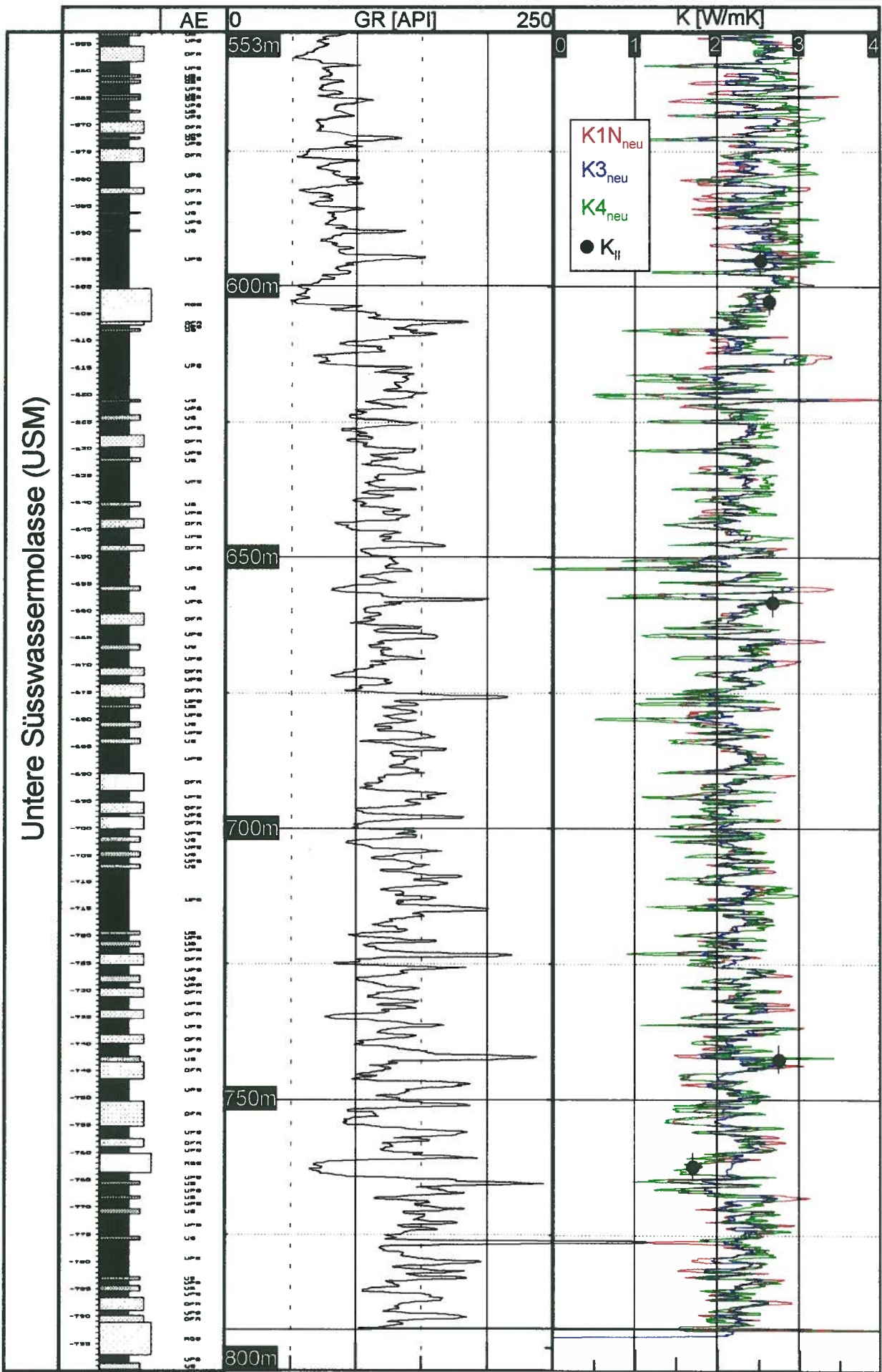


Fig. 8: Sammelprofil Bassersdorf (USM) 1:1000 mit berechneten ($K1N_{neu}$, $K3_{neu}$, $K4_{neu}$) und gemessenen (K_{II} trocken) Wärmeleitfähigkeiten. AE = sedimentäre Architektur-Elemente

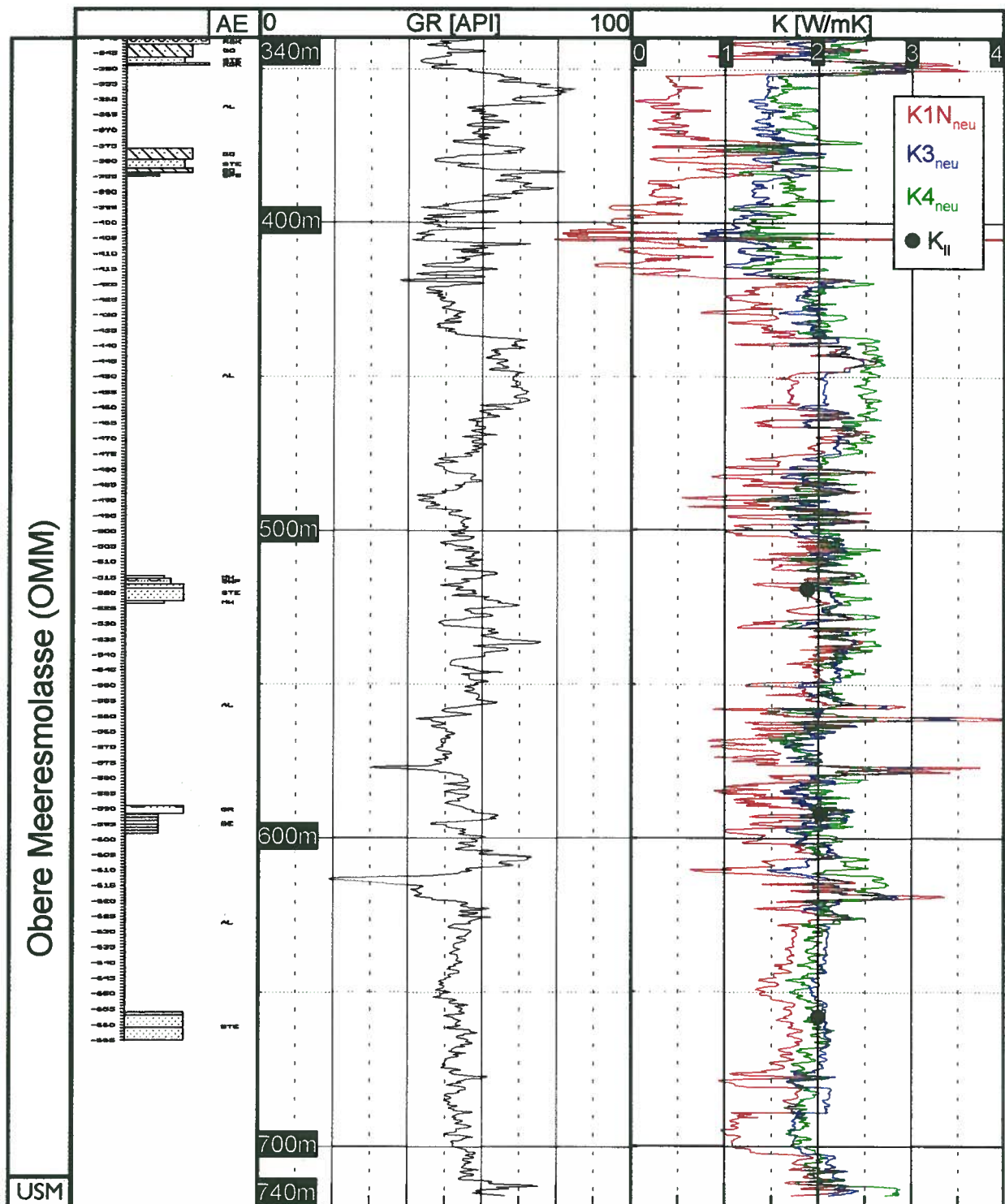


Fig. 9: Sammelprofil Tiefenbrunnen (OMM) 1:2000 mit berechneten ($K1N_{neu}$, $K3_{neu}$, $K4_{neu}$) und gemessenen (K_{II} trocken) Wärmeleitfähigkeiten. AE = sedimentäre Architektur-Elemente (siehe Kap. 3).

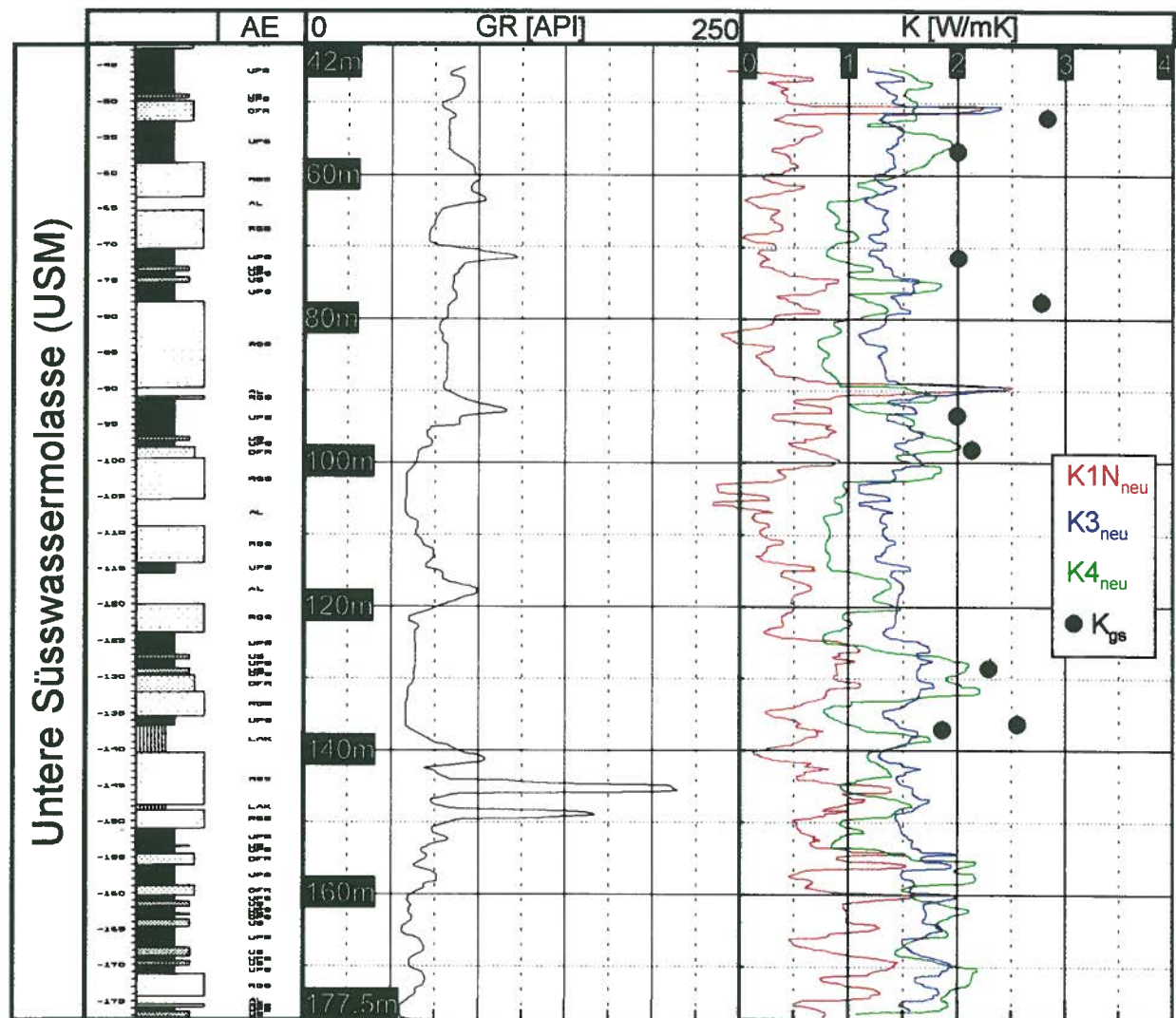


Fig.10: Sammelprofil Weiach (USM) 1:1000 mit berechneten ($K_{1N_{neu}}$, $K_{3_{neu}}$, $K_{4_{neu}}$) und gemessenen (K_{gs}) Wärmeleitfähigkeiten (feucht). AE = sedimentäre Architektur-Elemente (siehe Kap. 3).

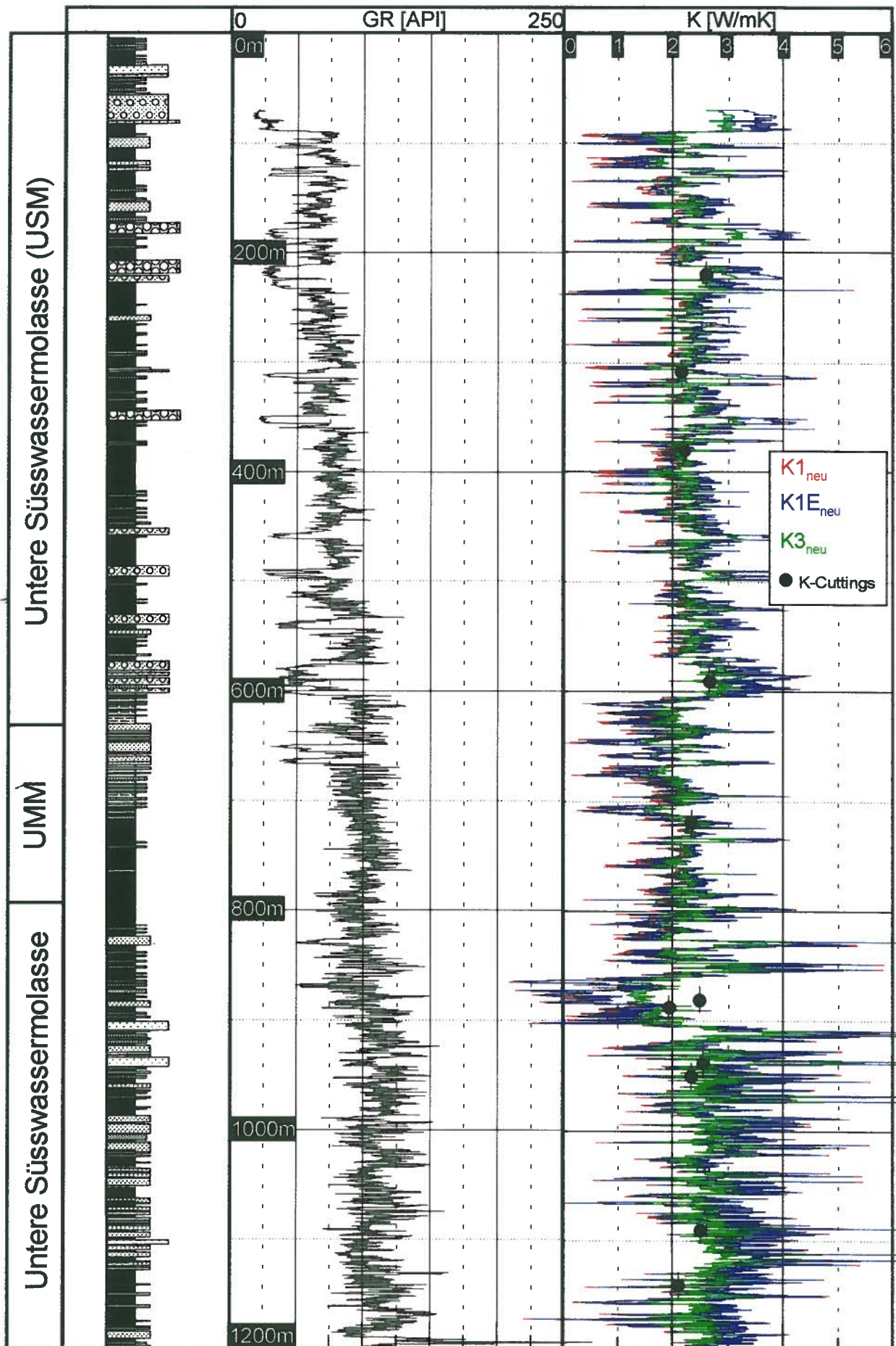


Fig. 11a: Sammelprofil Weggis 0 - 1200 m (1:5000) mit berechneten ($K1_{neu}$, $K1E_{neu}$, $K3_{neu}$) und an Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Matrix-Werte, siehe Text).

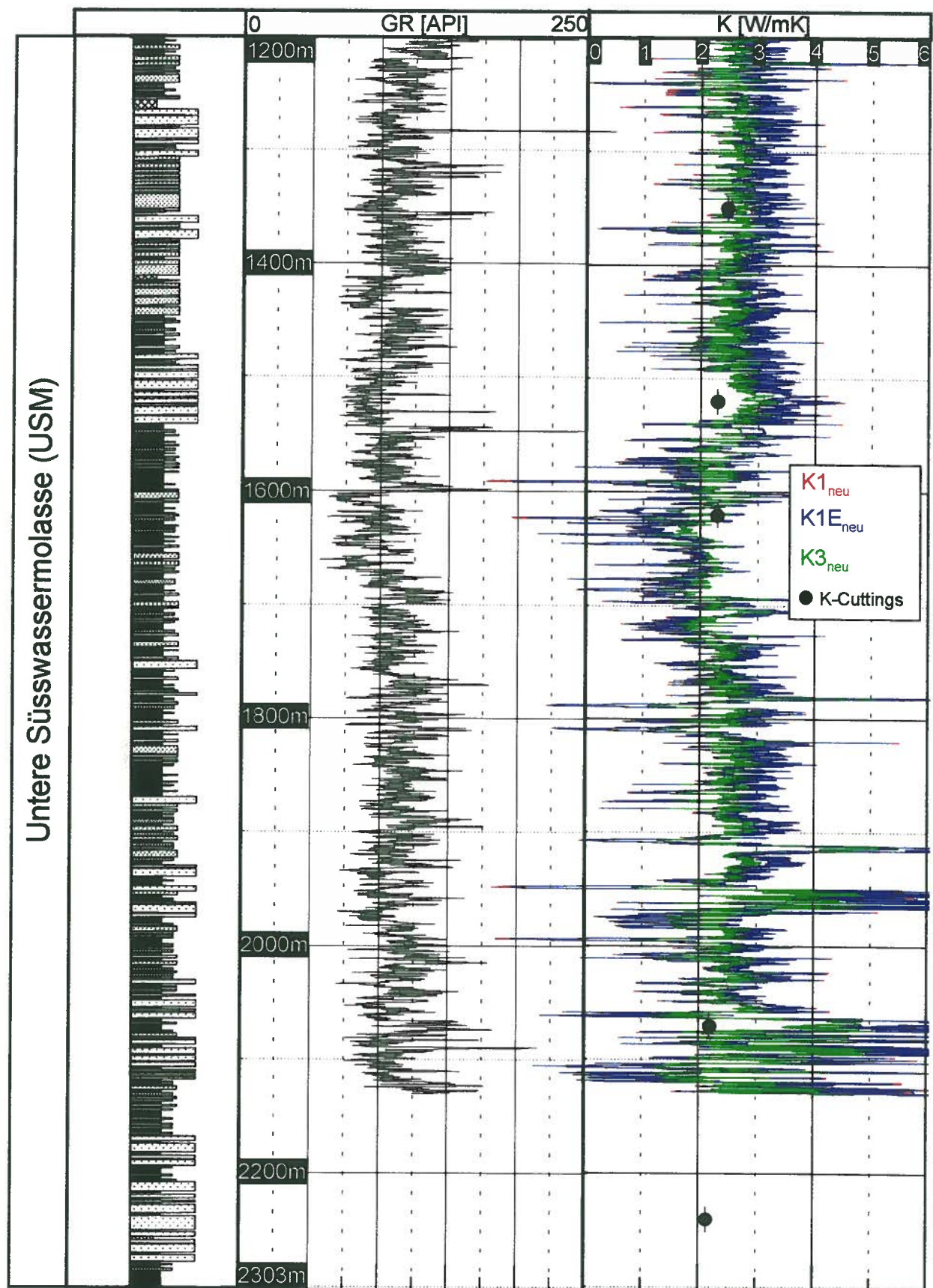


Fig. 11b: Sammelprofil Weggis 1200 - 2303 m (1:5000) mit berechneten ($K1_{neu}$, $K1E_{neu}$, $K3_{neu}$) und an Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Matrix-Werte, siehe Text).

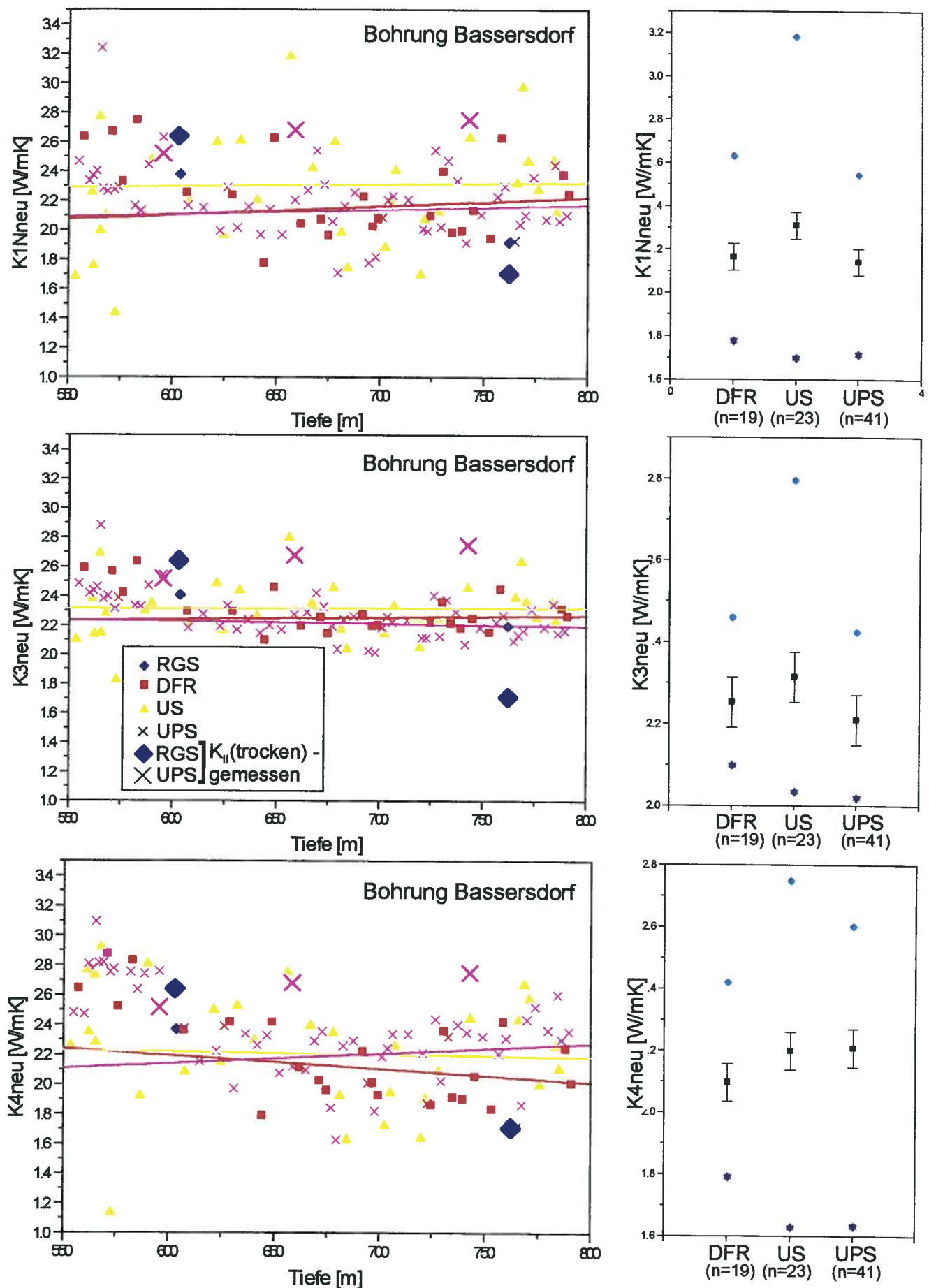


Fig. 12: Korrelation der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Architektur-Elementen (Bassersdorf). Die Korrelationsgeraden und Box charts wurden nur mit Daten aus Tiefen grösser als 600 m berechnet (Box charts: Farbige Symbole = Minimal- und Maximalwert, schwarze Quadrate = Mittelwert, Linie = 1 σ -Abweichung)

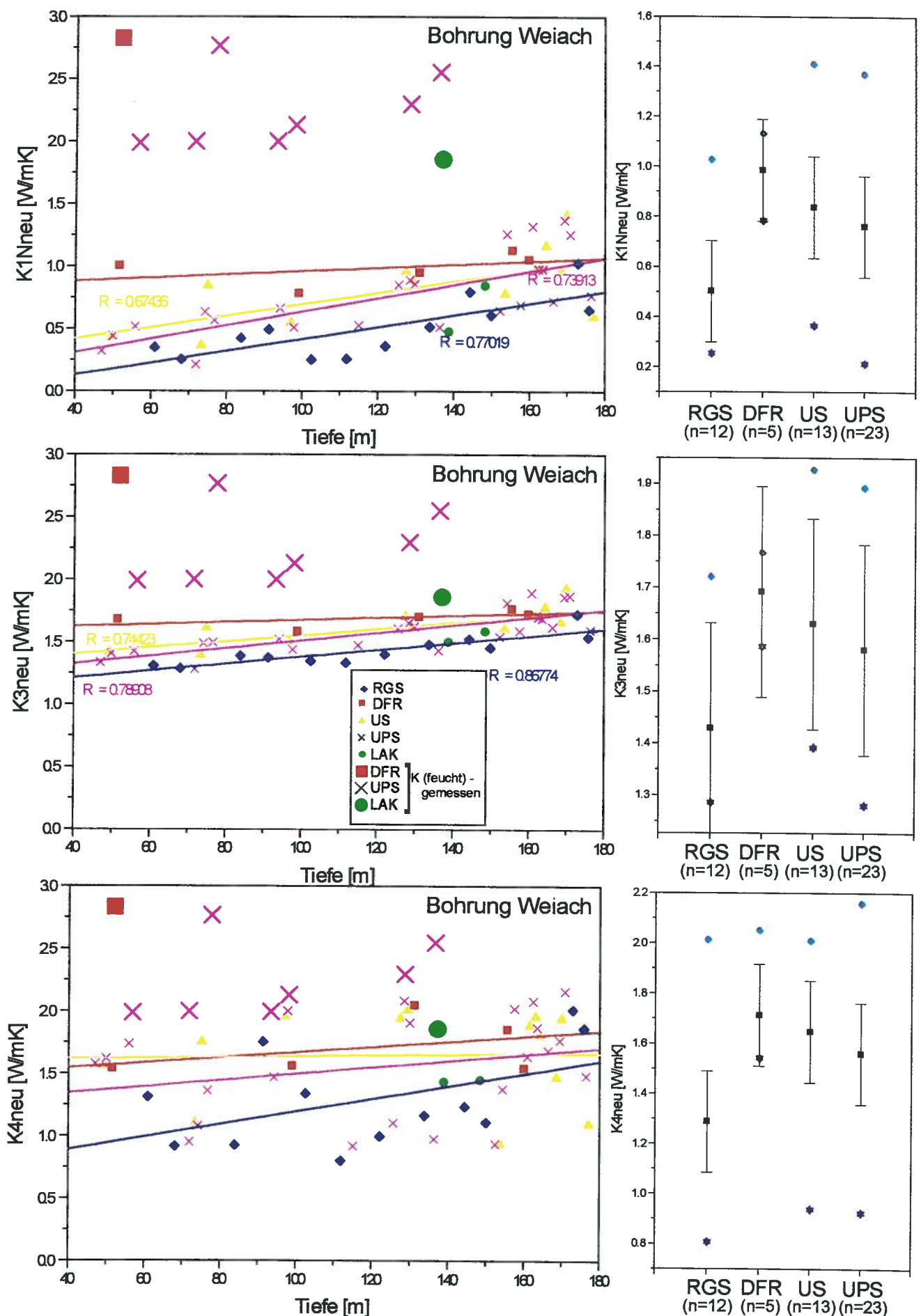


Fig. 13: Korrelation der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Architektur-Elementen (Weiach). Eingezeichnet sind auch die an den *feuchten* Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Box charts: Farbige Symbole = Minimal- und Maximalwert, schwarze Quadrate = Mittelwert, Linie = 1- σ Abweichung).

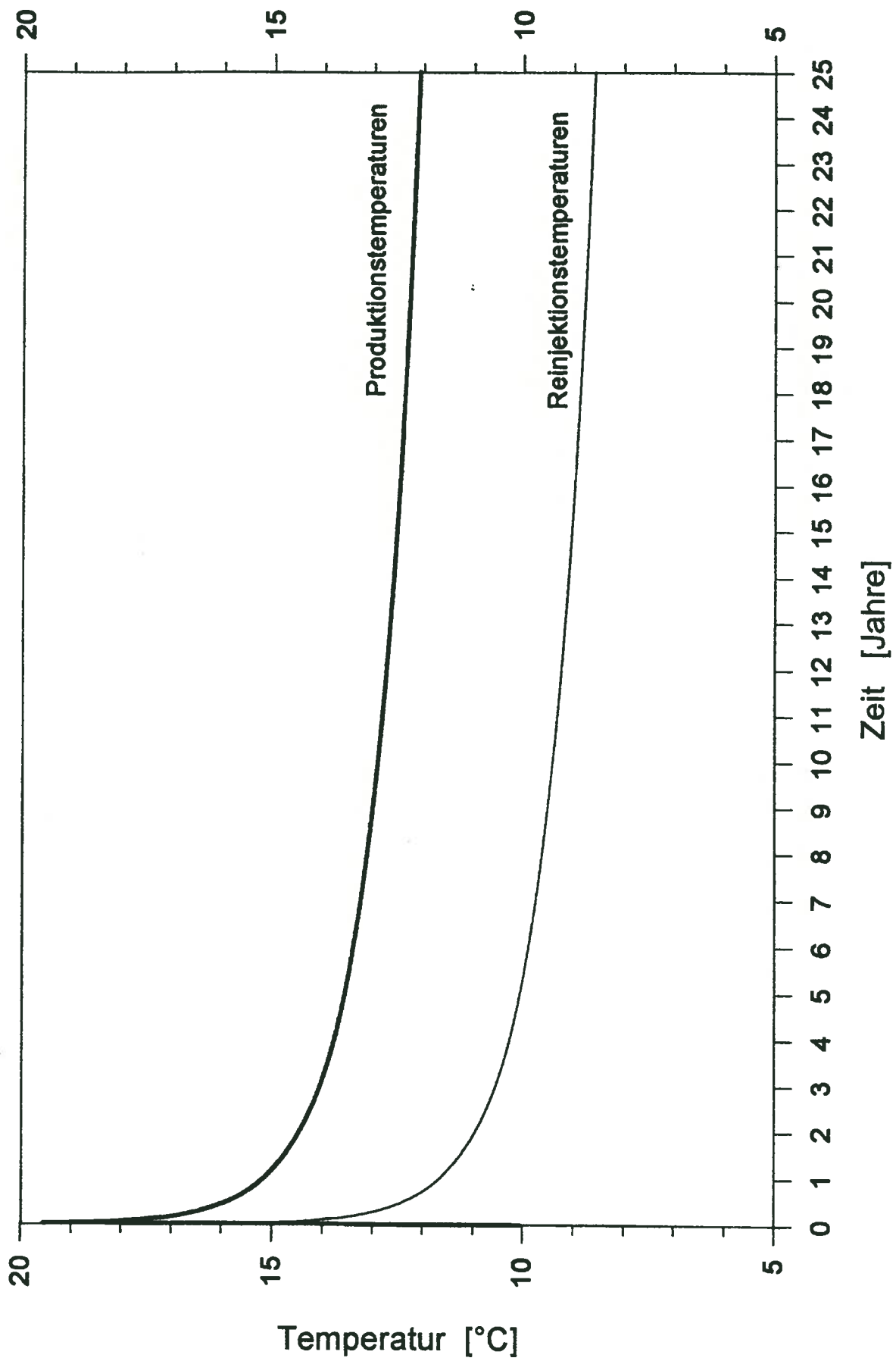


Fig 14: Langzeitabkühlungskurven der Produktions- und Injektionstemperaturen der modellierten Erdwärmesonden, gültig für sämtliche berechneten Varianten.

14'382 / 54'385



Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Programm
Geothermie



Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens (Pilotstudie - Wärmeleitfähigkeit)

Wärmeleitfähigkeit: Labormessungen, geophysikalische Log-Berechnungen, sedimentäre Architekturen und Einfluss auf Wärmeentzugsrechnungen

ausgearbeitet durch Forschungs-
gemeinschaft:

Dr. E. Greber, Dr. W. Leu (Koord.)
Geoform AG
Anton Graffstr. 6, 8401 Winterthur

Prof. Dr. L. Rybach, B. Bucher
Institut für Geophysik
ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

Dr. R.J. Hopkirk, Dr. W.J. Eugster
Polydynamics Engineering
(Männedorf)
Bahngasse 3, 8708 Männedorf

Dr. B. Keller
R. Mengis + H.G. Lorenz AG
Schlossstrasse 3, 6005 Luzern

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

August 1996

Schlussbericht

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Résumé	2
Summary	3
1. Einleitung	4
1.1 Ausgangslage.....	4
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Vorgehen.....	5
2. Datengrundlage und Dateneinsicht	7
2.1 Tiefenbrunnen: Obere Meeresmolasse (OMM)	7
2.2 Bassersdorf: Untere Süsswassermolasse (USM)	7
2.3 Weiach: Untere Süsswassermolasse (USM)	7
2.4 Weggis: Untere Süsswasser- und Meeresmolasse (USM / UMM)	7
3. Sedimentologie (B. Keller)	8
3.1 Methodik	8
3.2 Architektur-Elemente in den Bohrungen	8
3.2.1 <i>Untere Süsswassermolasse (USM)</i>	8
3.2.2 <i>Obere Meeresmolasse (OMM)</i>	10
4. Labormessungen (B. Bucher / L. Rybach)	11
4.1 Messmethodik	11
4.1.1 <i>Messgerät</i>	11
4.1.2 <i>Verfahren</i>	11
4.1.3 <i>Wärmeleitfähigkeits-Definitionen</i>	11
4.2 Resultate	12
4.2.1 <i>Messungen an den Bohrkernen von Bassersdorf und Tiefenbrunnen</i>	12
4.2.2 <i>Messungen an den Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis</i>	12
4.2.3 <i>Vergleich der Messwerte Bohrkern-Cuttings</i>	14
5. Log-Berechnungen und Kalibration mit Messwerten (E. Greber / W. Leu)	16
5.1 Methodik	16
5.1.1 <i>Empirische Berechnungsgrundlagen</i>	16
5.1.2 <i>Berechnung der Porosität</i>	17
5.2 Kalibration mit Laborwerten	18
5.2.1 <i>Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen</i>	19
5.2.2 <i>Bohrung Weiach</i>	19
5.2.3 <i>Bohrung Weggis</i>	19
5.2.4 <i>Kalibration der Berechnungsformeln (Logs)</i>	19
5.3 Resultate der Log-Berechnungen	20
5.3.1 <i>Bassersdorf (Fig. 8):</i>	20
5.3.2 <i>Tiefenbrunnen (Fig. 9):</i>	21
5.3.3 <i>Weiach (Fig. 10):</i>	21
5.3.4 <i>Weggis (Fig. 11a/b):</i>	22
6. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur (E. Greber / B. Keller / W. Leu)	23
6.1 Auswertungsmethode	23
6.2 Resultate	23
6.2.1 <i>Bohrung Bassersdorf (Fig. 12)</i>	23
6.2.2 <i>Bohrung Weiach (Fig. 13)</i>	24
6.2.3 <i>Folgerungen</i>	24

7. Modellrechnungen des Wärmeentzuges über eine Sonde mittlerer Tiefe (R.J. Hopkirk / W.J. Eugster)	25
7.1 Einleitung und Modellbeschreibung	25
7.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit	26
7.3 Einfluss der spezifischen Wärmekapazität	27
8. Schlussfolgerungen / Nutzen für die Praxis	28
9. Empfehlungen für das weitere Vorgehen	30
Literaturverzeichnis	31

Figurenverzeichnis

Fig. 1:	Geologische Übersichtskarte des Molassebeckens
Fig. 2:	Stratigraphisches Sammelprofil der Molasseeinheiten
Fig. 3:	Messapparatur
Fig. 4:	Vergleich der Labormesswerte Kerne (trocken) vs. Cuttings
Fig. 5:	Vergleich Labormesswerte Kerne (feucht) vs. Cuttings
Fig. 6:	Korrelation K_{II} -gemessen vs. $K_{1N}/K_{2N}/K_3$ (Bassersdorf-Tiefenbrunnen)
Fig. 7:	Korrelation K_{II} -gemessen vs. $K_{1N_{neu}}/K_{3_{neu}}/K_{4_{neu}}$ (Bassersdorf- Tiefenbrunnen)
Fig. 8:	Sammelprofil Bassersdorf (USM) 1:1000
Fig. 9:	Sammelprofil Tiefenbrunnen (OMM) 1: 2000
Fig. 10:	Sammelprofil Weiach (USM) 1:1000
Fig. 11a/b:	Sammelprofil Weggis (USM/UMM) 1: 5000
Fig. 12:	Korrelation der berechneten Werte (K-log) mit den Architektur-Elementen (Bassersdorf)
Fig. 13:	Korrelation der berechneten Werte (K-log) mit den Architektur-Elementen (Weiach)
Fig. 14:	Langzeitabkühlungskurven der Produktions- und Injektionstemperaturen der modellierten Erdwärmesonden

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse (USM)
Tab. 2:	Architektur-Elemente der Oberen Meeresmolasse (OMM)
Tab. 3:	Messergebnisse Bohrkern Bassersdorf und Tiefenbrunnen
Tab. 4:	Messergebnisse der Cuttings-Proben Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis
Tab. 5:	Mittlere Wärmeleitfähigkeit der Proben Tiefenbrunnen
Tab. 6:	Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierenden Wärmeleitfähigkeiten im 2-Schichten-Modell
Tab. 7:	Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierender Wärmekapazität des Wirtgesteins

Beilagenverzeichnis

Beilage 1:	Kompilation der Wärmeleitfähigkeitsdaten Daten von Schweizer Molasse-Gesteinen.
Beilage 2:	Petrophysikalische und geothermische Daten von Proben der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis.

Zusammenfassung

Zielsetzung der Arbeit:

Für die Nutzung geothermischer Ressourcen mit tiefen Erdwärmensonden und saisonalen Speicheranlagen werden detaillierte Kenntnisse der geothermischen Eigenschaften des Untergrundes zunehmend notwendig. Ziele dieser Pilotstudie sind i) die Demonstration des Einflusses dieser Parameter bei Wärmeentzugsrechnungen, ii) eine Inventarisierung bereits vorhandener Wärmeleitfähigkeits-Daten der Schweizer Molasse (ergänzt mit neuen Labormessungen), iii) die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit geophysikalischen Logs sowie iv) die Untersuchung der Beziehung zwischen sedimentären Architektur-Elementen und der Wärmeleitfähigkeit.

Methodik:

Im Anschluss an eine Kompilation von sämtlichen verfügbaren Wärmeleitfähigkeits-Daten der Molasse-Gesteine (publiziert und unpubliziert) wurde an 8 Kernen der Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen sowie an 24 Cuttings-Proben der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis die Wärmeleitfähigkeit neu gemessen. In einem zweiten Schritt wurden mit diesem Datensatz verschiedene Berechnungsmethoden, welche auf Porositäten, Sonic-Geschwindigkeiten und Dichte-Werten aus geophysikalischen Bohr-Logs beruhen, geeicht. Die damit berechneten, durchgehenden Wärmeleitfähigkeits-Profile wurden anschliessend für eine Sensitivitätsanalyse einfacher Wärmeentzugsmodelle eingesetzt.

Hauptergebnisse:

- Für die Obere Meeresmolasse (OMM, Bohrung Tiefenbrunnen) und Untere Süsswassermolasse (USM, Bohrung Bassersdorf) wurden im Labor an nassen Bohrkernen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2.5 und 3.0 (trocken 1.7 bis 2.75 W/mK) gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit von entsprechenden nassen Cuttings weicht davon weniger als $\pm 10\%$ ab.
- Mit drei für den Raum Bassersdorf - Zürich geeichten Berechnungsmethoden (Funktion der Porosität, der Sonic-Geschwindigkeit und der Gesteinsdichte aus geophysikalischen Bohr-Logs) konnte für die OMM- und USM-Intervalle durchgehende Wärmeleitfähigkeitsprofile berechnet werden. Diese Profile zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Lithologie. Speziell in der OMM wird eine intervallweise (~ 50 m) Änderung der Wärmeleitfähigkeit von bis zu 1 W/mK beobachtet.
- In der distalen USM (ton-reicher, nördliche Position im Ablagerungsbereich) ist nur eine schwache Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur vorhanden, wogegen in den sandigeren Architektur-Elementen eine deutliche Unterscheidung möglich ist (Porositätswechsel).
- Die Modellierung einer fiktiven 750 m tiefen Erdwärmesonde zeigt, dass der mögliche Wärmeentzug bereits bei Variation der Wärmeleitfähigkeit von ± 0.5 W/mK um bis zu 20 % ab- oder zunehmen kann. Der Einfluss der Wärmekapazität ist viel geringer, gewinnt jedoch an Bedeutung bei der untiefen (0-100 m), saisonalen Wärmespeicherung oder untiefen Erdwärmesonde.

