

Schlussbericht November 2001

Langzeitverhalten der EWS-Anlage in Elgg (ZH)

Spotmessung vom Herbst 2001

ausgearbeitet durch
Dr. Walter J. Eugster
Polydynamics Engineering Zürich
Malojaweg 19, 8048 Zürich
wje@polydynamics.ch

Zusammenfassung

Nach den Messkampagnen in den Jahren 1986 - 1991 und 1996 - 1998 wurden im August/September 2001 erneut die Untergrundtemperaturen im Nahbereich der Erdwärmesonde in Elgg (ZH) gemessen. Die neuen Messdaten zeigen im Rahmen der aufgezeigten Genauigkeitsbetrachtung das erwartete Resultat: Die Untergrundtemperaturen, gemessen jeweils unmittelbar vor Beginn der neuen Heizperiode, bleiben über die letzten Betriebsjahre stabil. Dies auf einem Niveau, welches ca. 1.8 K tiefer liegt als vor der ersten Inbetriebnahme im Dezember 1986 der reinen Heizungs-Anlage.

Auch die Extrapolationen der Untergrundtemperaturen im Nahbereich der Erdwärmesonde Elgg auf 30 und 50 Betriebsjahre auf Grund der bereits durchgeführten Modellrechnungen (EUGSTER, 1998) und der bisherigen Messungen bestätigen dieses Resultat.

Résumé

Après les mesurages dans les années 1986 – 1991 et 1996 – 1998, les températures du sous-sol autour de la sonde géothermique de Elgg étaient mesurées de nouveau en 2001 entre fin d'Août et fin de Septembre. Dans le cadre de la précision de la mesure, les nouveaux résultats montrent la tendance prédite: La température autour de la sonde au début d'une phase de chauffage reste stable pendant les dernières années d'opération. Le niveau de la température relative à la situation avant la première prise en opération de l'installation en 1986 est environ 1.8K plus bas.

L'extrapolation de la température du sous-sol pour 30 et 50 années d'opération sur la base des simulations numériques effectuées par EUGSTER (1998) et sur la base des mesures effectives montrent la même résultat.

Summary

After the complete measurement campaigns during the years 1986 – 1991 and 1996 – 1998, the ground temperatures in the near field of the BHE plant at Elgg (ZH) have been measured again in the autumn of 2001 (between end of August and end of September). Within the given accuracy of the measurements the results show the predicted behaviour: The ground temperatures in the near field of the BHE just before starting the new heating season are stable over the last years. The absolute values during the last years are some 1.8 K deeper than before the first going into operation in December 1986.

Also the extrapolation of the subsurface temperatures in the nearfield of the BHE for 30 and 50 years of operation of the Elgg plant, based on the formerly performed numerical simulations (EUGSTER, 1998) and based on the previous measurement results, show the same results.

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

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Zusammenfassung | 1 |
| Résumé | 1 |
| Summary | 1 |
| 1. Einleitung..... | 3 |
| 1.1. Ausgangslage..... | 3 |
| 1.2. Ziel der Arbeit..... | 3 |
| 1.3. Vorgehen..... | 3 |
| 2. Messkampagne Herbst 2001..... | 4 |
| 2.1. Zustand der Messgeräte / Messfühler..... | 4 |
| 2.2. Messdauer..... | 4 |
| 2.3. Zeitlicher Ablauf der Untergrundtemperaturen im Nahbereich der EWS | 4 |
| 2.4. Vertikale Temperaturverteilung im Nahfeld der Erdwärmesonde..... | 6 |
| 3. Diskussion und Schlussfolgerungen..... | 9 |
| 4. Literaturverzeichnis | 14 |

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die Erdwärmesonden-Anlage in Elgg (ZH) gehört zu den best untersuchten Anlagen in ganz Europa. Während bei den üblichen P+D-Anlagen des Bundesamtes für Enrgie primär die Energiebilanz einer Anlage erfasst wird, lag bei der Elgger Anlage von Beginn her das Hauptgewicht bei der Messung der Untergrundtemperaturen im Nahbereich der Sonde. Diese Temperaturwerte werden in ca. 50 und 100 cm Entfernung von der coaxialen Einzelsonde in Elgg gemessen.

Das ursprüngliche Messprojekt dauerte von 1986 bis Herbst 1991 (mit Verlängerungen). Im Herbst 1991 wurden die mobilen Messgeräte (Digitales Multimeter, Scanner und PC) entfernt. Mit Ausnahme der Aussentemperaturfühler wurden aber sämtliche Messfühler an ihrem Ort belassen. Aus dieser Zeit stammt eine lückenlose Messreihe der Untergrundtemperaturen ab Dezember 1991 (Messbeginn). Dieses erste Projekt wurde durch das Bundesamt für Energie, durch den Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) sowie durch den Kanton Zürich finanziert. Die Resultate sind in EUGSTER (1991) und in EUGSTER ET AL. (1992) enthalten.

Zwischen Herbst 1996 und Herbst 1998 wurde die Messkampagne wieder reaktiviert. Die mobilen Messgeräte wurden wieder installiert und an die Messfühler angeschlossen. Aus dieser Zeit liegt ebenfalls eine lückenlose Datenreihe vor. Diese Messdaten wurden insbesondere zu umfangreichen Modellrechnungen verwendet. Die Resultate sind in EUGSTER (1998) enthalten. Finanziert wurde dieses Projekt vom Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL).

Nach Ablauf dieser zweiten Messkampagne wurden sämtliche Messgeräte vor Ort belassen.

Im vorliegenden Kurzbericht wird nur auf die neuen Daten eingegangen.

1.2. Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Durchführung einer Spotmessung der Untergrundtemperaturen im Herbst 2001 zum Festhalten der thermischen Situation im Untergrund nach dem 15. abgeschlossenen Betriebsjahr.

1.3. Vorgehen

Die vor Ort verbliebenen Messgeräte werden wieder in Betrieb genommen. Dabei wird vom Funktions-Status-Quo der Messfühler ausgegangen, d.h. es wird in Kauf genommen, dass vielleicht einige der 1986 installierten Messfühler nicht mehr voll funktionstüchtig sind.

2. Messkampagne Herbst 2001

2.1. Zustand der Messgeräte / Messfühler

Gegenüber dem Abschluss der letzten Messkampagne im Jahr 1998 konnte ein einziger Fühler nicht mehr korrekt gemessen werden: Der Pt100-Messgeber in 1.9 m Tiefe und in 0.5 m Abstand von der koaxialen Erdwärmesonde. Die übrigen Fühler liefern auf den ersten Blick vernünftige Antworten (siehe dazu auch Kapitel 2.2).

Im Gegensatz zur erwähnten 2. Messkampagne (1996 - 1998) wurde diesmal aus Kostengründen das Digitale Multimeter (DVM; Herzstück der Messkampagne) nicht neu geeicht. Die Funktion vom Multimeter und Scanner war jedoch während der ersten Messvorgänge im August 2001 (=Testphase) einwandfrei.

Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Messgeräte nach wie vor problemlos funktionieren.

2.2. Messdauer

Die Messungen wurden zwischen 27. August 2001, ca. 12 Uhr, und 25. September 2001, ca. 12 Uhr durchgeführt.

2.3. Zeitlicher Ablauf der Untergrundtemperaturen im Nahbereich der EWS

Der Verlauf der stündlich erfassten Messdaten zeigt, dass die Temperaturfühler im Untergrund mehrheitlich in vertrauenswürdigem Zustand sind. Figur 1 zeigt den Verlauf der oberflächennahen Temperaturfühler der Messsonde Nr. 3 für Tiefen zwischen 10 und 100 cm.

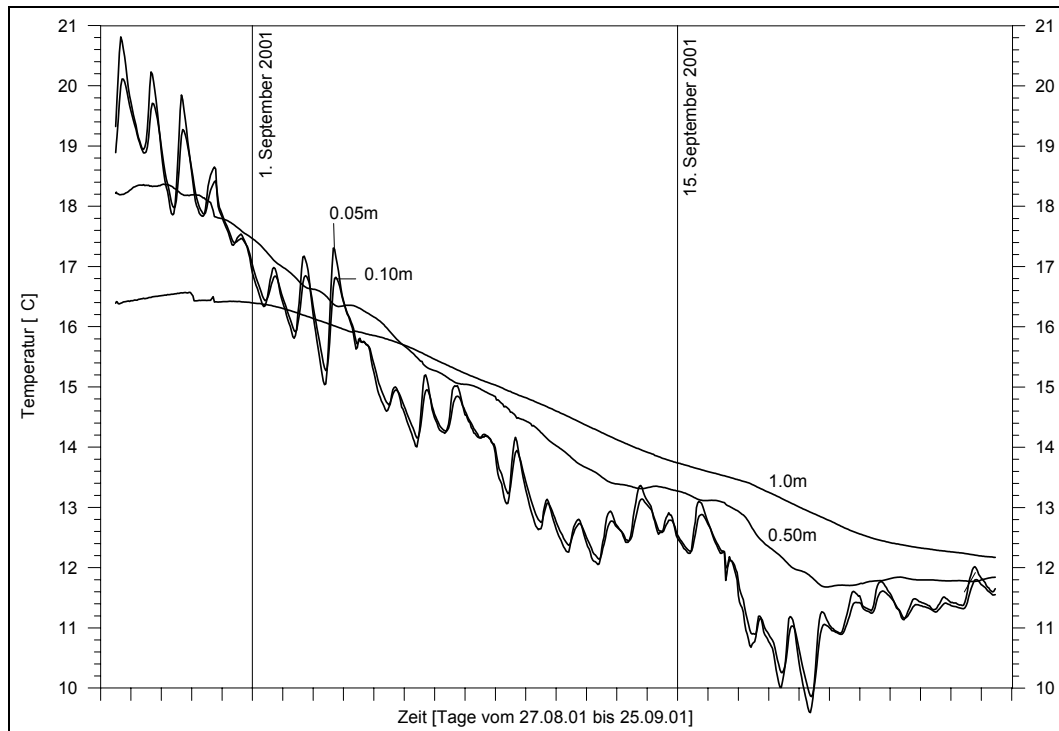
Diese Messwerte zeigen einen vertrauenswürdigen Verlauf. Es sind keine Ausreisser festzustellen. Die starken Schwankungen der oberflächennächsten Fühler (5 und 10 cm) sind plausibel für die Einflüsse der Atmosphäre auf diese Tiefenlage.

Figur 2 zeigt den Verlauf der Temperatur-Fühlerkette in ca. 1 m Abstand zur Erdwärmesonde (genaue Abstände siehe EUGSTER, 1991). Die Tiefenlage der Fühler liegt bei 1, 2, 5, 10, 20, 35, 50, 65, 85 und 105 m. Der Temperaturfühler in 35 m Tiefe gibt keine brauchbare Antwort. Auf die Darstellung dieser Werte wurde deshalb verzichtet.

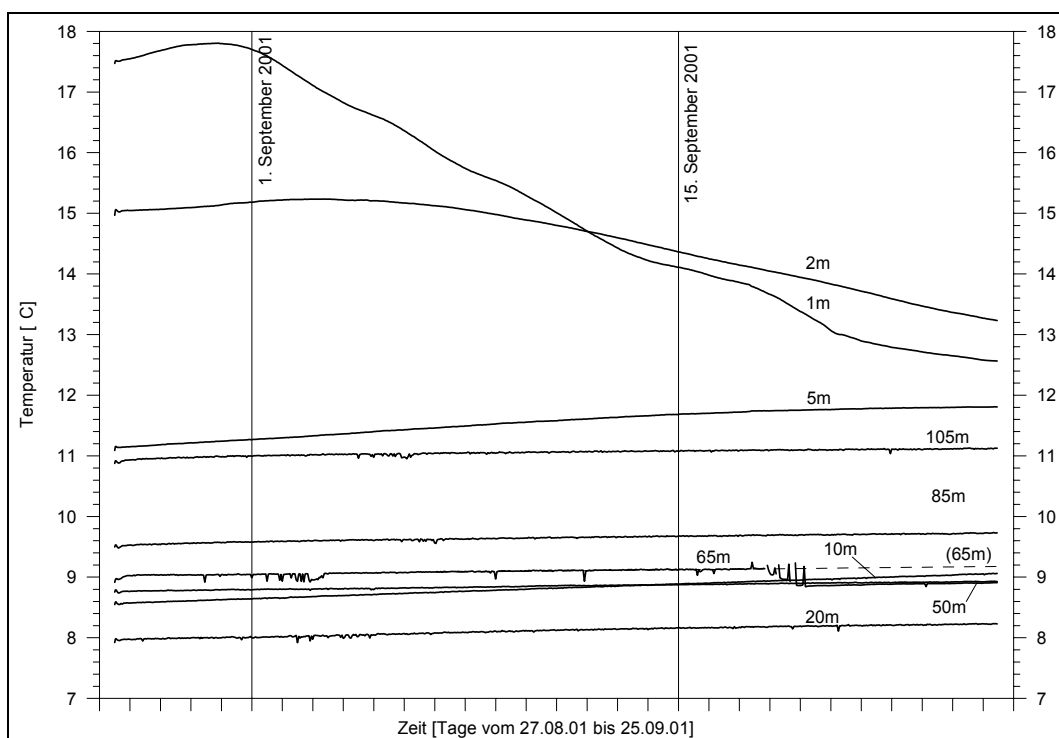
Der Fühler in 65 m Tiefe zeigt offensichtlich gewisse Störungen in seinem Verhalten. Zwischen 17. und 20. September sind deutliche Schwankungen feststellbar. Danach liegt die Temperaturantwort dieses Fühlers bei rund 0.3K tiefer als vorher. Deshalb wurde die vorangegangene Tendenz bis Ende Messkampagne verlängert (gestrichelte Linie). Die übrigen Fühler zeigen ein plausibles Verhalten.