Anwendung in der Praxis:

Die kompilierten Wärmeleitfähigkeits-Daten können direkt bei der Planung geothermischer Anlagen in der Schweizer Molasse eingesetzt werden. Sind in der Nähe eines Projektes geophysikalische Bohrlogs vorhanden, können schnell und kostengünstig, durchgehende Wärmeleitfähigkeit-Profile berechnet werden. Damit werden bereits in der Planungsphase Berechnungen des potentiellen Wärmeentzugs präziser (=Kostenoptimierung).

Weiteres Vorgehen:

Die bereits vielversprechenden Resultate dieser Pilotstudie sollten mit zusätzlichen Labormessungen verbessert und ergänzt werden (z.B. Probleme in der Eichung mit Daten von trockenen/nassen Proben, Messung der Wärmekapazität). Mit den vorhandenen geophysikalischen Bohrlogs (ca. 35 Bohrungen) sollten anschliessend die Berechnungen im ganzen Schweizer Molassebecken flächendeckende durchgeführt werden. Zusätzlich drängt sich auch eine weitere Untersuchung des Einflusses von sedimentären Architektur-Elementen in anderen Ablagerungsbereichen (N-S oder E-W Trends) auf. Zudem sollte der Einfluss von detaillierteren Wärmeentzugsrechnungen (einschliesslich Wärmekapazität bei Wärmespeicherung) auf die Wirtschaftlichkeit an konkreten Projekten getestet werden.

Résumé

Buts du projet:

Avec l'exploitation croissante de l'énergie géothermique, soit par des sondes géothermiques ou par des systèmes de stockage saisonnier, la connaissance détaillée des propriétés géothermiques du sous-bassement devient un facteur crucial dans l'évaluation économique d'un projet géothermique. Les buts du projet sont les suivants: i) démonstration de l'influence des propriétés thermiques sur les calculs d'extraction de chaleur, ii) compilation des données sur la conductivité thermique du bassin molassique suisse (complété par de nouvelles mesures en laboratoire), iii) détermination de la conductivité thermique à l'aide des diagraphies, et iv) étude de la relation entre les éléments architecturaux sédimentaires et la conductivité thermique.

Méthodes:

Après avoir compilé toutes les données sur les valeurs sur la conductivité thermique des sédiments du bassin molassique suisse (publiées et non-publiées), des nouvelles valeurs ont été déterminées dans huit carottes provenant des forages de Bassersdorf et de Zurich-Tiefenbrunnen ainsi que dans 24 échantillons de cuttings des forages de Bassersdorf, Tiefenbrunnen et Weggis. Dans une deuxième phase, plusieurs méthodes d'estimation de la conductivité thermique basées sur les données des diagraphies (porosité, vitesse sonic et densité) ont été calibrées avec les valeurs mesurées. Ces techniques ont permis de calculer des profils de conductivité thermique utilisés par la suite pour des analyses de sensibilité des modèles simples d'extraction de chaleur.

Principaux résultats:

- La conductivité thermique déterminées en laboratoire sur les carottes saturées en eau provenant de la Molasse marine supérieure (OMM, forage Tiefenbrunnen) et de la Molasse d'eau douce inférieure (USM, forage Bassersdorf) se situe entre 2.5 et 3.0 W/mK (1.7-2.75 W/mK pour des carottes séchées). Les valeurs mesurés sur les cuttings correspondants se corrélaient bien ($\pm 10\%$) avec celles des carottes saturées.
- Des profils de conductivité thermique établis dans les intervalles de l'OMM et USM de la région de Zurich-Bassersdorf montrent une forte influence de la lithologie. Une variation importante de la conductivité thermique, atteignant 1 W/mK a été observée d'un intervalle (~ 50 -200 m) lithologique à l'autre, particulièrement dans l'OMM.
- Dans les parties distales de l'USM (lithofaciès argileux, partie septentrionale) la conductivité thermique dépend peu de l'architecture sédimentaire. Malgré tout, une variation systématique associée à des changements de porosité est observée dans les faciès gréseux.
- La modélisation théorique d'une sonde géothermique d'une longueur de 750 m montre que le potentiel de chaleur extractible peut varier de $\pm 20\%$ avec un changement de conductivité thermique de ± 0.5 W/mK. L'influence de la capacité calorifique est moins importante pour une sonde géothermique profonde que pour un système de stockage saisonnier ou une sonde géothermique peu profonde (< 100 m).

Application pratique:

La compilation des données sur la conductivité thermique peut être utilisée directement pour des projets géothermiques dans le bassin molassique suisse. Des profils de conductivité thermique peuvent être calculés rapidement et avec un budget modeste, dans la mesure où des diagraphies dans des forages proches sont disponibles. Cette approche permet de mieux limiter les incertitudes quant à l'estimation de la chaleur extractible dans la phase de planification (optimisation des frais).

Recommandations:

Les résultats prometteurs de cette étude pilote devraient être optimisés par des mesures complémentaires en laboratoire (p. ex. problèmes avec la calibration des données des échantillons saturés/séchés, mesure de la capacité calorifique). Dans le bassin molassique suisse les diagraphies de 35 forages existent. Elles pourront être utilisées pour calculer la conductivité thermique sur une plus grande surface („cartographie"). Avec ces résultats, une étude approfondie de l'influence de l'architecture sédimentaire dans d'autres environnements de dépôt (tendances N-S et E-W) pourrait être entreprise. L'influence de calculs détaillés d'extraction de chaleur devrait être testée dans des projets concrets.

Summary

Project aims

Detailed knowledge of the geothermal properties of the underground becomes more and more important with increasing exploitation of geothermal resources by deep vertical tube heat exchangers or by seasonal storage installations. Main aims of this pilot study are: i) the demonstration of the influence of these parameters on heat extraction calculations, ii) a compilation of already existing thermal conductivity data of the Swiss Molasse (supplemented with new lab measurements), iii) the calculation of the thermal conductivity with geophysical logs, and iv) the study of the relationships between sedimentary architecture and the thermal conductivity.

Methods:

After compiling all available thermal conductivity data of the Molasse sediments (published and unpublished), further measurements on 8 cores from wells at Bassersdorf and Zurich-Tiefenbrunnen as well as on 24 cuttings samples from the wells at Bassersdorf, Tiefenbrunnen and Weggis were carried out. In a second step, several techniques to estimate thermal conductivity from well logs (porosities, sonic velocities and densities) were calibrated with this data set. The thermal conductivity profiles calculated with these methods were used for a sensitivity analysis of simple heat extraction models.

Main results:

- Laboratory measurements on wet cores from the Upper Marine Molasse (OMM, well Tiefenbrunnen) and from the Lower Freshwater Molasse (USM, well Bassersdorf) yield thermal conductivities between 2.5 and 3.0 W/mK (1.7-2.75 W/mK on dry cores). The thermal conductivities of the corresponding wet cuttings are within a range of $\pm 10\%$ of the wet core values.
- Top to bottom conductivity profiles calculated for the OMM and USM intervals of the area Zurich - Bassersdorf show a clear dependence on lithology. Especially in the OMM changes of the thermal conductivity up to 1 W/mK are observed from one interval to another (~ 50 - 200 m thick).
- In distal parts of the USM (clay rich lithofacies, external depositional environment) the thermal conductivity is generally only slightly dependent on the sedimentary architecture. However, in sandy facies obvious distinctions are possible, related to porosity changes.
- The modelling of a theoretical 750 m long vertical tube heat exchanger shows that the potential quantity of extractable heat increases or decreases by up to 20 % by varying the thermal conductivity with ± 0.5 W/mK. The influence of the heat capacity is less important. However, this parameter is getting more important if shallow (0-100 m) seasonal heat storage or shallow heat exchangers are considered.

Practical applications:

The compiled thermal conductivity data can directly be used in the planning of geothermal installations in the Swiss Molasse. If geophysical logs are available from nearby wells, fast and low-budget top to bottom conductivity profiles can be calculated. This provides better constrained assumptions for estimations of extractable heat already in the planning phase (optimisation of the costs).

Recommendations:

The promising results of this pilot study should be optimised with additional laboratory measurements (e.g. calibration problems with data from wet/dry samples, heat capacity measurements). With the available geophysical logs of some 35 wells, heat conductivity calculations should be carried out for the whole Swiss Molasse Basin. With these results a further study of the influence of sedimentary architecture in other depositional environments (N-S and E-W trends) could be analysed. In addition, the influence of detailed heat extraction calculations on actual projects should be tested.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das vorgelegte Projekt nutzt die interdisziplinären Synergien der Fachbereiche Geologie, Geophysik und mathematische Modellierung für eine verbesserte Erfassung der geothermischen Eigenschaften im Schweizer Mittelland (Schwergewicht Molasse).

Das schweizerische Molasse Becken umfasst etwa 30% der Fläche der Schweiz (Fig. 1) und beherbergt die am dichtesten besiedelten Zonen. Die zunehmende Nutzung geothermischer Ressourcen verlangt nach immer detaillierten Kenntnissen der geothermischen Eigenschaften des Untergrundes.

Insbesondere bei der Planung und der Dimensionierung von geothermischen Speichieranlagen, Sondenfeldern und tiefen Erdwärmesonden sind die Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten der durchteuften Gesteinsschichten die entscheidenden Grössen (SCHÄRLI 1989, HOPKIRK et al. 1994, GEOFORM 1994a). Für die heute oft eingesetzte Simulation des thermischen Verhaltens des Untergrundes solcher Anlagen müssen mangels geeigneter Datengrundlagen stark vereinfachende Annahmen dieser Parameter gemacht werden (BURKART et al. 1989, EUGSTER et al. 1992, SANNER 1992, SEIFERT et al. 1992, STADLER et al. 1995b).

Der heutige Wissensstand über die geothermischen Eigenschaften der verschiedenen Gesteinstypen des Schweizer Mittellandes stützt sich weitgehend auf eine Ansammlung punktueller Daten unterschiedlichster Projekte (BODMER & RYBACH 1984). Da die geothermischen Eigenschaften eine Funktion von Gesteinszusammensetzung, Gesteinstextur, Porosität, Porenfluidtyp und Temperatur sind, können solche Richtwerte oft nur bedingt auf andere Gebiete und Tiefenbereiche übertragen werden. Um den Variationen betreffend Lithologie, Sedimentfazies und Kompaktion gerecht zu werden, wären oft für grössere Projekte lokalspezifische Neumessungen (Labor) notwendig, worauf jedoch in der Regel aus Kostengründen verzichtet wird. Mit Labormessungen geeichte Methoden, die eine kostengünstige Berechnung der geothermischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) aufgrund der Sedimentarchitektur und der geophysikalischen Messungen erlauben, fehlen weitgehend.

Dieser limitierte Kenntnisstand führt dazu, dass quantifizierende Modelle für geplante geothermische Anlagen mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Mit zunehmender Grösse der geothermischen Anlage nimmt jedoch die Relevanz dieser Eigenschaften zu.

Die Integration von verschiedenen neuen Forschungsentwicklungen der letzten Jahre würde es heute erlauben, diese Basis für die Schweiz zu schaffen. Dazu zu zählen ist insbesondere die Bestimmung der sedimentären Architektur mit Bohrlogs (KELLER 1992, AMMAN et al. 1993, BLASER et al. 1994), die direkte Berechnung der geothermischen Eigenschaften aufgrund von geophysikalischen Bohrlochmessungen sowie der Seismik (BLACKWELL & STEELE 1989, HOUBOLT & WELLS 1980) oder die Messung der Wärmeleitfähigkeit an Cuttings-Proben im Labor bei fehlendem Kernmaterial (HOPKIRK et al. 1994, SASS et al. 1971).

Am 26. September 1995 wurde die vorliegende Pilotstudie (Auswertungen und Labormessungen an den Bohrungen Tiefenbrunnen und Bassersdorf) vom BEW bewilligt, mit einer Projektdauer vom 15. Oktober 1995 bis 15. Juli 1996.

1.2 Zielsetzung

Die Ziele dieses Projektes sind:

- Inventarisierung bestehender Wärmeleitfähigkeits-Daten von Gesteinen aus dem Schweizer Molassebecken für eine direkte Nutzung bei der Planung und Konzipierung von geothermischen Anlagen.
- Messungen der Wärmeleitfähigkeiten an Kernen sowie Cuttings und Vergleich der Messungen.
- Berechnungen der Wärmeleitfähigkeiten mit Hilfe von geophysikalischen Logs sowie Kalibration der dabei verwendeten Methoden.
- Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeleitfähigkeits-Werte der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis.
- Analyse der Korrelation zwischen den Wärmeleitfähigkeiten und den sedimentologischen Architektur-Elementen.
- Abschätzung des Einflusses der in einer Bohrung vorhandenen Wärmeleitfähigkeiten auf den geothermischen Wärmeentzug (Sensitivitätsanalyse mit Modellierungen).

1.3 Vorgehen

In Anbetracht des beschränkten finanziellen Rahmens dieses Projektes wurde das Schwergewicht der Arbeiten auf eine Kalibration und Verbesserung der anzuwendenden Methoden gesetzt. Damit soll die Basis geschaffen werden, diese kostengünstigen Hilfsmittel in Zukunft flächendeckend im Schweizer Mittelland einsetzen zu können. Das Projekt wurde wie folgt gegliedert:

a) Inventarisierung bestehender Daten

Basierend auf der von Prof. Dr. L. Rybach, Dr. F. Medici und Dr. U. Schärli erstellten „Petrophysikalischen Datenbank von Gesteinen aus der Schweiz und den angrenzenden Gebieten“, kurz „PETRODAT“ (Rybach et al. 1995), sowie aufgrund publizierter Literatur wurden die Wärmeleitfähigkeits-Daten der schweizerischen Molassegesteine in einer Tabelle zusammengestellt (siehe Beilage 1: Tabelle und Karte).

b) Dateneinsichtsgesuche

Für die Verwendung der geophysikalischen Bohrlogs von Tiefenbrunnen und Bassersdorf sowie die Beprobung der Untersuchungsintervalle wurden bei den Dateneigentümern (Stadt und Kanton Zürich, respektive Nagra) Gesuche gestellt.

c) Probenahme

Bei den Bohrungen Bassersdorf (USM) und Tiefenbrunnen (OMM) wurden Kernproben, bei der Bohrung Weggis (USM und UMM) Cuttings-Proben aus Intervallen mit charakteristischen Architektur-Elementen entnommen.

d) Labormessungen

An 5 Kernproben der Bohrung Bassersdorf und an 3 Kernproben der Bohrung Tiefenbrunnen wurden die Wärmeleitfähigkeiten der trockenen und der feuchten Probe parallel zur Bohrachse im Labor gemessen ($K_{||}$ -trocken respektive $K_{||}$ -feucht). Bei den Kernproben der Bohrung Tiefenbrunnen wurde zusätzlich auch die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Bohrachse gemessen ($K_{\perp}$ -trocken und $K_{\perp}$ -feucht). Nachdem die Messungen an den Kernen abgeschlossen waren, wurden sie zu Cuttings zerkleinert. Anschliessend wurde die Wärmeleitfähigkeit des Cutting/Wasser-Gemisches gemessen und daraus die Matrix-Wärmeleitfähigkeit berechnet. Analoge Messungen an Cuttings wurden an 16 Proben der Bohrung Weggis durchgeführt.

e) Wärmeleitfähigkeits-Berechnung mit geophysikalischen Logs

Mit Hilfe der geophysikalischen Logs der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis wurde die Wärmeleitfähigkeit mit verschiedenen Methoden als Funktion von Gesteinsdichte, -porosität und -schallgeschwindigkeit berechnet und mit den Messwerten verglichen. Anschliessend wurden die Berechnungs-Algorithmen mit den Labormessungen kalibriert und für typische Molassegesteine geeicht.

f) Geothermische Charakterisierung der Architektur-Elemente

Mit Hilfe dieser geeichten Berechnungsmethoden wurden anschliessend für verschiedene Architektur-Elemente die Wärmeleitfähigkeiten als Funktion der Tiefe bestimmt.

g) Modellrechnungen

Durch eine Modellrechnung mit Sensitivitätsanalyse wurde anschliessend der Einfluss der Wärmeleitfähigkeits-Verteilung im Untergrund auf die zu entnehmende Menge an geothermischer Energie analysiert.

2. Datengrundlage und Dateneinsicht

Für die Verwendung der geophysikalischen Bohrlogs von Tiefenbrunnen und Bassersdorf sowie die Beprobung der Untersuchungsintervalle wurde bei den Dateneigentümern (Stadt und Kanton Zürich, respektive Nagra) ein Gesuch gestellt.

2.1 Tiefenbrunnen: Obere Meeresmolasse (OMM)

Herr B.-F. Iseli (Effretikon, Verwalter der Daten von Tiefenbrunnen), im Auftrag der Wasserversorgung Zürich, und Herr K. Fehr (AGW Zürich) haben uns freundlicherweise bei der Datenbeschaffung geholfen. Die geologischen und petrophysikalischen Daten der Bohrung sind in den Gutachten von Dr. U.P. Büchi Nr. 1094, 1282 und 1441 zusammengefasst.

Es wurden 3 Kernproben für neue Labormessungen entnommen. Die geophysikalischen Bohr-Logs wurden für die Bearbeitung im Intervall 340 bis 736 m (Endtiefe) digitalisiert. Davon wurde speziell der OMM-Bereich von 340 bis 716 m untersucht.

2.2 Bassersdorf: Untere Süsswassermolasse (USM)

Die Daten der Bohrung Bassersdorf (Geologie, Petrophysik, Roh-Logs) sind in einem technischen Bericht der Nagra (BLASER et al. 1994) publiziert. Um die Vorbereitungsarbeiten zeitlich zu reduzieren, wurden mit einem Gesuch bei der Nagra die digitalen Daten der geophysikalischen Bohrlogs und das Beprobungsrecht am Kernmaterial angefragt.

Es wurden 5 Kernproben für neue Labormessungen entnommen. Die geophysikalischen Bohr-Logs wurden im USM-Intervall 552 bis ca. 790 m bearbeitet.

2.3 Weiach: Untere Süsswassermolasse (USM)

Sämtliche für das Projekt notwendigen Daten der Bohrung Weiach sind publiziert (MATTER et al. 1988a). Eine Neubeprobung wurde nicht vorgenommen, da bereits 9 Wärmeleitfähigkeits-Messungen an an USM-Kernen (51.93 - 137.06 m) vorhanden waren. Die Logs des USM-Abschnittes wurden neu digitalisiert.

2.4 Weggis: Untere Süsswasser- und Meeresmolasse (USM / UMM)

Sämtliche für das Projekt notwendigen Daten der Bohrung Weggis sind publiziert (GREBER et al. 1994). Für die vorliegende Studie wurden 16 Cutting-Proben entnommen. Die Bohr-Logs waren im Intervall zwischen 70 und ca. 2130 m bereits in digitaler Form vorhanden.

3. Sedimentologie

(B. Keller)

3.1 Methodik

Für die Charakterisierung der geothermischen Eigenschaften eines Gesteinsstapels ist eine Gliederung in seine hauptsächlichen Lithologien sinnvoll. Traditionell wird diese nach den verschiedenen Gesteinstypen oder Fazies (siltiger Feinsandstein, roter Schlammstein etc.) vorgenommen. Dabei resultieren oftmals Schwierigkeiten bezüglich einer einheitlichen Abgrenzung und Unterteilung (z.B. Fining- oder Coarsening-upward Sequenzen), und es besteht die Gefahr, dass die Anzahl Gesteinstypen zu gross und unübersichtlich (splitting) oder aber zu gering und wenig aussagekräftig gerät.

Neue Arbeiten aus dem Molasse-Becken haben überdies gezeigt, dass sehr ähnliche Lithologien je nach Ablagerungstyp (z.B. dünne Überschwemmungssandsteine, mächtige Sandsteine von Rinnengürteln) nicht nur verschiedene Petrographien, sondern ebenso sehr unterschiedliche petrophysikalische Eigenschaften (Porosität, Permeabilität etc.) aufweisen (z.B. KELLER et al. 1990).

Um diese Unzulänglichkeiten zu eliminieren, wurde von KELLER et al. (1990) für die hydrogeologische Charakterisierung der distalen Unteren Süsswassermolasse das Konzept der Architektur-Elemente angewendet. Dieses Konzept ist in KELLER (1992) eingehend beschrieben und basiert auf folgenden Grundlagen:

- Architektur-Elemente sind die prinzipiellen sedimentären Bausteine eines Lithosoms.
- Architektur-Elemente sind Gesteinskörper mit
 - bezeichnender 3-D Geometrie,
 - charakteristischem fazielltem Aufbau,
 - spezifischer Grössenordnung und
 - typischer Genese.

Einzelne Architektur-Elemente zeichnen sich jeweils durch recht homogene Petrographien, Diagenesen (Zementation) und petrophysikalische Eigenschaften wie Porosität und Permeabilität aus, wie KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) nachgewiesen haben. Die Publikation von BLASER et al. (1994) sowie interne Weiterbearbeitungen der NAGRA belegten überdies charakteristische geophysikalische Log-Fazies einzelner Architektur-Elemente.

Wegen der verschiedenen beschriebenen Vorteile wurde auch in der vorliegenden Arbeit das Konzept der Architektur-Elemente angewendet. Darüber hinaus soll geprüft werden, ob, aus den sehr ähnlichen, bis anhin untersuchten petrophysikalischen Eigenschaften einzelner Architektur-Elemente auch gut unterscheidbare, *charakteristische geothermische Eigenschaften* resultieren. Als vorteilhaft erwies sich auch der Umstand, dass von den im vorliegenden Bericht abgehandelten vier Bohrungen bereits zwei (Weiach [KELLER et al. 1990] und Bassersdorf [BLASER et al. 1994]) unter dem Gesichtspunkt der Architektur-Elemente bearbeitet wurden.

3.2 Architektur-Elemente in den Bohrungen

3.2.1 Untere Süsswassermolasse (USM)

Die Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse sind in den Arbeiten von KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) ausführlich beschrieben, weshalb wir uns hier mit einer

zusammenfassenden Darstellung begnügen (Tab. 1). Während in der distalen Unteren Süßwassermolasse der Bohrungen Weiach und Bassersdorf die Architektur-Elemente sandige Rinnengürtel (RGs), Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR), distale Überschwemmungssandsteine (US), Uferwälle (UW), Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) und lakustrische Ablagerungen (LAK) vorkommen, gesellen sich im proximalen Ablagerungsraum bei Weggis auch konglomeratistische Rinnengürtel (RGk) dazu. Die bis anhin untersuchten petrophysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Architektur-Elemente sind ebenfalls in KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) sowie in BLASER et al. (1994) eingehend charakterisiert.

Tab. 1: Architektur-Elemente der Unteren Süßwassermolasse.

RGk	Konglomeratistische Rinnengürtel Bunte Konglomerate (meist Mittel- bis Grobkonglomerate) mit gut gerundeten Komponenten, mit Mittel- bis Grobsandsteinbänken wie RGs sowie trogförmigen und flachwinkligen Schrägschichtungen, viele Erosionsdiskordanzen, generell mehr als 10% Konglomerate, Mächtigkeiten > 2 m, häufig amalgamierte Abfolgen.
RGs	Sandige Rinnengürtel Mittelsandsteine mit unterschiedlichen Fein- und bis Grobsandstein-Anteilen, über scharfen Erosionsdiskordanzen gelegentlich Sohlenpflaster aus gerundeten extraformationellen Geröllen oder aus Schlammstein-Intraklasten, häufig trogförmige, flachwinklige und tabulare Schrägschichtung, Mächtigkeiten generell > 2 m, häufig amalgamierte Abfolgen.
DFR	Durchbruchsfächer und -rinnen Fein- bis Grobsandsteine, gelegentlich geröllführend oder mit Schlammstein-Intraklasten, mit scharfen Erosionsdiskordanzen wie RGs, häufig trogförmige und planare Schrägschichtungen, tw. Fining-upwards Sequenzen, Mächtigkeiten generell < 2 m.
US / UW	Distale Überschwemmungssandsteine (US) und Uferwälle (UW) Fein- bis Mittelsandsteine, häufig siltig, tw. rötlich pedogenisiert oder mit Rhizolithen (Wurzelspuren), tw. erosive Basis oder mit flachwinkliger Schrägschichtung, tw. Fining-upwards Sequenzen, geringe Mächtigkeiten von generell <1 m. Gelegentlich kommen über Rinnengürteln auch heterolithische Wechsellagerungen dünnbankiger Sandsteine vom Typ US mit Zwischenschichten aus Peliten vom Typ UPS vor, die als Uferwälle (UW) interpretierbar sind. Charakteristisch sind in diesem Element Kletterrippeln und Wulstschichtungen.
UPS	Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen Diese Gruppe pelitischer Gesteine umfasst Silt- und Schlammsteine unterschiedlicher Zusammensetzung sowie gelegentlich eigentliche Mergel sowie siltige Feinst- und Feinsandsteine und bildet häufig heterolithische Abfolgen. Häufig sind Pedoturbation und Rhizolithe (Wurzelspuren), gelegentlich kommen auch Caliche (Kalk-Knöllchen) vor.
LAK	Lakustrische Ablagerungen Graue und olivbraune Schlamm- und Siltsteine sowie Mergel, gelegentlich mit dünnen Feinsandstein-Bänken.

Die aufgrund von in 2m-Abstand gewonnenen Cuttings sowie von geophysikalischen Logs bearbeitete Bohrung Weggis erlaubt nicht eine derart detaillierte Aufgliederung in einzelne

Architektur-Elemente wie die gekernten Bohrungen Weiach und Bassersdorf. Gut unterscheiden liessen sich in Weggis lediglich mächtigere arenitische und psephitische Abfolgen der sandigen (RGs) und konglomeratischen Rinnengürtel (RGk) einerseits sowie pelitische Abfolgen der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) mit dünneren Sandsteinen der Architektur-Elemente Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) sowie distale Überschwemmungssandsteine (US) als Mischgruppe andererseits.

3.2.2 Obere Meeresmolasse (OMM)

Anders als für die Untere Süsswassermolasse existiert für die Obere Meeresmolasse kein publiziertes Architektur-Element Konzept in vergleichbarer Grössenordnung. Basierend auf der Arbeit von KELLER (1989) liegt jedoch eine unpublizierte Gliederung in Architektur-Elemente vor, die für die Bohrung Tiefenbrunnen auszugsweise verwendet wurde (Tab. 2). Nebst diesen kommen in regressiven Intervallen auch Architektur-Elemente der Süsswassermolasse (Strand-, resp. Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen UPS sowie konglomeratische Rinnengürtel RGk der Deltas) vor.

In der Unteren Meeresmolasse (UMM) der Bohrung Weggis finden sich davon die Architektur-Elemente Strandebene (STE) und Beckenablagerungen (BE).

Tab. 2: Architektur-Elemente der Oberen Meeresmolasse.

STE	Strandebene Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Feinst- oder Grobsandsteine, gut bis sehr gut sortiert, mit Parallellamination, Strömungs- und Wellenrippeln sowie gelegentlicher Schräg- oder Flaserschichtung.
GD	Rinnen von Gezeitendeltas Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Grobsandsteine, mässig- bis gut sortiert, häufig Schlammstein-Intraklasten (Schlickgerölle), häufige Schrägschichtung, gelegentlich Muschelschille.
SW	Schlickwatten Schlamm- und Siltsteine, häufig laminiert, tw. heterolithisch, tw. massiv bioturbiert.
MW	Mischwatten Silt- und Sandsteine (Feinst- bis Mittelsandstein), häufig als bankige bis laminierte heterolithische Abfolgen mit Rippeln, Sandsteine mässig bis gut sortiert.
SWP	Sandwatt und Platen Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Feinst- oder Grobsandsteine, mässig bis gut sortiert, gelegentlich Siltstein-Laminae, Schrägschichtungen und Rippeln, untergeordnet heterolithische Wechschichtungen mit Schlammsteinen (wie MW).
GR	Grossrinnen Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Grobsandsteine, mässig- bis gut sortiert, tw. mit Geröllen und Schlammstein-Intraklasten (Schlickgerölle), häufige Schrägschichtung, untergeordnet heterolithische Wechschichtungen mit Schlammsteinen (wie MW).
BE	Beckenablagerungen Silt- und Schlammsteine, bioturbiert massiv oder laminiert, tw. heterolithische Wechschichtung mit Feinsandsteinen, gelegentlich Rippeln.

4. Labormessungen

(B. Bucher / L. Rybach)

4.1 Messmethodik

4.1.1 Messgerät

Für die Labormessungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten wurde das Messgerät TK04 der Firma TeKa GmbH aus Berlin verwendet (Fig. 3). Diese Messanlage wendet die Methode des instationären Wärmestroms an. Dabei wird eine Linienquelle konstant beheizt und gleichzeitig die Änderung der Quellentemperatur registriert. Aus dieser Heizkurve wird die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnet. Die Daten der Halbraum-Linienquelle (HLQ) werden auf einem Rechner aufgezeichnet und ausgewertet.

Um einen guten Kontakt zwischen der Halbraum-Linienquelle (Messsonde) und der Probe zu erreichen, wird die Messsonde mit Hilfe einer Kurbel oder einer hydraulischen Presse an die Probe gedrückt (maximal 30 bar).

4.1.2 Verfahren

Nach der vollständigen Trocknung im Ofen wurden die Proben (Bohrkerne und Cuttings) wurden in trockenem und in wassergesättigtem Zustand („feucht“) gemessen (BODMER & RYBACH 1984). Bei der Messung der Bohrkerne wurde die Sonde auf die aufgeschnittene Fläche gepresst. Aufgrund der Dimension der Messsonde muss bei der Messung von Bohrkerne die Probe eine plan geschliffene Fläche von minimal ca. 5 cm x 10 cm aufweisen. Nach der Messung in trockenem Zustand wurden die Bohrkerne während 24 Stunden in Wasser eingelegt. Um ein Austrocknen der Bohrkerne zu verhindern, wurden die anschliessenden Messungen in einem Behälter unter Wasser durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit wurde je nach Grösse der vorhandenen, plan geschliffenen Fläche sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung gemessen.

In einem nächsten Schritt wurden die Bohrkerne mit Hilfe einer Hydraulikpresse zu künstlichen Cuttings verkleinert. Bei der Messung der Cuttings wurde eine abgewogene Menge der Proben in einen Druckbehälter gegeben und mit Wasser gesättigt. Dabei bleibt das Cutting-Material mit Wasser überdeckt und die Messsonde wird mit 30 bar auf das Gemisch aus Probenmaterial und Wasser gedrückt.

Bei jeder Messung wurde die Wärmeleitfähigkeit 7 mal bestimmt. Aus diesen sieben Werten wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

4.1.3 Wärmeleitfähigkeits-Definitionen

Bei den Kern-Messungen werden folgende Abkürzungen für die Wärmeleitfähigkeiten verwendet:

- $K_{||}$: Wärmeleitfähigkeit **parallel** zur Schichtung oder senkrecht zur Bohrachse (Sonde parallel zur Bohrachse).
- $K_{\perp}$: Wärmeleitfähigkeit **senkrecht** zur Schichtung oder parallel zur Bohrachse ($K_{\perp}$ ist nicht direkt messbar aber mit K_{gs} berechenbar, siehe 4.2.1).

- K_{gs} : **Mischwert** der Wärmeleitfähigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung (siehe 4.2.1, Sonde senkrecht zur Bohrachse).
- $\underline{K}$: **Mittlere** Wärmeleitfähigkeit (Berechnung mit $K_{||}$ und K_s , siehe 4.2.3), entspricht *nicht* K_{gs} .

4.2 Resultate

4.2.1 Messungen an den Bohrkernen von Bassersdorf und Tiefenbrunnen

An den Bohrkernen von Bassersdorf konnte nur eine Messung mit Sondenorientierung parallel zur Bohrachse vorgenommen werden, während die Bohrkern von Tiefenbrunnen Messungen sowohl parallel als auch senkrecht zur Bohrachse erlaubten. Bis auf eine Ausnahme (BA-595.21) konnten alle Bohrkern in trockenem und nassem Zustand gemessen werden (siehe Tab. 3). Der Bohrkern BA-595.21 zerfiel beim Einlegen in Wasser und liess sich deshalb nur in trockenem Zustand messen.

Je nach Orientierung der Messsonde auf der Probe sagt die gemessenen Wärmeleitfähigkeit etwas anderes aus. Liegt die Messsonde parallel zur Bohrachse, d.h. in unserem Fall senkrecht zur Schichtung, wird die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung gemessen ($K_{||}$ in Tab. 3). Liegt die Messsonde aber senkrecht zur Bohrachse (parallel zur Schichtung bei horizontaler Lagerung), wird ein Mischwert aus der Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung und aus der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung gemessen (K_{gs} in Tab. 3). Mit Hilfe der Beziehung $K_s = K_{gs}^2 / K_{||}$ und den gemessenen Werten lässt sich die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung berechnen (K_s in Tab. 3) (BODMER & RYBACH 1984). Die Anisotropie entspricht dem Verhältnis $K_{||} / K_s$. Sie ist bei den Proben der Bohrung Tiefenbrunnen als klein einzustufen.

4.2.2 Messungen an den Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis

Die Cuttings der Proben von Bassersdorf und Tiefenbrunnen wurden künstlich aus den entsprechenden Bohrkernen hergestellt. Die gemessene Wärmeleitfähigkeitswerte (K_G) wurden mit Hilfe weiterer Parameter zu einer Matrix-Wärmeleitfähigkeit (K_M , entspricht der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins ohne Wasser) umgerechnet (siehe Tab. 4 und PRIBNOW 1994):

$$K_M = K_G * (K_G / K_W)^{(mw*dc)/(mc*dw)}$$

wobei K_W : Wärmeleitfähigkeit des Wassers (0.62 W/mK)
mw: Masse Wasser im Gemisch
mc: Masse des trockenen Bohrkleins
dw: Dichte des Wassers
dc: Dichte des trockenen Bohrkleins

Eine theoretisch notwendige, zusätzliche Korrektur für den effektiven Porensättigungsgrad der Cutting wurde hier nicht vorgenommen. Auch der Tatsache, dass die künstliche Erzeugung von Cuttings aus Bohrkernen den Feinanteil erhöht (Diskussion siehe STADLER 1995), konnte in Anbetracht des beschränkten Aufwandes der Pilotstudie nicht Rechnung getragen werden.

Tab. 3: Messergebnisse der Bohrkerne von Bassersdorf und Tiefenbrunnen. Abkürzungen: K_{gs} = Mischwert aus der Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung und aus der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Mischung, K_{II} = Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung, K_s = Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung.

Bohrung	Probe	Proben- zustand	K_{gs} [W/mK]	K_{II} [W/mK]	K_s [W/mK]	Standard- abweichung	Anisotropie
Bassersdorf	BA-595.21	trocken		2.52		0.067	
	BA-602.75	trocken		2.64		0.020	
		feucht		3.0		0.148	
	BA-658.39	trocken		2.68		0.054	
		feucht		2.68		0.041	
	BA-742.55	trocken		2.75		0.076	
Tiefenbrunnen		feucht		2.67		0.094	
	BA-762.26	trocken		1.71		0.036	
		feucht		2.56		0.080	
	TI-519.00	trocken				0.025	0.896 (trocken)
		trocken	1.88	1.78		0.036	
		trocken					
		feucht			1.99	0.101	1.007 (feucht)
		feucht	2.79	2.8		0.094	
		feucht			2.8		
	TI-591.93	trocken				0.144	1.081 (trocken)
		trocken	2.02	2.1		0.048	
		trocken					
		feucht			1.99	0.107	1.154 (feucht)
		feucht	2.7	2.9		0.161	
		feucht			2.5		
	TI-657.91	trocken				0.027	0.980 (trocken)
		trocken	2.0	1.98		0.109	
		trocken					
		feucht			2.02	0.061	1.056 (feucht)
		feucht	2.90	2.98		0.067	
		feucht			2.82		

Bei der Wärmeleitfähigkeit von WG-310 aus der Bohrung Weggis handelt es sich um das Messresultat einer Mischung der Proben WG-310 und WG-320, da von der Probe WG-310 zu wenig Material vorhanden war. Anstelle der Proben WG-875 und WG-940, von denen kein Material vorhanden war, wurden die Proben WG-880, WG-888, WG-938 und WG-950 gemessen.

Die Wärmeleitfähigkeiten sind unter anderem auch abhängig von der Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit lässt sich durch die Beziehung $K(T) = 1.84 + 365.75 \cdot (K_{20} - 1.84) \cdot (1/(T + 273) - 1/1473)$ beschreiben, wobei T für die Temperatur T(z) in °C und K_{20} für die Wärmeleitfähigkeit bei Zimmertemperatur (20 °C) steht (SEKIGUCHI 1984). Die aus dieser Beziehung resultierenden Ergebnisse für die Proben von Weggis sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tab. 4: Wärmeleitfähigkeit der Cutting-Proben aus den Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis.

Bohrung	Probe	K gemessen [W/mK]	Standard- abweichung	K-Matrix [W/mK]	K-Matrix T-korrigiert [W/mK]	Temperatur [°C]
Bassersdorf	BA-595.21	1.87	0.030	2.20		
	BA-602.75	2.06	0.017	2.65		
	BA-658.39	1.91	0.058	2.34		
	BA-742.55	1.91	0.078	2.32		
	BA-762.26	1.93	0.068	2.58		
Tiefenbrunnen	TI-519.00	1.97	0.048	2.59		
	TI-591.93	2.10	0.073	2.66		
	TI-657.91	1.88	0.040	2.30		
Weggis	WG-220	1.71	0.013	2.57	2.60	16.5
	WG-310	1.73	0.066	2.15	2.16	19.1
	WG-380	1.70	0.111	2.20	2.20	21.2
	WG-590	1.87	0.027	2.67	2.66	27.4
	WG-720	1.86	0.020	2.36	2.34	31.2
	WG-880	1.93	0.052	2.52	2.49	36.0
	WG-888	1.61	0.057	1.94	1.93	36.2
	WG-938	1.79	0.036	2.59	2.55	37.7
	WG-950	1.91	0.071	2.36	2.33	38.0
	WG-1090	1.80	0.100	2.50	2.50	42.2
	WG-1140	1.70	0.102	2.10	2.10	43.6
	WG-1350	1.75	0.024	2.53	2.46	49.8
	WG-1520	1.72	0.027	2.36	2.29	54.8
	WG-1620	1.80	0.220	2.40	2.30	57.8
	WG-2070	1.75	0.048	2.25	2.18	71.1
	WG-2240	1.66	0.024	2.20	2.13	76.1

4.2.3 Vergleich der Messwerte Bohrkerne-Cuttings

Da für Wärmeleitfähigkeitsmessungen in der Praxis in vielen Fällen nur Cuttings zur Verfügung stehen, ist eine generelle Prüfung der Aussagekraft von Cuttings-Messungen von besonderem Interesse. Hier kann jedoch angesichts des beschränkten Probenmaterials nur ein erster, orientierender Vergleich angestellt werden.

Für die Weggis-Proben standen keine Kerne zur Verfügung und von Bassersdorf keine Angaben über die Anisotropie. Für die Tiefenbrunnen-Bohrkerne wurde als Vergleichswert eine mittlere Wärmeleitfähigkeit $\underline{K}$ wie folgt berechnet (Tab. 5):

$$\underline{K} = (K_{\parallel}^2 \cdot K_s)^{1/3}$$

Die Vergleichsresultate sind in den Figuren 4 und 5 gegeben. Bei Gleichheit der Bohrkern- und Cuttings-Werte sollten die Punkte nahe der 45 °-Geraden liegen. Die Resultate weisen Streuungen bis über ± 20 % auf. Die Streuung ist bei den trockenen Proben bedeutend grösser als bei den feuchten Proben. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass im ersten Fall der Kontakt Messsonde/Gestein schlechter ist.

Tab. 5: Mittlere Wärmeleitfähigkeiten $\underline{K}$ der Bohrung Tiefenbrunnen.

Probe	K_{II} [W/mK]	K_s [W/mK]	$\underline{K}$ [W/mK]
TI-519.00 trocken	1.78	1.99	1.85
TI-519.00 feucht	2.80	2.80	2.80
TI-591.93 trocken	2.1	1.9	2.03
TI-591.93 feucht	2.9	2.5	2.76
TI-657.93 trocken	1.98	2.02	1.99
TI-657.93 feucht	2.98	2.82	2.93

Aufgrund der sehr beschränkten Datenbasis lässt sich nur aussagen, dass die Abweichungen zwischen Kern-Messungen (feucht) und Cuttings-Messungen (berechneter Matrixwert) im Mittel unter $\pm 10 - 15 \%$ bleiben. Dies ist ein ermutigendes Resultat und legt weitere, umfangreichere Vergleichsmessungen nahe (siehe auch STADLER 1995).

5. Log-Berechnungen und Kalibration mit Messwerten (E. Greber / W. Leu)

5.1 Methodik

Die Wärmeleitfähigkeit eines Gesteines ist von zahlreichen chemischen und (petro)physikalischen Parametern abhängig (siehe z.B. SCHÖN 1996).

Bei den *chemischen* Parametern sind die Mineralzusammensetzung und die Zusammensetzung des Porenfluids von besonderer Bedeutung. Jedes Mineral wird durch eine eigene Wärmeleitfähigkeits-Bandbreite charakterisiert, z.B. variiert die Wärmeleitfähigkeit von Calcit zwischen 3.30 und 3.9 W/mK, jene von Quarz zwischen 6.5 und 13.0 W/mK oder jene von Tonmineralien zwischen 1.7 und 5.2 W/mK (Ref. in SCHÖN 1996). Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Porenfluids, desto höher ist erwartungsgemäss auch die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtgesteins. Allgemein nimmt die Wärmeleitfähigkeit auch mit zunehmendem Wassergehalt zu (SCHÖN 1996). Die chemische Zusammensetzung und die Gesamtmineralisationen der Molasse-Formationswässer sind je nach Lokalität und Tiefenbereich sehr unterschiedlich.

Zu den wichtigsten *physikalischen* Parametern 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). Bei einem Gestein mit einer sedimentär, tektonisch oder metamorph bedingten schichtförmigen Anordnung der Minerale ist die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung/Schieferung meist besser als senkrecht dazu. Gesteine, welche von kristallinen Mineralien aufgebaut werden, zeigen mit zunehmender Temperatur meist abnehmende thermische Leitfähigkeiten.

5.1.1 Empirische Berechnungsgrundlagen

In der Literatur finden sich zahlreiche empirische Formeln, mit denen sich mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen („Logs“) Wärmeleitfähigkeiten berechnen lassen (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). Diese Vielzahl von Berechnungsgrundlagen beruht in erster Linie wohl 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. Dies ist gut nachvollziehbar, wenn man in Betracht zieht, wie z.B. gebirgsbildende Vorgänge die Gesteine eines regionalen Gebietes sekundär in ihren petrophysikalischen Eigenschaften (und damit in ihrer Wärmeleitfähigkeit) wesentlich verändern können. In der Regel müssen deshalb 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 mit einer Kalibrierung der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit im Labor gemessenen Werten durchgeführt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Labormessungen oft nicht unter in-situ Bedingungen (Temperatur, Porenflüssigkeitstyp, Druck, Porosität) gemessen werden können und deshalb vor einem Vergleich korrigiert werden müssen (siehe Kap. 4).

In der vorliegenden Studie wurden mit folgenden empirischen Beziehungen gerechnet:

BLACKWELL & STEELE (1989), basierend auf GOSS & COMBS (1976):

$$K1 = 0.84 - 0.04 * \Phi + 0.000695 * v_p \quad (1)$$

wobei $K1$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 Φ = Porosität in %
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in m/s

Diese Beziehung basiert auf einer Evaluation von vorwiegend Sandstein-, sowie einigen Siltstein- und Kalk-Proben aus dem Imperial Valley in Kalifornien. GOSS & COMBS (1976) beobachteten auch Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeiten vom geologischen Milieu.

EVANS (1977):

$$K2 = -0.049 * \Phi - 0.160 * v_p + 3.60 * p_b - 5.50 \quad (2)$$

wobei $K2$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 Φ = Porosität in %
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in km/s
 p_b = bulk density in g/cm⁻³ (aus RHOB-Log = Brutto-Dichte Log = f(Dichte Gesteinsmatrix, Porosität und Dichte Porenflüssigkeit))

Diese Beziehung wurde aus einem breiten Spektrum von Nordseeproben abgeleitet.

Bohrung Weiach (statistische Auswertung Geoform AG):

$$K3 = 0.7 * v_p \quad (3)$$

wobei $K3$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in km/s

Diese stark vereinfachende Berechnung basiert auf einer statistischen Auswertung der Bohrung Weiach. Dabei wurde die Korrelation zwischen allen Wärmeleitfähigkeits-Messungen (Labor, MATTER et al. 1988a) und den entsprechenden Sonic-Geschwindigkeiten untersucht. Der Faktor 0.7 resultiert aus einer Regression durch den Nullpunkt unter Einbezug aller Datenpunkte (Tertiär, Mesozoikum, Permokarbon, ohne Kristallin) sämtlicher Lithologietypen. Einen vergleichbaren Faktor von 0.72 ± 0.2 ermittelte auch Sattel (1982) für Sedimentgesteine des Rheingrabens.

5.1.2 Berechnung der Porosität

Bei den ersten beiden Ansätzen ($K1$ und $K2$) spielt die Porosität (Φ) eine wichtige Rolle. Sie lässt sich auf verschiedene Arten mit geophysikalischen Logs berechnen. Bei den Wärmeleitfähigkeits-Berechnungen der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weiach wurde die (Gesamt- oder totale) Porosität N_{poro} nach BLASER et al. (1994) folgendermassen berechnet:

$$N_{\text{Poro}} = N_{\text{PHI}} - (\text{Clay} * P_{\text{sh}})$$

wobei

NPHI	=	Neutron-Porosität (Fraktion, aus Log)
Clay	=	Tongehalt (Fraktion)
P _{sh}	=	scheinbare Porosität eines reinen Tones (Fraktion)

Der Tongehalt Clay wird folgendermassen berechnet:

$$\text{Clay} = A * (GR - Gr_{cl}) / (GR_{sh} - GR_{cl})$$

wobei

GR	=	Gamma Ray Wert aus Log (in API-Einheit = Kalibrations-Standard)
Gr _{cl}	=	GR-Wert der tonfreien Formation (API): für Bassersdorf: 50 API, Tiefenbrunnen und Weiach: 20 API
Gr _{sh}	=	GR-Wert eines reines Tons (API), Bassersdorf und Weiach: 200 API, Tiefenbrunnen: 180 API
A	=	Skalierungsfaktor (hier: = 1)

Die scheinbare Porosität eines reinen Tones P_{sh} lässt sich bei Bassersdorf aus der Korrelation zwischen Tongehalt und Neutron-Porosität ermitteln. Sie beträgt 0.35 im USM-Abschnitt. Ein Wert von 0.3 wurde bei den Berechnungen der Bohrungen Tiefenbrunnen und Weiach verwendet.

Die Porositäts-Berechnung bei Tiefenbrunnen konnte im Abschnitt 656 bis 661 m mit im Labor gemessenen Porositäten geeicht werden.

Im Fall der Bohrung Weggis wurde die Porosität nicht neu berechnet und basiert auf den Werten von GEOFORM (1994b) und GREBER et al. (1994). Dabei handelt es sich um die aus dem Sonic-Log errechneten Porosität PHIA und die effektive Porosität PHIE, welche für den Tongehalt korrigiert ist.

Im weiteren werden folgende Notationen verwendet:

K1N: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, als Porosität wird N_{poro} verwendet

K1: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität aus PHIA (siehe oben)

K1E: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität aus PHIE (siehe oben)

K2N: mit Formel (2) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität wird N_{poro} (siehe oben)

K3: mit Formel (3) berechnete Wärmeleitfähigkeit

5.2 Kalibration mit Laborwerten

Die Wärmeleitfähigkeiten wurden in einer ersten Phase mit den Formeln (1) bis (3) berechnet und mit den im Labor gemessenen Werten verglichen. Dabei wurden pro Probtiefe 5 berechnete Wärmeleitfähigkeits-Werte gemittelt. Beispielsweise wurden für die Probe Tiefenbrunnen TI-519.00 die berechneten Wärmeleitfähigkeiten über das Tiefenintervall 518.6 - 518.8 - 519.0 - 519.2 - 519.4 gemittelt. Bei den Bohrungen Bassersdorf und Weggis betragen die Messdaten-Abstände 0.1 m, bei den Bohrungen Tiefenbrunnen und Weiach 0.2 m.

5.2.1 Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der trockenen Proben parallel zur Bohrachse $K_{||}$ zeigen eine gute positive (lineare) Korrelation mit den mit der Formel (1) und (3) berechneten Werten (Fig. 6). Die Korrelationsfaktoren betragen 0.93 resp. 0.86. Erstaunlicherweise wurden zwischen den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der feuchten Proben $K_{||}$ und den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Werten keine linearen Korrelationen festgestellt. Ein Vergleich zwischen den Messwerten von feuchten und trockenen Proben ist generell problematisch, da v.a. die Messung an feuchten Proben mit schwer beizukommenden Fehlerquellen (z.B. durch das Einpressen von Wasser) verbunden ist.

Hingegen eine gute positive Korrelation wurde zwischen $K_{||}$ (trocken) und den gemittelten Dichtewerten aus dem kompensierten Dichte-Log RHOB festgestellt ($R = 0.86$).

Bei der Bohrung Tiefenbrunnen wurde interessanterweise auch zwischen den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten senkrecht zur Schichtung (K_s , trocken und feucht) und den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Leitfähigkeiten eine gute Korrelation festgestellt. Allerdings ist dabei zu beachten, dass nur 3 Messwerte vorhanden sind.

5.2.2 Bohrung Weiach

Bei dieser Bohrung wurden im Labor nur die Mittleren Wärmeleitfähigkeiten der feuchten Proben (K , siehe Beilage 2) bestimmt. Diese Werte zeigen keine Korrelationen mit den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Wärmeleitfähigkeiten.

5.2.3 Bohrung Weggis

Bei dieser Bohrung konnten die Wärmeleitfähigkeiten wegen fehlendem Kern-Material nur an Cuttings gemessen werden (Tab.2, Beilage 2). Die dabei ermittelten Matrix-Wärmeleitfähigkeiten zeigen keine lineare Korrelation mit den mit den Formeln (1) und (3) berechneten Werten. Allenfalls könnte eine bessere Korrelation erreicht werden, wenn die berechneten Wärmeleitfähigkeiten über grössere Tiefenintervalle gemittelt würden (siehe z.B. Fig. 11a).

5.2.4 Kalibration der Berechnungsformeln (Logs)

Den Resultaten ist vor auszuschicken, dass bei der Kalibration der mit den Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Labormesswerten in erster Linie versucht wurde, lineare Korrelationen mit in der Literatur verwendeten empirischen Berechnungsformeln herauszufinden. Von diesen Berechnungsformeln ist nur Formel (3) linear aufgebaut. In Anbetracht der kleinen Datenmenge erschien es uns nicht gerechtfertigt, aufwendigere statistische Untersuchungen durchzuführen.

Bei den Korrelationsversuchen hat sich also gezeigt, dass sich bei Molasse-Gesteinen eine auf geophysikalische Logs gestützte Berechnung der Wärmeleitfähigkeit am zuverlässigsten mit den Formeln (1), (3) sowie mit dem Dichte-Log RHOB alleine durchführen lässt. Jedoch müssen erwartungsgemäss (siehe oben) die Koeffizienten der Gleichungen angepasst werden. Diese wurden mit einem mathematischen Fitting-Verfahren ermittelt, mit dem Ziel, eine möglichst gute Korrelation zwischen den berechneten Wärmeleitfähigkeits-Werten und den gemessenen Werten $K_{||}$ (trocken) zu erhalten (Fig. 7).

Als Ersatz für die Gleichung (1), bei welcher die Sonic-Geschwindigkeit v_p und die Porosität ϕ als Variablen auftreten, kann folgende Formel aufgestellt werden:

$$K1N_{neu} = -1.71 - 0.022 * N_{poro} + 0.97 * v_p \quad (4)$$

wobei $K1N_{neu}$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 N_{poro} = Porosität in % (Berechnung siehe oben)
 V_p = Sonic-Geschwindigkeit in km/s

Als Ersatz für die Formel (3), welche nur die Sonic-Geschwindigkeit berücksichtigt, kann Formel (5) geschrieben werden. Sie wurde mit Hilfe einer Regression durch den Nullpunkt aller K_{II} -Werte (trocken) der beiden Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen ermittelt. Im Gegensatz zu Formel (3) wurden also nur Molasse-Daten verwendet.

$$K3_{neu} = 0.54 * v_p \quad (5)$$

wobei $K3_{neu}$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 V_p = Sonic-Geschwindigkeit in km/s

Neu wurde eine Formel abgeleitet, welche auf dem Dichte-Log RHOB beruht:

$$K4_{neu} = -8.64 + 4.27 * RHOB \quad (6)$$

wobei RHOB = kompensierte Dichte in g/cm³

Solche direkten Beziehungen zwischen der Dichte eines Gesteines und dessen Wärmeleitfähigkeit wurden schon von zahlreichen Autoren festgestellt (siehe z.B. BEZIAT et al. 1992).

Mit Hilfe dieser drei für die OMM und USM im Raum Tiefenbrunnen/Bassersdorf kalibrierten Formeln (4), (5) und (6) wurden die Wärmeleitfähigkeiten anschliessend bei allen vier Bohrungen berechnet und zusammen mit der Geologie graphisch dargestellt (Fig. 8, 9, 10, 11a und 11b).

In Anbetracht der allgemeinen Unsicherheiten bei den Labormessungen, der Kalibrationsmethode sowie der unterschiedlichen Tiefenauflösung der geophysikalischen Logs wäre eine Glättung der berechneten Wärmeleitfähigkeits-Kurven für die praktische Anwendung sinnvoll (z.B. Wärmeentzugsberechnungen, siehe Kapitel 7). Diese Weiterbearbeitung ist für ein Folgeprojekt vorgesehen.

5.3 Resultate der Log-Berechnungen

5.3.1 Bassersdorf (Fig. 8):

Die drei verschiedenen Berechnungsarten führen über das gesamte untersuchte Tiefenintervall der USM zu recht ähnlichen Wärmeleitfähigkeiten. Im obersten Teil, bis ca. 604 m, fällt auf, dass die berechneten Werte ($\varnothing$ ca. 2.65 W/mK) deutlich höher liegen als im unteren Teil bis 800 m ($\varnothing$ ca. 2.3 W/mK).

Die Logs dieser Bohrung (BLASER et al. 1994) zeigen bei einer Tiefe von ca. 604 m einen markanten Wechsel in ihrem Charakter: Die natürliche Gamma-Strahlung (GR), die Sonic-Intervallzeit und auch die berechneten und gemessenen Tongehalte nehmen im unteren Intervall zu, die Porositäten ab. BLASER et al. (1994, p.122ff.) erklären diesen Umstand

damit, dass im oberen pelitischen Intervall zwischen 553 und 615 m Tiefe wegen wesentlich höheren Calcit- und Dolomitgehalten die Darstellung der totalen Porosität in scheinbaren Sandstein-Porositätseinheiten nicht angebracht ist. Dadurch erklärt sich auch, dass die aus den Dichte-Logs berechneten Porositäten wesentlich geringer sind als diejenigen aus den Neutron-Logs. Der höhere Zementierungsgrad im oberen Teil, (höhere Sonic-Geschwindigkeiten und Dichten, kleinere Porositäten) resultiert in berechneten Wärmeleitfähigkeiten, welche erwartungsgemäss höher liegen als im unteren Teil. Dies zeigt deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit unter anderem sehr stark von der lithologischen Zusammensetzung (Sand, Ton, Diagenese, Korngrösse) abhängig ist.

Innerhalb des unteren Teils wird tendenziell eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe beobachtet, was auf zunehmende Kompaktion zurückzuführen ist.

Die an trockenen Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten K_{II} stimmen gut mit den berechneten Werten überein.

Zusammenfassung:

- Alle Berechnungsarten geben übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten in der USM (~ 2.3 W/mK)
- Labormessungen stimmen mit berechneten Log-Werten überein
- Bessere Zementation mit Calcit und Dolomit im Intervall 553 und 615 m erhöht die Wärmeleitfähigkeit

5.3.2 Tiefenbrunnen (Fig. 9):

Die mit den Formeln (5,) und (6,) berechneten Wärmeleitfähigkeiten stimmen gut überein. Die mit Formel (4, $K1N_{neu}$) berechneten Werte unterscheiden sich jedoch in bestimmten Intervallen (z.B. zwischen 350 und 410 m) relativ stark von den anderen Werten ($K3_{neu}$ und $K4_{neu}$). Bei diesen Intervallen handelt es sich um vorwiegend tonig-siltige Partien mit hohen GR-Ablesungen, welche sich von übrigen, deutlich sandigeren Partien deutlich abheben. Da die $K1N_{neu}$ -Werte vermutlich zu tief liegen (bei ca. 400 m wurden sogar negative Werte berechnet), wird vermutet, dass in den tonigen Partien zu hohe Porositäten berechnet wurden. Die Porositäts-Berechnung müsste deshalb noch besser kalibriert werden.

In den sandigeren Partien sind verschiedene Tiefenintervalle mit relativ konstanten Wärmeleitfähigkeiten zu beobachten. OMM-Durchschnittswerte liegen um ca. 2.0 W/mK, also tendenziell etwas tiefer als in der USM der Bohrung Bassersdorf.

Die an trockenen Proben aus vorwiegend sandigen Partien gemessenen Wärmeleitfähigkeiten K_{II} stimmen gut mit den berechneten Werten überein.

Zusammenfassung:

- Die Berechnungsmethoden $K3_{neu}$ und $K4_{neu}$ geben in der OMM übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten von durchschnittlich ~ 2.0 W/mK)
- Labormessungen stimmen mit berechneten Log-Werten überein
- Der Einfluss der Porosität hat grossen Einfluss auf berechnete Wärmeleitfähigkeiten

5.3.3 Weiach (Fig. 10):

Die mit der $K1N_{neu}$ -Methode berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte sind auffallend tief. Bei dieser Berechnungsmethode sind die berechnete Porosität (N_{poro}) und die Intervallgeschwindigkeit von Bedeutung. Vergleiche mit dem Sonic- und Dichte-Log deuten darauf hin, dass mit der oben beschriebenen Methode (siehe Kap. 5.1) zu hohe Porositäten berechnet

wurden. Die mit den anderen Methoden (Formeln (5) und (6)) berechneten Wärmeleitfähigkeiten sind durchgehend höher, aber immer noch tiefer als die im Labor an feuchten Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten. Die mit (5) und (6) berechneten Wärmeleitfähigkeiten unterscheiden sich z.T. relativ stark voneinander und schwanken zwischen ca. 0.75 und 2.5 W/mK. Es können verschiedene Tiefenbereiche mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten unterschieden werden.

Bei der Interpretation der Resultate ist jedoch zu berücksichtigen, dass das bei Weiach untersuchte Molasse-Intervall sehr unteuf liegt. Die oberflächennahe Auflockerungszone (Entspannung) wird durch die geophysikalischen Logs besser erfasst, da generell grössere Tiefenintervalle abgetastet werden (Logs: 0.3-0.6 m) als bei punktuellen Messungen im Labor (dm-Bereich).

Zusammenfassung:

- Die Labormesswerte sind generell ca. 1 W/mK höher als die mit Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten (Einfluss oberflächennaher Auflockerungszone!)
- Für untiefe Bereiche (0-200 m) müssen mehr Kalibrationswerte gemessen werden

5.3.4 Weggis (Fig. 11a/b):

Alle drei verwendeten Berechnungsmethoden liefern ähnliche Wärmeleitfähigkeiten, welche durchschnittlich im Bereich zwischen 1.8 und 2.8 W/mK liegen. Deutlich können diskrete Tiefenabschnitte (50 - 200 m mächtig) mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden. Die Wärmeleitfähigkeiten aus den Cuttings-Messungen (durchschnittlich 1.9 - 2.7 W/mK) stimmen vor allem im oberen Teil der Bohrung bis ca. 1200 m recht gut mit den berechneten Werten überein. Hier sei daran erinnert, dass einerseits die Labormessmethode noch verbessert werden muss (Kap. 4.2.2) und andererseits die Kalibrationsversuche mit den Labormessungen von Weggis (Cuttings) erfolglos verliefen (siehe 5.2). Die hier angewandten Berechnungsmethoden wurden konnten nur mit Daten von Tiefenbrunnen und Bassersdorf kalibriert werden. Diese Bohrungen liegen jedoch relativ weit entfernt, in einem deutlich distaleren (nördlicheren) Ablagerungsmilieu des Molassebeckens mit unterschiedlichem lithologischem Charakter und höheren diagenetischen Reifegrad.

Zusammenfassung:

- Alle Berechnungsarten geben übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten in der USM (~1.8 - 2.8 W/mK)
- Kalibrationsdaten standen nur von relativ weit entfernten Bohrungen zur Verfügung

6. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur (E. Greber / B. Keller / W. Leu)

Bei der folgenden Auswertung geht es im wesentlichen darum zu untersuchen, ob sedimentologisch definierte Architektur-Elemente durch bestimmte Wärmeleitfähigkeits-Bereiche charakterisiert sind.

6.1 Auswertungsmethode

Bei den Bohrungen Bassersdorf (USM) und Weiach (USM) wurden über den gesamten untersuchten Bereich die sedimentologischen Architektur-Elemente bestimmt (BLASER et al. 1994, KELLER et al. 1990).

In der Bohrung Tiefenbrunnen liessen sich diese Elemente nur im gekerntem Bereich bestimmen, womit eine durchgehende Auswertung nicht möglich war. Für die Bohrung Weggis wurde auf eine solche Auswertung vorläufig verzichtet, da keine Kerne vorhanden sind.

Für die USM (Bassersdorf und Weiach) wurden folgende Architektur-Elemente ausgeschieden (siehe auch Kap. 3): RGS (sandiger Rinnengürtel), DFR (Durchbruchsfächer- und -rinnen), US (Überschwemmungssandstein), UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) und LAK (lakustrische Ablagerungen).

Die mit den Formeln (4), (5) und (6) berechneten Wärmeleitfähigkeits-Profile wurden über den Tiefenbereich von jeweils einem Architektur-Element gemittelt und pro Architektur-Element-Typ gegen die Tiefe aufgetragen (Fig. 12 und 13, *kleine* Symbole). Ebenfalls aufgetragen auf den Figuren 12 und 13 wurden die im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (*grosse* Symbole). Im Gegensatz also zu den kleinen Symbolen, welche berechnete, gemittelte Intervallwerte darstellen, handelt es sich bei den grossen Symbolen um Einzelmesswerte. Da die berechneten Wärmeleitfähigkeiten auch innerhalb desselben Architektur-elementes starken Schwankungen unterworfen sind, ist es nicht weiter erstaunlich, dass die Messwerte (*grosse* Symbole) von den Regressionsgeraden durch die Architektur-Element-Werte meist abweichen. Bei Figur 13 (Bohrung Weiach) ist weiter darauf hinzuweisen, dass hier die Messwerte von *feuchten* Proben stammen. Diese liegen in der Regel höher als jene Werte, welche an *trockenen* Proben gemessen werden. Die berechneten, gemittelten Intervallwerte hingegen stammen aus mit *trockenen* Proben kalibrierten Berechnungsgrundlagen (siehe 5.2).

6.2 Resultate

6.2.1 Bohrung Bassersdorf (Fig. 12)

Im Bereich der gesamten Unteren Süsswassermolasse sind die verschiedenen Architektur-Elemente kaum auf der Basis der Wärmeleitfähigkeit auseinanderzuhalten: Die drei ausgewerteten Architektur-Elemente DFR, US und UPS (Box charts in Fig. 12) sind durch eine grosse Bandbreite von Wärmeleitfähigkeiten charakterisiert, deren 1σ -Abweichungen vom Mittelwert sich teilweise überlappen. Allein eine schwache Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe wird beobachtet (Fig. 12). Ausser bei der $K_{4_{neu}}$ -Methode zeigen die Überschwemmungssandsteine (US) generell höhere Wärmeleitfähigkeiten als die Sedimen-

te der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS). Dieser Umstand spiegelt die höheren Tongehalte des Architektur-Elementes UPS wieder.

Die generell höheren Wärmeleitfähigkeits-Werte oberhalb 604 m stehen mit dem höheren Karbonatanteil im Porensystem in Zusammenhang (siehe 5.3).

6.2.2 Bohrung Weiach (Fig. 13)

Die verschiedenen Architektur-Elemente sind in dieser Bohrung meist durch relativ enge Wärmeleitfähigkeits-Bereiche charakterisiert, welche alle generell mit zunehmender Tiefe grösser werden.

Die sandigen Rinnengürtel (RGS) weisen tendenziell die tiefsten Werte auf, als Folge der grössten Porositäten. Im Falle der Sedimente der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) sind die relativ tiefen Wärmeleitfähigkeit-Werte durch den höheren Tonanteil bedingt. Die 1σ -Abweichungen vom Mittelwert der Architektur-Elemente DFR, US und UPS überlagern sich stark, liegen aber über dem Bereich des Elementes RGS (Box charts in Fig. 13). Die erwähnte Überlagerung ist bis zu einem gewissen Grad auch mit der tendenziellen Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe zu erklären.

6.2.3 Folgerungen

Die zur Verfügung stehenden Daten erlauben lediglich eine detaillierte geothermische Charakterisierung der distalen Unteren Süsswassermolasse. Trotz des momentan noch spärlichen Datensatzes können folgende interessanten Beobachtungen über die geothermischen Eigenschaften gemacht werden:

Abhängigkeit von der Tiefe

Für ein bestimmtes Architektur-Element nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe generell zu. Dieser Umstand ist durch die zunehmende lithostatische Kompaktion erklärbar, die bei abnehmender Porosität eine grössere Verdichtung zur Folge hat.

Abhängigkeit von der sedimentären Architektur

Die Unterschiede der geothermischen Eigenschaften der einzelnen Architektur-Elemente sind in der distalen USM relativ gering. Sie treten in der stratigraphisch tiefer gelegenen Bohrung Weiach deutlicher zu Tage als in der höher gelegenen Bohrung Bassersdorf.

Ursache dieser eher schwachen Abhängigkeit ist die grundsätzlich recht ähnliche petrographische Zusammensetzung granulometrisch und faziell unterschiedlicher Architektur-Elemente (KELLER et al. 1990, KELLER 1992, BLASER et al. 1994). Alle Architektur-Elemente sind demnach als feldspatreiche Litharenite oder Litharenite anzusprechen, mit sehr variablen Quarzgehalten zwischen ca. 10 und 50 %. Ebenso sind die Tongehalte relativ ähnlich, da im pelitischen Architektur-Element UPS der Ton als Matrix, in der arenitischen DFR, US und RG als Bestandteil der lithischen Komponenten (kristalline Gesteine) vorliegt.

Interessanterweise sind die Unterschiede zwischen den arenitischen Architektur-Elementen DFR und US einerseits sowie RGs andererseits recht deutlich. Dieser Umstand erklärt sich dadurch, dass die Sandsteine der Rinnengürtel (RGs) wesentlich höhere Porositäten aufweisen als diejenigen der Überschwemmungssandsteine (US) und der Durchbruchfächer und -rinnen (DFR).

7. Modellrechnungen des Wärmeentzuges über eine Sonde mittlerer Tiefe (R.J. Hopkirk / W.J. Eugster)

7.1 Einleitung und Modellbeschreibung

Es ist wichtig, die Sensitivität der erreichbaren Wärmeentnahme aus dem Untergrund bezüglich Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Wirtgesteins abschätzen zu können. Um diese Sensitivität bei den hier untersuchten Materialien zu gewinnen, wurde eine Serie numerischer Simulationsrechnungen durchgeführt.

Es wurden drei Aspekte untersucht:

- die Auswirkung eines systematischen Fehlers bei der Schätzung der Wärmeleitfähigkeit von Molassegesteinen
- die Auswirkung des Eintretens eines der Extremwerte für Wärmeleitfähigkeit von Molassegesteinen
- die Auswirkung des Eintretens eines der Extremwerte für Wärmekapazität von Molassegesteinen

Die Berechnungen wurden mit dem Rechenprogramm COSOND durchgeführt. Das Finite-Differenzen Programm, geschrieben in z-r (zylindrischen) Koordinaten, ermöglicht die Simulation des Ausbaus und des Betriebes einer coaxialen Erdwärmesonde in einem horizontal geschichteten Untergrund. Der numerische Algorithmus bietet eine voll-implizite Lösung für das Temperaturfeld im zylindrischen Untergrundbereich und behandelt dabei die Strömung (laminar bzw. turbulent) und Wärmeübergänge im Sondenkreislauf, sowie allfälligen Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Bodenoberfläche. Teleskopierte Ausbaustufen des Bohrlochs und der Verrohrung werden berücksichtigt und alle thermische Belastungen dürfen beliebig zeitabhängig sein.

In den vier in der vorliegenden Studie untersuchten Bohrungen sind nur die Molasse-Ablagerungen der OMM und USM spezifisch betrachtet worden. In drei der vier Fälle (Ausnahme Weggis) beginnt der relevante Schichtenbereich erst in einer Tiefe von einigen hundert Metern. Es wurde deshalb ein möglichst einfaches Modell aufgestellt, um typische Auswirkungen von Variationen der thermischen Eigenschaften der Materialien in der Molasse zu zeigen.

Zu diesem Zweck dient für die Untersuchung von Wärmeleitfähigkeitseffekten ein 2-Schichten-Modell von 950 m Tiefe. Eine obere Schicht mit eher niedriger Wärmeleitfähigkeit reicht bis in eine Tiefe von 475 m, die zweite Schicht bis zur Modellunterkante bei 950 m. Der Modellradius beträgt 150 m. Die thermischen Eigenschaften wurden dabei nicht in jeder Tiefe über ihren theoretisch maximal möglichen Variationsbereich geändert, sondern jeweils nur in realistischem Rahmen in den beiden modellierten Schichten.

Zur Untersuchung der spezifischen Wärmekapazität wurden die thermischen Eigenschaften der beiden Schichten gleichgestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des ganzen unterirdischen Halbraumes wurde bei einem mässigen Wert (2.4 W/mK) konstant gehalten und nur die spezifische Wärmekapazität variiert.

Der Energieentzug erfolgt durch Einsatz einer mitteltiefen Erdwärmesonde in einem 750 m tiefen Bohrloch. Dabei wird die obere Schicht sowie 275 m der unteren Schicht durchbohrt.

Die Konstruktion der Sonde ist eher "konventionell":

- 7" Verrohrung zementiert in einem 8 1/2" Bohrloch ohne jegliche Art von Teleskopierung
- koaxial-angeordnete, gut zentrierte Steigleitung aus Kunststoff (PE) mit Aussendurchmesser 90 mm

Um nützliche Resultate zu erhalten, muss die modellierte Erdwärmesonde in einem möglichst typischen Flüssigkeitstemperaturbereich arbeiten. Der Grund dafür ist, dass Wärmepumpen, die bei einer solcher geothermischen Anwendung am ehesten in Frage kommen, am optimalsten in einem beschränkten Temperatur-Bereich arbeiten: Zudem ist die potentielle Entzugsleistung vom Temperatur-Unterschied zwischen der Wärmeträgerflüssigkeit und der Formation abhängig. Der Bereich wurde für sämtliche Fälle so gewählt, dass nach einem Periode von 25 Jahren in Dauerbetrieb eine Quellentemperatur (Temperatur des gelieferten Warmwassers am Sondenkopf) von ca. 10°C resultierte. Dadurch sollte es erfahrungsgemäss möglich sein, auch bei typischen saisonalen Lastschwankungen während dieser Periode mit reinem Wasser zu arbeiten. Eine Differenz zwischen der Quellen- und der Rückgabetemperatur im hydraulischen Kreislauf von 3.5K wurde in jedem Fall angenommen. Es ist zu erwähnen, dass unter diesen Voraussetzungen die Dauerleistung in den beiden Basisfällen 21.9 kW betrug (siehe Tabellen 6 und 7).

Durch iterative Änderung der Durchlaufgeschwindigkeit im Sondenkreislauf konnten die langzeitigen Abkühlungsverläufe von Variante zu Variante sehr genau dem jeweiligen Basisfall angepasst werden. Dies bedeutet, dass die zeitlichen Verläufe der Quellen- und Rückgabemperaturen in der Figur 14 auch für sämtliche weiteren Rechenläufe repräsentativ sind.

7.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit

Das Temperaturfeld im Wirtgestein wird bestimmt durch die Annahme einer mittleren Erdoberflächen-Temperatur von 10°C sowie durch ein vertikales Temperaturprofil, welches aus einem geothermischen Wärmefluss von 80 mW/m² resultiert. Die spezifische Wärmekapazität des Formationsgesteins wurde beim Wert von 850 J/kgK für die beiden Schichten belassen.

Die ersten drei Fälle in der Tabelle 6 (Basis, 022 und 032) zeigen die Auswirkungen globaler Wärmeleitfähigkeits-Änderungen in der Höhe von ± 0.5 W/mK der unteren Schicht. Die Werte sind indikativ für Auswirkungen von systematischen Fehlern bei der Schätzung der Wärmeleitfähigkeit der unteren Schicht (Molasse).

Kommen ähnliche Schätzungsfehler auch in der oberen Schicht dazu, nehmen die Änderungen bei der Entzugsleistung noch weiter bis gegen 20% zu.

Zweck der Berechnungen 043 und 053 war, die Effekte von Extremänderungen der Wärmeleitfähigkeit nach oben in der unteren Schicht und nach unten in der oberen Schicht zu zeigen, und diese mit den Auswirkungen der Schätzungsfehler zu vergleichen. Signifikant ist die grössere Wirkung auf das Leistungspotential in der unteren Schicht bei Änderung der Wärmeleitfähigkeit in ähnlicher Grössenordnung in beiden Schichten.

Tab. 6: Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierenden Wärmeleitfähigkeiten im zwei-Schicht-Modell.

Berechnung	K_{oben} [W/mK]	K_{unten} [W/mK]	Durchfluss [m ³ /h]	Entzug [MWh/a]	Veränderung [%]
Basisfall	2.0	2.7	5.4	191.7	0.0
Run 022	2.0	3.2	6.1	215.8	+12.6
Run 032	2.0	2.2	4.7	167.2	-12.8
Run 043	2.0	3.8	6.8	243.2	+26.9
Run 053	1.0	2.7	4.6	161.9	-15.5

7.3 Einfluss der spezifischen Wärmekapazität

In dieser Untersuchung wurde das Temperaturfeld wieder durch die gleichen Annahmen wie oben bestimmt, die Wärmeleitfähigkeit des Wirtgesteins jedoch wurde beim Wert von 2.4 W/mK über den gesamten Tiefenbereich des Modells belassen.

Die Resultate (Tab. 7) zeigen, dass der Einfluss der Wärmekapazitäts-Änderungen auf das Entzugspotential bei diesen Modellierungen relativ gering ist.

Tab. 7: Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierender Wärmekapazität des gesamten Wirtgesteins.

Berechnung	$C_{\text{Formation}}$ [J/kgK]	Durchfluss [m ³ /h]	Entzug [MWh/a]	Veränderung [%]
Basisfall	850.0	5.4	191.7	0.0
Run 063	700.0	5.3	189.8	-0.9
Run 073	1600.0	5.7	202.5	+5.5

8. Schlussfolgerungen / Nutzen für die Praxis

- ⇒ Die Kompilation aller zur Zeit verfügbaren geothermischen Daten von schweizerischen Molasse-Gesteinen (Beilage 1) bildet eine neue Grundlage für die Planung und Konzipierung von geothermischen Anlagen.
- ⇒ Die Wärmeleitfähigkeiten nehmen innerhalb ähnlicher Lithologien mit zunehmender Tiefe und Kompaktion tendenziell zu. Für die USM liegen die durchschnittlichen Werte bei Bassersdorf zwischen ca. 2.2 und 2.7 W/mK, bei Weiach zwischen ca. 1.1 und 1.8 W/mK und bei Weggis zwischen ca. 2.8 und 2.8 W/mK. Für die OMM der Bohrung Tiefenbrunnen wurden durchschnittliche Werte zwischen ca. 1.7 und 2.4 W/mK ermittelt. Offensichtlich liegen hier deutlich regionalgeologische (Diagenese, Kompaktion) und formationsspezifische Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten vor, die durch das spärliche Datenmaterial, aber auch in Folge des beschränkten Forschungssetats nicht genügend ergründet werden konnten.
- ⇒ Die Labormessungen (trocken und feucht) an Kernen und Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis zeigen einen bedeutenden Einfluss der Sättigung mit Porenflüssigkeit auf gemessene Wärmeleitfähigkeiten. Die Abweichungen zwischen den Wärmeleitfähigkeiten der *feuchten* Kerne und den Wärmeleitfähigkeiten der entsprechenden Cuttings liegt im Mittel unter $\pm 10 - 15 \%$.
- ⇒ Die Umrechnung der an den Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten zu Matrix-Wärmeleitfähigkeiten ist mit methodisch bedingten Schwierigkeiten verbunden und muss in Zukunft noch besser untersucht werden.
- ⇒ Geophysikalische Bohr-Logs erlauben es, ohne grossen Arbeitsaufwand durchgehende und relativ zuverlässige Wärmeleitfähigkeiten zu berechnen. Die Berechnungsmethoden, welche auf den Porositäten, den Sonic-Geschwindigkeiten und den Dichte-Werten beruhen, konnten mit den Wärmeleitfähigkeits-Messungen an den trockenen Kernen K_H kalibriert werden. Generell scheinen die Berechnungsmethoden, welche alleine auf der Sonic-Geschwindigkeit oder der Gesteinsdichte beruhen, die zuverlässigsten Resultate zu liefern. Wird auch die Porosität berücksichtigt sollten nur zuverlässig kalibrierte Log-Porositäten verwendet werden.
- ⇒ Für die Kalibrierung der Berechnungsmethoden (Logs) standen nur 8 Datenpunkte aus distalen Bereichen des Molassebeckens zur Verfügung. Vor einer flächenhaften Anwendung der Berechnungsformeln müssen unbedingt mehr Labormessungen durchgeführt werden.
- ⇒ In der distalen Unteren Süsswassermolasse ist nur eine schwache Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur feststellbar. Diese für die Praxis wichtige Erkenntnis ist durch die sehr ähnliche petrographische Zusammensetzung der verschiedenen Architektur-Elemente erklärbar. Innerhalb der sandigen Architektur-Elemente jedoch ist eine deutliche Unterscheidung infolge verschiedener Porositäten und diagenetischer Zementation erkennbar.
- ⇒ Die Wichtigkeit der Wärmeleitfähigkeit bei Wärmeentzugsmodellierungen wird sogar unter konservativ gestalteter Berechnungen deutlich. Es ist deshalb für die Auslegung jeder Edwärmesonde wichtig, die Wärmeleitfähigkeit möglichst genau zu kennen. Bei tiefen Sondenanlagen haben Fehlschätzungen der Wärmeleitfähigkeit von ± 0.5 W/mK Variationen des Wärmeentzugspotentials von bis zu 20% zur Folge.

⇒ Obwohl nur eine kleine Auswirkung der spezifischen Wärmekapazität auf Wärmeentzugsrechnungen demonstriert werden konnte, ist die volle Signifikanz dieses Parameters noch nicht klar. Es ist hier jedoch zu berücksichtigen, dass im Rahmen dieser Pilotstudie (limitierter Datensatz und Aufwand) nur eine tiefe Erdwärmesonde in Dauerbetrieb simuliert wurde. Die Berechnung verschiedener dynamischer Lastfälle liegt ausserhalb des Rahmens des vorliegenden Projektes. Dies nicht zuletzt deshalb, weil konkrete Erfahrungen mit der Temperaturdynamik tieferer, in Betrieb stehender Erdwärmesonden, erst beim Projekt Weggis gesammelt werden. Die Wärmekapazität ist jedoch relevant für Speicheranlagen und sich saisonal voll regenerierende Erdwärmesonden im untiefen Bereich (0 - 100 m).

Die vorliegende Studie zeigt somit, dass es möglich ist, die geothermischen Eigenschaften der Molasse-Gesteine im Schweizer Molassebecken mit kostengünstigen und kalibrierten Methoden auf zuverlässige Weise zu berechnen. Dies sind positive Signale im Hinblick auf eine möglichst wirtschaftliche Nutzung der Geothermie in der Schweiz.

9. Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Um ein wirksames Planungsinstrument für geothermische Anlagen im gesamten Schweizer Molassebecken zu erhalten, sollten in einem Folgeprojekt folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Flächendeckende Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten bis in Tiefen von ca. 2 km mit Hilfe geophysikalischer Logs. Glättung der berechneten Wärmeleitfähigkeiten über praktisch anwendbare Tiefenintervalle.
- Die Methode der Wärmeleitfähigkeitsmessung an Cuttings im Labor sollte weiter optimiert und mittels Eichung mit einer viel grösseren Anzahl von Kern- und Log-Daten abgesichert werden.
- Zusätzliche Wärmeleitfähigkeits-Messungen an Kernen (bisher nur 8 Messungen), um die in diesem Bericht beschriebenen Berechnungsmethoden mittels Logs abzusichern. Vor allem im untiefen Bereich (0 bis 300 m) fehlen gute Messdaten. Möglich wäre z.B. eine Neubeprobung der Bohrung Weiach. Die bisherige Kalibration konnte nur relativ punktuell, im Raum Bassersdorf / Tiefenbrunnen, durchgeführt werden. Wichtig wäre aber, dass auch Molasse-Kerne aus anderen Regionen (z.B. Zentral- und Westschweiz) kalibriert werden können.
- Die regionalgeologischen Unterschiede infolge unterschiedlicher Diagenese sollten detaillierter untersucht werden. Hierzu ist eine Ausdehnung eines Folgeprojektes auf das ganze Molasse-Becken erforderlich.
- Die grosse Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Petrographie und der Petrophysik konnte zwar für die distale USM anhand der Architektur-Elemente nachgewiesen werden. Wie sich dieser Einfluss in den quarzreichen Gruppen OMM und OSM niederschlägt, müsste durch weitere Untersuchungen analog zu den vorliegenden geklärt werden. Weitere Untersuchungen müssten demnach auch die Sedimentpetrographie und die Petrophysik berücksichtigen, wie dies im ursprünglichen Projektvorschlag vorgesehen war.
- Es sollte versucht werden, die Wärmeleitfähigkeit, basierend auf der mineralogischen Zusammensetzung zu berechnen (bei sehr geringer Porosität oder genauer Kenntnis der Porosität, des Sättigungsgrades und der Art der Porenfüllung).
- Es sollte getestet werden, ob die Wärmeleitfähigkeiten auch mit seismischen Profilen, respektive mit den seismischen Geschwindigkeiten, berechnet werden können.
- Labormessungen der Wärmekapazität sowie Entwicklung neuer Messmethoden. Es bestehen bereits vielversprechende Ansätze zur Messung dieses Parameters, welcher bei der Konzipierung geothermischer Anlagen ebenso wichtig wie die Wärmeleitfähigkeit ist.
- Weitere Berechnungen von dynamischen Belastungen an Erdwärmesonden in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität sollten durchgeführt werden. Zudem sollte auch der untiefere Bereich (0-100 m, heute grösste Dichte von Speicheranlagen und Erdwärmesonden) berücksichtigt werden, wo generell grosse Variationen der oben genannten Parameter auftreten.