Figur 3 zeigt den Verlauf der Temperatur-Fühlerkette in ca. 50 cm Abstand zur Erdwärmesonde (genaue Abstände siehe EUGSTER, 1991). Da das Fixierungsseil für diese Messsonde beim Einbau gerissen ist, liegt die Messsonde in einer um 90 cm zu tiefen Lage. Die Fühler liegen also in einer Tiefe von 1.9, 2.9, 5.9, 10.9, 20.9, 35.9, 50.9, 65.9, 85.9 und 105.9 m. Der Temperaturfühler in 1.9 Tiefe liefert keine brauchbare Antwort mehr. Auf die Darstellung dieser Werte

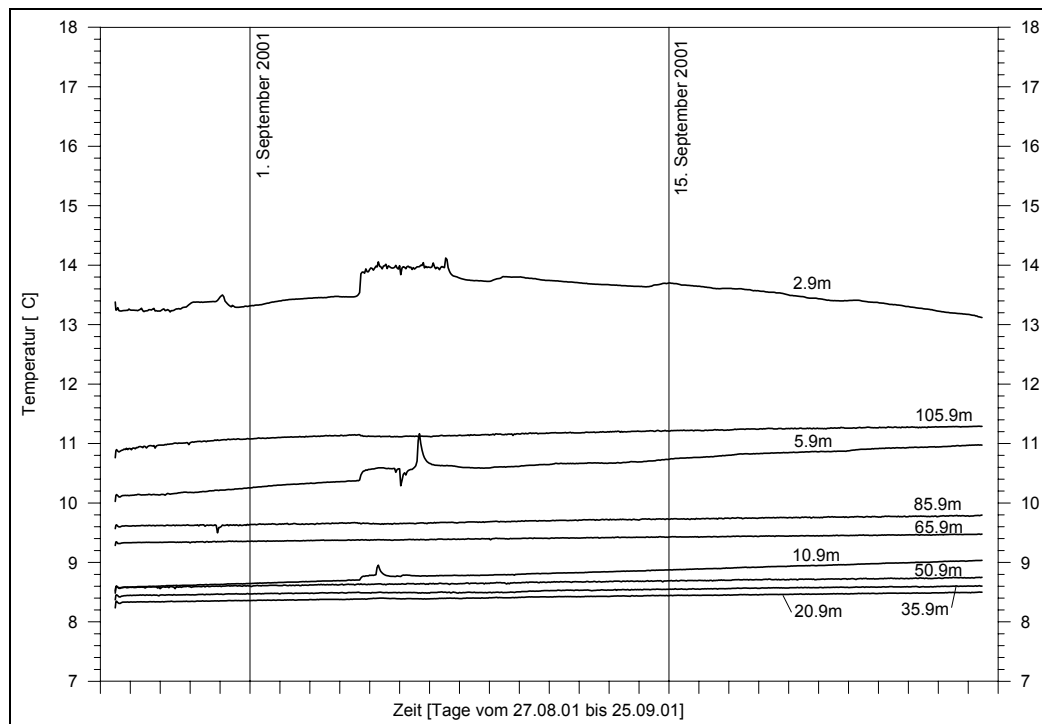
wurde deshalb ebenfalls verzichtet. Der Fühler in 5.9 m Tiefe könnte allenfalls um ca. 0.2K zu hohe Werte anzeigen.



Figur 1: Temperaturverlauf der oberflächennahen Temperaturfühler der Messsonde MS3 in 5, 10, 20 und 100 cm Tiefe. Der Abstand zur EWS beträgt ca. 3m. Der Fühler in 50 cm Tiefe ist seit ca. 1990 nicht mehr funktionsfähig.



Figur 2: Temperaturverlauf der Temperaturfühlerkette der Messsonde MS2 in 1, 2, 5, 10, 20, 35, 50, 65, 85 und 105 m Tiefe. Der Abstand zur EWS beträgt ca. 100 cm. Der Fühler in 35 m Tiefe ist nicht mehr funktionstüchtig und wird deshalb nicht mehr angezeigt. Die Temperatur des Fühlers in 65 m Tiefe (nicht nachvollziehbare Messwerte) wurde für die Zeit nach dem 18. September 2001 graphisch verlängert (gestrichelte Linie).



Figur 3: Temperaturverlauf der Temperaturfühlerkette der Messsonde MS1 in 1.9, 2.9, 5.9, 10.9, 20.9, 35.9, 50.9, 65.9, 85.9 und 105.9 m Tiefe. Der Abstand zur EWS beträgt ca. 50 cm. Der Fühler in 1.9 m Tiefe ist nicht mehr funktionstüchtig und wird deshalb nicht mehr angezeigt. Der Fühler in 5.9 m Tiefe könnte allenfalls um ca. 0.2K zu hohe Werte anzeigen.

Mit Ausnahme der bisher erwähnten Unregelmässigkeiten dürfen die übrigen Messwerte als recht vertrauenswürdig eingestuft werden. Zu erwähnen ist, dass in den Tiefen 10 m und 65 m bei Untersuchungen während der 1. Messkampagne (1986 – 1991) messbare Grund- bzw. Hangwasserströme feststellbar waren.