Verdankungen

Die Autoren danken Frau Heidi Haas (Universität Bern, Beprobung Weggis), Herrn B.-F. Iseli (Effretikon, Beprobung Tiefenbrunnen), Herrn K. Fehr (AGW Zürich), Herrn Dr. P. Blümling (Nagra, Logs Bassersdorf) sowie den Herren R. Schegg und B. Loup (Résumé français) für ihre zuvorkommende Mitarbeit.

Literaturverzeichnis

- AMMANN, M., BIRKHÄUSER, P., BLÄSI, H.R., LAVANCHY, J.-M., LÖW, S., MEIER, B. & MÜLLER, W.H. (1993): Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf. Charakterisierung mittels Geologie, Petrophysik und Fluid Logging. - NTB, 92-03, 76 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. & 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.
- 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 issledovaniya skvashin. - Moscow.
- EUGSTER, W. J., HOPKIRK, R. J., KÄLIN, B., RYBACH, L. & SEIFERT, P. (1992): Das Betriebsverhalten der Erdwärmesonde. Dezentrales Heizen durch Nutzung der untiefen Geothermie. - SIA, 46, 6 p..
- EVANS, T.R. (1976): Thermal properties of North Sea rocks. - The Log Analyst, 18/2, p. 3-12.
- GEOFORM (1994a): Bestandesaufnahme bestehender Tiefbohrungen in der Schweiz. - Bericht Geoform AG, gf-156-1, p. 13.
- GEOFORM (1994b): Geothermiebohrung Weggis - Schlussbericht Geologie/Geophysik/Bohrtechnik. - Bericht Geoform AG, gf-138-1, p.31.
- GIOVANOLI, F. & HSÜ, K. J. (1981): Die wissenschaftliche Sondierbohrung im tiefsten Teil des Zürichsees. - Neue Zürcher Zeitung Nr. 155 (8.7.1981).
- 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., GRÜNENFELDER, T., KELLER, B. & WYSS, R. (1994): Die Geothermie-Bohrung Weggis, Kanton Luzern. - Bull. schweiz. Ver. Petroleum-Geol. u. -Ing., 61/138, p. 17-43.
- HOPKIRK, R. J., RYBACH, L. & STADLER, T. (1994): Tiefe Erdwärmesonden. - In: Sanner, B. & Lehmann, A. (ed.): Tagungsbericht 2. Symposium 'Erdgekoppelte Wärmepumpen'. Informationszentrum Wärmepumpen+Kältetechnik, Karlsruhe. IWZ-Bericht 1/94, p. 265-274.
- HOUBOLT, J.J.H.C. & WELLS, P.R.A. (1980): Estimation of heat flow in oil wells based on a relation between heat conductivity and sound velocity. - Geol. Mijnbouw, 59/3, p. 215-224.
- KELLER, B. (1989): Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. - Dissertation, Bern, 403 p.

- KELLER, B., BLÄSI, H.-R., PLATT, N.H., MOZLEY, P.S. & MATTER, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysik. Eigenschaften am Beispiel der Bohrung Langenthal. - Nagra NTB 90-41, 100 p.
- KELLER, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. - *Eclogae geol. Helv.*, 85/3, p. 611-651.
- MATTER, A., PETERS, T., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., ISCHI, H. & MEYER, CH. (1988a): Sondierbohrung Weiach, Geologie (Text- und Beilagenband). - Nagra NTB 86-01, 438 p.
- MATTER, A., PETERS, T., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F. & WEISS, H.-P. (1988b): Sondierbohrung Schafisheim, Geologie. Test- und Beilagenband. - Nagra NTB, 86-03, 321 p.
- MENGIS & LORENZ (1994): Sanierung des Krienbaches (Kriens-Luzern). - Bericht über die geologische Aufnahme des Gütschstollens. Bauherrschaft GALU (Stadt Luzern und Gemeinde Kriens), Landeshydrologie und -geologie (Bern) und Geologisches Institut der Universität Bern. 19 p. + Fig./Profile.
- PRIBNOW, D. (1994): Ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie. - *Fortschr.-Ber., VDI Reihe 19*, Nr. 75, Düsseldorf.
- 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-InformationsZentrum 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. (1989): Geothermische Detailkartierung (1:100000) in der zentralen Nordschweiz mit besonderer Berücksichtigung petrophysikalischer Parameter. - Diss. ETH, Nr. 8941, 208 p.
- 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, Seismic exploration., 18, 583 p.
- SEIFERT, P.K., EUGSTER, W.J., KÄLIN, B. & HOPKIRK, R.J. (1992): Auswirkung von Bergklima und Bodentypen auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden. - Polydynamics Ltd. im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW.
- SEKIGUCHI, K. (1984): A method for determining terrestrial heat flow in basinal areas. - *Tectonophysics*, 103, 67-79.
- STADLER, T. (1995): Messung der Wärmeleitfähigkeit an Bohrklein mit dem TK04 der Gruppe für Geothermie am Institut für Geophysik, ETH Hönnggerberg. - Interner Bericht.
- STADLER, T., HOPKIRK, R.J. & HESS, K. (1995b): Auswirkungen von Klima, Bodentyp und Standorthöhe auf die Dimensionen von Erdwärmesonden in der Schweiz. - Polydynamics Ltd. im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW.
- VASSEUR, G., BRIGAUD, F. & DEMONGODIN, L. (1995): Thermal conductivity estimation in dedimentary basins. - *Tectonophysics*, 244, 167-174.

Figuren 1 - 14

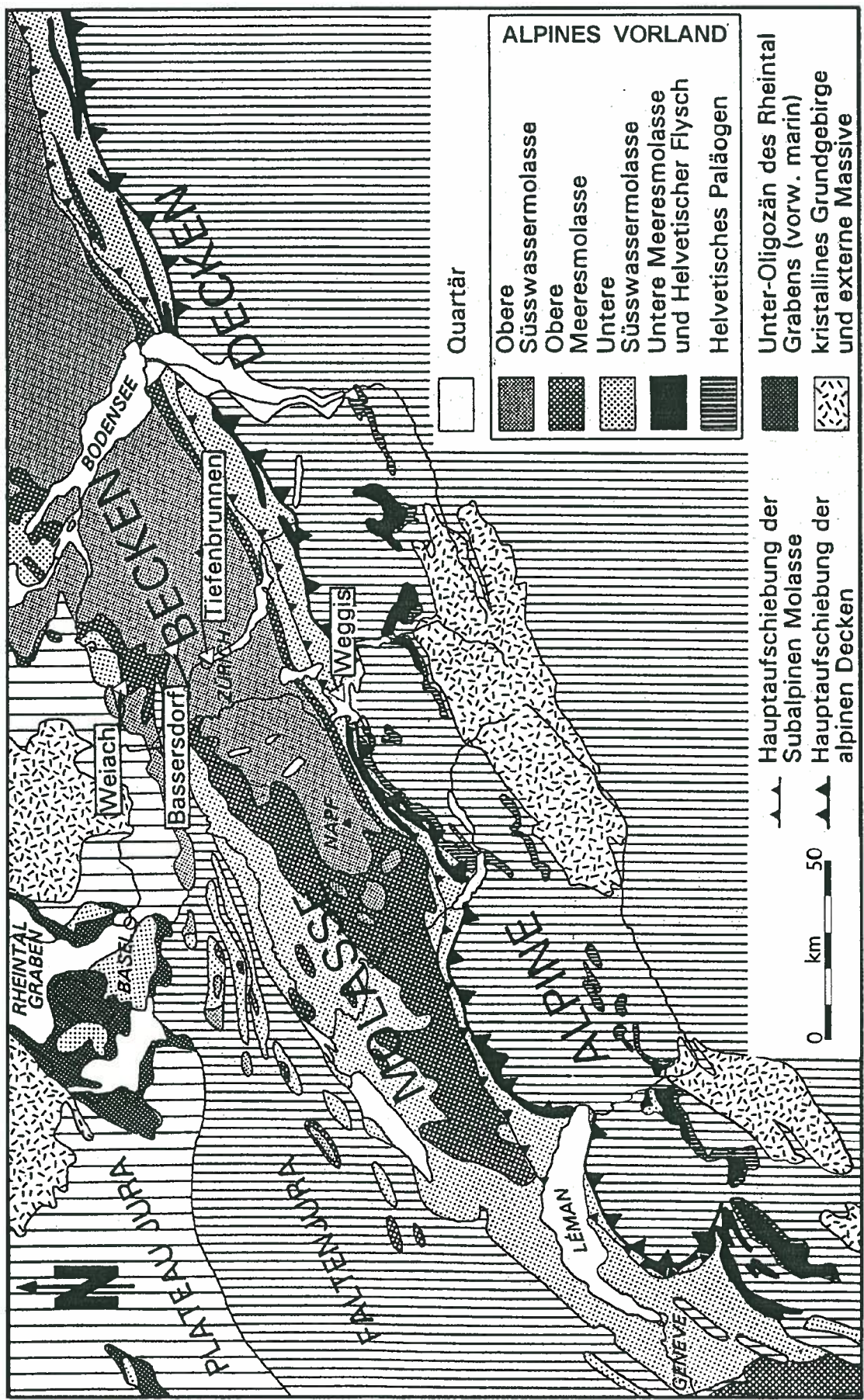


Fig 1: Geologische Übersichtskarte des Molasse-Beckens mit den Lokalitäten der beprobten Bohrungen (nach KELLER 1992).

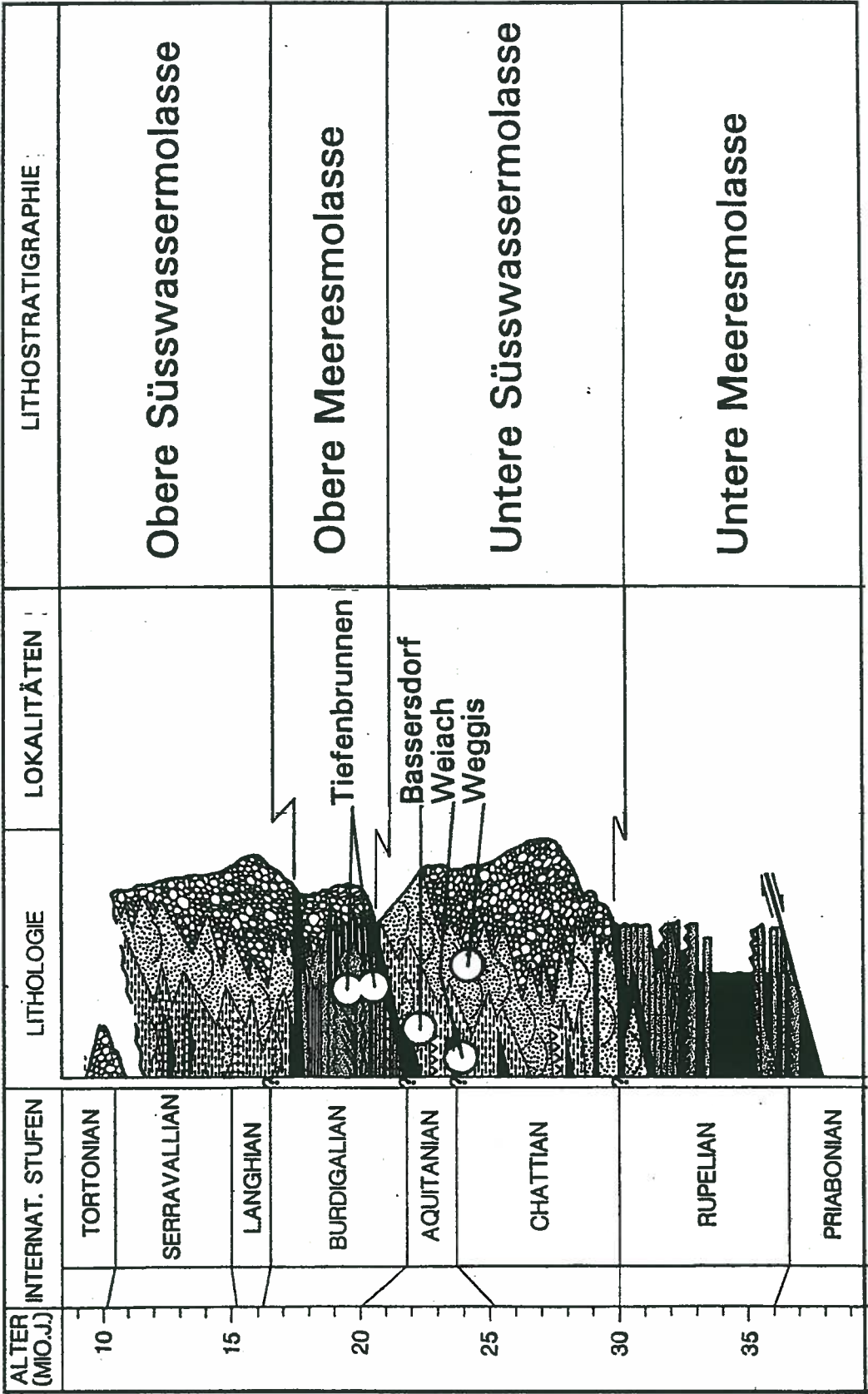


Fig 2: Stratigraphisches Sammelprofil der untersuchten Molasseeinheiten mit relativer Position der beprobten Intervalle (nach KELLER 1992).

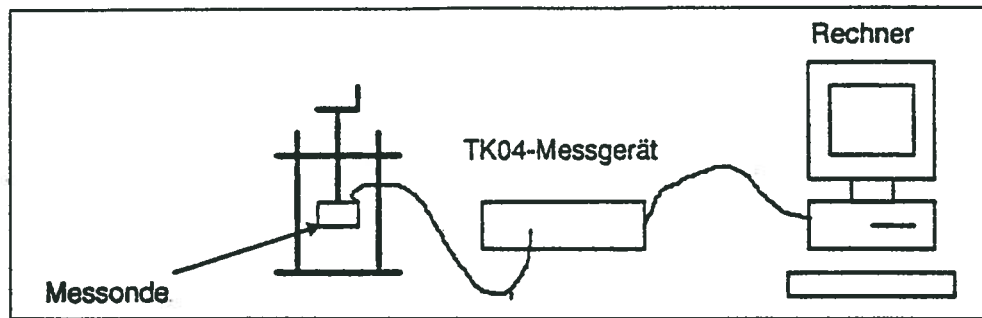


Fig 3: Schematische Darstellung der Messapparatur

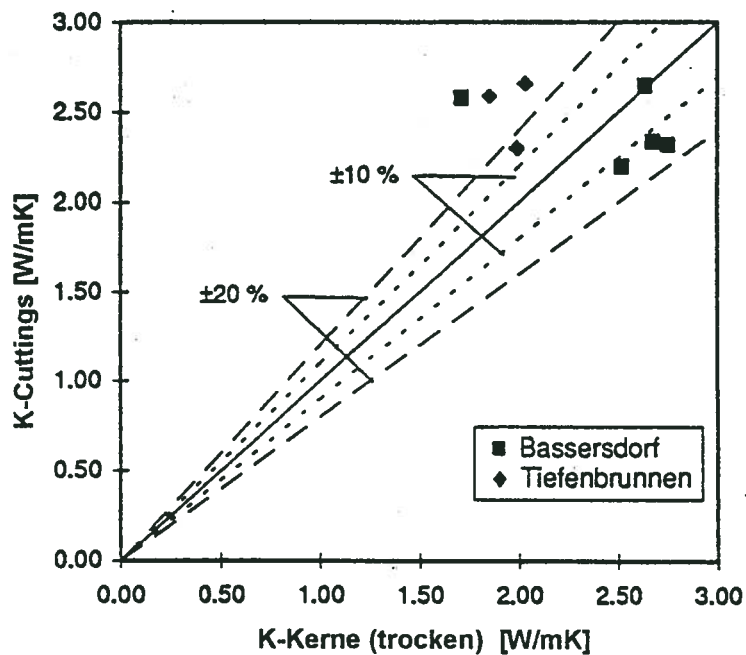


Fig 4: Vergleich zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Kerne (trocken) und der Cuttings (Matrixwert, siehe Text).

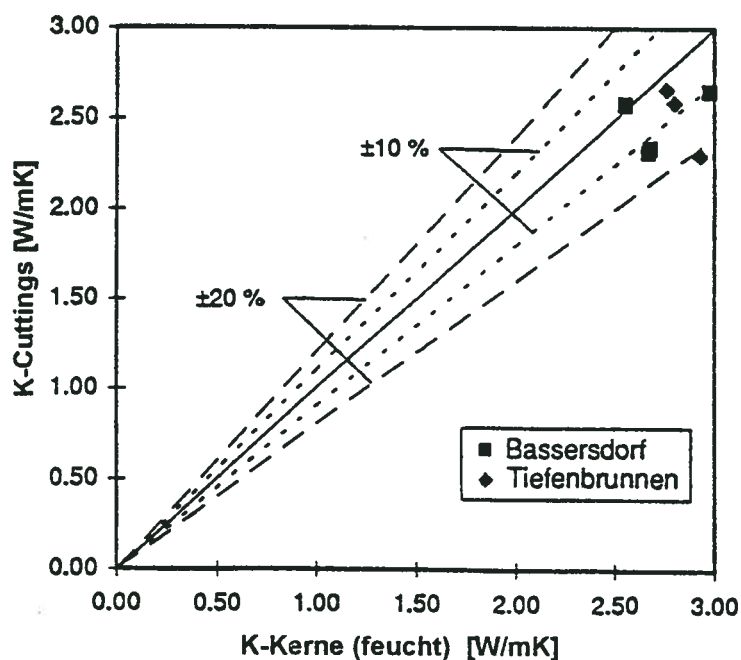


Fig 5: Vergleich zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Kerne (feucht) und der Cuttings (Matrixwert, siehe Text).

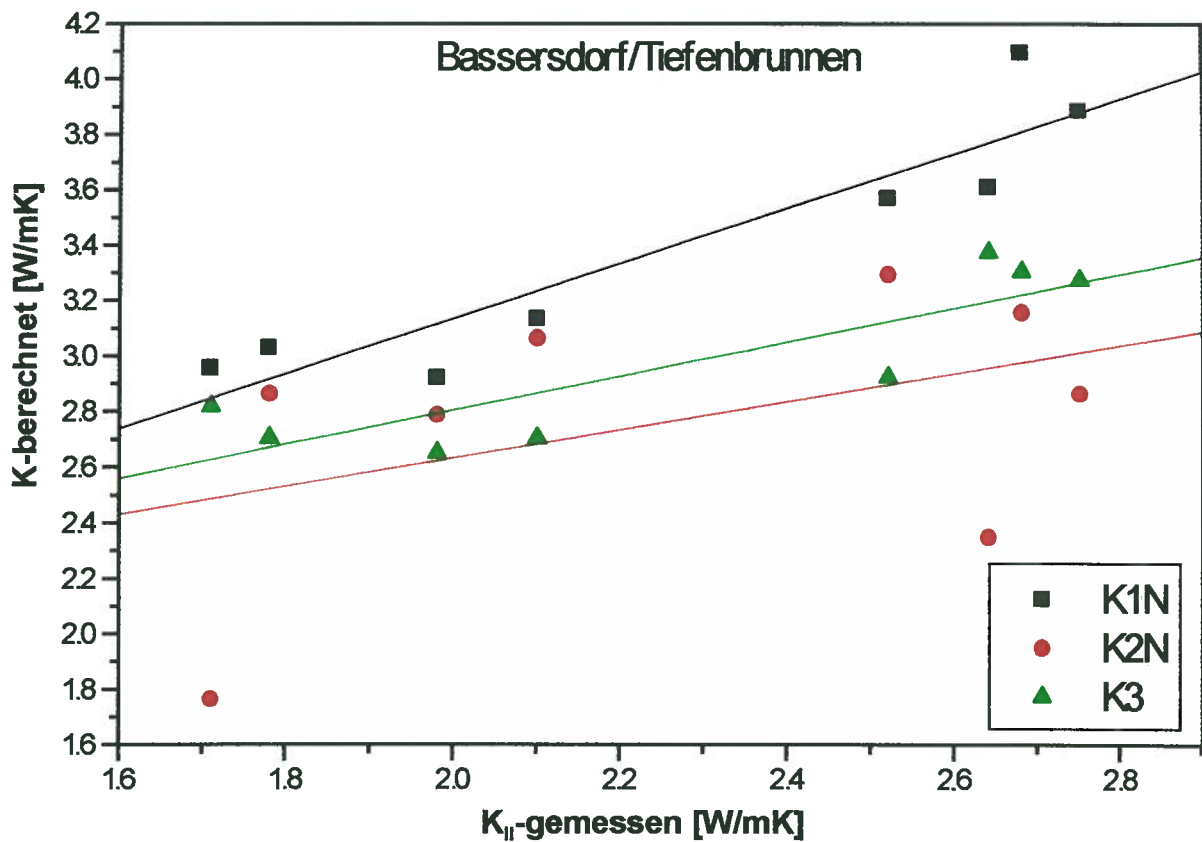


Fig 6: Korrelation von K_{II} -gemessen (trocken) vs. K1N/K2N/K3-Logs (Korrelationsgeraden: $y=A+B \cdot x$) für die Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen (für Berechnungsmethode siehe Text).

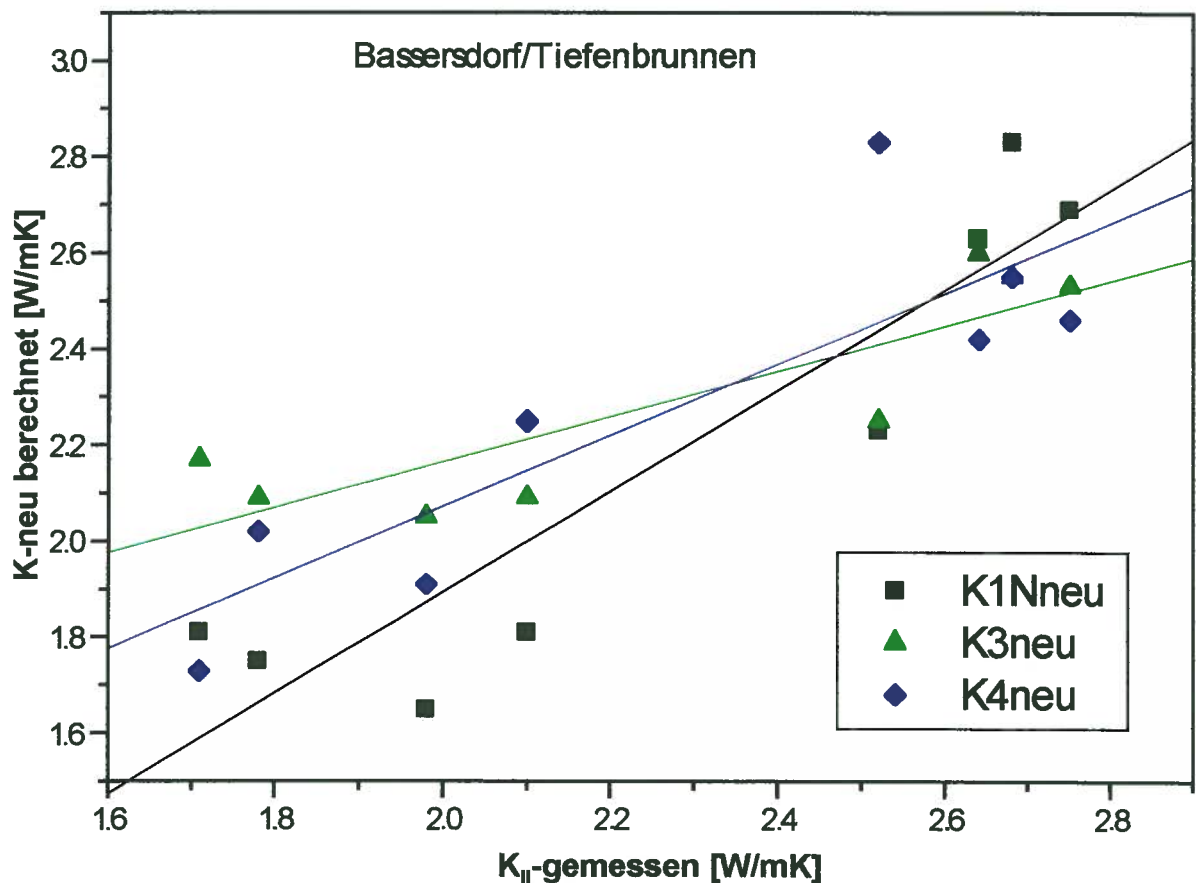


Fig 7: Korrelation von K_{II} -gemessen (trocken) vs. $K1N_{neu}/K3_{neu}/K4_{neu}$ -Logs (Korrelationsgeraden: $y=A+B \cdot x$, neu kalibriert) für die Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen (für Berechnungsmethode siehe Text).

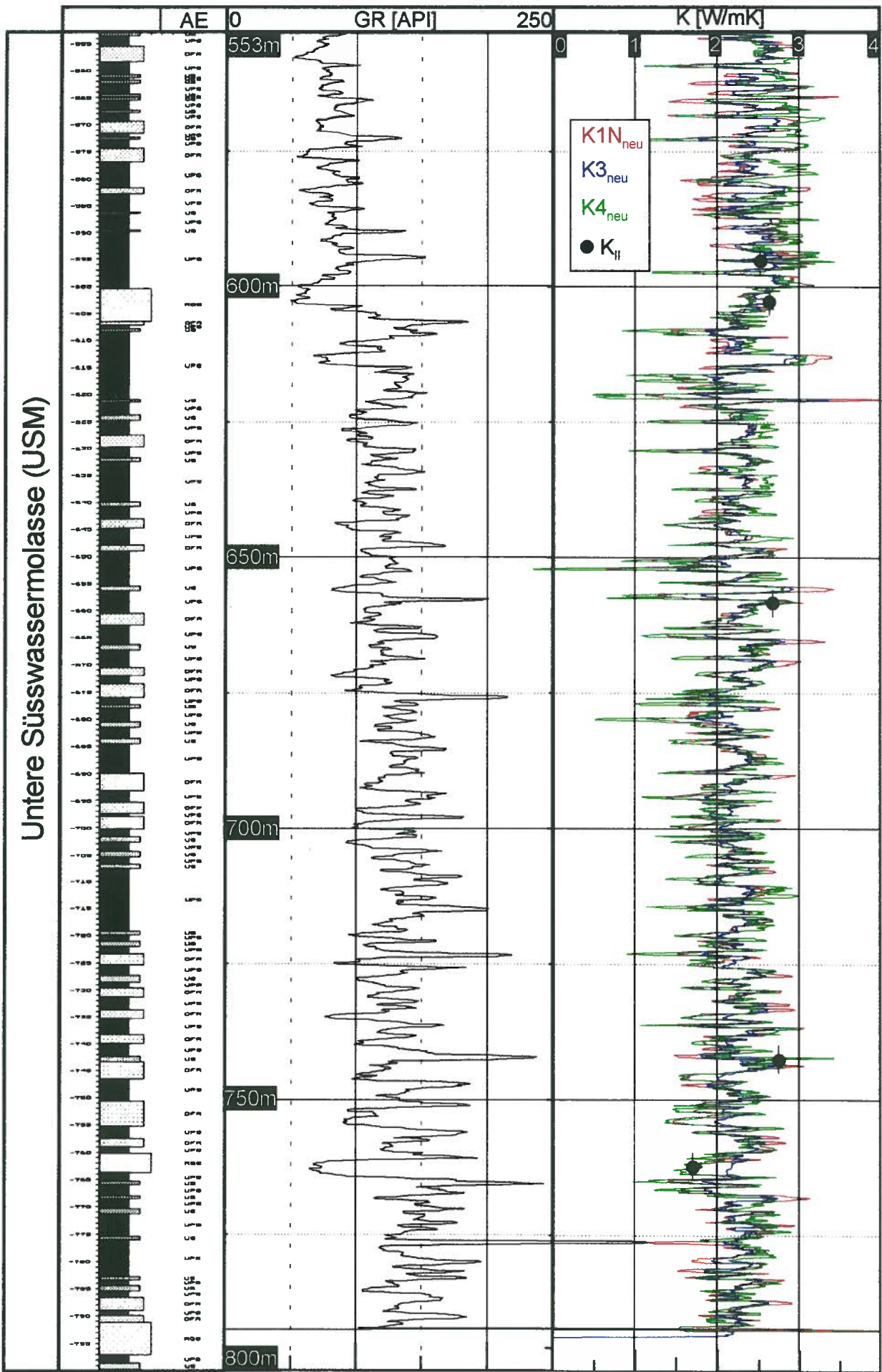


Fig. 8: Sammelprofil Bassersdorf (USM) 1:1000 mit berechneten ($K1N_{neu}$, $K3_{neu}$, $K4_{neu}$) und gemessenen (K_{II} trocken) Wärmeleitfähigkeiten. AE = sedimentäre Architektur-Elemente

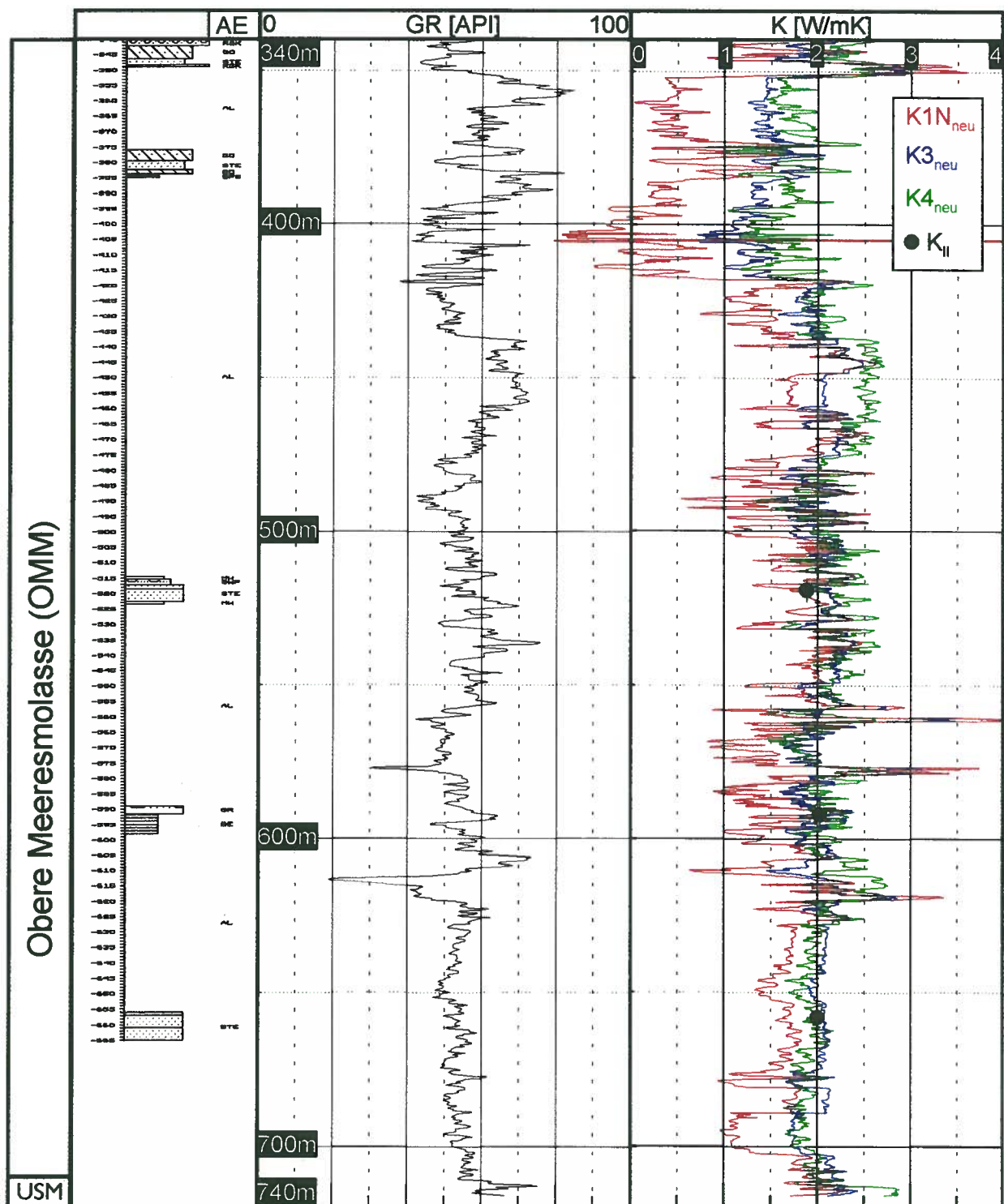


Fig. 9: Sammelprofil Tiefenbrunnen (OMM) 1:2000 mit berechneten ($K1N_{neu}$, $K3_{neu}$, $K4_{neu}$) und gemessenen (K_{II} trocken) Wärmeleitfähigkeiten. AE = sedimentäre Architektur-Elemente (siehe Kap. 3).

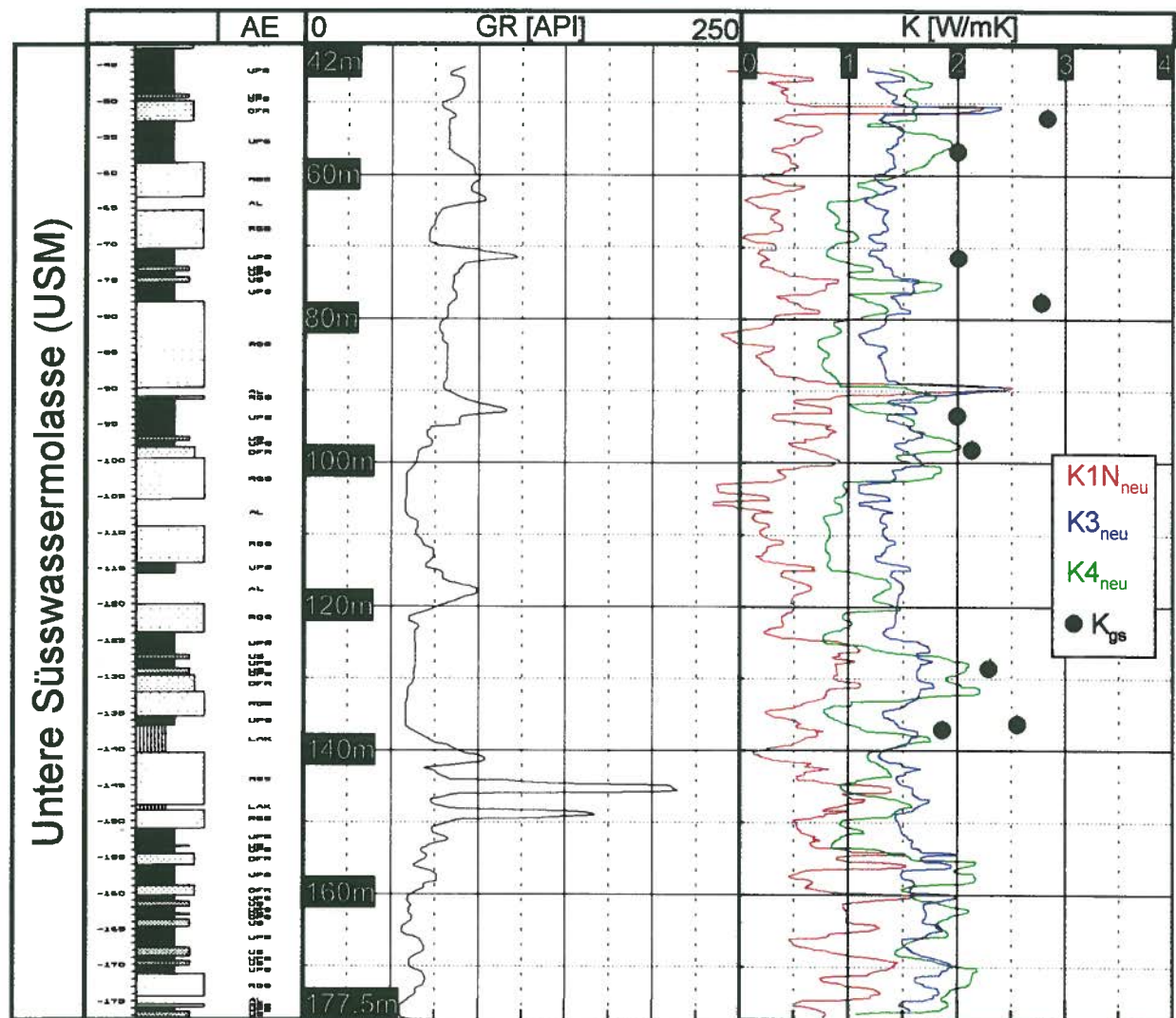


Fig.10: Sammelprofil Weiach (USM) 1:1000 mit berechneten ($K_{1N_{neu}}$, $K_{3_{neu}}$, $K_{4_{neu}}$) und gemessenen (K_{gs}) Wärmeleitfähigkeiten (feucht). AE = sedimentäre Architektur-Elemente (siehe Kap. 3).

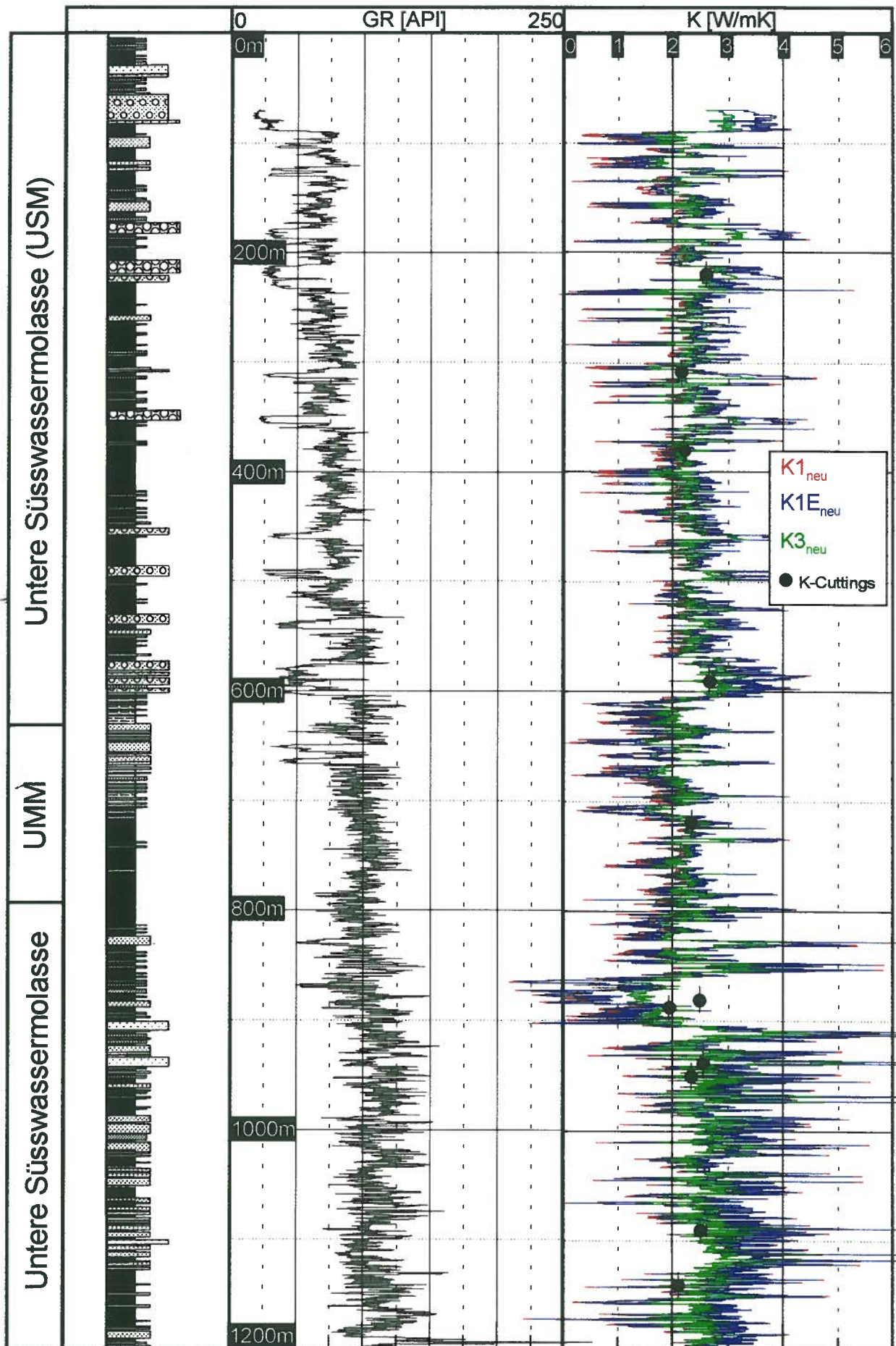


Fig. 11a: Sammelprofil Weggis 0 - 1200 m (1:5000) mit berechneten ($K1_{neu}$, $K1E_{neu}$, $K3_{neu}$) und an Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Matrix-Werte, siehe Text).

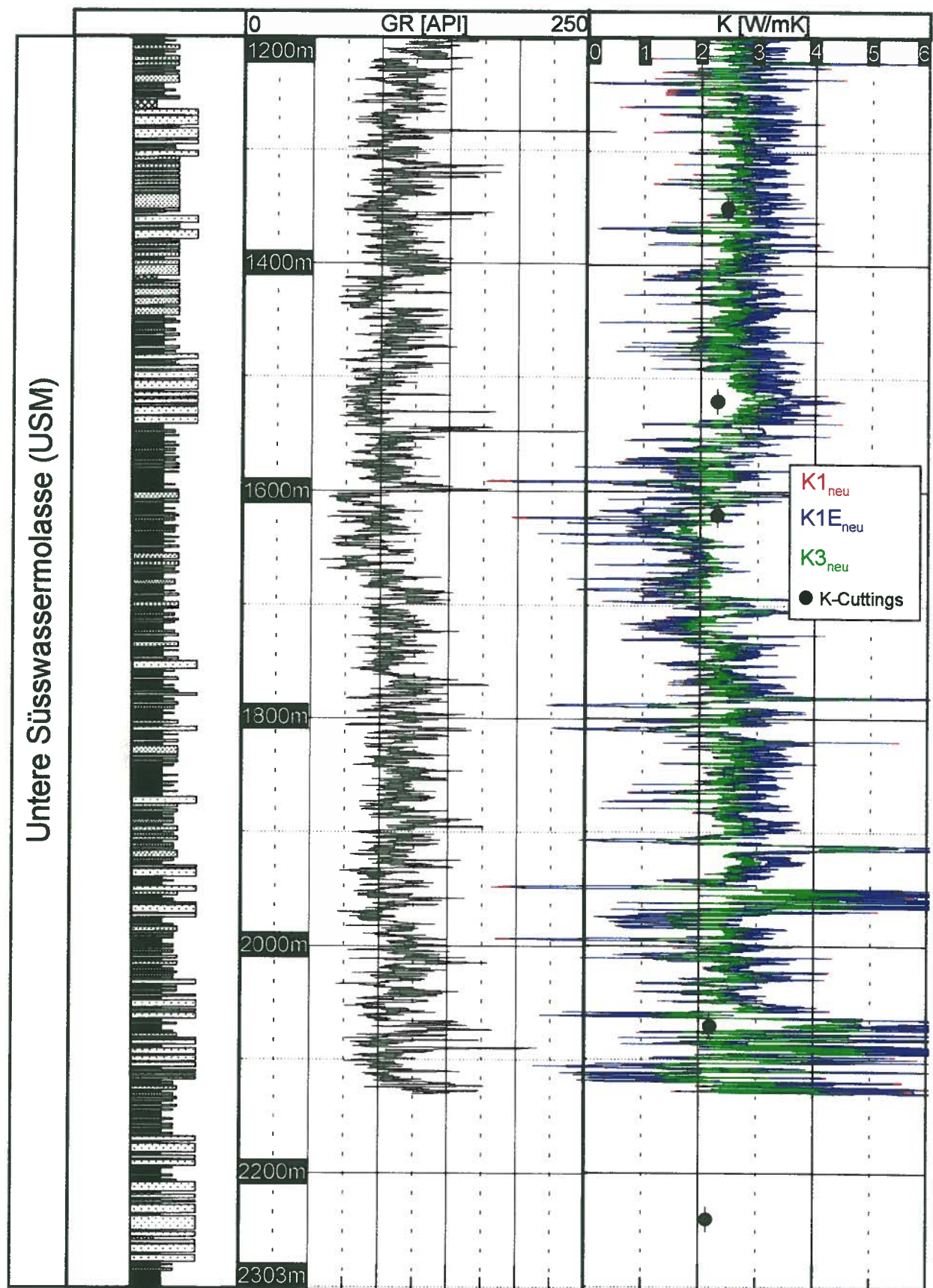


Fig. 11b: Sammelprofil Weggis 1200 - 2303 m (1:5000) mit berechneten ($K1_{neu}$, $K1E_{neu}$, $K3_{neu}$) und an Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Matrix-Werte, siehe Text).

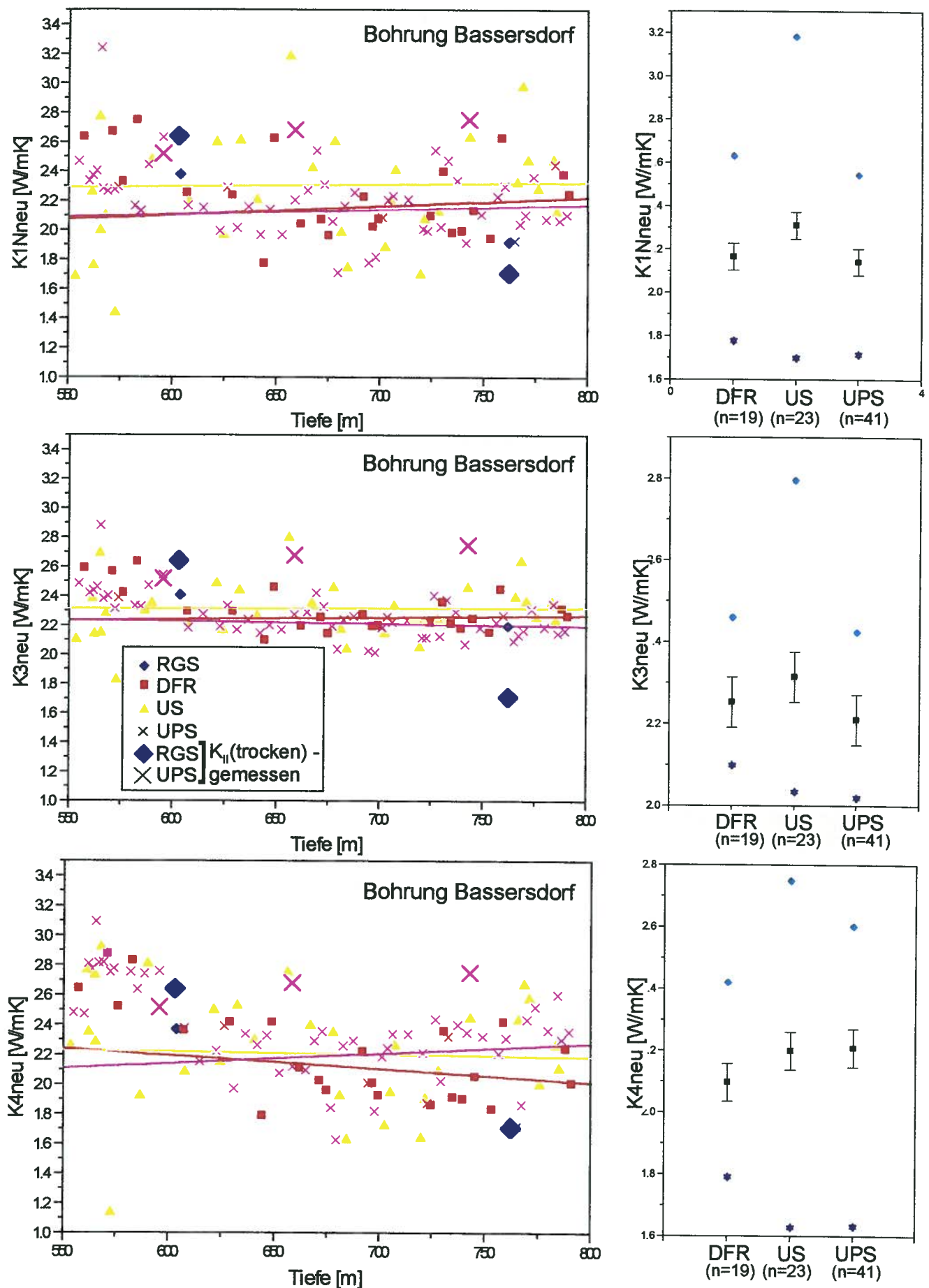


Fig. 12: Korrelation der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Architektur-Elementen (Bassersdorf). Die Korrelationsgeraden und Box charts wurden nur mit Daten aus Tiefen grösser als 600 m berechnet (Box charts: Farbige Symbole = Minimal- und Maximalwert, schwarze Quadrate = Mittelwert, Linie = 1 σ -Abweichung)

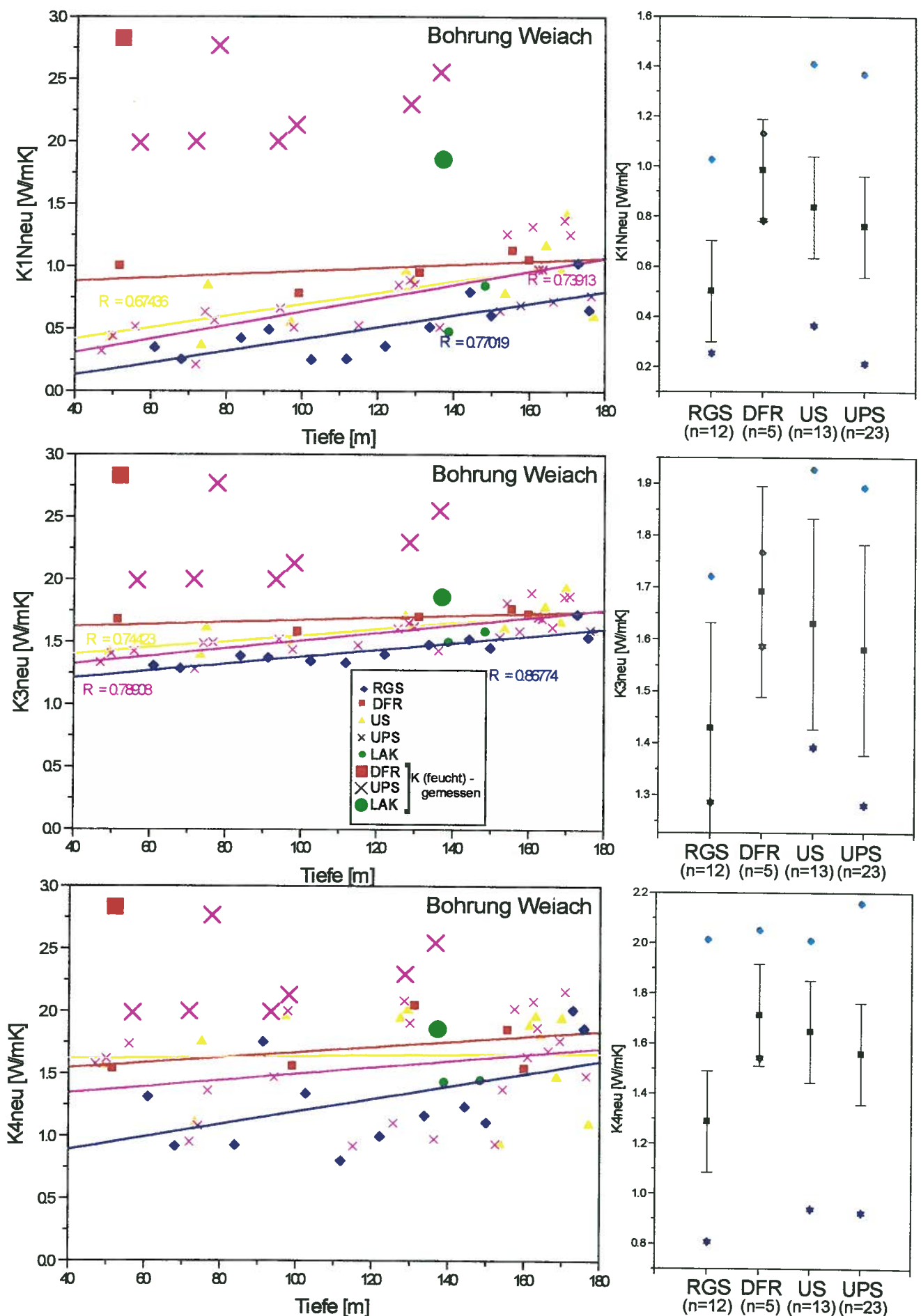


Fig. 13: Korrelation der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Architektur-Elementen (Weiach). Eingezeichnet sind auch die an den *feuchten* Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Box charts: Farbige Symbole = Minimal- und Maximalwert, schwarze Quadrate = Mittelwert, Linie = 1- σ Abweichung).

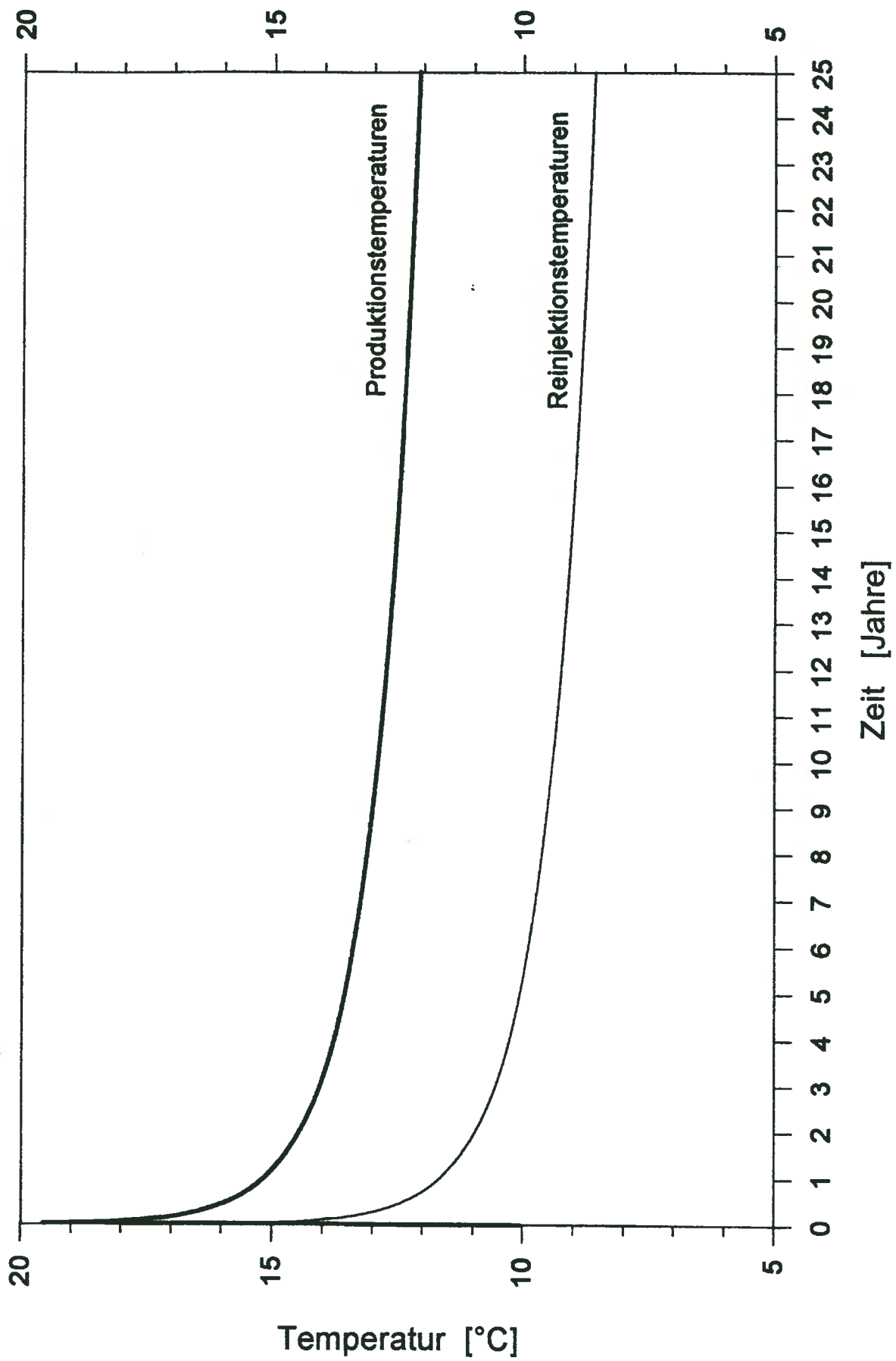


Fig 14: Langzeitabkühlungskurven der Produktions- und Injektionstemperaturen der modellierten Erdwärmesonden, gültig für sämtliche berechneten Varianten.

14'382 / 54'385



Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Programm
Geothermie



Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens (Pilotstudie - Wärmeleitfähigkeit)

Wärmeleitfähigkeit: Labormessungen, geophysikalische Log-Berechnungen, sedimentäre Architekturen und Einfluss auf Wärmeentzugsrechnungen

ausgearbeitet durch Forschungs-
gemeinschaft:

Dr. E. Greber, Dr. W. Leu (Koord.)
Geoform AG
Anton Graffstr. 6, 8401 Winterthur

Prof. Dr. L. Rybach, B. Bucher
Institut für Geophysik
ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

Dr. R.J. Hopkirk, Dr. W.J. Eugster
Polydynamics Engineering
(Männedorf)
Bahngasse 3, 8708 Männedorf

Dr. B. Keller
R. Mengis + H.G. Lorenz AG
Schlossstrasse 3, 6005 Luzern

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

August 1996

Schlussbericht

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Résumé	2
Summary	3
1. Einleitung	4
1.1 Ausgangslage.....	4
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Vorgehen.....	5
2. Datengrundlage und Dateneinsicht	7
2.1 Tiefenbrunnen: Obere Meeresmolasse (OMM)	7
2.2 Bassersdorf: Untere Süsswassermolasse (USM)	7
2.3 Weiach: Untere Süsswassermolasse (USM)	7
2.4 Weggis: Untere Süsswasser- und Meeresmolasse (USM / UMM)	7
3. Sedimentologie (B. Keller)	8
3.1 Methodik	8
3.2 Architektur-Elemente in den Bohrungen	8
3.2.1 <i>Untere Süsswassermolasse (USM)</i>	8
3.2.2 <i>Obere Meeresmolasse (OMM)</i>	10
4. Labormessungen (B. Bucher / L. Rybach)	11
4.1 Messmethodik	11
4.1.1 <i>Messgerät</i>	11
4.1.2 <i>Verfahren</i>	11
4.1.3 <i>Wärmeleitfähigkeits-Definitionen</i>	11
4.2 Resultate	12
4.2.1 <i>Messungen an den Bohrkernen von Bassersdorf und Tiefenbrunnen</i>	12
4.2.2 <i>Messungen an den Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis</i>	12
4.2.3 <i>Vergleich der Messwerte Bohrkern-Cuttings</i>	14
5. Log-Berechnungen und Kalibration mit Messwerten (E. Greber / W. Leu)	16
5.1 Methodik	16
5.1.1 <i>Empirische Berechnungsgrundlagen</i>	16
5.1.2 <i>Berechnung der Porosität</i>	17
5.2 Kalibration mit Laborwerten	18
5.2.1 <i>Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen</i>	19
5.2.2 <i>Bohrung Weiach</i>	19
5.2.3 <i>Bohrung Weggis</i>	19
5.2.4 <i>Kalibration der Berechnungsformeln (Logs)</i>	19
5.3 Resultate der Log-Berechnungen	20
5.3.1 <i>Bassersdorf (Fig. 8):</i>	20
5.3.2 <i>Tiefenbrunnen (Fig. 9):</i>	21
5.3.3 <i>Weiach (Fig. 10):</i>	21
5.3.4 <i>Weggis (Fig. 11a/b):</i>	22
6. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur (E. Greber / B. Keller / W. Leu)	23
6.1 Auswertungsmethode	23
6.2 Resultate	23
6.2.1 <i>Bohrung Bassersdorf (Fig. 12)</i>	23
6.2.2 <i>Bohrung Weiach (Fig. 13)</i>	24
6.2.3 <i>Folgerungen</i>	24

7. Modellrechnungen des Wärmeentzuges über eine Sonde mittlerer Tiefe (R.J. Hopkirk / W.J. Eugster)	25
7.1 Einleitung und Modellbeschreibung	25
7.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit	26
7.3 Einfluss der spezifischen Wärmekapazität	27
8. Schlussfolgerungen / Nutzen für die Praxis	28
9. Empfehlungen für das weitere Vorgehen	30
Literaturverzeichnis	31

Figurenverzeichnis

Fig. 1:	Geologische Übersichtskarte des Molassebeckens
Fig. 2:	Stratigraphisches Sammelprofil der Molasseeinheiten
Fig. 3:	Messapparatur
Fig. 4:	Vergleich der Labormesswerte Kerne (trocken) vs. Cuttings
Fig. 5:	Vergleich Labormesswerte Kerne (feucht) vs. Cuttings
Fig. 6:	Korrelation K_{II} -gemessen vs. $K_{1N}/K_{2N}/K_3$ (Bassersdorf-Tiefenbrunnen)
Fig. 7:	Korrelation K_{II} -gemessen vs. $K_{1N_{neu}}/K_{3_{neu}}/K_{4_{neu}}$ (Bassersdorf- Tiefenbrunnen)
Fig. 8:	Sammelprofil Bassersdorf (USM) 1:1000
Fig. 9:	Sammelprofil Tiefenbrunnen (OMM) 1: 2000
Fig. 10:	Sammelprofil Weiach (USM) 1:1000
Fig. 11a/b:	Sammelprofil Weggis (USM/UMM) 1: 5000
Fig. 12:	Korrelation der berechneten Werte (K-log) mit den Architektur-Elementen (Bassersdorf)
Fig. 13:	Korrelation der berechneten Werte (K-log) mit den Architektur-Elementen (Weiach)
Fig. 14:	Langzeitabkühlungskurven der Produktions- und Injektionstemperaturen der modellierten Erdwärmesonden

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse (USM)
Tab. 2:	Architektur-Elemente der Oberen Meeresmolasse (OMM)
Tab. 3:	Messergebnisse Bohrkern Bassersdorf und Tiefenbrunnen
Tab. 4:	Messergebnisse der Cuttings-Proben Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis
Tab. 5:	Mittlere Wärmeleitfähigkeit der Proben Tiefenbrunnen
Tab. 6:	Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierenden Wärmeleitfähigkeiten im 2-Schichten-Modell
Tab. 7:	Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierender Wärmekapazität des Wirtgesteins

Beilagenverzeichnis

Beilage 1:	Kompilation der Wärmeleitfähigkeitsdaten Daten von Schweizer Molasse-Gesteinen.
Beilage 2:	Petrophysikalische und geothermische Daten von Proben der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis.

Zusammenfassung

Zielsetzung der Arbeit:

Für die Nutzung geothermischer Ressourcen mit tiefen Erdwärmensonden und saisonalen Speicheranlagen werden detaillierte Kenntnisse der geothermischen Eigenschaften des Untergrundes zunehmend notwendig. Ziele dieser Pilotstudie sind i) die Demonstration des Einflusses dieser Parameter bei Wärmeentzugsrechnungen, ii) eine Inventarisierung bereits vorhandener Wärmeleitfähigkeits-Daten der Schweizer Molasse (ergänzt mit neuen Labormessungen), iii) die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit geophysikalischen Logs sowie iv) die Untersuchung der Beziehung zwischen sedimentären Architektur-Elementen und der Wärmeleitfähigkeit.

Methodik:

Im Anschluss an eine Kompilation von sämtlichen verfügbaren Wärmeleitfähigkeits-Daten der Molasse-Gesteine (publiziert und unpubliziert) wurde an 8 Kernen der Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen sowie an 24 Cuttings-Proben der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis die Wärmeleitfähigkeit neu gemessen. In einem zweiten Schritt wurden mit diesem Datensatz verschiedene Berechnungsmethoden, welche auf Porositäten, Sonic-Geschwindigkeiten und Dichte-Werten aus geophysikalischen Bohr-Logs beruhen, geeicht. Die damit berechneten, durchgehenden Wärmeleitfähigkeits-Profile wurden anschliessend für eine Sensitivitätsanalyse einfacher Wärmeentzugsmodelle eingesetzt.

Hauptergebnisse:

- Für die Obere Meeresmolasse (OMM, Bohrung Tiefenbrunnen) und Untere Süsswassermolasse (USM, Bohrung Bassersdorf) wurden im Labor an nassen Bohrkernen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2.5 und 3.0 (trocken 1.7 bis 2.75 W/mK) gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit von entsprechenden nassen Cuttings weicht davon weniger als $\pm 10\%$ ab.
- Mit drei für den Raum Bassersdorf - Zürich geeichten Berechnungsmethoden (Funktion der Porosität, der Sonic-Geschwindigkeit und der Gesteinsdichte aus geophysikalischen Bohr-Logs) konnte für die OMM- und USM-Intervalle durchgehende Wärmeleitfähigkeitsprofile berechnet werden. Diese Profile zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Lithologie. Speziell in der OMM wird eine intervallweise (~ 50 m) Änderung der Wärmeleitfähigkeit von bis zu 1 W/mK beobachtet.
- In der distalen USM (ton-reicher, nördliche Position im Ablagerungsbereich) ist nur eine schwache Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur vorhanden, wogegen in den sandigeren Architektur-Elementen eine deutliche Unterscheidung möglich ist (Porositätswechsel).
- Die Modellierung einer fiktiven 750 m tiefen Erdwärmesonde zeigt, dass der mögliche Wärmeentzug bereits bei Variation der Wärmeleitfähigkeit von ± 0.5 W/mK um bis zu 20 % ab- oder zunehmen kann. Der Einfluss der Wärmekapazität ist viel geringer, gewinnt jedoch an Bedeutung bei der untiefen (0-100 m), saisonalen Wärmespeicherung oder untiefen Erdwärmesonde.

Anwendung in der Praxis:

Die kompilierten Wärmeleitfähigkeits-Daten können direkt bei der Planung geothermischer Anlagen in der Schweizer Molasse eingesetzt werden. Sind in der Nähe eines Projektes geophysikalische Bohrlogs vorhanden, können schnell und kostengünstig, durchgehende Wärmeleitfähigkeit-Profile berechnet werden. Damit werden bereits in der Planungsphase Berechnungen des potentiellen Wärmeentzugs präziser (=Kostenoptimierung).

Weiteres Vorgehen:

Die bereits vielversprechenden Resultate dieser Pilotstudie sollten mit zusätzlichen Labormessungen verbessert und ergänzt werden (z.B. Probleme in der Eichung mit Daten von trockenen/nassen Proben, Messung der Wärmekapazität). Mit den vorhandenen geophysikalischen Bohrlogs (ca. 35 Bohrungen) sollten anschliessend die Berechnungen im ganzen Schweizer Molassebecken flächendeckende durchgeführt werden. Zusätzlich drängt sich auch eine weitere Untersuchung des Einflusses von sedimentären Architektur-Elementen in anderen Ablagerungsbereichen (N-S oder E-W Trends) auf. Zudem sollte der Einfluss von detaillierteren Wärmeentzugsrechnungen (einschliesslich Wärmekapazität bei Wärmespeicherung) auf die Wirtschaftlichkeit an konkreten Projekten getestet werden.

Résumé

Buts du projet:

Avec l'exploitation croissante de l'énergie géothermique, soit par des sondes géothermiques ou par des systèmes de stockage saisonnier, la connaissance détaillée des propriétés géothermiques du sous-bassement devient un facteur crucial dans l'évaluation économique d'un projet géothermique. Les buts du projet sont les suivants: i) démonstration de l'influence des propriétés thermiques sur les calculs d'extraction de chaleur, ii) compilation des données sur la conductivité thermique du bassin molassique suisse (complété par de nouvelles mesures en laboratoire), iii) détermination de la conductivité thermique à l'aide des diagraphies, et iv) étude de la relation entre les éléments architecturaux sédimentaires et la conductivité thermique.

Méthodes:

Après avoir compilé toutes les données sur les valeurs sur la conductivité thermique des sédiments du bassin molassique suisse (publiées et non-publiées), des nouvelles valeurs ont été déterminées dans huit carottes provenant des forages de Bassersdorf et de Zurich-Tiefenbrunnen ainsi que dans 24 échantillons de cuttings des forages de Bassersdorf, Tiefenbrunnen et Weggis. Dans une deuxième phase, plusieurs méthodes d'estimation de la conductivité thermique basées sur les données des diagraphies (porosité, vitesse sonic et densité) ont été calibrées avec les valeurs mesurées. Ces techniques ont permis de calculer des profils de conductivité thermique utilisés par la suite pour des analyses de sensibilité des modèles simples d'extraction de chaleur.

Principaux résultats:

- La conductivité thermique déterminées en laboratoire sur les carottes saturées en eau provenant de la Molasse marine supérieure (OMM, forage Tiefenbrunnen) et de la Molasse d'eau douce inférieure (USM, forage Bassersdorf) se situe entre 2.5 et 3.0 W/mK (1.7-2.75 W/mK pour des carottes séchées). Les valeurs mesurées sur les cuttings correspondants se corrélaient bien ($\pm 10\%$) avec celles des carottes saturées.
- Des profils de conductivité thermique établis dans les intervalles de l'OMM et USM de la région de Zurich-Bassersdorf montrent une forte influence de la lithologie. Une variation importante de la conductivité thermique, atteignant 1 W/mK a été observée d'un intervalle (~ 50 -200 m) lithologique à l'autre, particulièrement dans l'OMM.
- Dans les parties distales de l'USM (lithofaciès argileux, partie septentrionale) la conductivité thermique dépend peu de l'architecture sédimentaire. Malgré tout, une variation systématique associée à des changements de porosité est observée dans les faciès gréseux.
- La modélisation théorique d'une sonde géothermique d'une longueur de 750 m montre que le potentiel de chaleur extractible peut varier de $\pm 20\%$ avec un changement de conductivité thermique de ± 0.5 W/mK. L'influence de la capacité calorifique est moins importante pour une sonde géothermique profonde que pour un système de stockage saisonnier ou une sonde géothermique peu profonde (< 100 m).

Application pratique:

La compilation des données sur la conductivité thermique peut être utilisée directement pour des projets géothermiques dans le bassin molassique suisse. Des profils de conductivité thermique peuvent être calculés rapidement et avec un budget modeste, dans la mesure où des diagraphies dans des forages proches sont disponibles. Cette approche permet de mieux limiter les incertitudes quant à l'estimation de la chaleur extractible dans la phase de planification (optimisation des frais).

Recommandations:

Les résultats prometteurs de cette étude pilote devraient être optimisés par des mesures complémentaires en laboratoire (p. ex. problèmes avec la calibration des données des échantillons saturés/séchés, mesure de la capacité calorifique). Dans le bassin molassique suisse les diagraphies de 35 forages existent. Elles pourront être utilisées pour calculer la conductivité thermique sur une plus grande surface („cartographie"). Avec ces résultats, une étude approfondie de l'influence de l'architecture sédimentaire dans d'autres environnements de dépôt (tendances N-S et E-W) pourrait être entreprise. L'influence de calculs détaillés d'extraction de chaleur devrait être testée dans des projets concrets.

Summary

Project aims

Detailed knowledge of the geothermal properties of the underground becomes more and more important with increasing exploitation of geothermal resources by deep vertical tube heat exchangers or by seasonal storage installations. Main aims of this pilot study are: i) the demonstration of the influence of these parameters on heat extraction calculations, ii) a compilation of already existing thermal conductivity data of the Swiss Molasse (supplemented with new lab measurements), iii) the calculation of the thermal conductivity with geophysical logs, and iv) the study of the relationships between sedimentary architecture and the thermal conductivity.

Methods:

After compiling all available thermal conductivity data of the Molasse sediments (published and unpublished), further measurements on 8 cores from wells at Bassersdorf and Zurich-Tiefenbrunnen as well as on 24 cuttings samples from the wells at Bassersdorf, Tiefenbrunnen and Weggis were carried out. In a second step, several techniques to estimate thermal conductivity from well logs (porosities, sonic velocities and densities) were calibrated with this data set. The thermal conductivity profiles calculated with these methods were used for a sensitivity analysis of simple heat extraction models.

Main results:

- Laboratory measurements on wet cores from the Upper Marine Molasse (OMM, well Tiefenbrunnen) and from the Lower Freshwater Molasse (USM, well Bassersdorf) yield thermal conductivities between 2.5 and 3.0 W/mK (1.7-2.75 W/mK on dry cores). The thermal conductivities of the corresponding wet cuttings are within a range of $\pm 10\%$ of the wet core values.
- Top to bottom conductivity profiles calculated for the OMM and USM intervals of the area Zurich - Bassersdorf show a clear dependence on lithology. Especially in the OMM changes of the thermal conductivity up to 1 W/mK are observed from one interval to another (~ 50 - 200 m thick).
- In distal parts of the USM (clay rich lithofacies, external depositional environment) the thermal conductivity is generally only slightly dependent on the sedimentary architecture. However, in sandy facies obvious distinctions are possible, related to porosity changes.
- The modelling of a theoretical 750 m long vertical tube heat exchanger shows that the potential quantity of extractable heat increases or decreases by up to 20 % by varying the thermal conductivity with ± 0.5 W/mK. The influence of the heat capacity is less important. However, this parameter is getting more important if shallow (0-100 m) seasonal heat storage or shallow heat exchangers are considered.

Practical applications:

The compiled thermal conductivity data can directly be used in the planning of geothermal installations in the Swiss Molasse. If geophysical logs are available from nearby wells, fast and low-budget top to bottom conductivity profiles can be calculated. This provides better constrained assumptions for estimations of extractable heat already in the planning phase (optimisation of the costs).

Recommendations:

The promising results of this pilot study should be optimised with additional laboratory measurements (e.g. calibration problems with data from wet/dry samples, heat capacity measurements). With the available geophysical logs of some 35 wells, heat conductivity calculations should be carried out for the whole Swiss Molasse Basin. With these results a further study of the influence of sedimentary architecture in other depositional environments (N-S and E-W trends) could be analysed. In addition, the influence of detailed heat extraction calculations on actual projects should be tested.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das vorgelegte Projekt nutzt die interdisziplinären Synergien der Fachbereiche Geologie, Geophysik und mathematische Modellierung für eine verbesserte Erfassung der geothermischen Eigenschaften im Schweizer Mittelland (Schwergewicht Molasse).

Das schweizerische Molasse Becken umfasst etwa 30% der Fläche der Schweiz (Fig. 1) und beherbergt die am dichtesten besiedelten Zonen. Die zunehmende Nutzung geothermischer Ressourcen verlangt nach immer detaillierten Kenntnissen der geothermischen Eigenschaften des Untergrundes.

Insbesondere bei der Planung und der Dimensionierung von geothermischen Speicheranlagen, Sondenfeldern und tiefen Erdwärmesonden sind die Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten der durchteuften Gesteinsschichten die entscheidenden Grössen (SCHÄRLI 1989, HOPKIRK et al. 1994, GEOFORM 1994a). Für die heute oft eingesetzte Simulation des thermischen Verhaltens des Untergrundes solcher Anlagen müssen mangels geeigneter Datengrundlagen stark vereinfachende Annahmen dieser Parameter gemacht werden (BURKART et al. 1989, EUGSTER et al. 1992, SANNER 1992, SEIFERT et al. 1992, STADLER et al. 1995b).

Der heutige Wissensstand über die geothermischen Eigenschaften der verschiedenen Gesteinstypen des Schweizer Mittellandes stützt sich weitgehend auf eine Ansammlung punktueller Daten unterschiedlichster Projekte (BODMER & RYBACH 1984). Da die geothermischen Eigenschaften eine Funktion von Gesteinszusammensetzung, Gesteinstextur, Porosität, Porenfluidtyp und Temperatur sind, können solche Richtwerte oft nur bedingt auf andere Gebiete und Tiefenbereiche übertragen werden. Um den Variationen betreffend Lithologie, Sedimentfazies und Kompaktion gerecht zu werden, wären oft für grössere Projekte lokalspezifische Neumessungen (Labor) notwendig, worauf jedoch in der Regel aus Kostengründen verzichtet wird. Mit Labormessungen geeichte Methoden, die eine kostengünstige Berechnung der geothermischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) aufgrund der Sedimentarchitektur und der geophysikalischen Messungen erlauben, fehlen weitgehend.

Dieser limitierte Kenntnisstand führt dazu, dass quantifizierende Modelle für geplante geothermische Anlagen mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Mit zunehmender Grösse der geothermischen Anlage nimmt jedoch die Relevanz dieser Eigenschaften zu.

Die Integration von verschiedenen neuen Forschungsentwicklungen der letzten Jahre würde es heute erlauben, diese Basis für die Schweiz zu schaffen. Dazu zu zählen ist insbesondere die Bestimmung der sedimentären Architektur mit Bohrlogs (KELLER 1992, AMMAN et al. 1993, BLASER et al. 1994), die direkte Berechnung der geothermischen Eigenschaften aufgrund von geophysikalischen Bohrlochmessungen sowie der Seismik (BLACKWELL & STEELE 1989, HOUBOLT & WELLS 1980) oder die Messung der Wärmeleitfähigkeit an Cuttings-Proben im Labor bei fehlendem Kernmaterial (HOPKIRK et al. 1994, SASS et al. 1971).

Am 26. September 1995 wurde die vorliegende Pilotstudie (Auswertungen und Labormessungen an den Bohrungen Tiefenbrunnen und Bassersdorf) vom BEW bewilligt, mit einer Projektdauer vom 15. Oktober 1995 bis 15. Juli 1996.

1.2 Zielsetzung

Die Ziele dieses Projektes sind:

- Inventarisierung bestehender Wärmeleitfähigkeits-Daten von Gesteinen aus dem Schweizer Molassebecken für eine direkte Nutzung bei der Planung und Konzipierung von geothermischen Anlagen.
- Messungen der Wärmeleitfähigkeiten an Kernen sowie Cuttings und Vergleich der Messungen.
- Berechnungen der Wärmeleitfähigkeiten mit Hilfe von geophysikalischen Logs sowie Kalibration der dabei verwendeten Methoden.
- Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeleitfähigkeits-Werte der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis.
- Analyse der Korrelation zwischen den Wärmeleitfähigkeiten und den sedimentologischen Architektur-Elementen.
- Abschätzung des Einflusses der in einer Bohrung vorhandenen Wärmeleitfähigkeiten auf den geothermischen Wärmeentzug (Sensitivitätsanalyse mit Modellierungen).

1.3 Vorgehen

In Anbetracht des beschränkten finanziellen Rahmens dieses Projektes wurde das Schwergewicht der Arbeiten auf eine Kalibration und Verbesserung der anzuwendenden Methoden gesetzt. Damit soll die Basis geschaffen werden, diese kostengünstigen Hilfsmittel in Zukunft flächendeckend im Schweizer Mittelland einsetzen zu können. Das Projekt wurde wie folgt gegliedert:

a) Inventarisierung bestehender Daten

Basierend auf der von Prof. Dr. L. Rybach, Dr. F. Medici und Dr. U. Schärli erstellten „Petrophysikalischen Datenbank von Gesteinen aus der Schweiz und den angrenzenden Gebieten“, kurz „PETRODAT“ (Rybach et al. 1995), sowie aufgrund publizierter Literatur wurden die Wärmeleitfähigkeits-Daten der schweizerischen Molassegesteine in einer Tabelle zusammengestellt (siehe Beilage 1: Tabelle und Karte).

b) Dateneinsichtsgesuche

Für die Verwendung der geophysikalischen Bohrlogs von Tiefenbrunnen und Bassersdorf sowie die Beprobung der Untersuchungsintervalle wurden bei den Dateneigentümern (Stadt und Kanton Zürich, respektive Nagra) Gesuche gestellt.

c) Probenahme

Bei den Bohrungen Bassersdorf (USM) und Tiefenbrunnen (OMM) wurden Kernproben, bei der Bohrung Weggis (USM und UMM) Cuttings-Proben aus Intervallen mit charakteristischen Architektur-Elementen entnommen.

d) Labormessungen

An 5 Kernproben der Bohrung Bassersdorf und an 3 Kernproben der Bohrung Tiefenbrunnen wurden die Wärmeleitfähigkeiten der trockenen und der feuchten Probe parallel zur Bohrachse im Labor gemessen ($K_{||}$ -trocken respektive $K_{||}$ -feucht). Bei den Kernproben der Bohrung Tiefenbrunnen wurde zusätzlich auch die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Bohrachse gemessen ($K_{\perp}$ -trocken und $K_{\perp}$ -feucht). Nachdem die Messungen an den Kernen abgeschlossen waren, wurden sie zu Cuttings zerkleinert. Anschliessend wurde die Wärmeleitfähigkeit des Cutting/Wasser-Gemisches gemessen und daraus die Matrix-Wärmeleitfähigkeit berechnet. Analoge Messungen an Cuttings wurden an 16 Proben der Bohrung Weggis durchgeführt.

e) Wärmeleitfähigkeits-Berechnung mit geophysikalischen Logs

Mit Hilfe der geophysikalischen Logs der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen, Weiach und Weggis wurde die Wärmeleitfähigkeit mit verschiedenen Methoden als Funktion von Gesteinsdichte, -porosität und -schallgeschwindigkeit berechnet und mit den Messwerten verglichen. Anschliessend wurden die Berechnungs-Algorithmen mit den Labormessungen kalibriert und für typische Molassegesteine geeicht.

f) Geothermische Charakterisierung der Architektur-Elemente

Mit Hilfe dieser geeichten Berechnungsmethoden wurden anschliessend für verschiedene Architektur-Elemente die Wärmeleitfähigkeiten als Funktion der Tiefe bestimmt.

g) Modellrechnungen

Durch eine Modellrechnung mit Sensitivitätsanalyse wurde anschliessend der Einfluss der Wärmeleitfähigkeits-Verteilung im Untergrund auf die zu entnehmende Menge an geothermischer Energie analysiert.

2. Datengrundlage und Dateneinsicht

Für die Verwendung der geophysikalischen Bohrlogs von Tiefenbrunnen und Bassersdorf sowie die Beprobung der Untersuchungsintervalle wurde bei den Dateneigentümern (Stadt und Kanton Zürich, respektive Nagra) ein Gesuch gestellt.