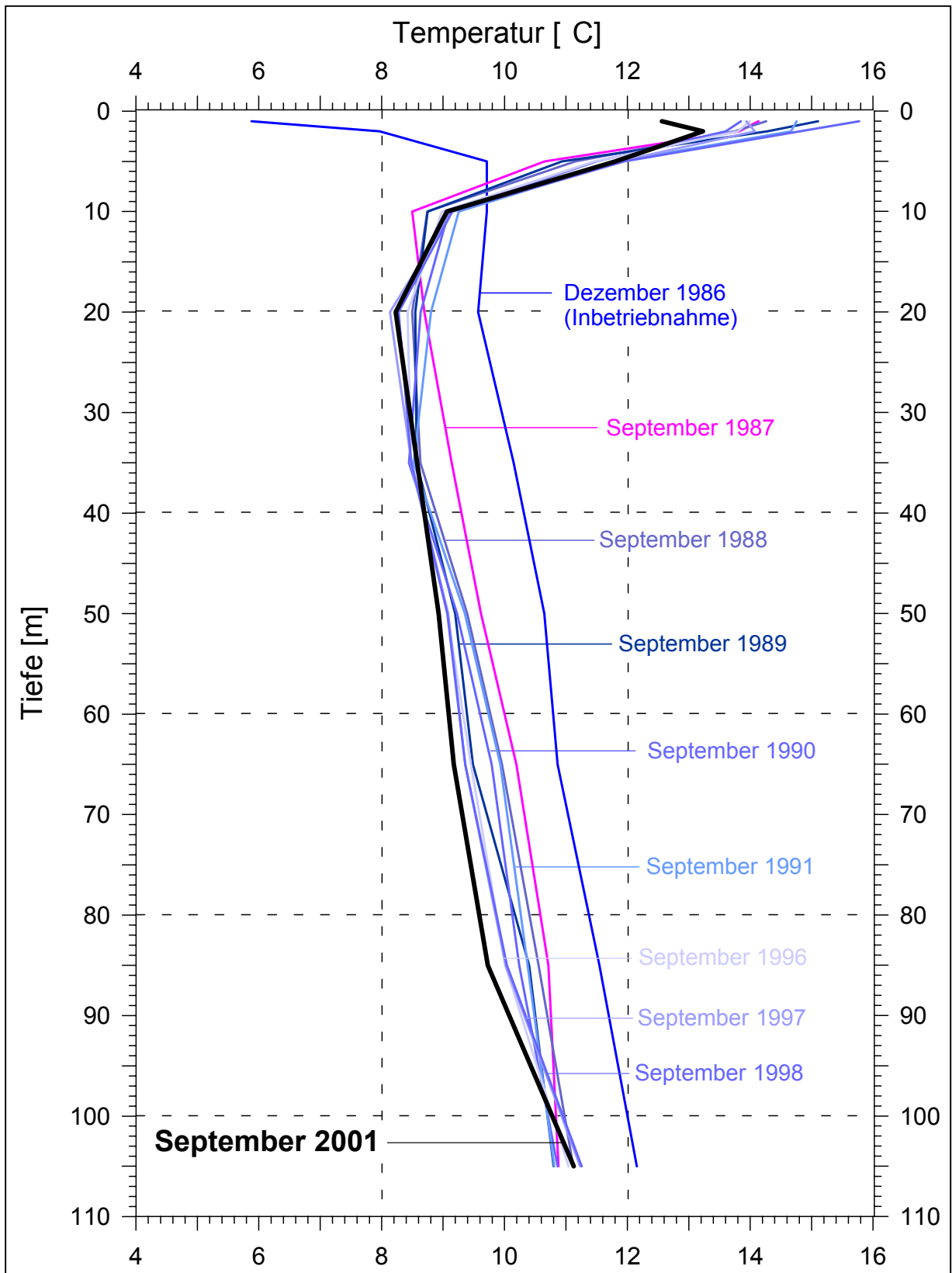
2.4. Vertikale Temperaturverteilung im Nahfeld der Erdwärmesonde

Die Figuren 2 und 3 bilden die Basis für die Darstellung der Temperatur-Tiefenverteilung um die EWS in Elgg. Als Vergleich dienen die entsprechenden Werte aus den früheren Messkampagnen.

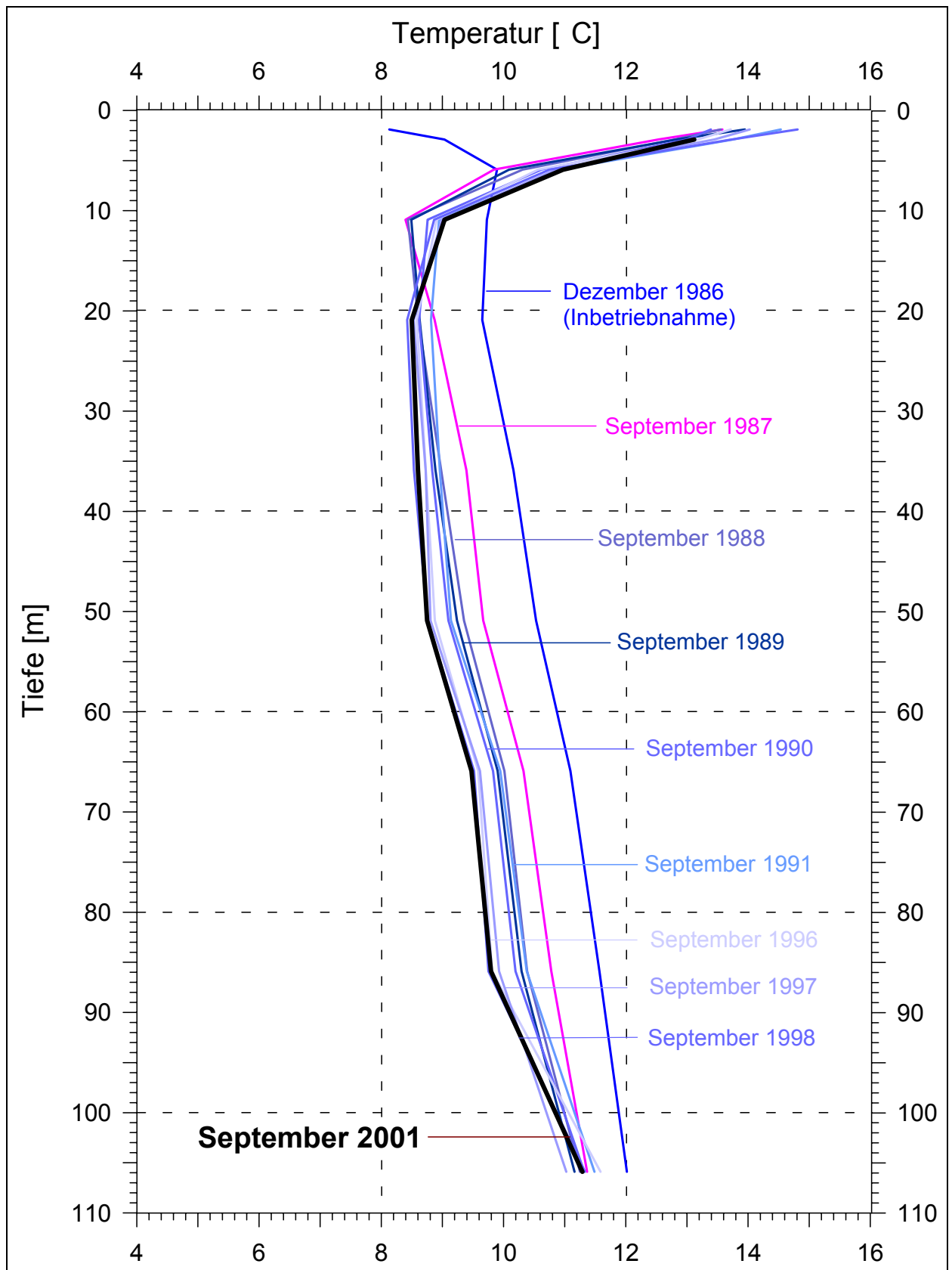
Figur 4 zeigt die aktualisierte Temperatur-Tiefenverteilung der Messsonde 2 (1.0 m Abstand von der Sonde) und Figur 5 jene der Messsonde 1 (0.5 m Abstand von der Sonde). Die fehlenden Werte innerhalb der Messreihe wurden interpoliert bzw. auf die in Figur 2 abgeschätzten Werte extrapoliert.