2.1 Tiefenbrunnen: Obere Meeresmolasse (OMM)

Herr B.-F. Iseli (Effretikon, Verwalter der Daten von Tiefenbrunnen), im Auftrag der Wasserversorgung Zürich, und Herr K. Fehr (AGW Zürich) haben uns freundlicherweise bei der Datenbeschaffung geholfen. Die geologischen und petrophysikalischen Daten der Bohrung sind in den Gutachten von Dr. U.P. Büchi Nr. 1094, 1282 und 1441 zusammengefasst.

Es wurden 3 Kernproben für neue Labormessungen entnommen. Die geophysikalischen Bohr-Logs wurden für die Bearbeitung im Intervall 340 bis 736 m (Endtiefe) digitalisiert. Davon wurde speziell der OMM-Bereich von 340 bis 716 m untersucht.

2.2 Bassersdorf: Untere Süsswassermolasse (USM)

Die Daten der Bohrung Bassersdorf (Geologie, Petrophysik, Roh-Logs) sind in einem technischen Bericht der Nagra (BLASER et al. 1994) publiziert. Um die Vorbereitungsarbeiten zeitlich zu reduzieren, wurden mit einem Gesuch bei der Nagra die digitalen Daten der geophysikalischen Bohrlogs und das Beprobungsrecht am Kernmaterial angefragt.

Es wurden 5 Kernproben für neue Labormessungen entnommen. Die geophysikalischen Bohr-Logs wurden im USM-Intervall 552 bis ca. 790 m bearbeitet.

2.3 Weiach: Untere Süsswassermolasse (USM)

Sämtliche für das Projekt notwendigen Daten der Bohrung Weiach sind publiziert (MATTER et al. 1988a). Eine Neubeprobung wurde nicht vorgenommen, da bereits 9 Wärmeleitfähigkeits-Messungen an an USM-Kernen (51.93 - 137.06 m) vorhanden waren. Die Logs des USM-Abschnittes wurden neu digitalisiert.

2.4 Weggis: Untere Süsswasser- und Meeresmolasse (USM / UMM)

Sämtliche für das Projekt notwendigen Daten der Bohrung Weggis sind publiziert (GREBER et al. 1994). Für die vorliegende Studie wurden 16 Cutting-Proben entnommen. Die Bohr-Logs waren im Intervall zwischen 70 und ca. 2130 m bereits in digitaler Form vorhanden.

3. Sedimentologie

(B. Keller)

3.1 Methodik

Für die Charakterisierung der geothermischen Eigenschaften eines Gesteinsstapels ist eine Gliederung in seine hauptsächlichen Lithologien sinnvoll. Traditionell wird diese nach den verschiedenen Gesteinstypen oder Fazies (siltiger Feinsandstein, roter Schlammstein etc.) vorgenommen. Dabei resultieren oftmals Schwierigkeiten bezüglich einer einheitlichen Abgrenzung und Unterteilung (z.B. Fining- oder Coarsening-upward Sequenzen), und es besteht die Gefahr, dass die Anzahl Gesteinstypen zu gross und unübersichtlich (splitting) oder aber zu gering und wenig aussagekräftig gerät.

Neue Arbeiten aus dem Molasse-Becken haben überdies gezeigt, dass sehr ähnliche Lithologien je nach Ablagerungstyp (z.B. dünne Überschwemmungssandsteine, mächtige Sandsteine von Rinnengürteln) nicht nur verschiedene Petrographien, sondern ebenso sehr unterschiedliche petrophysikalische Eigenschaften (Porosität, Permeabilität etc.) aufweisen (z.B. KELLER et al. 1990).

Um diese Unzulänglichkeiten zu eliminieren, wurde von KELLER et al. (1990) für die hydrogeologische Charakterisierung der distalen Unteren Süsswassermolasse das Konzept der Architektur-Elemente angewendet. Dieses Konzept ist in KELLER (1992) eingehend beschrieben und basiert auf folgenden Grundlagen:

- Architektur-Elemente sind die prinzipiellen sedimentären Bausteine eines Lithosoms.
- Architektur-Elemente sind Gesteinskörper mit
 - bezeichnender 3-D Geometrie,
 - charakteristischem fazielltem Aufbau,
 - spezifischer Grössenordnung und
 - typischer Genese.

Einzelne Architektur-Elemente zeichnen sich jeweils durch recht homogene Petrographien, Diagenesen (Zementation) und petrophysikalische Eigenschaften wie Porosität und Permeabilität aus, wie KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) nachgewiesen haben. Die Publikation von BLASER et al. (1994) sowie interne Weiterbearbeitungen der NAGRA belegten überdies charakteristische geophysikalische Log-Fazies einzelner Architektur-Elemente.

Wegen der verschiedenen beschriebenen Vorteile wurde auch in der vorliegenden Arbeit das Konzept der Architektur-Elemente angewendet. Darüber hinaus soll geprüft werden, ob, aus den sehr ähnlichen, bis anhin untersuchten petrophysikalischen Eigenschaften einzelner Architektur-Elemente auch gut unterscheidbare, *charakteristische geothermische Eigenschaften* resultieren. Als vorteilhaft erwies sich auch der Umstand, dass von den im vorliegenden Bericht abgehandelten vier Bohrungen bereits zwei (Weiach [KELLER et al. 1990] und Bassersdorf [BLASER et al. 1994]) unter dem Gesichtspunkt der Architektur-Elemente bearbeitet wurden.

3.2 Architektur-Elemente in den Bohrungen

3.2.1 Untere Süsswassermolasse (USM)

Die Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse sind in den Arbeiten von KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) ausführlich beschrieben, weshalb wir uns hier mit einer

zusammenfassenden Darstellung begnügen (Tab. 1). Während in der distalen Unteren Süsswassermolasse der Bohrungen Weiach und Bassersdorf die Architektur-Elemente sandige Rinnengürtel (RGs), Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR), distale Überschwemmungssandsteine (US), Uferwälle (UW), Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) und lakustrische Ablagerungen (LAK) vorkommen, gesellen sich im proximalen Ablagerungsraum bei Weggis auch konglomeratistische Rinnengürtel (RGk) dazu. Die bis anhin untersuchten petrophysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Architektur-Elemente sind ebenfalls in KELLER et al. (1990) und KELLER (1992) sowie in BLASER et al. (1994) eingehend charakterisiert.

Tab. 1: Architektur-Elemente der Unteren Süsswassermolasse.

RGk	Konglomeratistische Rinnengürtel Bunte Konglomerate (meist Mittel- bis Grobkonglomerate) mit gut gerundeten Komponenten, mit Mittel- bis Grobsandsteinbänken wie RGs sowie trogförmigen und flachwinkligen Schrägschichtungen, viele Erosionsdiskordanzen, generell mehr als 10% Konglomerate, Mächtigkeiten > 2 m, häufig amalgamierte Abfolgen.
RGs	Sandige Rinnengürtel Mittelsandsteine mit unterschiedlichen Fein- und bis Grobsandstein-Anteilen, über scharfen Erosionsdiskordanzen gelegentlich Sohlenpflaster aus gerundeten extraformationellen Geröllen oder aus Schlammstein-Intraklasten, häufig trogförmige, flachwinklige und tabulare Schrägschichtung, Mächtigkeiten generell > 2 m, häufig amalgamierte Abfolgen.
DFR	Durchbruchsfächer und -rinnen Fein- bis Grobsandsteine, gelegentlich geröllführend oder mit Schlammstein-Intraklasten, mit scharfen Erosionsdiskordanzen wie RGs, häufig trogförmige und planare Schrägschichtungen, tw. Fining-upwards Sequenzen, Mächtigkeiten generell < 2 m.
US / UW	Distale Überschwemmungssandsteine (US) und Uferwälle (UW) Fein- bis Mittelsandsteine, häufig siltig, tw. rötlich pedogenisiert oder mit Rhizolithen (Wurzelspuren), tw. erosive Basis oder mit flachwinkliger Schrägschichtung, tw. Fining-upwards Sequenzen, geringe Mächtigkeiten von generell <1 m. Gelegentlich kommen über Rinnengürteln auch heterolithische Wechsellagerungen dünnbankiger Sandsteine vom Typ US mit Zwischenschichten aus Peliten vom Typ UPS vor, die als Uferwälle (UW) interpretierbar sind. Charakteristisch sind in diesem Element Kletterrippeln und Wulstschichtungen.
UPS	Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen Diese Gruppe pelitischer Gesteine umfasst Silt- und Schlammsteine unterschiedlicher Zusammensetzung sowie gelegentlich eigentliche Mergel sowie siltige Feinst- und Feinsandsteine und bildet häufig heterolithische Abfolgen. Häufig sind Pedoturbation und Rhizolithe (Wurzelspuren), gelegentlich kommen auch Caliche (Kalk-Knöllchen) vor.
LAK	Lakustrische Ablagerungen Graue und olivbraune Schlamm- und Siltsteine sowie Mergel, gelegentlich mit dünnen Feinsandstein-Bänken.

Die aufgrund von in 2m-Abstand gewonnenen Cuttings sowie von geophysikalischen Logs bearbeitete Bohrung Weggis erlaubt nicht eine derart detaillierte Aufgliederung in einzelne

Architektur-Elemente wie die gekernten Bohrungen Weiach und Bassersdorf. Gut unterscheiden liessen sich in Weggis lediglich mächtigere arenitische und psephitische Abfolgen der sandigen (RGs) und konglomeratischen Rinnengürtel (RGk) einerseits sowie pelitische Abfolgen der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) mit dünneren Sandsteinen der Architektur-Elemente Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) sowie distale Überschwemmungssandsteine (US) als Mischgruppe andererseits.

3.2.2 Obere Meeresmolasse (OMM)

Anders als für die Untere Süsswassermolasse existiert für die Obere Meeresmolasse kein publiziertes Architektur-Element Konzept in vergleichbarer Grössenordnung. Basierend auf der Arbeit von KELLER (1989) liegt jedoch eine unpublizierte Gliederung in Architektur-Elemente vor, die für die Bohrung Tiefenbrunnen auszugsweise verwendet wurde (Tab. 2). Nebst diesen kommen in regressiven Intervallen auch Architektur-Elemente der Süsswassermolasse (Strand-, resp. Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen UPS sowie konglomeratische Rinnengürtel RGk der Deltas) vor.

In der Unteren Meeresmolasse (UMM) der Bohrung Weggis finden sich davon die Architektur-Elemente Strandebene (STE) und Beckenablagerungen (BE).

Tab. 2: Architektur-Elemente der Oberen Meeresmolasse.

STE	Strandebene Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Feinst- oder Grobsandsteine, gut bis sehr gut sortiert, mit Parallellamination, Strömungs- und Wellenrippeln sowie gelegentlicher Schräg- oder Flaserschichtung.
GD	Rinnen von Gezeitendeltas Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Grobsandsteine, mässig- bis gut sortiert, häufig Schlammstein-Intraklasten (Schlickgerölle), häufige Schrägschichtung, gelegentlich Muschelschille.
SW	Schlickwatten Schlamm- und Siltsteine, häufig laminiert, tw. heterolithisch, tw. massiv bioturbirt.
MW	Mischwatten Silt- und Sandsteine (Feinst- bis Mittelsandstein), häufig als bankige bis laminierte heterolithische Abfolgen mit Rippeln, Sandsteine mässig bis gut sortiert.
SWP	Sandwatt und Platen Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Feinst- oder Grobsandsteine, mässig bis gut sortiert, gelegentlich Siltstein-Laminae, Schrägschichtungen und Rippeln, untergeordnet heterolithische Wechschichtungen mit Schlammsteinen (wie MW).
GR	Grossrinnen Fein- bis Mittelsandsteine, gelegentlich Grobsandsteine, mässig- bis gut sortiert, tw. mit Geröllen und Schlammstein-Intraklasten (Schlickgerölle), häufige Schrägschichtung, untergeordnet heterolithische Wechschichtungen mit Schlammsteinen (wie MW).
BE	Beckenablagerungen Silt- und Schlammsteine, bioturbirt massiv oder laminiert, tw. heterolithische Wechschichtung mit Feinsandsteinen, gelegentlich Rippeln.

4. Labormessungen

(B. Bucher / L. Rybach)

4.1 Messmethodik

4.1.1 Messgerät

Für die Labormessungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten wurde das Messgerät TK04 der Firma TeKa GmbH aus Berlin verwendet (Fig. 3). Diese Messanlage wendet die Methode des instationären Wärmestroms an. Dabei wird eine Linienquelle konstant beheizt und gleichzeitig die Änderung der Quellentemperatur registriert. Aus dieser Heizkurve wird die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnet. Die Daten der Halbraum-Linienquelle (HLQ) werden auf einem Rechner aufgezeichnet und ausgewertet.

Um einen guten Kontakt zwischen der Halbraum-Linienquelle (Messsonde) und der Probe zu erreichen, wird die Messsonde mit Hilfe einer Kurbel oder einer hydraulischen Presse an die Probe gedrückt (maximal 30 bar).

4.1.2 Verfahren

Nach der vollständigen Trocknung im Ofen wurden die Proben (Bohrkerne und Cuttings) wurden in trockenem und in wassergesättigtem Zustand („feucht“) gemessen (BODMER & RYBACH 1984). Bei der Messung der Bohrkerne wurde die Sonde auf die aufgeschnittene Fläche gepresst. Aufgrund der Dimension der Messsonde muss bei der Messung von Bohrkerne die Probe eine plan geschliffene Fläche von minimal ca. 5 cm x 10 cm aufweisen. Nach der Messung in trockenem Zustand wurden die Bohrkerne während 24 Stunden in Wasser eingelegt. Um ein Austrocknen der Bohrkerne zu verhindern, wurden die anschliessenden Messungen in einem Behälter unter Wasser durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit wurde je nach Grösse der vorhandenen, plan geschliffenen Fläche sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung gemessen.

In einem nächsten Schritt wurden die Bohrkerne mit Hilfe einer Hydraulikpresse zu künstlichen Cuttings verkleinert. Bei der Messung der Cuttings wurde eine abgewogene Menge der Proben in einen Druckbehälter gegeben und mit Wasser gesättigt. Dabei bleibt das Cutting-Material mit Wasser überdeckt und die Messsonde wird mit 30 bar auf das Gemisch aus Probenmaterial und Wasser gedrückt.

Bei jeder Messung wurde die Wärmeleitfähigkeit 7 mal bestimmt. Aus diesen sieben Werten wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

4.1.3 Wärmeleitfähigkeits-Definitionen

Bei den Kern-Messungen werden folgende Abkürzungen für die Wärmeleitfähigkeiten verwendet:

- $K_{||}$: Wärmeleitfähigkeit **parallel** zur Schichtung oder senkrecht zur Bohrachse (Sonde parallel zur Bohrachse).
- $K_{\perp}$: Wärmeleitfähigkeit **senkrecht** zur Schichtung oder parallel zur Bohrachse ($K_{\perp}$ ist nicht direkt messbar aber mit K_{gs} berechenbar, siehe 4.2.1).

- K_{gs} : **Mischwert** der Wärmeleitfähigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung (siehe 4.2.1, Sonde senkrecht zur Bohrachse).
- $\underline{K}$: **Mittlere** Wärmeleitfähigkeit (Berechnung mit $K_{||}$ und K_s , siehe 4.2.3), entspricht *nicht* K_{gs} .

4.2 Resultate

4.2.1 Messungen an den Bohrkernen von Bassersdorf und Tiefenbrunnen

An den Bohrkernen von Bassersdorf konnte nur eine Messung mit Sondenorientierung parallel zur Bohrachse vorgenommen werden, während die Bohrkern von Tiefenbrunnen Messungen sowohl parallel als auch senkrecht zur Bohrachse erlaubten. Bis auf eine Ausnahme (BA-595.21) konnten alle Bohrkern in trockenem und nassem Zustand gemessen werden (siehe Tab. 3). Der Bohrkern BA-595.21 zerfiel beim Einlegen in Wasser und liess sich deshalb nur in trockenem Zustand messen.

Je nach Orientierung der Messsonde auf der Probe sagt die gemessenen Wärmeleitfähigkeit etwas anderes aus. Liegt die Messsonde parallel zur Bohrachse, d.h. in unserem Fall senkrecht zur Schichtung, wird die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung gemessen ($K_{||}$ in Tab. 3). Liegt die Messsonde aber senkrecht zur Bohrachse (parallel zur Schichtung bei horizontaler Lagerung), wird ein Mischwert aus der Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung und aus der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung gemessen (K_{gs} in Tab. 3). Mit Hilfe der Beziehung $K_s = K_{gs}^2 / K_{||}$ und den gemessenen Werten lässt sich die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung berechnen (K_s in Tab. 3) (BODMER & RYBACH 1984). Die Anisotropie entspricht dem Verhältnis $K_{||} / K_s$. Sie ist bei den Proben der Bohrung Tiefenbrunnen als klein einzustufen.

4.2.2 Messungen an den Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis

Die Cuttings der Proben von Bassersdorf und Tiefenbrunnen wurden künstlich aus den entsprechenden Bohrkernen hergestellt. Die gemessene Wärmeleitfähigkeitswerte (K_G) wurden mit Hilfe weiterer Parameter zu einer Matrix-Wärmeleitfähigkeit (K_M , entspricht der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins ohne Wasser) umgerechnet (siehe Tab. 4 und PRIBNOW 1994):

$$K_M = K_G * (K_G / K_W)^{(mw*dc)/(mc*dw)}$$

wobei K_W : Wärmeleitfähigkeit des Wassers (0.62 W/mK)
mw: Masse Wasser im Gemisch
mc: Masse des trockenen Bohrkleins
dw: Dichte des Wassers
dc: Dichte des trockenen Bohrkleins

Eine theoretisch notwendige, zusätzliche Korrektur für den effektiven Porensättigungsgrad der Cutting wurde hier nicht vorgenommen. Auch der Tatsache, dass die künstliche Erzeugung von Cuttings aus Bohrkernen den Feinanteil erhöht (Diskussion siehe STADLER 1995), konnte in Anbetracht des beschränkten Aufwandes der Pilotstudie nicht Rechnung getragen werden.

Tab. 3: Messergebnisse der Bohrkerne von Bassersdorf und Tiefenbrunnen. Abkürzungen: K_{gs} = Mischwert aus der Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung und aus der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Mischung, K_{II} = Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung, K_s = Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung.

Bohrung	Probe	Proben- zustand	K_{gs} [W/mK]	K_{II} [W/mK]	K_s [W/mK]	Standard- abweichung	Anisotropie
Bassersdorf	BA-595.21	trocken		2.52		0.067	
	BA-602.75	trocken		2.64		0.020	
		feucht		3.0		0.148	
	BA-658.39	trocken		2.68		0.054	
		feucht		2.68		0.041	
	BA-742.55	trocken		2.75		0.076	
Tiefenbrunnen		feucht		2.67		0.094	
	BA-762.26	trocken		1.71		0.036	
		feucht		2.56		0.080	
	TI-519.00	trocken		1.78		0.025	0.896 (trocken)
		trocken	1.88			0.036	
		trocken			1.99		
		feucht		2.8		0.101	1.007 (feucht)
		feucht	2.79			0.094	
		feucht			2.8		
	TI-591.93	trocken		2.1		0.144	1.081 (trocken)
		trocken	2.02			0.048	
		trocken			1.99		
		feucht		2.9		0.107	1.154 (feucht)
		feucht	2.7			0.161	
		feucht			2.5		
	TI-657.91	trocken		1.98		0.027	0.980 (trocken)
		trocken	2.0			0.109	
		trocken			2.02		
		feucht		2.98		0.061	1.056 (feucht)
		feucht	2.90			0.067	
		feucht			2.82		

Bei der Wärmeleitfähigkeit von WG-310 aus der Bohrung Weggis handelt es sich um das Messresultat einer Mischung der Proben WG-310 und WG-320, da von der Probe WG-310 zu wenig Material vorhanden war. Anstelle der Proben WG-875 und WG-940, von denen kein Material vorhanden war, wurden die Proben WG-880, WG-888, WG-938 und WG-950 gemessen.

Die Wärmeleitfähigkeiten sind unter anderem auch abhängig von der Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit lässt sich durch die Beziehung $K(T) = 1.84 + 365.75 \cdot (K_{20} - 1.84) \cdot (1/(T + 273) - 1/1473)$ beschreiben, wobei T für die Temperatur T(z) in °C und K_{20} für die Wärmeleitfähigkeit bei Zimmertemperatur (20 °C) steht (SEKIGUCHI 1984). Die aus dieser Beziehung resultierenden Ergebnisse für die Proben von Weggis sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tab. 4: Wärmeleitfähigkeit der Cutting-Proben aus den Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis.

Bohrung	Probe	K gemessen [W/mK]	Standard- abweichung	K-Matrix [W/mK]	K-Matrix T-korrigiert [W/mK]	Temperatur [°C]
Bassersdorf	BA-595.21	1.87	0.030	2.20		
	BA-602.75	2.06	0.017	2.65		
	BA-658.39	1.91	0.058	2.34		
	BA-742.55	1.91	0.078	2.32		
	BA-762.26	1.93	0.068	2.58		
Tiefenbrunnen	TI-519.00	1.97	0.048	2.59		
	TI-591.93	2.10	0.073	2.66		
	TI-657.91	1.88	0.040	2.30		
Weggis	WG-220	1.71	0.013	2.57	2.60	16.5
	WG-310	1.73	0.066	2.15	2.16	19.1
	WG-380	1.70	0.111	2.20	2.20	21.2
	WG-590	1.87	0.027	2.67	2.66	27.4
	WG-720	1.86	0.020	2.36	2.34	31.2
	WG-880	1.93	0.052	2.52	2.49	36.0
	WG-888	1.61	0.057	1.94	1.93	36.2
	WG-938	1.79	0.036	2.59	2.55	37.7
	WG-950	1.91	0.071	2.36	2.33	38.0
	WG-1090	1.80	0.100	2.50	2.50	42.2
	WG-1140	1.70	0.102	2.10	2.10	43.6
	WG-1350	1.75	0.024	2.53	2.46	49.8
	WG-1520	1.72	0.027	2.36	2.29	54.8
	WG-1620	1.80	0.220	2.40	2.30	57.8
	WG-2070	1.75	0.048	2.25	2.18	71.1
	WG-2240	1.66	0.024	2.20	2.13	76.1

4.2.3 Vergleich der Messwerte Bohrkerne-Cuttings

Da für Wärmeleitfähigkeitsmessungen in der Praxis in vielen Fällen nur Cuttings zur Verfügung stehen, ist eine generelle Prüfung der Aussagekraft von Cuttings-Messungen von besonderem Interesse. Hier kann jedoch angesichts des beschränkten Probenmaterials nur ein erster, orientierender Vergleich angestellt werden.

Für die Weggis-Proben standen keine Kerne zur Verfügung und von Bassersdorf keine Angaben über die Anisotropie. Für die Tiefenbrunnen-Bohrkerne wurde als Vergleichswert eine mittlere Wärmeleitfähigkeit $\underline{K}$ wie folgt berechnet (Tab. 5):

$$\underline{K} = (K_{\parallel}^2 \cdot K_s)^{1/3}$$

Die Vergleichsresultate sind in den Figuren 4 und 5 gegeben. Bei Gleichheit der Bohrkern- und Cuttings-Werte sollten die Punkte nahe der 45 °-Geraden liegen. Die Resultate weisen Streuungen bis über ± 20 % auf. Die Streuung ist bei den trockenen Proben bedeutend grösser als bei den feuchten Proben. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass im ersten Fall der Kontakt Messsonde/Gestein schlechter ist.

Tab. 5: Mittlere Wärmeleitfähigkeiten $\underline{K}$ der Bohrung Tiefenbrunnen.

Probe	$K_{ }$ [W/mK]	K_s [W/mK]	$\underline{K}$ [W/mK]
TI-519.00 trocken	1.78	1.99	1.85
TI-519.00 feucht	2.80	2.80	2.80
TI-591.93 trocken	2.1	1.9	2.03
TI-591.93 feucht	2.9	2.5	2.76
TI-657.93 trocken	1.98	2.02	1.99
TI-657.93 feucht	2.98	2.82	2.93

Aufgrund der sehr beschränkten Datenbasis lässt sich nur aussagen, dass die Abweichungen zwischen Kern-Messungen (feucht) und Cuttings-Messungen (berechneter Matrixwert) im Mittel unter $\pm 10 - 15 \%$ bleiben. Dies ist ein ermutigendes Resultat und legt weitere, umfangreichere Vergleichsmessungen nahe (siehe auch STADLER 1995).

5. Log-Berechnungen und Kalibration mit Messwerten (E. Greber / W. Leu)

5.1 Methodik

Die Wärmeleitfähigkeit eines Gesteines ist von zahlreichen chemischen und (petro)physikalischen Parametern abhängig (siehe z.B. SCHÖN 1996).

Bei den *chemischen* Parametern sind die Mineralzusammensetzung und die Zusammensetzung des Porenfluids von besonderer Bedeutung. Jedes Mineral wird durch eine eigene Wärmeleitfähigkeits-Bandbreite charakterisiert, z.B. variiert die Wärmeleitfähigkeit von Calcit zwischen 3.30 und 3.9 W/mK, jene von Quarz zwischen 6.5 und 13.0 W/mK oder jene von Tonmineralien zwischen 1.7 und 5.2 W/mK (Ref. in SCHÖN 1996). Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Porenfluids, desto höher ist erwartungsgemäss auch die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtgesteins. Allgemein nimmt die Wärmeleitfähigkeit auch mit zunehmendem Wassergehalt zu (SCHÖN 1996). Die chemische Zusammensetzung und die Gesamtmineralisationen der Molasse-Formationswässer sind je nach Lokalität und Tiefenbereich sehr unterschiedlich.

Zu den wichtigsten *physikalischen* Parametern 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). Bei einem Gestein mit einer sedimentär, tektonisch oder metamorph bedingten schichtförmigen Anordnung der Minerale ist die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung/Schieferung meist besser als senkrecht dazu. Gesteine, welche von kristallinen Mineralien aufgebaut werden, zeigen mit zunehmender Temperatur meist abnehmende thermische Leitfähigkeiten.

5.1.1 Empirische Berechnungsgrundlagen

In der Literatur finden sich zahlreiche empirische Formeln, mit denen sich mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen („Logs“) Wärmeleitfähigkeiten berechnen lassen (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). Diese Vielzahl von Berechnungsgrundlagen beruht in erster Linie wohl 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. Dies ist gut nachvollziehbar, wenn man in Betracht zieht, wie z.B. gebirgsbildende Vorgänge die Gesteine eines regionalen Gebietes sekundär in ihren petrophysikalischen Eigenschaften (und damit in ihrer Wärmeleitfähigkeit) wesentlich verändern können. In der Regel müssen deshalb 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 mit einer Kalibrierung der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit im Labor gemessenen Werten durchgeführt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Labormessungen oft nicht unter in-situ Bedingungen (Temperatur, Porenflüssigkeitstyp, Druck, Porosität) gemessen werden können und deshalb vor einem Vergleich korrigiert werden müssen (siehe Kap. 4).

In der vorliegenden Studie wurden mit folgenden empirischen Beziehungen gerechnet:

BLACKWELL & STEELE (1989), basierend auf GOSS & COMBS (1976):

$$K1 = 0.84 - 0.04 * \Phi + 0.000695 * v_p \quad (1)$$

wobei K_1 = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 Φ = Porosität in %
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in m/s

Diese Beziehung basiert auf einer Evaluation von vorwiegend Sandstein-, sowie einigen Siltstein- und Kalk-Proben aus dem Imperial Valley in Kalifornien. GOSS & COMBS (1976) beobachteten auch Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeiten vom geologischen Milieu.

EVANS (1977):

$$K_2 = -0.049 * \Phi - 0.160 * v_p + 3.60 * p_b - 5.50 \quad (2)$$

wobei

K2	= Wärmeleitfähigkeit in W/mK
Φ	= Porosität in %
V _p	= Sonic Geschwindigkeit in km/s
p _b	= bulk density in g/cm ⁻³ (aus RHOB-Log = Brutto-Dichte Log = f(Dichte Gesteinsmatrix, Porosität und Dichte Porenflüssigkeit)

Diese Beziehung wurde aus einem breiten Spektrum von Nordseeproben abgeleitet.

Bohrung Weiach (statistische Auswertung Geoform AG):

$$K3 = 0.7 * v_p \quad (3)$$

wobei K_3 = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 V_p = Sonic Geschwindigkeit in km/s

Diese stark vereinfachende Berechnung basiert auf einer statistischen Auswertung der Bohrung Weiach. Dabei wurde die Korrelation zwischen allen Wärmeleitfähigkeits-Messungen (Labor, MATTER et al. 1988a) und den entsprechenden Sonic-Geschwindigkeiten untersucht. Der Faktor 0.7 resultiert aus einer Regression durch den Nullpunkt unter Einbezug aller Datenpunkte (Tertiär, Mesozoikum, Permokarbon, ohne Kristallin) sämtlicher Lithologietypen. Einen vergleichbaren Faktor von 0.72 ± 0.2 ermittelte auch Sattel (1982) für Sedimentgesteine des Rheingrabens.

5.1.2 Berechnung der Porosität

Bei den ersten beiden Ansätzen (K1 und K2) spielt die Porosität (Φ) eine wichtige Rolle. Sie lässt sich auf verschiedene Arten mit geophysikalischen Logs berechnen. Bei den Wärmeleitfähigkeits-Berechnungen der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weiach wurde die (Gesamt- oder totale) Porosität N_{poro} nach BLASER et al. (1994) folgendermassen berechnet:

$$N_{\text{Poro}} = N_{\text{PHI}} - (\text{Clay} * P_{\text{sh}})$$

wobei

NPHI	=	Neutron-Porosität (Fraktion, aus Log)
Clay	=	Tongehalt (Fraktion)
P _{sh}	=	scheinbare Porosität eines reinen Tones (Fraktion)

Der Tongehalt Clay wird folgendermassen berechnet:

$$\text{Clay} = A * (GR - Gr_{cl}) / (GR_{sh} - GR_{cl})$$

wobei

GR	=	Gamma Ray Wert aus Log (in API-Einheit = Kalibrations-Standard)
Gr _{cl}	=	GR-Wert der tonfreien Formation (API): für Bassersdorf: 50 API, Tiefenbrunnen und Weiach: 20 API
Gr _{sh}	=	GR-Wert eines reines Tons (API), Bassersdorf und Weiach: 200 API, Tiefenbrunnen: 180 API
A	=	Skalierungsfaktor (hier: = 1)

Die scheinbare Porosität eines reinen Tones P_{sh} lässt sich bei Bassersdorf aus der Korrelation zwischen Tongehalt und Neutron-Porosität ermitteln. Sie beträgt 0.35 im USM-Abschnitt. Ein Wert von 0.3 wurde bei den Berechnungen der Bohrungen Tiefenbrunnen und Weiach verwendet.

Die Porositäts-Berechnung bei Tiefenbrunnen konnte im Abschnitt 656 bis 661 m mit im Labor gemessenen Porositäten geeicht werden.

Im Fall der Bohrung Weggis wurde die Porosität nicht neu berechnet und basiert auf den Werten von GEOFORM (1994b) und GREBER et al. (1994). Dabei handelt es sich um die aus dem Sonic-Log errechneten Porosität PHIA und die effektive Porosität PHIE, welche für den Tongehalt korrigiert ist.

Im weiteren werden folgende Notationen verwendet:

K1N: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, als Porosität wird N_{porm} verwendet

K1: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität aus PHIA (siehe oben)

K1E: mit Formel (1) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität aus PHIE (siehe oben)

K2N: mit Formel (2) berechnete Wärmeleitfähigkeit, Porosität wird N_{poro} (siehe oben)

K3: mit Formel (3) berechnete Wärmeleitfähigkeit

5.2 Kalibration mit Laborwerten

Die Wärmeleitfähigkeiten wurden in einer ersten Phase mit den Formeln (1) bis (3) berechnet und mit den im Labor gemessenen Werten verglichen. Dabei wurden pro Probentiefe 5 berechnete Wärmeleitfähigkeits-Werte gemittelt. Beispielsweise wurden für die Probe Tiefenbrunnen TI-519.00 die berechneten Wärmeleitfähigkeiten über das Tiefenintervall 518.6 - 518.8 - 519.0 - 519.2 - 519.4 gemittelt. Bei den Bohrungen Bassersdorf und Weggis betragen die Messdaten-Abstände 0.1 m, bei den Bohrungen Tiefenbrunnen und Weiach 0.2 m.

5.2.1 Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der trockenen Proben parallel zur Bohrachse $K_{||}$ zeigen eine gute positive (lineare) Korrelation mit den mit der Formel (1) und (3) berechneten Werten (Fig. 6). Die Korrelationsfaktoren betragen 0.93 resp. 0.86. Erstaunlicherweise wurden zwischen den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der feuchten Proben $K_{||}$ und den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Werten keine linearen Korrelationen festgestellt. Ein Vergleich zwischen den Messwerten von feuchten und trockenen Proben ist generell problematisch, da v.a. die Messung an feuchten Proben mit schwer beizukommenden Fehlerquellen (z.B. durch das Einpressen von Wasser) verbunden ist.

Hingegen eine gute positive Korrelation wurde zwischen $K_{||}$ (trocken) und den gemittelten Dichtewerten aus dem kompensierten Dichte-Log RHOB festgestellt ($R = 0.86$).

Bei der Bohrung Tiefenbrunnen wurde interessanterweise auch zwischen den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten senkrecht zur Schichtung (K_s , trocken und feucht) und den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Leitfähigkeiten eine gute Korrelation festgestellt. Allerdings ist dabei zu beachten, dass nur 3 Messwerte vorhanden sind.

5.2.2 Bohrung Weiach

Bei dieser Bohrung wurden im Labor nur die Mittleren Wärmeleitfähigkeiten der feuchten Proben (K , siehe Beilage 2) bestimmt. Diese Werte zeigen keine Korrelationen mit den mit den Formeln (1) bis (3) berechneten Wärmeleitfähigkeiten.

5.2.3 Bohrung Weggis

Bei dieser Bohrung konnten die Wärmeleitfähigkeiten wegen fehlendem Kern-Material nur an Cuttings gemessen werden (Tab.2, Beilage 2). Die dabei ermittelten Matrix-Wärmeleitfähigkeiten zeigen keine lineare Korrelation mit den mit den Formeln (1) und (3) berechneten Werten. Allenfalls könnte eine bessere Korrelation erreicht werden, wenn die berechneten Wärmeleitfähigkeiten über grössere Tiefenintervalle gemittelt würden (siehe z.B. Fig. 11a).

5.2.4 Kalibration der Berechnungsformeln (Logs)

Den Resultaten ist vorzuschicken, dass bei der Kalibration der mit den Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Labormesswerten in erster Linie versucht wurde, lineare Korrelationen mit in der Literatur verwendeten empirischen Berechnungsformeln herauszufinden. Von diesen Berechnungsformeln ist nur Formel (3) linear aufgebaut. In Anbetracht der kleinen Datenmenge erschien es uns nicht gerechtfertigt, aufwendigere statistische Untersuchungen durchzuführen.

Bei den Korrelationsversuchen hat sich also gezeigt, dass sich bei Molasse-Gesteinen eine auf geophysikalische Logs gestützte Berechnung der Wärmeleitfähigkeit am zuverlässigsten mit den Formeln (1), (3) sowie mit dem Dichte-Log RHOB alleine durchführen lässt. Jedoch müssen erwartungsgemäss (siehe oben) die Koeffizienten der Gleichungen angepasst werden. Diese wurden mit einem mathematischen Fitting-Verfahren ermittelt, mit dem Ziel, eine möglichst gute Korrelation zwischen den berechneten Wärmeleitfähigkeits-Werten und den gemessenen Werten $K_{||}$ (trocken) zu erhalten (Fig. 7).

Als Ersatz für die Gleichung (1), bei welcher die Sonic-Geschwindigkeit v_p und die Porosität ϕ als Variablen auftreten, kann folgende Formel aufgestellt werden:

$$K1N_{neu} = -1.71 - 0.022 * N_{poro} + 0.97 * v_p \quad (4)$$

wobei $K1N_{neu}$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 N_{poro} = Porosität in % (Berechnung siehe oben)
 V_p = Sonic-Geschwindigkeit in km/s

Als Ersatz für die Formel (3), welche nur die Sonic-Geschwindigkeit berücksichtigt, kann Formel (5) geschrieben werden. Sie wurde mit Hilfe einer Regression durch den Nullpunkt aller K_{II} -Werte (trocken) der beiden Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen ermittelt. Im Gegensatz zu Formel (3) wurden also nur Molasse-Daten verwendet.

$$K3_{neu} = 0.54 * v_p \quad (5)$$

wobei $K3_{neu}$ = Wärmeleitfähigkeit in W/mK
 V_p = Sonic-Geschwindigkeit in km/s

Neu wurde eine Formel abgeleitet, welche auf dem Dichte-Log RHOB beruht:

$$K4_{neu} = -8.64 + 4.27 * RHOB \quad (6)$$

wobei RHOB = kompensierte Dichte in g/cm³

Solche direkten Beziehungen zwischen der Dichte eines Gesteines und dessen Wärmeleitfähigkeit wurden schon von zahlreichen Autoren festgestellt (siehe z.B. BEZIAT et al. 1992).

Mit Hilfe dieser drei für die OMM und USM im Raum Tiefenbrunnen/Bassersdorf kalibrierten Formeln (4), (5) und (6) wurden die Wärmeleitfähigkeiten anschliessend bei allen vier Bohrungen berechnet und zusammen mit der Geologie graphisch dargestellt (Fig. 8, 9, 10, 11a und 11b).

In Anbetracht der allgemeinen Unsicherheiten bei den Labormessungen, der Kalibrationsmethode sowie der unterschiedlichen Tiefenauflösung der geophysikalischen Logs wäre eine Glättung der berechneten Wärmeleitfähigkeits-Kurven für die praktische Anwendung sinnvoll (z.B. Wärmeentzugsberechnungen, siehe Kapitel 7). Diese Weiterbearbeitung ist für ein Folgeprojekt vorgesehen.

5.3 Resultate der Log-Berechnungen

5.3.1 Bassersdorf (Fig. 8):

Die drei verschiedenen Berechnungsarten führen über das gesamte untersuchte Tiefenintervall der USM zu recht ähnlichen Wärmeleitfähigkeiten. Im obersten Teil, bis ca. 604 m, fällt auf, dass die berechneten Werte ($\varnothing$ ca. 2.65 W/mK) deutlich höher liegen als im unteren Teil bis 800 m ($\varnothing$ ca. 2.3 W/mK).

Die Logs dieser Bohrung (BLASER et al. 1994) zeigen bei einer Tiefe von ca. 604 m einen markanten Wechsel in ihrem Charakter: Die natürliche Gamma-Strahlung (GR), die Sonic-Intervallzeit und auch die berechneten und gemessenen Tongehalte nehmen im unteren Intervall zu, die Porositäten ab. BLASER et al. (1994, p.122ff.) erklären diesen Umstand

damit, dass im oberen pelitischen Intervall zwischen 553 und 615 m Tiefe wegen wesentlich höheren Calcit- und Dolomitgehalten die Darstellung der totalen Porosität in scheinbaren Sandstein-Porositätseinheiten nicht angebracht ist. Dadurch erklärt sich auch, dass die aus den Dichte-Logs berechneten Porositäten wesentlich geringer sind als diejenigen aus den Neutron-Logs. Der höhere Zementierungsgrad im oberen Teil, (höhere Sonic-Geschwindigkeiten und Dichten, kleinere Porositäten) resultiert in berechneten Wärmeleitfähigkeiten, welche erwartungsgemäss höher liegen als im unteren Teil. Dies zeigt deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit unter anderem sehr stark von der lithologischen Zusammensetzung (Sand, Ton, Diagenese, Korngrösse) abhängig ist.

Innerhalb des unteren Teils wird tendenziell eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe beobachtet, was auf zunehmende Kompaktion zurückzuführen ist.

Die an trockenen Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten K_{II} stimmen gut mit den berechneten Werten überein.

Zusammenfassung:

- Alle Berechnungsarten geben übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten in der USM (~ 2.3 W/mK)
- Labormessungen stimmen mit berechneten Log-Werten überein
- Bessere Zementation mit Calcit und Dolomit im Intervall 553 und 615 m erhöht die Wärmeleitfähigkeit

5.3.2 Tiefenbrunnen (Fig. 9):

Die mit den Formeln (5,) und (6,) berechneten Wärmeleitfähigkeiten stimmen gut überein. Die mit Formel (4, $K1N_{neu}$) berechneten Werte unterscheiden sich jedoch in bestimmten Intervallen (z.B. zwischen 350 und 410 m) relativ stark von den anderen Werten ($K3_{neu}$ und $K4_{neu}$). Bei diesen Intervallen handelt es sich um vorwiegend tonig-siltige Partien mit hohen GR-Ablesungen, welche sich von übrigen, deutlich sandigeren Partien deutlich abheben. Da die $K1N_{neu}$ -Werte vermutlich zu tief liegen (bei ca. 400 m wurden sogar negative Werte berechnet), wird vermutet, dass in den tonigen Partien zu hohe Porositäten berechnet wurden. Die Porositäts-Berechnung müsste deshalb noch besser kalibriert werden.

In den sandigeren Partien sind verschiedene Tiefenintervalle mit relativ konstanten Wärmeleitfähigkeiten zu beobachten. OMM-Durchschnittswerte liegen um ca. 2.0 W/mK, also tendenziell etwas tiefer als in der USM der Bohrung Bassersdorf.

Die an trockenen Proben aus vorwiegend sandigen Partien gemessenen Wärmeleitfähigkeiten K_{II} stimmen gut mit den berechneten Werten überein.