In 1 m Abstand von der Erdwärmesonde (Figur 4) liegt die aktuelle Kurve September 2001 im Bereich bis 50 m Tiefe innerhalb der Kurvenschar der früheren Messungen. Bis in eine Tiefen von bis zu 20 m sind die Temperaturen durch die Atmosphäre beeinflusst. Zwischen 50 und 85 m Tiefe zeigt die neue Kurve eine Abkühlung von ca. 0.2K gegenüber den Messdaten von 1998. In 105 m Tiefe, d.h. knapp unterhalb des Erdwärmesondenfusses, liegt die aktuelle Temperatur wiederum im Bereich der früheren Messungen.

In 50 cm Abstand von der Erdwärmesonde (Figur 5) liegt die aktuelle Kurve (September 2001) unterhalb von 20 m Tiefe (atmosphärischer Einfluss) durchwegs im Bereich der Messwerte aus den Jahren 1996 bis 1998.



Figur 4: Temperatur-Tiefenverlauf um die koaxiale Erdwärmesonde in Elgg (ZH) in 100 cm Abstand. Dargestellt ist die Temperatur-Tiefenverteilung jeweils unmittelbar vor Beginn der neuen Heizperiode im September des angegebenen Jahres. Der Temperaturwert in 35 m Tiefe ist ein linear interpolierter Wert. Die Kurve Dezember 1986 zeigt den Zustand vor Inbetriebnahme der Heizungsanlage an.



Figur 5: Temperatur-Tiefenverlauf um die koaxiale Erdwärmesonde in Elgg (ZH) in 50 cm Abstand. Dargestellt ist die Temperatur-Tiefenverteilung jeweils unmittelbar vor Beginn der neuen Heizperiode im September des angegebenen Jahres. Der Temperaturwert in 65 m Tiefe wurde linear extrapoliert gemäss Figur 2. Die Kurve Dezember 1986 zeigt den Zustand vor Inbetriebnahme der Heizungsanlage an.

3. Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Winter 2000/2001 war die Erdwärmesonden-Anlage Elgg wenig belastet, da das Gebäude zwar beheizt, jedoch nicht bewohnt war. Allerdings wurden Differenzen in der jährlich von der Anlage abgegebenen Heizenergie von knapp 40% auch in den früheren Messkampagnen festgestellt (EUGSTER, 1991 und EUGSTER 1998)

Wie in den vorangegangenen Messreihen, deckt sich der Verlauf der beiden Temperaturprofile in 50 und 100 cm Abstand von der Erdwärmesonde weitgehend – auch wenn die optische Form der beiden Kurven unterschiedlich ist. Die Differenz zwischen zwei vergleichbaren Temperaturfühlern unterhalb von 20 m liegt bei maximal 0.3K (siehe Tabelle 1: 65 m Tiefe, Jahr 2001). Dies deutet wahrscheinlich auf einen „echten“ Messdifferenz hin, da im aktuellen Jahr kaum mit einem verbleibenden ausgeprägten Temperaturtrichter zu rechnen ist.

*Tabelle 1: Messwerte und Differenz zwischen den Temperaturfühlern in 50 cm (MS1) und 100 cm (MS2) Abstand von der EWS im Vergleich der Jahre 1997, 1998 und 2001. Negative Differenzen entsprechen theoretisch einem noch nicht aufgefüllten Temperaturtrichter. Die Messfühler in der Messsonde MS1 (50 cm Abstand) liegen rund 90 cm tiefer als die entsprechenden Fühler in MS2. (-: kein Messwert; *: extrapolierter Wert).*

| Tiefe (nominal) | 1997 | | | 1998 | | | 2001 | | |
|--------------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|
| | MS1 | MS2 | ΔT | MS1 | MS2 | ΔT | MS1 | MS2 | ΔT |
| [m] | [°C] | [°C] | [K] | [°C] | [°C] | [K] | [°C] | [°C] | [K] |
| 1 | 14.03 | 13.94 | + 0.09 | 14.81 | 15.78 | - 0.97 | - | 12.56 | - |
| 2 | 13.45 | 14.08 | - 0.63 | 13.73 | 14.81 | - 1.08 | 13.12 | 13.23 | - 0.11 |
| 5 | 10.86 | 11.86 | - 1.00 | 10.75 | 11.95 | - 1.20 | 10.98 | 11.81 | - 0.83 |
| 10 | 8.99 | 9.14 | - 0.15 | 8.86 | 9.15 | - 0.29 | 9.04 | 9.06 | - 0.02 |
| 20 | 8.53 | 8.14 | - 0.39 | 8.42 | 8.28 | + 0.14 | 8.50 | 8.23 | + 0.27 |
| 35 | 8.73 | 8.49 | + 0.24 | 8.53 | 8.48 | + 0.05 | 8.60 | - | - |
| 50 | 8.80 | 9.08 | - 0.28 | 8.76 | 9.07 | - 0.31 | 8.75 | 8.93 | - 0.18 |
| 65 | 9.61 | 9.36 | + 0.25 | 9.52 | 9.36 | + 0.16 | 9.48 | 9.18* | + 0.30 |
| 85 | 9.93 | 10.02 | - 0.09 | 9.75 | 10.04 | - 0.29 | 9.80 | 9.73 | + 0.07 |
| 105 | 11.03 | 11.23 | - 0.20 | 11.33 | 11.26 | + 0.07 | 11.29 | 11.13 | + 0.16 |

Ungeachtet dieser Genauigkeitsbetrachtung zeigt die aktuelle Messreihe, dass der Untergrund auch nach dem Abschluss des 15. Betriebsjahr auf konstantem Niveau bleibt. Gegenüber dem Ruhezustand vom Dezember 1986 verbleibt eine Differenz von ca. 1.8 K.

Die neuen Messdaten haben also die bisherigen Aussagen bestätigt, dass beim Betrieb einer Erdwärmesonden-Anlage zur reinen Gebäudebeheizung die Untergrundtemperatur im Nahbereich der Erdwärmesonde in den ersten Jahren stark abkühlt und nachher mehr oder weniger auf diesem Niveau verbleibt. Diese Aussage ist rein qualitativ und bedeutet, dass sich bei unverändertem Benutzerverhalten die Untergrundtemperaturen im Nahbereich der Erdwärmesonde in den zukünftigen Betriebsjahren kaum mehr messbar ändern.