Zusammenfassung:

- Die Berechnungsmethoden $K3_{neu}$ und $K4_{neu}$ geben in der OMM übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten von durchschnittlich ~ 2.0 W/mK)
- Labormessungen stimmen mit berechneten Log-Werten überein
- Der Einfluss der Porosität hat grossen Einfluss auf berechnete Wärmeleitfähigkeiten

5.3.3 Weiach (Fig. 10):

Die mit der $K1N_{neu}$ -Methode berechneten Wärmeleitfähigkeitswerte sind auffallend tief. Bei dieser Berechnungsmethode sind die berechnete Porosität (N_{poro}) und die Intervallgeschwindigkeit von Bedeutung. Vergleiche mit dem Sonic- und Dichte-Log deuten darauf hin, dass mit der oben beschriebenen Methode (siehe Kap. 5.1) zu hohe Porositäten berechnet

wurden. Die mit den anderen Methoden (Formeln (5) und (6)) berechneten Wärmeleitfähigkeiten sind durchgehend höher, aber immer noch tiefer als die im Labor an feuchten Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten. Die mit (5) und (6) berechneten Wärmeleitfähigkeiten unterscheiden sich z.T. relativ stark voneinander und schwanken zwischen ca. 0.75 und 2.5 W/mK. Es können verschiedene Tiefenbereiche mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten unterschieden werden.

Bei der Interpretation der Resultate ist jedoch zu berücksichtigen, dass das bei Weiach untersuchte Molasse-Intervall sehr unteuf liegt. Die oberflächennahe Auflockerungszone (Entspannung) wird durch die geophysikalischen Logs besser erfasst, da generell grössere Tiefenintervalle abgetastet werden (Logs: 0.3-0.6 m) als bei punktuellen Messungen im Labor (dm-Bereich).

Zusammenfassung:

- Die Labormesswerte sind generell ca. 1 W/mK höher als die mit Logs berechneten Wärmeleitfähigkeiten (Einfluss oberflächennaher Auflockerungszone!)
- Für untiefe Bereiche (0-200 m) müssen mehr Kalibrationswerte gemessen werden

5.3.4 Weggis (Fig. 11a/b):

Alle drei verwendeten Berechnungsmethoden liefern ähnliche Wärmeleitfähigkeiten, welche durchschnittlich im Bereich zwischen 1.8 und 2.8 W/mK liegen. Deutlich können diskrete Tiefenabschnitte (50 - 200 m mächtig) mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden. Die Wärmeleitfähigkeiten aus den Cuttings-Messungen (durchschnittlich 1.9 - 2.7 W/mK) stimmen vor allem im oberen Teil der Bohrung bis ca. 1200 m recht gut mit den berechneten Werten überein. Hier sei daran erinnert, dass einerseits die Labormessmethode noch verbessert werden muss (Kap. 4.2.2) und andererseits die Kalibrationsversuche mit den Labormessungen von Weggis (Cuttings) erfolglos verliefen (siehe 5.2). Die hier angewandten Berechnungsmethoden wurden konnten nur mit Daten von Tiefenbrunnen und Bassersdorf kalibriert werden. Diese Bohrungen liegen jedoch relativ weit entfernt, in einem deutlich distaleren (nördlicheren) Ablagerungsmilieu des Molassebeckens mit unterschiedlichem lithologischem Charakter und höheren diagenetischen Reifegrad.

Zusammenfassung:

- Alle Berechnungsarten geben übereinstimmende Wärmeleitfähigkeiten in der USM (~1.8 - 2.8 W/mK)
- Kalibrationsdaten standen nur von relativ weit entfernten Bohrungen zur Verfügung

6. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur (E. Greber / B. Keller / W. Leu)

Bei der folgenden Auswertung geht es im wesentlichen darum zu untersuchen, ob sedimentologisch definierte Architektur-Elemente durch bestimmte Wärmeleitfähigkeits-Bereiche charakterisiert sind.

6.1 Auswertungsmethode

Bei den Bohrungen Bassersdorf (USM) und Weiach (USM) wurden über den gesamten untersuchten Bereich die sedimentologischen Architektur-Elemente bestimmt (BLASER et al. 1994, KELLER et al. 1990).

In der Bohrung Tiefenbrunnen liessen sich diese Elemente nur im gekerntem Bereich bestimmen, womit eine durchgehende Auswertung nicht möglich war. Für die Bohrung Weggis wurde auf eine solche Auswertung vorläufig verzichtet, da keine Kerne vorhanden sind.

Für die USM (Bassersdorf und Weiach) wurden folgende Architektur-Elemente ausgeschieden (siehe auch Kap. 3): RGS (sandiger Rinnengürtel), DFR (Durchbruchsfächer- und -rinnen), US (Überschwemmungssandstein), UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) und LAK (lakustrische Ablagerungen).

Die mit den Formeln (4), (5) und (6) berechneten Wärmeleitfähigkeits-Profile wurden über den Tiefenbereich von jeweils einem Architektur-Element gemittelt und pro Architektur-Element-Typ gegen die Tiefe aufgetragen (Fig. 12 und 13, *kleine* Symbole). Ebenfalls aufgetragen auf den Figuren 12 und 13 wurden die im Labor gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (*grosse* Symbole). Im Gegensatz also zu den kleinen Symbolen, welche berechnete, gemittelte Intervallwerte darstellen, handelt es sich bei den grossen Symbolen um Einzelmesswerte. Da die berechneten Wärmeleitfähigkeiten auch innerhalb desselben Architektur-elementes starken Schwankungen unterworfen sind, ist es nicht weiter erstaunlich, dass die Messwerte (*grosse* Symbole) von den Regressionsgeraden durch die Architektur-Element-Werte meist abweichen. Bei Figur 13 (Bohrung Weiach) ist weiter darauf hinzuweisen, dass hier die Messwerte von *feuchten* Proben stammen. Diese liegen in der Regel höher als jene Werte, welche an *trockenen* Proben gemessen werden. Die berechneten, gemittelten Intervallwerte hingegen stammen aus mit *trockenen* Proben kalibrierten Berechnungsgrundlagen (siehe 5.2).

6.2 Resultate

6.2.1 Bohrung Bassersdorf (Fig. 12)

Im Bereich der gesamten Unteren Süsswassermolasse sind die verschiedenen Architektur-Elemente kaum auf der Basis der Wärmeleitfähigkeit auseinanderzuhalten: Die drei ausgewerteten Architektur-Elemente DFR, US und UPS (Box charts in Fig. 12) sind durch eine grosse Bandbreite von Wärmeleitfähigkeiten charakterisiert, deren 1σ -Abweichungen vom Mittelwert sich teilweise überlappen. Allein eine schwache Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe wird beobachtet (Fig. 12). Ausser bei der $K_{4_{neu}}$ -Methode zeigen die Überschwemmungssandsteine (US) generell höhere Wärmeleitfähigkeiten als die Sedimen-

te der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS). Dieser Umstand spiegelt die höheren Tongehalte des Architektur-Elementes UPS wieder.

Die generell höheren Wärmeleitfähigkeits-Werte oberhalb 604 m stehen mit dem höheren Karbonatanteil im Porensystem in Zusammenhang (siehe 5.3).

6.2.2 Bohrung Weiach (Fig. 13)

Die verschiedenen Architektur-Elemente sind in dieser Bohrung meist durch relativ enge Wärmeleitfähigkeits-Bereiche charakterisiert, welche alle generell mit zunehmender Tiefe grösser werden.

Die sandigen Rinnengürtel (RGS) weisen tendenziell die tiefsten Werte auf, als Folge der grössten Porositäten. Im Falle der Sedimente der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) sind die relativ tiefen Wärmeleitfähigkeit-Werte durch den höheren Tonanteil bedingt. Die 1σ -Abweichungen vom Mittelwert der Architektur-Elemente DFR, US und UPS überlagern sich stark, liegen aber über dem Bereich des Elementes RGS (Box charts in Fig. 13). Die erwähnte Überlagerung ist bis zu einem gewissen Grad auch mit der tendenziellen Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe zu erklären.

6.2.3 Folgerungen

Die zur Verfügung stehenden Daten erlauben lediglich eine detaillierte geothermische Charakterisierung der distalen Unteren Süsswassermolasse. Trotz des momentan noch spärlichen Datensatzes können folgende interessanten Beobachtungen über die geothermischen Eigenschaften gemacht werden:

Abhängigkeit von der Tiefe

Für ein bestimmtes Architektur-Element nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe generell zu. Dieser Umstand ist durch die zunehmende lithostatische Kompaktion erklärbar, die bei abnehmender Porosität eine grössere Verdichtung zur Folge hat.

Abhängigkeit von der sedimentären Architektur

Die Unterschiede der geothermischen Eigenschaften der einzelnen Architektur-Elemente sind in der distalen USM relativ gering. Sie treten in der stratigraphisch tiefer gelegenen Bohrung Weiach deutlicher zu Tage als in der höher gelegenen Bohrung Bassersdorf.

Ursache dieser eher schwachen Abhängigkeit ist die grundsätzlich recht ähnliche petrographische Zusammensetzung granulometrisch und faziell unterschiedlicher Architektur-Elemente (KELLER et al. 1990, KELLER 1992, BLASER et al. 1994). Alle Architektur-Elemente sind demnach als feldspatreiche Litharenite oder Litharenite anzusprechen, mit sehr variablen Quarzgehalten zwischen ca. 10 und 50 %. Ebenso sind die Tongehalte relativ ähnlich, da im pelitischen Architektur-Element UPS der Ton als Matrix, in der arenitischen DFR, US und RG als Bestandteil der lithischen Komponenten (kristalline Gesteine) vorliegt.

Interessanterweise sind die Unterschiede zwischen den arenitischen Architektur-Elementen DFR und US einerseits sowie RGs andererseits recht deutlich. Dieser Umstand erklärt sich dadurch, dass die Sandsteine der Rinnengürtel (RGs) wesentlich höhere Porositäten aufweisen als diejenigen der Überschwemmungssandsteine (US) und der Durchbruchfächer und -rinnen (DFR).

7. Modellrechnungen des Wärmeentzuges über eine Sonde mittlerer Tiefe (R.J. Hopkirk / W.J. Eugster)

7.1 Einleitung und Modellbeschreibung

Es ist wichtig, die Sensitivität der erreichbaren Wärmeentnahme aus dem Untergrund bezüglich Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Wirtgesteins abschätzen zu können. Um diese Sensitivität bei den hier untersuchten Materialien zu gewinnen, wurde eine Serie numerischer Simulationsrechnungen durchgeführt.

Es wurden drei Aspekte untersucht:

- die Auswirkung eines systematischen Fehlers bei der Schätzung der Wärmeleitfähigkeit von Molassegesteinen
- die Auswirkung des Eintretens eines der Extremwerte für Wärmeleitfähigkeit von Molassegesteinen
- die Auswirkung des Eintretens eines der Extremwerte für Wärmekapazität von Molassegesteinen

Die Berechnungen wurden mit dem Rechenprogramm COSOND durchgeführt. Das Finite-Differenzen Programm, geschrieben in z-r (zylindrischen) Koordinaten, ermöglicht die Simulation des Ausbaus und des Betriebes einer coaxialen Erdwärmesonde in einem horizontal geschichteten Untergrund. Der numerische Algorithmus bietet eine voll-implizite Lösung für das Temperaturfeld im zylindrischen Untergrundbereich und behandelt dabei die Strömung (laminar bzw. turbulent) und Wärmeübergänge im Sondenkreislauf, sowie allfälligen Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Bodenoberfläche. Teleskopierte Ausbaustufen des Bohrlochs und der Verrohrung werden berücksichtigt und alle thermische Belastungen dürfen beliebig zeitabhängig sein.

In den vier in der vorliegenden Studie untersuchten Bohrungen sind nur die Molasse-Ablagerungen der OMM und USM spezifisch betrachtet worden. In drei der vier Fälle (Ausnahme Weggis) beginnt der relevante Schichtenbereich erst in einer Tiefe von einigen hundert Metern. Es wurde deshalb ein möglichst einfaches Modell aufgestellt, um typische Auswirkungen von Variationen der thermischen Eigenschaften der Materialien in der Molasse zu zeigen.

Zu diesem Zweck dient für die Untersuchung von Wärmeleitfähigkeitseffekten ein 2-Schichten-Modell von 950 m Tiefe. Eine obere Schicht mit eher niedriger Wärmeleitfähigkeit reicht bis in eine Tiefe von 475 m, die zweite Schicht bis zur Modellunterkante bei 950 m. Der Modellradius beträgt 150 m. Die thermischen Eigenschaften wurden dabei nicht in jeder Tiefe über ihren theoretisch maximal möglichen Variationsbereich geändert, sondern jeweils nur in realistischem Rahmen in den beiden modellierten Schichten.

Zur Untersuchung der spezifischen Wärmekapazität wurden die thermischen Eigenschaften der beiden Schichten gleichgestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des ganzen unterirdischen Halbraumes wurde bei einem mässigen Wert (2.4 W/mK) konstant gehalten und nur die spezifische Wärmekapazität variiert.

Der Energieentzug erfolgt durch Einsatz einer mitteltiefen Erdwärmesonde in einem 750 m tiefen Bohrloch. Dabei wird die obere Schicht sowie 275 m der unteren Schicht durchbohrt.

Die Konstruktion der Sonde ist eher "konventionell":

- 7" Verrohrung zementiert in einem 8 1/2" Bohrloch ohne jegliche Art von Teleskopierung
- koaxial-angeordnete, gut zentrierte Steigleitung aus Kunststoff (PE) mit Aussendurchmesser 90 mm

Um nützliche Resultate zu erhalten, muss die modellierte Erdwärmesonde in einem möglichst typischen Flüssigkeitstemperaturbereich arbeiten. Der Grund dafür ist, dass Wärmepumpen, die bei einer solcher geothermischen Anwendung am ehesten in Frage kommen, am optimalsten in einem beschränkten Temperatur-Bereich arbeiten: Zudem ist die potentielle Entzugsleistung vom Temperatur-Unterschied zwischen der Wärmeträgerflüssigkeit und der Formation abhängig. Der Bereich wurde für sämtliche Fälle so gewählt, dass nach einem Periode von 25 Jahren in Dauerbetrieb eine Quellentemperatur (Temperatur des gelieferten Warmwassers am Sondenkopf) von ca. 10°C resultierte. Dadurch sollte es erfahrungsgemäss möglich sein, auch bei typischen saisonalen Lastschwankungen während dieser Periode mit reinem Wasser zu arbeiten. Eine Differenz zwischen der Quellen- und der Rückgabetemperatur im hydraulischen Kreislauf von 3.5K wurde in jedem Fall angenommen. Es ist zu erwähnen, dass unter diesen Voraussetzungen die Dauerleistung in den beiden Basisfällen 21.9 kW betrug (siehe Tabellen 6 und 7).

Durch iterative Änderung der Durchlaufgeschwindigkeit im Sondenkreislauf konnten die langzeitigen Abkühlungsverläufe von Variante zu Variante sehr genau dem jeweiligen Basisfall angepasst werden. Dies bedeutet, dass die zeitlichen Verläufe der Quellen- und Rückgabemperaturen in der Figur 14 auch für sämtliche weiteren Rechenläufe repräsentativ sind.

7.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit

Das Temperaturfeld im Wirtgestein wird bestimmt durch die Annahme einer mittleren Erdoberflächen-Temperatur von 10°C sowie durch ein vertikales Temperaturprofil, welches aus einem geothermischen Wärmefluss von 80 mW/m² resultiert. Die spezifische Wärmekapazität des Formationsgesteins wurde beim Wert von 850 J/kgK für die beiden Schichten belassen.

Die ersten drei Fälle in der Tabelle 6 (Basis, 022 und 032) zeigen die Auswirkungen globaler Wärmeleitfähigkeits-Änderungen in der Höhe von ± 0.5 W/mK der unteren Schicht. Die Werte sind indikativ für Auswirkungen von systematischen Fehlern bei der Schätzung der Wärmeleitfähigkeit der unteren Schicht (Molasse).

Kommen ähnliche Schätzungsfehler auch in der oberen Schicht dazu, nehmen die Änderungen bei der Entzugsleistung noch weiter bis gegen 20% zu.

Zweck der Berechnungen 043 und 053 war, die Effekte von Extremänderungen der Wärmeleitfähigkeit nach oben in der unteren Schicht und nach unten in der oberen Schicht zu zeigen, und diese mit den Auswirkungen der Schätzungsfehler zu vergleichen. Signifikant ist die grössere Wirkung auf das Leistungspotential in der unteren Schicht bei Änderung der Wärmeleitfähigkeit in ähnlicher Grössenordnung in beiden Schichten.

Tab. 6: Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierenden Wärmeleitfähigkeiten im zwei-Schicht-Modell.

Berechnung	K _{oben} [W/mK]	K _{unten} [W/mK]	Durchfluss [m ³ /h]	Entzug [MWh/a]	Veränderung [%]
Basisfall	2.0	2.7	5.4	191.7	0.0
Run 022	2.0	3.2	6.1	215.8	+12.6
Run 032	2.0	2.2	4.7	167.2	-12.8
Run 043	2.0	3.8	6.8	243.2	+26.9
Run 053	1.0	2.7	4.6	161.9	-15.5

7.3 Einfluss der spezifischen Wärmekapazität

In dieser Untersuchung wurde das Temperaturfeld wieder durch die gleichen Annahmen wie oben bestimmt, die Wärmeleitfähigkeit des Wirtgesteins jedoch wurde beim Wert von 2.4 W/mK über den gesamten Tiefenbereich des Modells belassen.

Die Resultate (Tab. 7) zeigen, dass der Einfluss der Wärmekapazitäts-Änderungen auf das Entzugspotential bei diesen Modellierungen relativ gering ist.

Tab. 7: Prozentuale Änderungen des Entzugspotentials bei variierender Wärmekapazität des gesamten Wirtgesteins.

Berechnung	C _{Formation} [J/kgK]	Durchfluss [m ³ /h]	Entzug [MWh/a]	Veränderung [%]
Basisfall	850.0	5.4	191.7	0.0
Run 063	700.0	5.3	189.8	-0.9
Run 073	1600.0	5.7	202.5	+5.5

8. Schlussfolgerungen / Nutzen für die Praxis

- ⇒ Die Kompilation aller zur Zeit verfügbaren geothermischen Daten von schweizerischen Molasse-Gesteinen (Beilage 1) bildet eine neue Grundlage für die Planung und Konzipierung von geothermischen Anlagen.
- ⇒ Die Wärmeleitfähigkeiten nehmen innerhalb ähnlicher Lithologien mit zunehmender Tiefe und Kompaktion tendenziell zu. Für die USM liegen die durchschnittlichen Werte bei Bassersdorf zwischen ca. 2.2 und 2.7 W/mK, bei Weiach zwischen ca. 1.1 und 1.8 W/mK und bei Weggis zwischen ca. 2.8 und 2.8 W/mK. Für die OMM der Bohrung Tiefenbrunnen wurden durchschnittliche Werte zwischen ca. 1.7 und 2.4 W/mK ermittelt. Offensichtlich liegen hier deutlich regionalgeologische (Diagenese, Kompaktion) und formationsspezifische Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten vor, die durch das spärliche Datenmaterial, aber auch in Folge des beschränkten Forschungssetats nicht genügend ergründet werden konnten.
- ⇒ Die Labormessungen (trocken und feucht) an Kernen und Cuttings der Bohrungen Bassersdorf, Tiefenbrunnen und Weggis zeigen einen bedeutenden Einfluss der Sättigung mit Porenflüssigkeit auf gemessene Wärmeleitfähigkeiten. Die Abweichungen zwischen den Wärmeleitfähigkeiten der *feuchten* Kerne und den Wärmeleitfähigkeiten der entsprechenden Cuttings liegt im Mittel unter $\pm 10 - 15 \%$.
- ⇒ Die Umrechnung der an den Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten zu Matrix-Wärmeleitfähigkeiten ist mit methodisch bedingten Schwierigkeiten verbunden und muss in Zukunft noch besser untersucht werden.
- ⇒ Geophysikalische Bohr-Logs erlauben es, ohne grossen Arbeitsaufwand durchgehende und relativ zuverlässige Wärmeleitfähigkeiten zu berechnen. Die Berechnungsmethoden, welche auf den Porositäten, den Sonic-Geschwindigkeiten und den Dichte-Werten beruhen, konnten mit den Wärmeleitfähigkeits-Messungen an den trockenen Kernen K_H kalibriert werden. Generell scheinen die Berechnungsmethoden, welche alleine auf der Sonic-Geschwindigkeit oder der Gesteinsdichte beruhen, die zuverlässigsten Resultate zu liefern. Wird auch die Porosität berücksichtigt sollten nur zuverlässig kalibrierte Log-Porositäten verwendet werden.
- ⇒ Für die Kalibrierung der Berechnungsmethoden (Logs) standen nur 8 Datenpunkte aus distalen Bereichen des Molassebeckens zur Verfügung. Vor einer flächenhaften Anwendung der Berechnungsformeln müssen unbedingt mehr Labormessungen durchgeführt werden.
- ⇒ In der distalen Unteren Süsswassermolasse ist nur eine schwache Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der sedimentären Architektur feststellbar. Diese für die Praxis wichtige Erkenntnis ist durch die sehr ähnliche petrographische Zusammensetzung der verschiedenen Architektur-Elemente erklärbar. Innerhalb der sandigen Architektur-Elemente jedoch ist eine deutliche Unterscheidung infolge verschiedener Porositäten und diagenetischer Zementation erkennbar.
- ⇒ Die Wichtigkeit der Wärmeleitfähigkeit bei Wärmeentzugsmodellierungen wird sogar unter konservativ gestalteter Berechnungen deutlich. Es ist deshalb für die Auslegung jeder Edwärmesonde wichtig, die Wärmeleitfähigkeit möglichst genau zu kennen. Bei tiefen Sondenanlagen haben Fehlschätzungen der Wärmeleitfähigkeit von ± 0.5 W/mK Variationen des Wärmeentzugspotentials von bis zu 20% zur Folge.

⇒ Obwohl nur eine kleine Auswirkung der spezifischen Wärmekapazität auf Wärmeentzugsrechnungen demonstriert werden konnte, ist die volle Signifikanz dieses Parameters noch nicht klar. Es ist hier jedoch zu berücksichtigen, dass im Rahmen dieser Pilotstudie (limitierter Datensatz und Aufwand) nur eine tiefe Erdwärmesonde in Dauerbetrieb simuliert wurde. Die Berechnung verschiedener dynamischer Lastfälle liegt ausserhalb des Rahmens des vorliegenden Projektes. Dies nicht zuletzt deshalb, weil konkrete Erfahrungen mit der Temperaturdynamik tieferer, in Betrieb stehender Erdwärmesonden, erst beim Projekt Weggis gesammelt werden. Die Wärmekapazität ist jedoch relevant für Speicheranlagen und sich saisonal voll regenerierende Erdwärmesonden im untiefen Bereich (0 - 100 m).

Die vorliegende Studie zeigt somit, dass es möglich ist, die geothermischen Eigenschaften der Molasse-Gesteine im Schweizer Molassebecken mit kostengünstigen und kalibrierten Methoden auf zuverlässige Weise zu berechnen. Dies sind positive Signale im Hinblick auf eine möglichst wirtschaftliche Nutzung der Geothermie in der Schweiz.

9. Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Um ein wirksames Planungsinstrument für geothermische Anlagen im gesamten Schweizer Molassebecken zu erhalten, sollten in einem Folgeprojekt folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Flächendeckende Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten bis in Tiefen von ca. 2 km mit Hilfe geophysikalischer Logs. Glättung der berechneten Wärmeleitfähigkeiten über praktisch anwendbare Tiefenintervalle.
- Die Methode der Wärmeleitfähigkeitsmessung an Cuttings im Labor sollte weiter optimiert und mittels Eichung mit einer viel grösseren Anzahl von Kern- und Log-Daten abgesichert werden.
- Zusätzliche Wärmeleitfähigkeits-Messungen an Kernen (bisher nur 8 Messungen), um die in diesem Bericht beschriebenen Berechnungsmethoden mittels Logs abzusichern. Vor allem im untiefen Bereich (0 bis 300 m) fehlen gute Messdaten. Möglich wäre z.B. eine Neubeprobung der Bohrung Weiach. Die bisherige Kalibration konnte nur relativ punktuell, im Raum Bassersdorf / Tiefenbrunnen, durchgeführt werden. Wichtig wäre aber, dass auch Molasse-Kerne aus anderen Regionen (z.B. Zentral- und Westschweiz) kalibriert werden können.
- Die regionalgeologischen Unterschiede infolge unterschiedlicher Diagenese sollten detaillierter untersucht werden. Hierzu ist eine Ausdehnung eines Folgeprojektes auf das ganze Molasse-Becken erforderlich.
- Die grosse Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Petrographie und der Petrophysik konnte zwar für die distale USM anhand der Architektur-Elemente nachgewiesen werden. Wie sich dieser Einfluss in den quarzreichen Gruppen OMM und OSM niederschlägt, müsste durch weitere Untersuchungen analog zu den vorliegenden geklärt werden. Weitere Untersuchungen müssten demnach auch die Sedimentpetrographie und die Petrophysik berücksichtigen, wie dies im ursprünglichen Projektvorschlag vorgesehen war.
- Es sollte versucht werden, die Wärmeleitfähigkeit, basierend auf der mineralogischen Zusammensetzung zu berechnen (bei sehr geringer Porosität oder genauer Kenntnis der Porosität, des Sättigungsgrades und der Art der Porenfüllung).
- Es sollte getestet werden, ob die Wärmeleitfähigkeiten auch mit seismischen Profilen, respektive mit den seismischen Geschwindigkeiten, berechnet werden können.
- Labormessungen der Wärmekapazität sowie Entwicklung neuer Messmethoden. Es bestehen bereits vielversprechende Ansätze zur Messung dieses Parameters, welcher bei der Konzipierung geothermischer Anlagen ebenso wichtig wie die Wärmeleitfähigkeit ist.
- Weitere Berechnungen von dynamischen Belastungen an Erdwärmesonden in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität sollten durchgeführt werden. Zudem sollte auch der untiefere Bereich (0-100 m, heute grösste Dichte von Speicheranlagen und Erdwärmesonden) berücksichtigt werden, wo generell grosse Variationen der oben genannten Parameter auftreten.

Verdankungen

Die Autoren danken Frau Heidi Haas (Universität Bern, Beprobung Weggis), Herrn B.-F. Iseli (Effretikon, Beprobung Tiefenbrunnen), Herrn K. Fehr (AGW Zürich), Herrn Dr. P. Blümling (Nagra, Logs Bassersdorf) sowie den Herren R. Schegg und B. Loup (Résumé français) für ihre zuvorkommende Mitarbeit.

Literaturverzeichnis

- AMMANN, M., BIRKHÄUSER, P., BLÄSI, H.R., LAVANCHY, J.-M., LÖW, S., MEIER, B. & MÜLLER, W.H. (1993): Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf. Charakterisierung mittels Geologie, Petrophysik und Fluid Logging. - NTB, 92-03, 76 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. & 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.
- 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 issledovaniya skvashin. - Moscow.
- EUGSTER, W. J., HOPKIRK, R. J., KÄLIN, B., RYBACH, L. & SEIFERT, P. (1992): Das Betriebsverhalten der Erdwärmesonde. Dezentrales Heizen durch Nutzung der untiefen Geothermie. - SIA, 46, 6 p..
- EVANS, T.R. (1976): Thermal properties of North Sea rocks. - The Log Analyst, 18/2, p. 3-12.
- GEOFORM (1994a): Bestandesaufnahme bestehender Tiefbohrungen in der Schweiz. - Bericht Geoform AG, gf-156-1, p. 13.
- GEOFORM (1994b): Geothermiebohrung Weggis - Schlussbericht Geologie/Geophysik/Bohrtechnik. - Bericht Geoform AG, gf-138-1, p.31.
- GIOVANOLI, F. & HSÜ, K. J. (1981): Die wissenschaftliche Sondierbohrung im tiefsten Teil des Zürichsees. - Neue Zürcher Zeitung Nr. 155 (8.7.1981).
- 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., GRÜNENFELDER, T., KELLER, B. & WYSS, R. (1994): Die Geothermie-Bohrung Weggis, Kanton Luzern. - Bull. schweiz. Ver. Petroleum-Geol. u. -Ing., 61/138, p. 17-43.
- HOPKIRK, R. J., RYBACH, L. & STADLER, T. (1994): Tiefe Erdwärmesonden. - In: Sanner, B. & Lehmann, A. (ed.): Tagungsbericht 2. Symposium 'Erdgekoppelte Wärmepumpen'. Informationszentrum Wärmepumpen+Kältetechnik, Karlsruhe. IWZ-Bericht 1/94, p. 265-274.
- HOUBOLT, J.J.H.C. & WELLS, P.R.A. (1980): Estimation of heat flow in oil wells based on a relation between heat conductivity and sound velocity. - Geol. Mijnbouw, 59/3, p. 215-224.
- KELLER, B. (1989): Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. - Dissertation, Bern, 403 p.

- KELLER, B., BLÄSI, H.-R., PLATT, N.H., MOZLEY, P.S. & MATTER, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysik. Eigenschaften am Beispiel der Bohrung Langenthal. - Nagra NTB 90-41, 100 p.
- KELLER, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. - *Eclogae geol. Helv.*, 85/3, p. 611-651.
- MATTER, A., PETERS, T., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., ISCHI, H. & MEYER, CH. (1988a): Sondierbohrung Weiach, Geologie (Text- und Beilagenband). - Nagra NTB 86-01, 438 p.
- MATTER, A., PETERS, T., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F. & WEISS, H.-P. (1988b): Sondierbohrung Schafisheim, Geologie. Test- und Beilagenband. - Nagra NTB, 86-03, 321 p.
- MENGIS & LORENZ (1994): Sanierung des Krienbaches (Kriens-Luzern). - Bericht über die geologische Aufnahme des Gütschstollens. Bauherrschaft GALU (Stadt Luzern und Gemeinde Kriens), Landeshydrologie und -geologie (Bern) und Geologisches Institut der Universität Bern. 19 p. + Fig./Profile.
- PRIBNOW, D. (1994): Ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie. - *Fortschr.-Ber., VDI Reihe 19*, Nr. 75, Düsseldorf.
- 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-InformationsZentrum 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. (1989): Geothermische Detailkartierung (1:100000) in der zentralen Nordschweiz mit besonderer Berücksichtigung petrophysikalischer Parameter. - Diss. ETH, Nr. 8941, 208 p.
- 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, Seismic exploration., 18, 583 p.
- SEIFERT, P.K., EUGSTER, W.J., KÄLIN, B. & HOPKIRK, R.J. (1992): Auswirkung von Bergklima und Bodentypen auf das Betriebsverhalten von Erdwärmesonden. - Polydynamics Ltd. im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW.
- SEKIGUCHI, K. (1984): A method for determining terrestrial heat flow in basinal areas. - *Tectonophysics*, 103, 67-79.
- STADLER, T. (1995): Messung der Wärmeleitfähigkeit an Bohrkern mit dem TK04 der Gruppe für Geothermie am Institut für Geophysik, ETH Hönnggerberg. - Interner Bericht.
- STADLER, T., HOPKIRK, R.J. & HESS, K. (1995b): Auswirkungen von Klima, Bodentyp und Standorthöhe auf die Dimensionen von Erdwärmesonden in der Schweiz. - Polydynamics Ltd. im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW.
- VASSEUR, G., BRIGAUD, F. & DEMONGODIN, L. (1995): Thermal conductivity estimation in sedimentary basins. - *Tectonophysics*, 244, 167-174.

Figuren 1 - 14

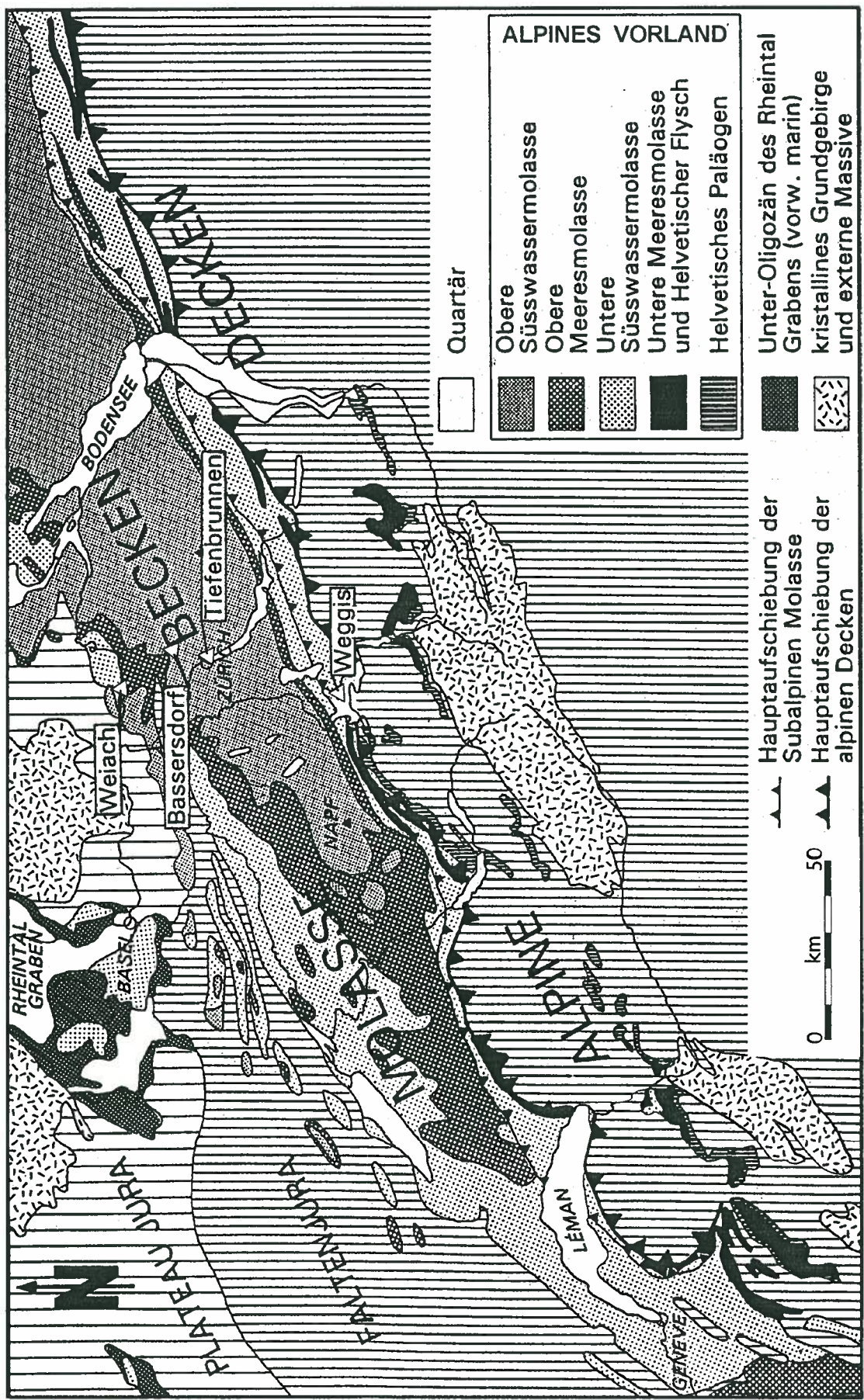


Fig 1: Geologische Übersichtskarte des Molasse-Beckens mit den Lokalitäten der beprobten Bohrungen (nach KELLER 1992).

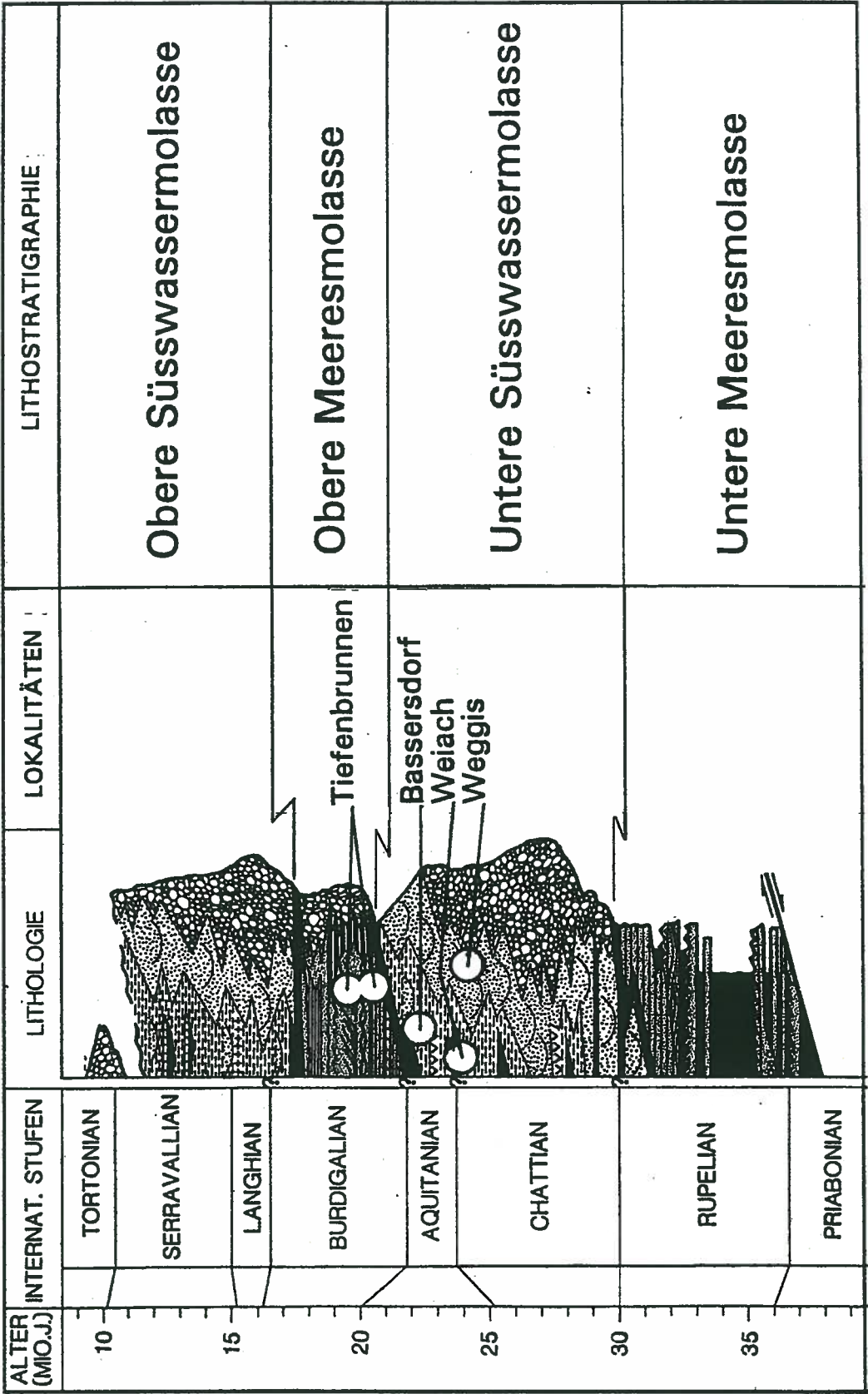


Fig 2: Stratigraphisches Sammelprofil der untersuchten Molasseeinheiten mit relativer Position der beprobten Intervalle (nach KELLER 1992).

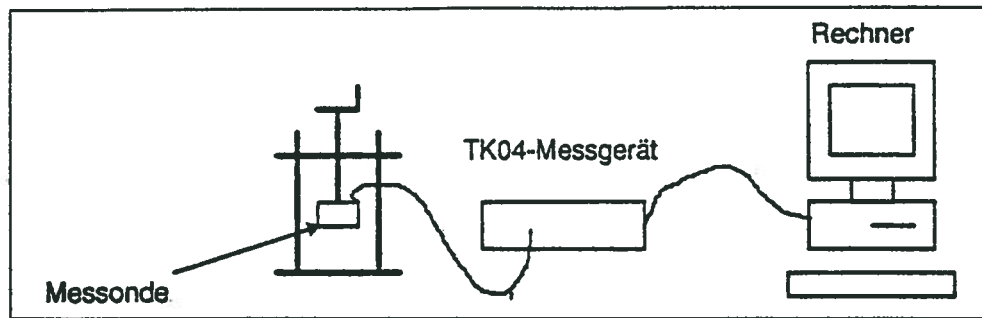


Fig 3: Schematische Darstellung der Messapparatur

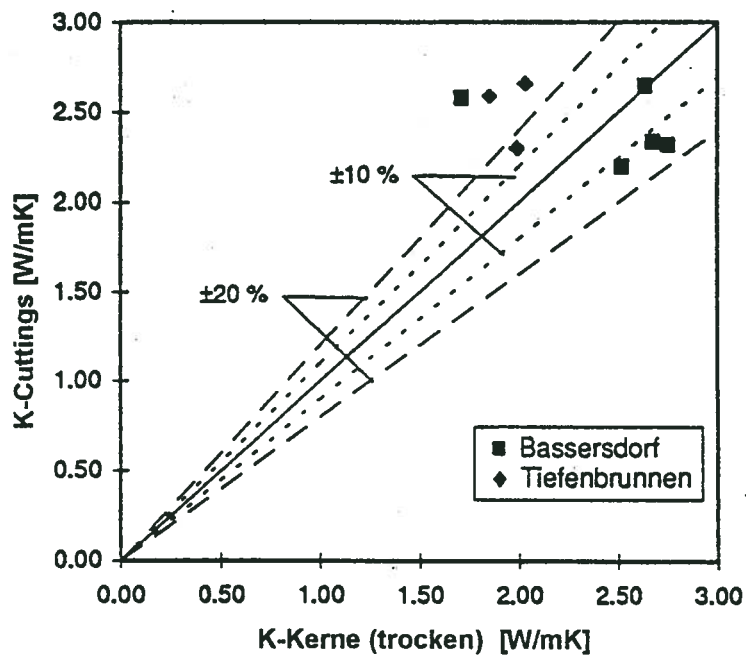


Fig 4: Vergleich zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Kerne (trocken) und der Cuttings (Matrixwert, siehe Text).

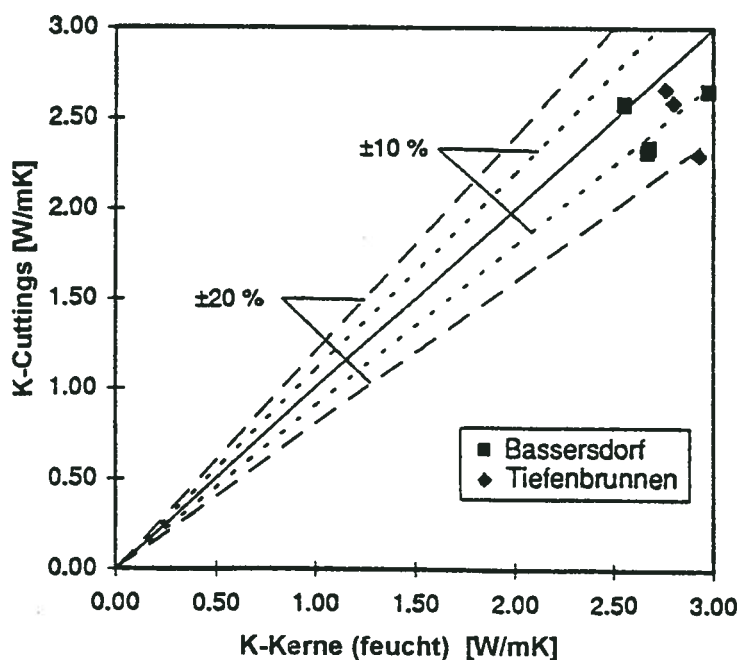


Fig 5: Vergleich zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Kerne (feucht) und der Cuttings (Matrixwert, siehe Text).

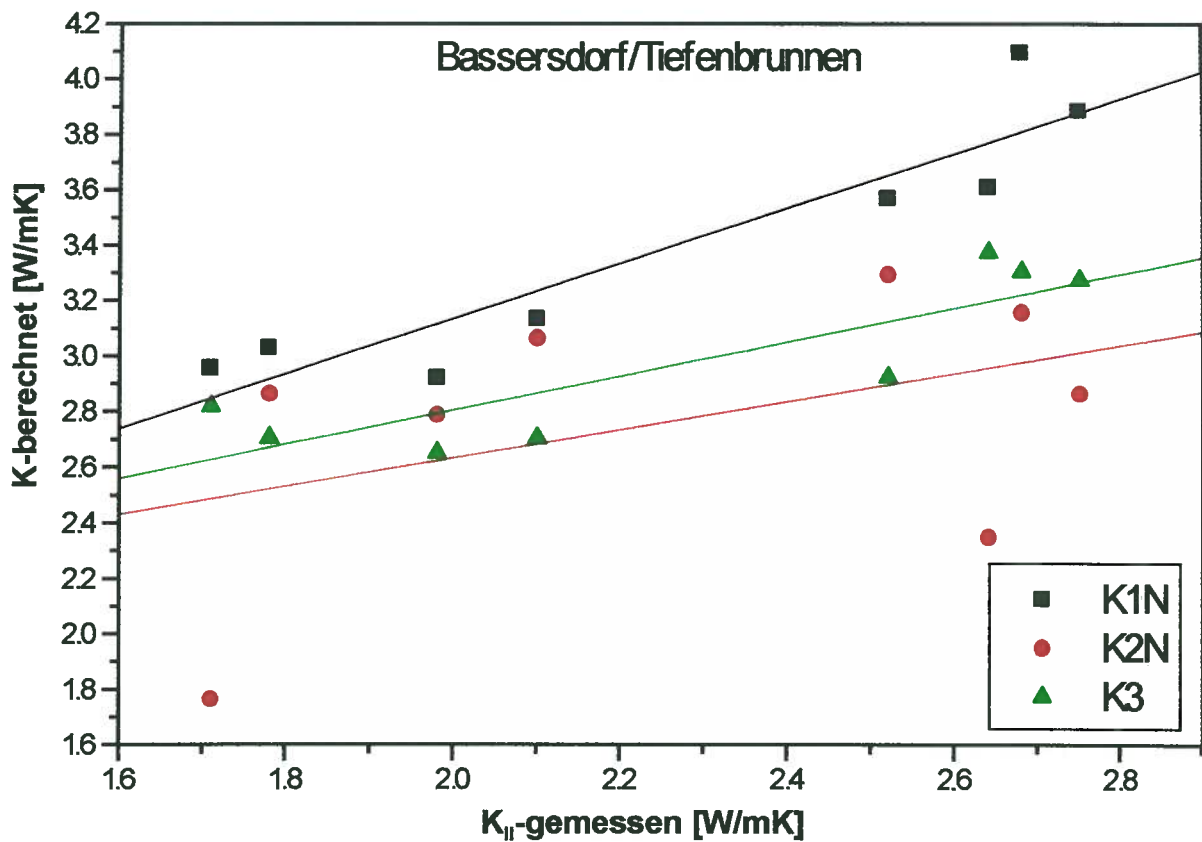


Fig 6: Korrelation von K_{II} -gemessen (trocken) vs. K1N/K2N/K3-Logs (Korrelationsgeraden: $y=A+B \cdot x$) für die Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen (für Berechnungsmethode siehe Text).

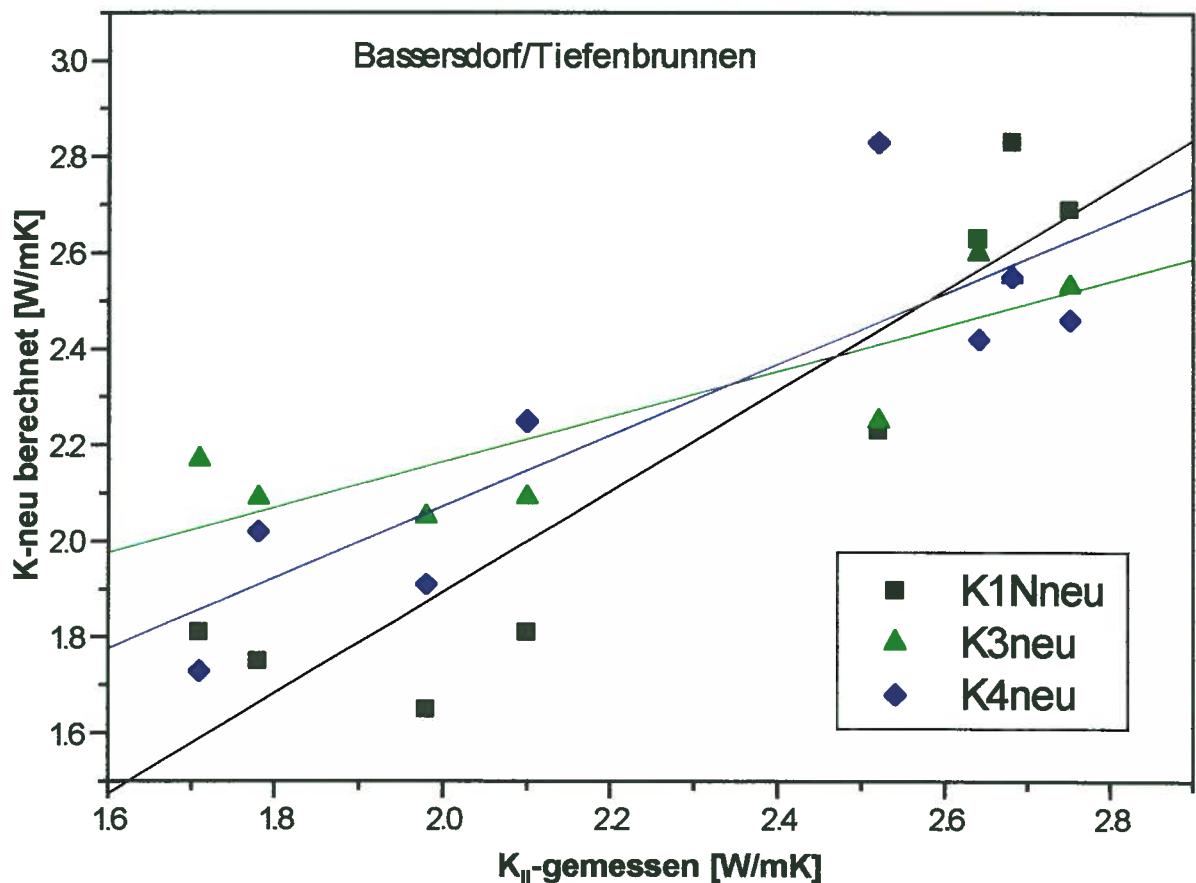


Fig 7: Korrelation von K_{II} -gemessen (trocken) vs. $K1N_{neu}/K3_{neu}/K4_{neu}$ -Logs (Korrelationsgeraden: $y=A+B \cdot x$, neu kalibriert) für die Bohrungen Bassersdorf und Tiefenbrunnen (für Berechnungsmethode siehe Text).

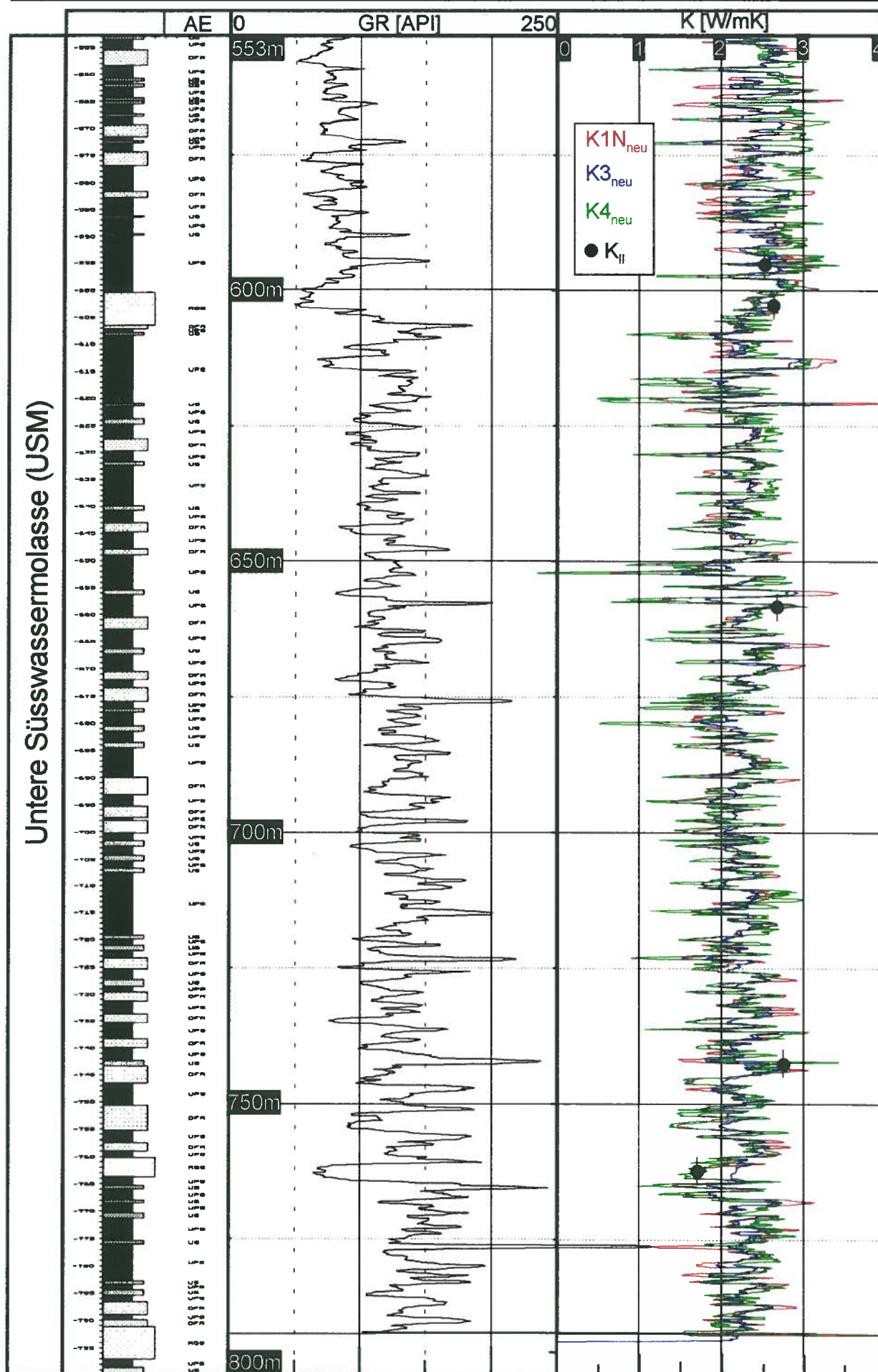


Fig. 8: Sammelprofil Bassersdorf (USM) 1:1000 mit berechneten ($K1N_{neu}$, $K3_{neu}$, $K4_{neu}$) und gemessenen (K_{II} trocken) Wärmeleitfähigkeiten. AE = sedimentäre Architektur-Elemente

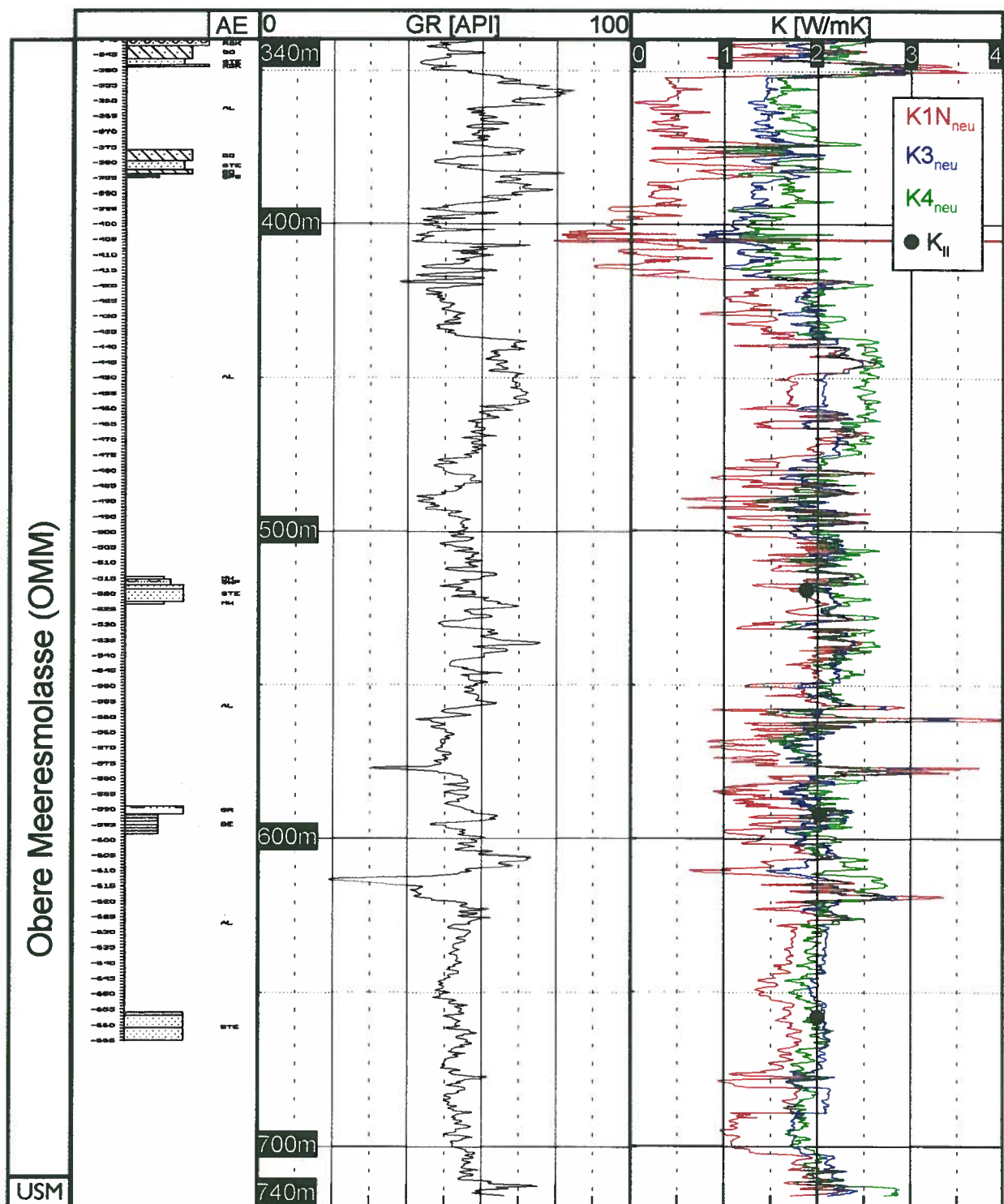


Fig. 9: Sammelprofil Tiefenbrunnen (OMM) 1:2000 mit berechneten ($K1N_{neu}$, $K3_{neu}$, $K4_{neu}$) und gemessenen (K_{II} trocken) Wärmeleitfähigkeiten. AE = sedimentäre Architektur-Elemente (siehe Kap. 3).

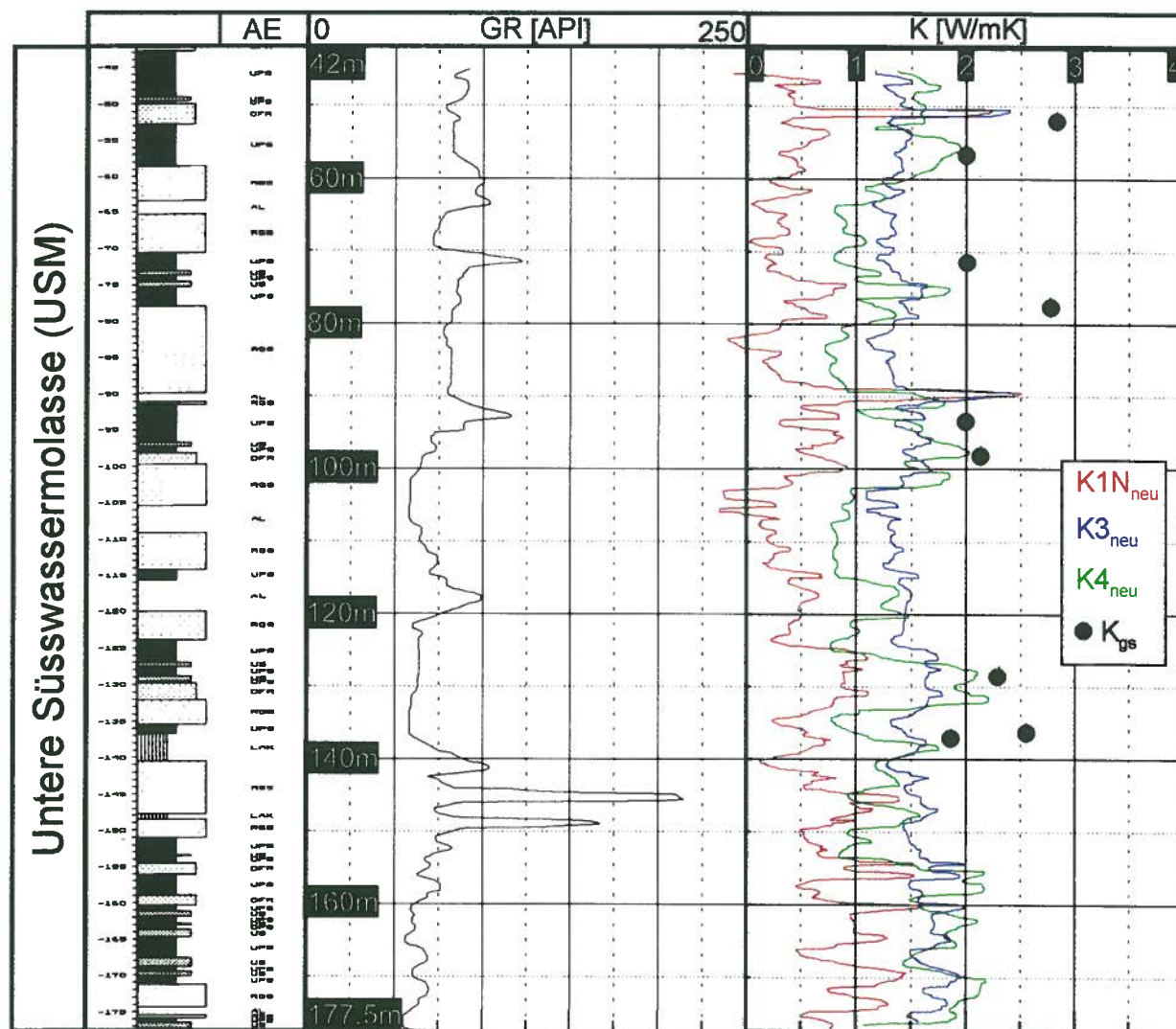


Fig.10: Sammelprofil Weiach (USM) 1:1000 mit berechneten ($K1N_{neu}$, $K3_{neu}$, $K4_{neu}$) und gemessenen (K_{gs}) Wärmeleitfähigkeiten (feucht). AE = sedimentäre Architektur-Elemente (siehe Kap. 3).

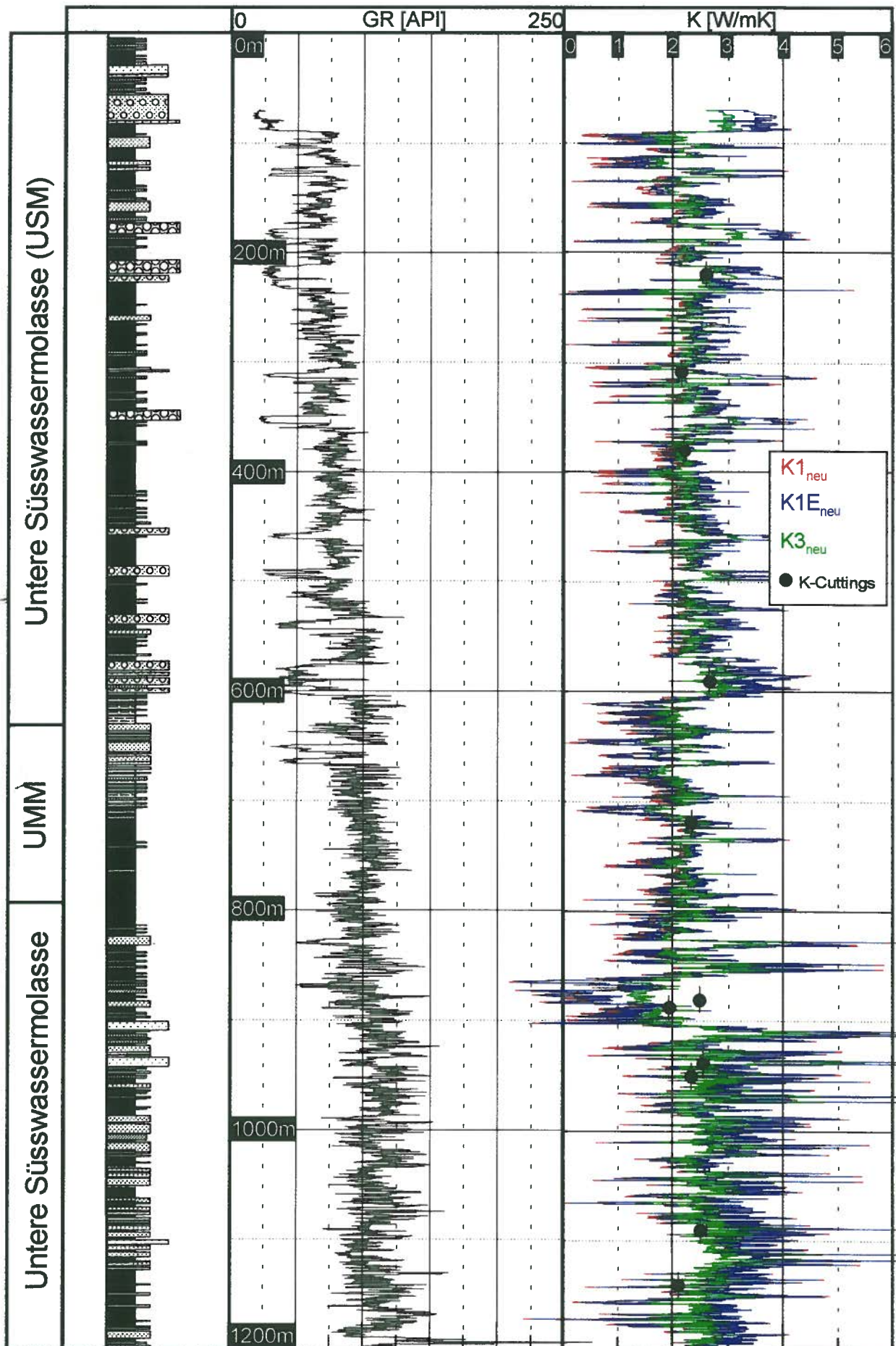


Fig. 11a: Sammelprofil Weggis 0 - 1200 m (1:5000) mit berechneten ($K1_{neu}$, $K1E_{neu}$, $K3_{neu}$) und an Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Matrix-Werte, siehe Text).

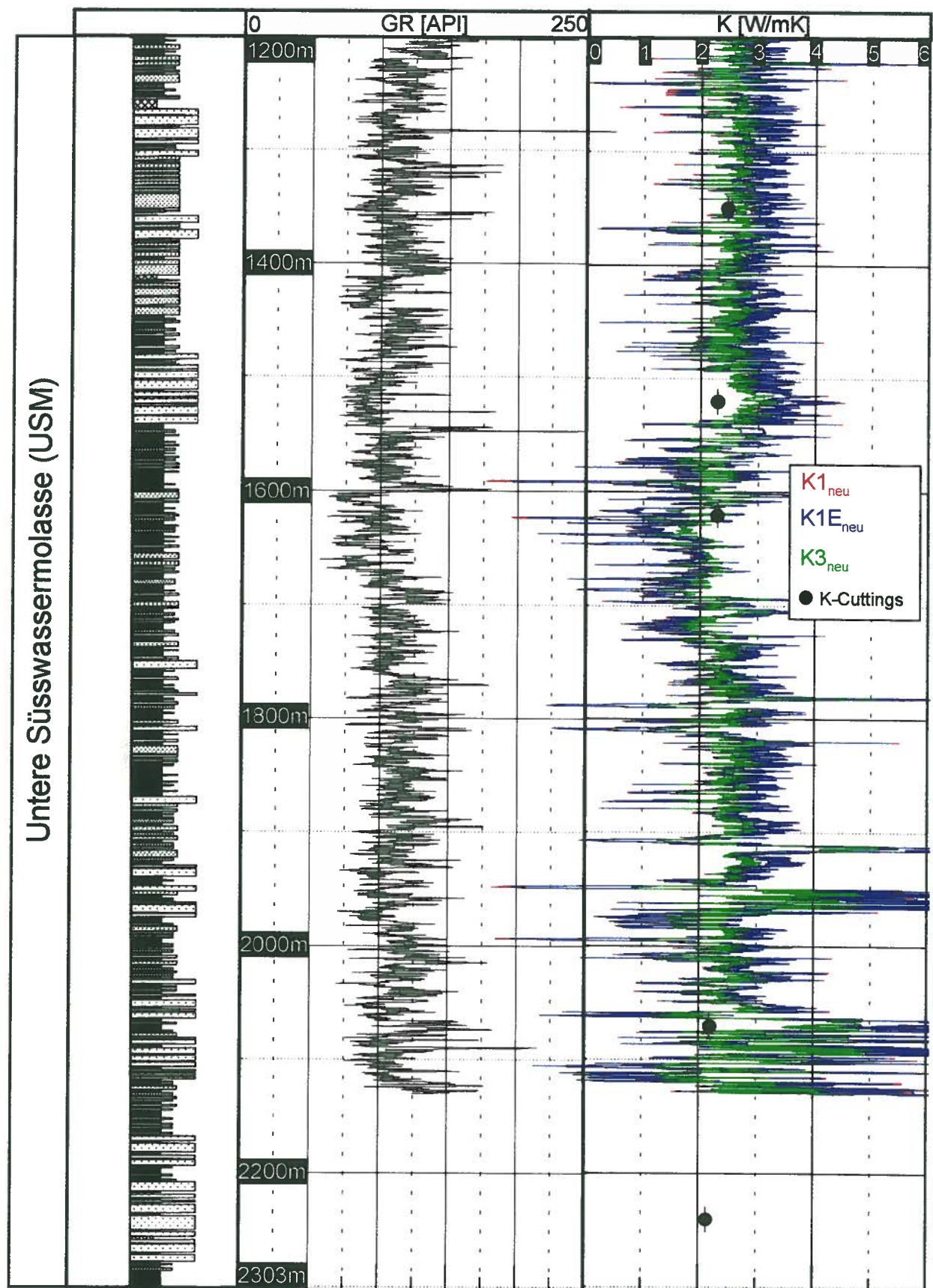


Fig. 11b: Sammelprofil Weggis 1200 - 2303 m (1:5000) mit berechneten ($K1_{neu}$, $K1E_{neu}$, $K3_{neu}$) und an Cuttings gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Matrix-Werte, siehe Text).

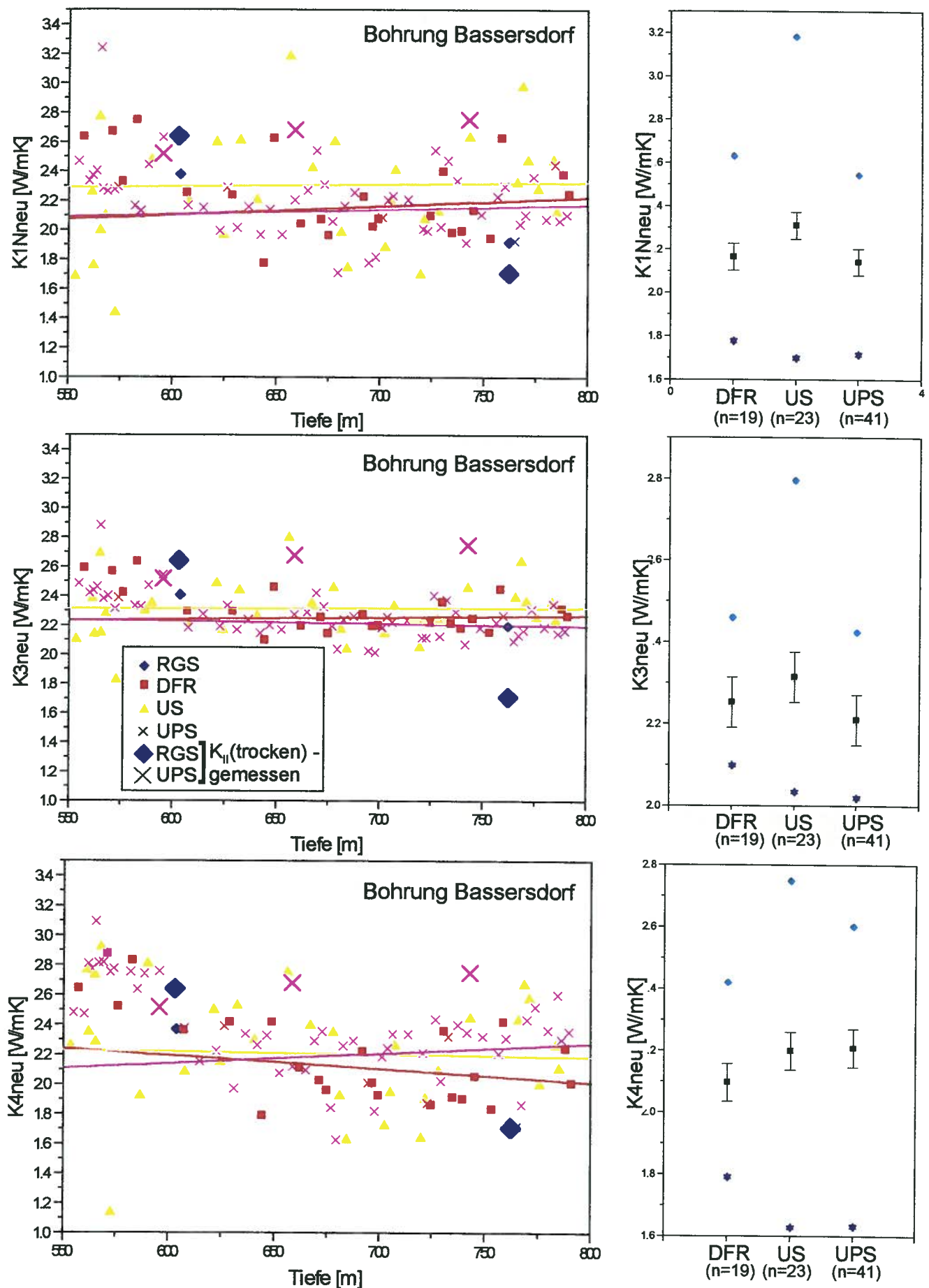


Fig. 12: Korrelation der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Architektur-Elementen (Bassersdorf). Die Korrelationsgeraden und Box charts wurden nur mit Daten aus Tiefen grösser als 600 m berechnet (Box charts: Farbige Symbole = Minimal- und Maximalwert, schwarze Quadrate = Mittelwert | Linie = 1 σ -Abweichung)

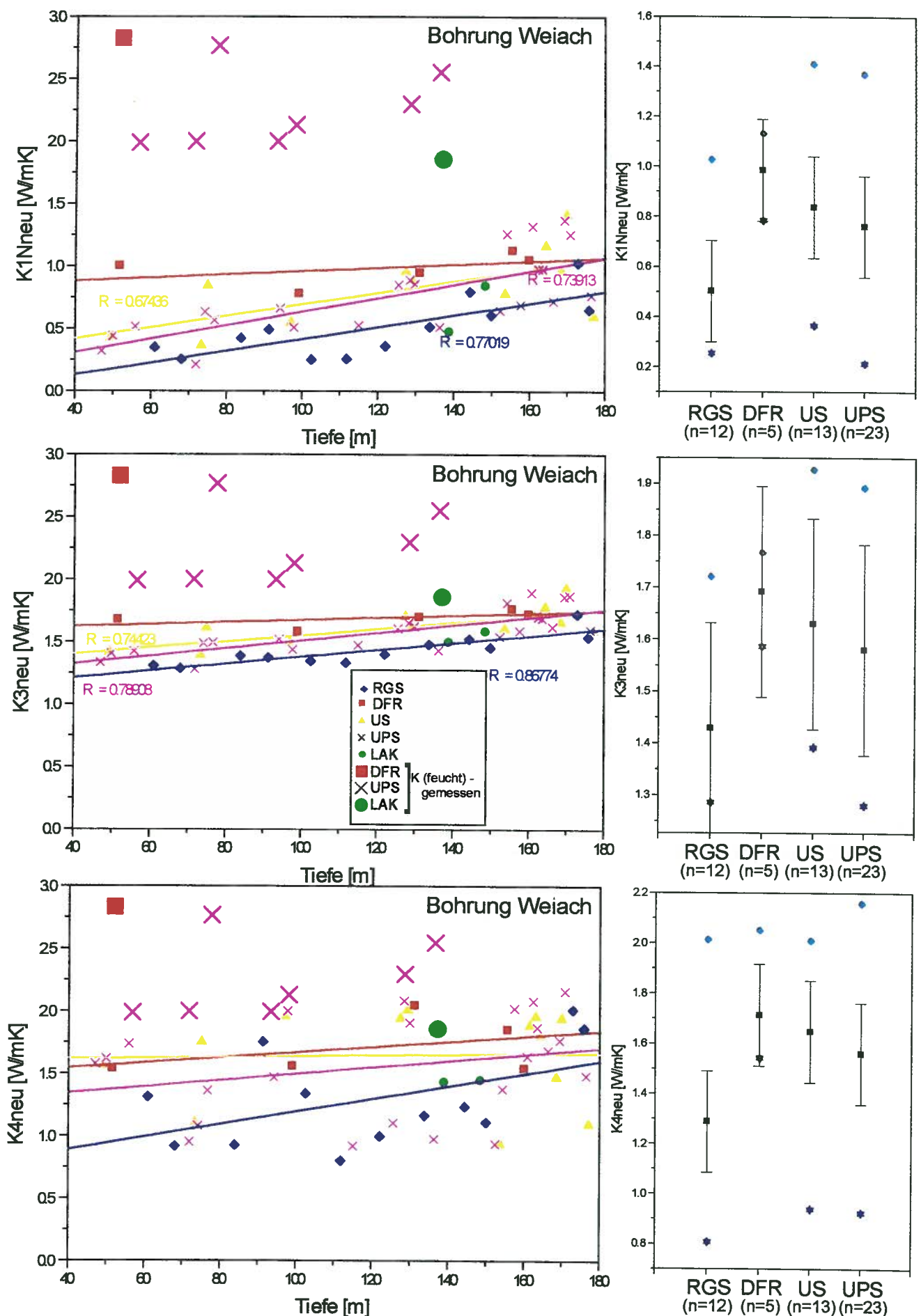


Fig. 13: Korrelation der berechneten Wärmeleitfähigkeiten mit den Architektur-Elementen (Weiach). Eingezeichnet sind auch die an den *feuchten* Proben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Box charts: Farbige Symbole = Minimal- und Maximalwert, schwarze Quadrate = Mittelwert, Linie = 1- σ Abweichung).

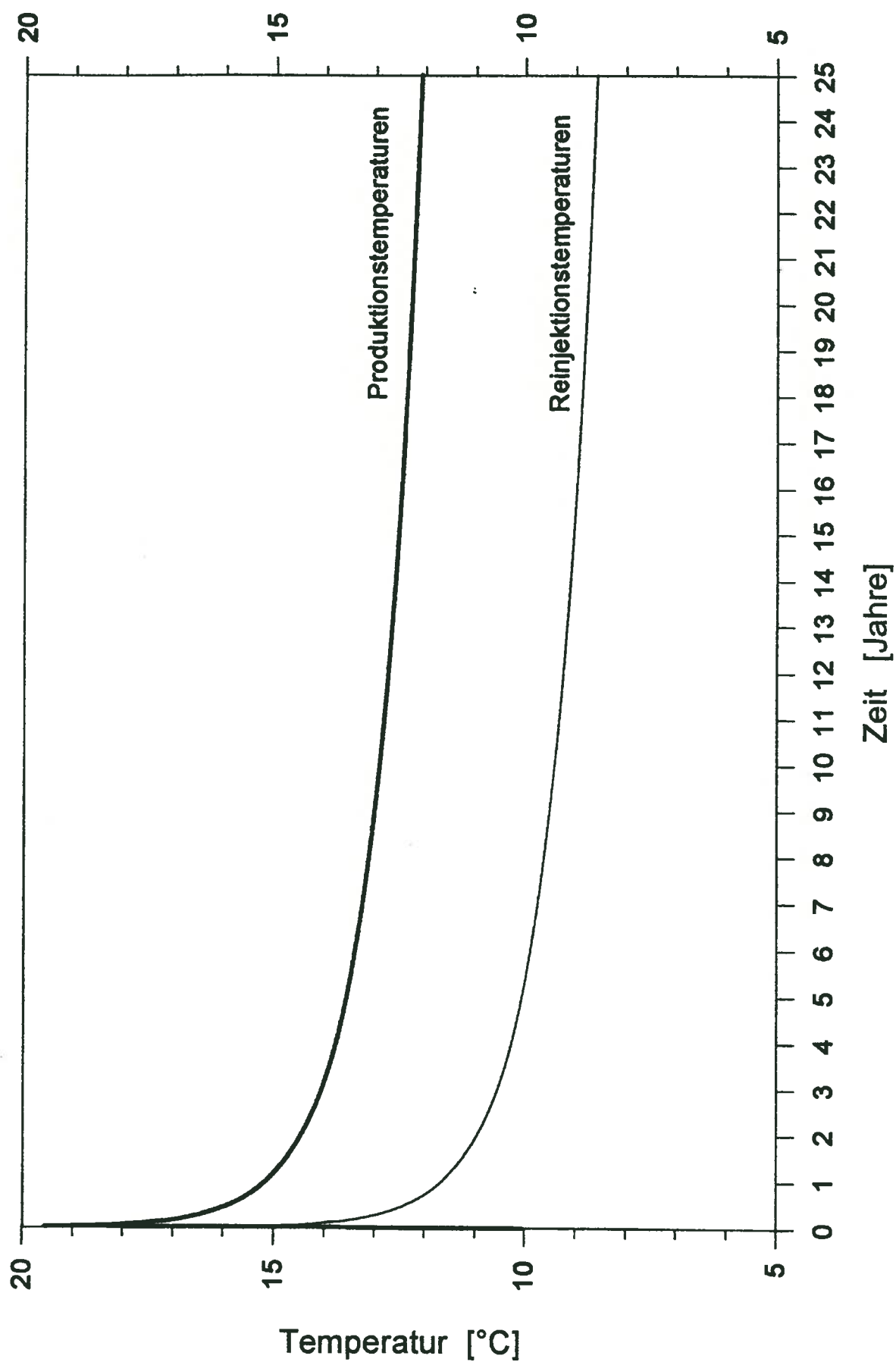


Fig 14: Langzeitabkühlungskurven der Produktions- und Injektionstemperaturen der modellierten Erdwärmesonden, gültig für sämtliche berechneten Varianten.