Diese provoziert allerdings weitere Fragen:

- Was heisst „kaum messbar“?
- Was bedeutet dies konkret für die Anlage in Elgg?
- Wie werden sich dessen Untergrundtemperaturen in den kommenden Betriebsjahren verändern?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden die Untergrundtemperaturen in 1 m Abstand von der Erdwärmesonde für den Zeitpunkt nach 30 und nach 50 Betriebsjahren prognostiziert. Dabei kommen zwei unterschiedliche Ansätze zum tragen:

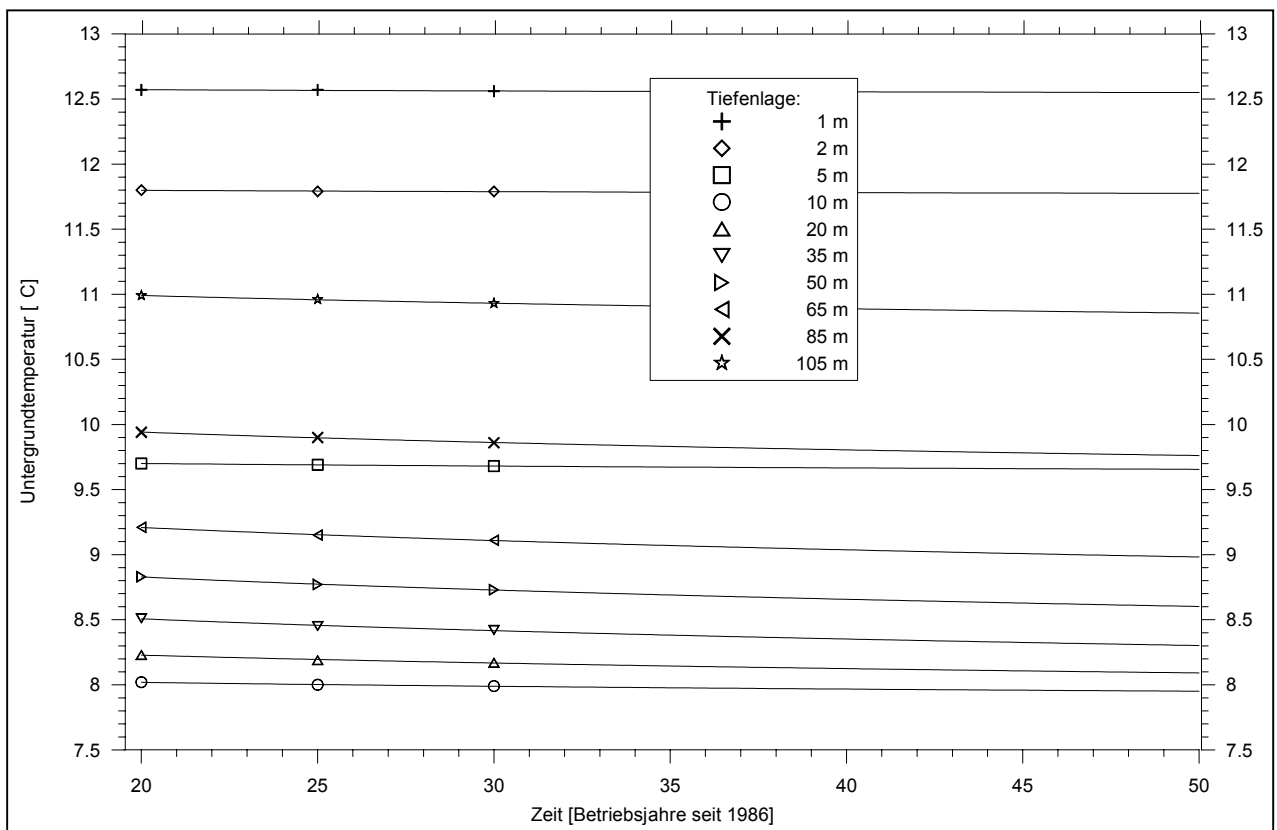
1. In EUGSTER (1998) wurden mit Hilfe von Modellrechnungen die Untergrundtemperaturen mit synthetischen jährlichen Lastprofilen bereits bis auf 30 Betriebsjahre extrapoliert. Aus diesen Simulationen wurden die Temperaturen für die Position der Messfühler in Elgg nach 20, 25 und 30 simulierten Betriebsjahren extrahiert. Diese Temperaturwerte dienen nun als Basis für eine logarithmische Extrapolation auf 50 Betriebsjahre nach folgender Formel:

$$\text{Temperatur} = a \cdot \ln(\text{Betriebsjahre}) + b$$

a, b: Regressionskoeffizienten

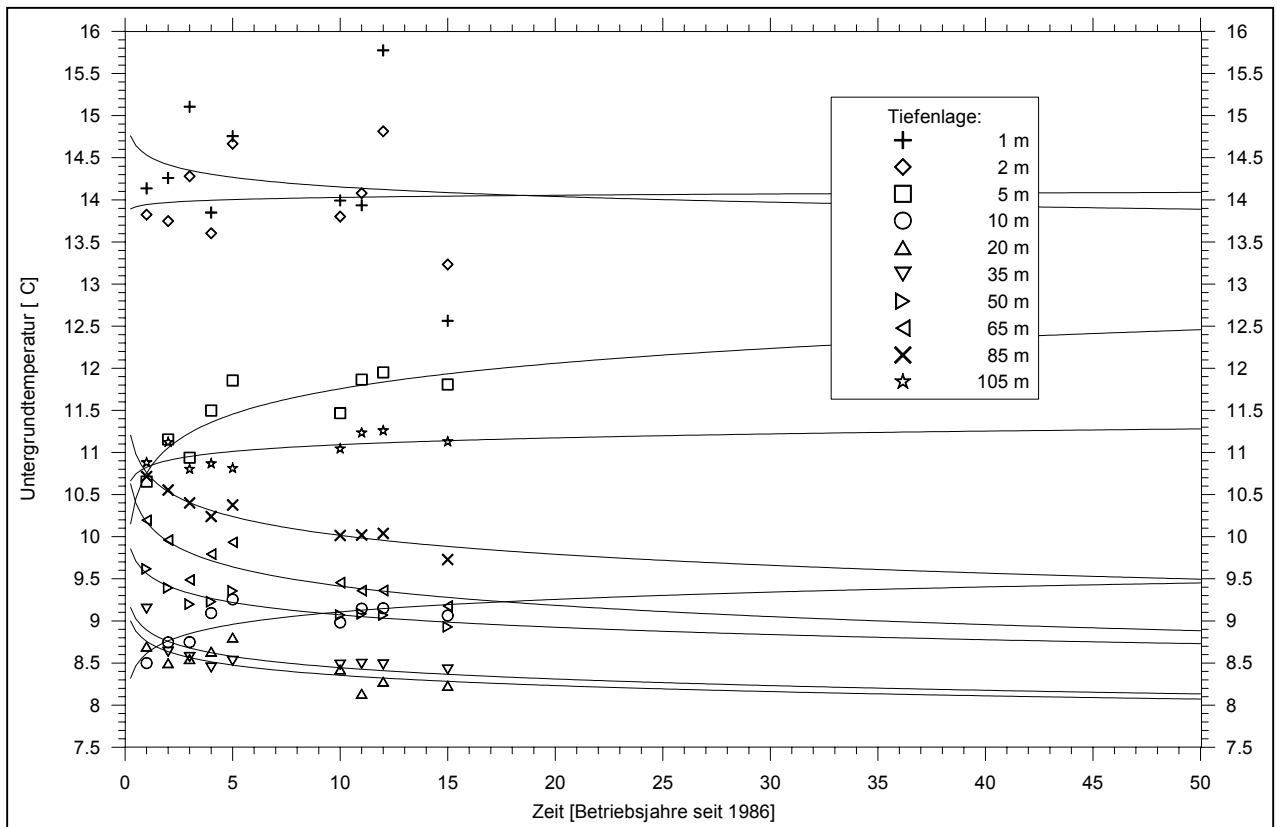
2. Extrapolation der Untergrundtemperaturen aufgrund der bisherigen Messwerte. Dabei wurde der Ruhezustand im Dezember 1986 vor Inbetriebnahme der Anlage jedoch nicht berücksichtigt. Es wurde ebenfalls das gleiche logarithmische Extrapolationsverfahren verwendet.

Diese Extrapolationen der Untergrundtemperaturen in 1 m Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg auf Grund der Modellrechnungen sind in Figur 6 dargestellt. Diese Daten zeigen eine minimale Abkühlung (< 0.1 K) für die Zeit zwischen 30 und 50 Betriebsjahren. Dieses Resultat geht allerdings von absolut identischen synthetischen Lastprofilen aus.



Figur 6: Extrapolierte Temperaturen (logarithmischer Ansatz, siehe Text) für die Messfühler in 1 m Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg auf Grund der in EUGSTER (1986) durchgeführten Modellsimulationen.

Die Extrapolation aufgrund der bisherigen Messresultate ist in Figur 7 dargestellt. Hier sind die Schwankungen wesentlich grösser, da das individuelle Benutzerverhalten, das effektive Lastprofil der bisherigen Jahre und allfällige Messfehler mitberücksichtigt ist. Die zusätzliche Abkühlung zwischen dem 30. und 50. Betriebsjahr beträgt hier je nach Tiefenlage zwischen < 0.1 K und ca. 0.2 K.



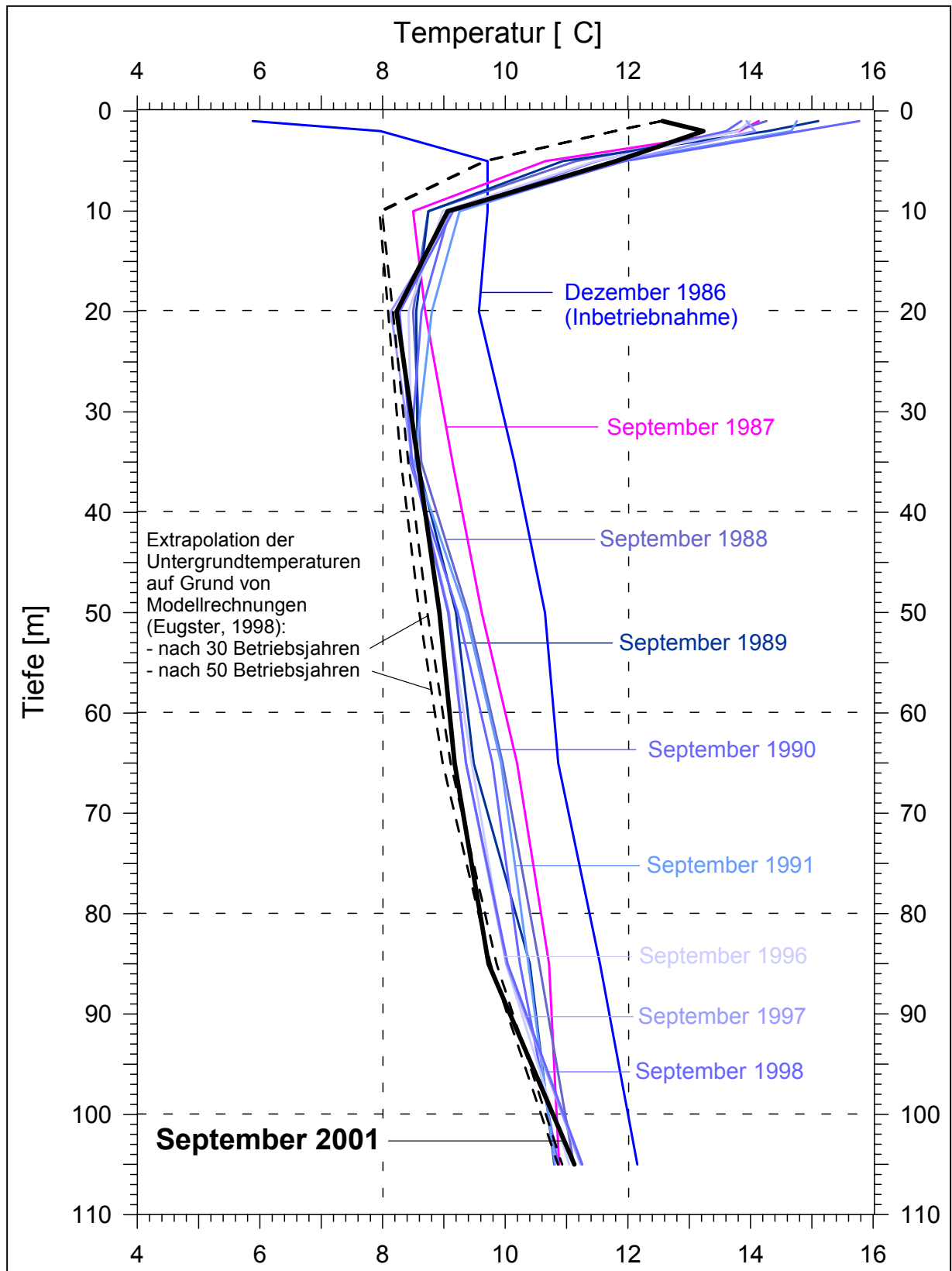
Figur 7: Extrapolierte Temperaturen (logarithmischer Ansatz, siehe Text) für die Messfühler in 1 m Abstand von der Erdwärmesonde in Elgg auf Grund der bisherigen Messungen.

Die Integration dieser beiden Extrapolationen in die bekannten Temperaturprofile ist in Figur 8 (Extrapolation auf Grund der Modellrechnungen) bzw. in Figur 9 (Extrapolation aufgrund der bisherigen Messdaten) dargestellt. Die Temperaturprofile der bisherigen Messungen sind identisch wie in Figur 4.

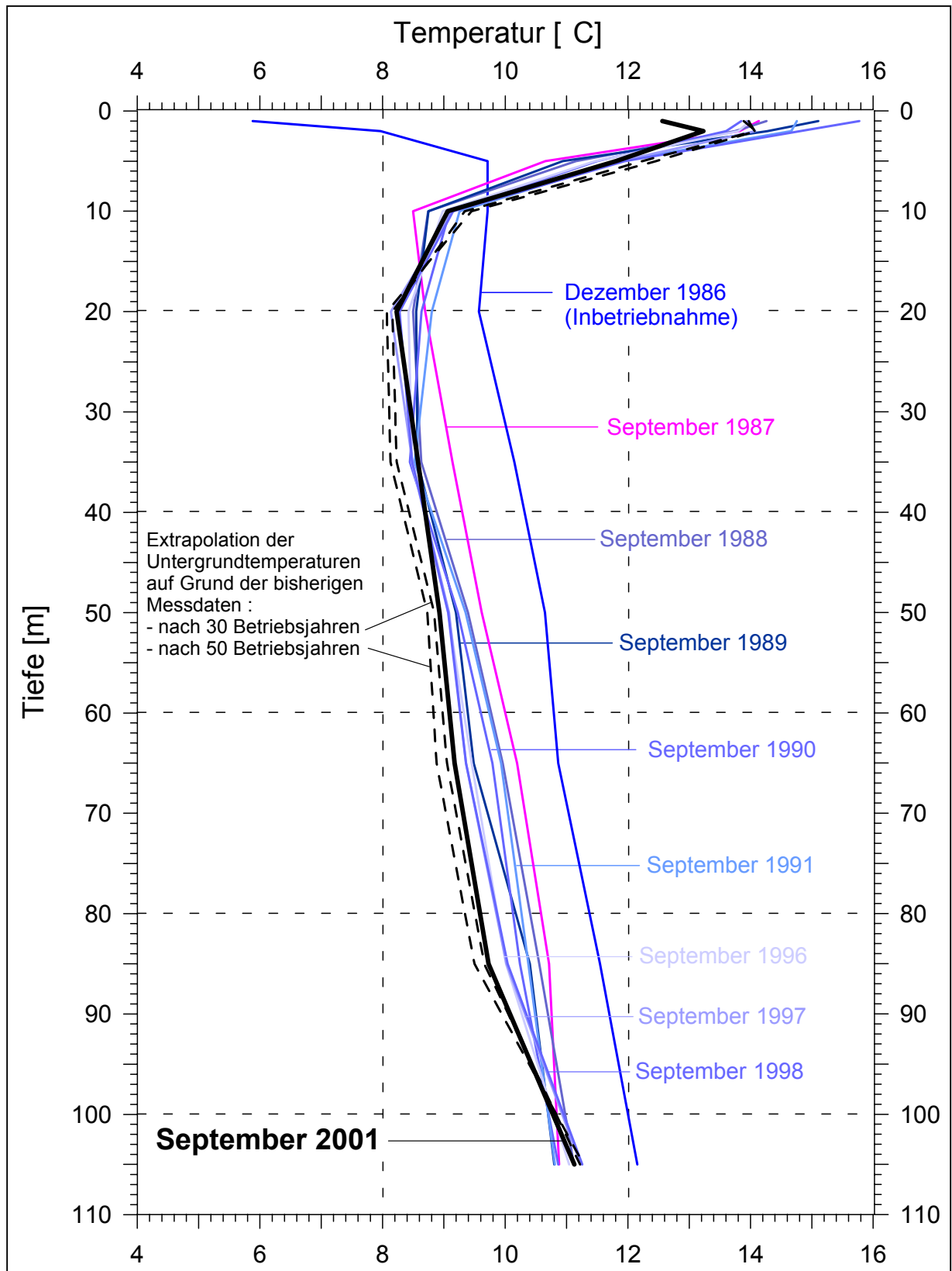
Figur 8 wie auch Figur 9 zeigen, dass verglichen mit den vergangenen 15 Betriebsjahren in der Zukunft tatsächlich keine beträchtlichen Temperaturänderungen mehr zu erwarten sind – gleiches Benutzerverhalten vorausgesetzt. Die zusätzliche jährliche Abkühlung beträgt deutlich weniger als 0.05 K (ca. 0.2 K pro 15 bzw. 20 Betriebsjahre) und liegt somit unterhalb der möglichen Messauflösung.

Dass beide Extrapolationen nicht deckungsgleich sind, erklärt sich aus der unterschiedlichen Datenbasis. Während die auf den Modellrechnungen basierenden Extrapolationen natürlich eine kontinuierliche Zunahme der Temperaturzunahme aufzeigt, folgen die aus den Messdaten extrapolierten Daten der bisher aufgezeichneten Zackenlinie. Die Abweichungen betragen aber durchwegs weniger als 0.2K. Beide Extrapolationsvarianten zeigen also, dass nach 15 Betriebsjahren nicht mehr mit starken Temperaturänderungen im Untergrund zu rechnen ist. Vielmehr ist das postulierte Temperaturgleichgewicht erreicht – auch wenn das Niveau dieses Gleichgewichtes mit den kommenden Jahren noch geringfügig abnehmen wird.

Obwohl nach Abschluss des vorliegenden Projektes die mobilen Messgeräte entfernt worden sind, wird empfohlen, im Jahr 2004 eine weitere Spotmessung und im Jahr 2006 (20. Betriebsjahr) eine vollständige 12 Monate dauernde Messkampagne durchzuführen. Dies hängt allerdings rein praktisch von den Besitzerverhältnissen der Liegenschaft in Elgg ab. Zur Zeit steht eine Handänderung bevor. Ob die neuen Besitzer die Anlage unverändert belassen und an einer weiteren Untersuchung interessiert sind, lässt sich erst zum gegebenen Zeitpunkt feststellen.



Figur 8: Aus den Modellrechnungen extrapolierte Temperaturen für 30 und 50 Betriebsjahre kombiniert mit den bisherigen Messresultaten aus 1 m Entfernung von der Erdwärmesonde in Elgg.



Figur 9: Aus den bisherigen Messdaten extrapolierte Temperaturen für 30 und 50 Betriebsjahre kombiniert mit den bisherigen Messresultaten aus 1 m Entfernung von der Erdwärmesonde in Elgg.

Der Autor dankt Frau Rinderer, Betriebsamt Elgg, für den formlos gewährten Zutritt zum Gebäude zur Durchführung der vorliegenden Spotmessungen.

4. Literaturverzeichnis

EUGSTER, W.J. (1991): Erdwärmesonden – Funktionsweise und Wechselwirkung mit dem geologischen Untergrund. Feldmessungen und Modellsimulation. ETH-Dissertation Nr. 9524, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

EUGSTER, W.J., RYBACH, L., HOPKIRK, R.J. (1992): Erdwärmesonden – ihre Funktionsweise und Wechselwirkung mit Boden und Grundwasser. Schlussbericht NEFF-Projekt 324 zuhanden des Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF).

EUGSTER, W.J. (1998): Langzeitverhalten der Erdwärmesonden-Anlage in Elgg/ZH. Schlussbericht PSEL-Projekt Nr. 102 zuhanden des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL).