Nagra
Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra
Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra
Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive

TECHNISCHER BERICHT 88-40

FELSLABOR GRIMSEL

WÄRMETEST
Abschlussbericht

J. Schneefuss
F. Gläss
G. Gommlich
M. Schmidt

MAI 1989

GSF – Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung mbH München, Institut für Tieflagerung Braunschweig

FELSLABOR GRIMSEL/SCHWEIZ
GEMEINSAMES FORSCHUNGSPROGRAMM DER

- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Baden, Schweiz
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Bundesrepublik Deutschland
- GSF – Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München, Bundesrepublik Deutschland

Parkstrasse 23 5401 Baden/Schweiz Telephon 056/20 55 11

Nagra
Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra
Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra
Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive

TECHNISCHER BERICHT 88-40

FELSLABOR GRIMSEL

WÄRMETEST
Abschlussbericht

J. Schneefuss
F. Gläss
G. Gommlich
M. Schmidt

MAI 1989

GSF – Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung mbH München, Institut für Tieflagerung Braunschweig

FELSLABOR GRIMSEL/SCHWEIZ
GEMEINSAMES FORSCHUNGSPROGRAMM DER

- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Baden, Schweiz
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Bundesrepublik Deutschland
- GSF – Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München, Bundesrepublik Deutschland

Parkstrasse 23 5401 Baden/Schweiz Telephon 056/20 55 11

VORWORT

Bei Konzepten, die die Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen vorsehen, ist die Kenntnis des Wirtgesteins und der angrenzenden Gesteinsschichten von grundlegender Bedeutung. Die Nagra betreibt deshalb seit Mai 1984 das Felslabor Grimsel in 450 m Tiefe im Kristallin des Aarmassivs. Die generelle Zielsetzung für die Arbeiten in diesem System von Versuchsstollen umfasst insbesondere

- den Aufbau von Know-how in der Planung, Ausführung und Interpretation von Untergrundversuchen in verschiedenen Experimentierbereichen und

- den Erwerb praktischer Erfahrung in der Entwicklung, Erprobung und dem Einsatz von Testapparaturen und Messverfahren.

Das Felslabor (FLG) wird durch die Nagra betrieben. Die verschiedenen Untersuchungen werden aufgrund eines deutsch-schweizerischen Zusammenarbeitsvertrages durch die Nagra, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) durchgeführt, beide gefördert vom Deutschen Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT).

Eine Uebersicht des FLG und die Zusammenfassungen der Untersuchungsprogramme sind mit Status August 1985 im NTB 85-47 enthalten.

Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen den drei Partnern erstellt. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargelegt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra, BGR oder GSF übereinstimmen.

AVANT-PROPOS

La connaissance de la roche d'accueil et des couches rocheuses avoisinantes est d'importance fondamentale pour l'élaboration de concepts prévoyant le stockage de déchets radioactifs dans des formations géologiques. C'est pour cela que la Cédra exploite depuis mai 1984 le laboratoire souterrain du Grimsel à 450 m de profondeur dans le cristallin du massif de l'Aar. Les objectifs généraux des travaux menés dans ce complexe de galeries d'essais comprennent notamment:

- la constitution d'un savoir-faire dans la préparation, l'exécution et l'interprétation d'essais souterrains dans divers domaines et

- l'acquisition d'expérience pratique dans le développement, la mise à l'épreuve et l'engagement d'appareillages d'essais et de techniques de mesure.

Le laboratoire souterrain est exploité par la Cédra. Les différentes recherches sont réalisées dans le cadre d'un accord de collaboration germano-suisse par la Cédra, la "Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe" (BGR) et la "Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung" (GSF), ces deux dernières instances étant soutenues par le Ministère allemand pour la recherche et la technologie (BMFT).

Un aperçu du laboratoire souterrain et un résumé des programmes de recherches apparaissent dans le rapport NTB 85-47 d'août 1985.

Le présent rapport a été élaboré dans le cadre de la collaboration entre les trois partenaires. Les auteurs ont présenté leurs vues et conclusions personnelles. Celles-ci ne doivent pas forcément correspondre à celles de la Cédra, de la BGR et de la GSF.

FOREWORD

Concepts which foresee the disposal of radioactive waste in geological formations lay great weight on acquiring knowledge of the proposed host rock and the surrounding rock strata. For this reason, Nagra has, since May 1984, been operating the Grimsel Test Site which is situated at a depth of 450 m in the crystalline formation of the Aar Massif. The general objectives of the research being carried out in this system of test tunnels include, in particular

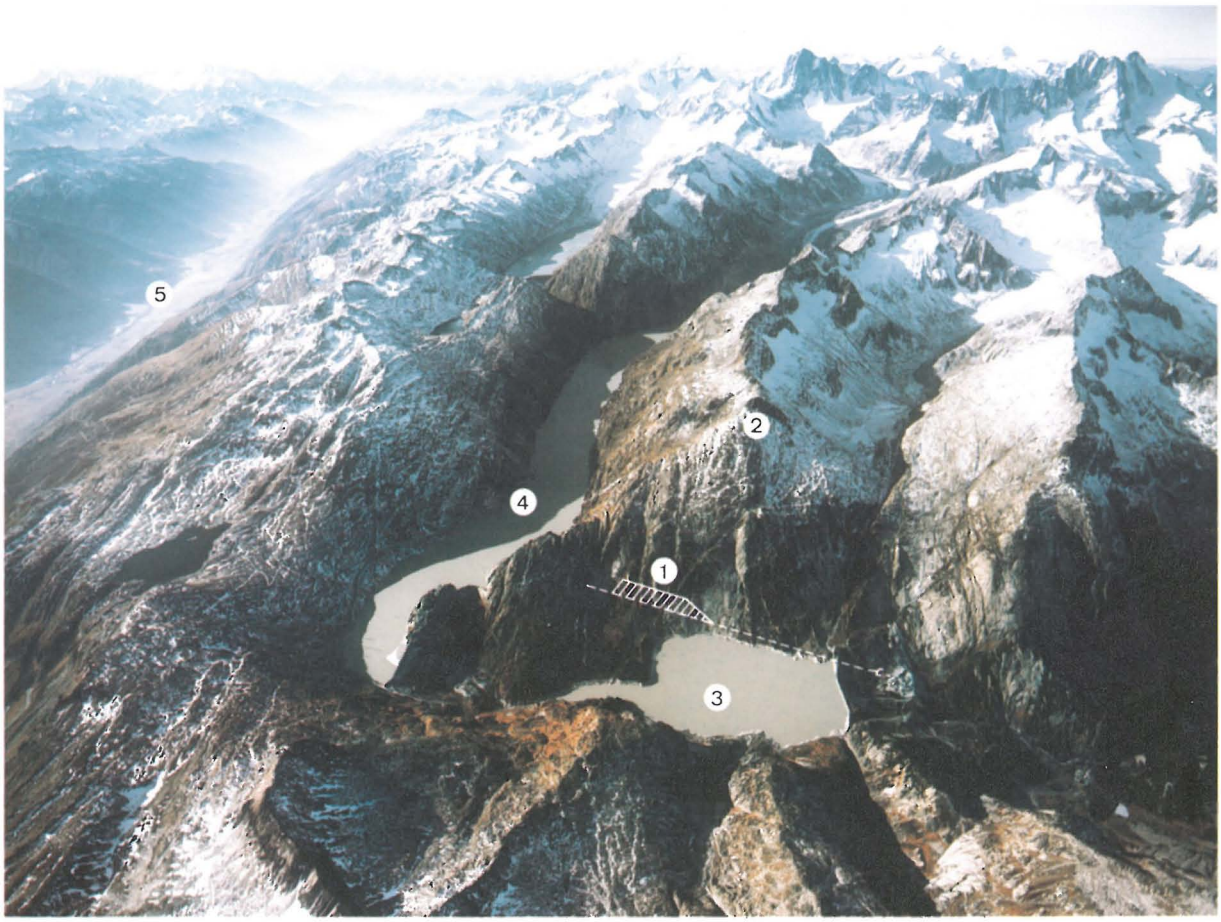
- the build-up of know-how in planning, performing and interpreting underground experiments in different scientific fields and

- the aquisition of practical experience in developing, testing and applying test equipment and measuring techniques.

The Test Site (GTS) is operated by Nagra. On the basis of a German-Swiss cooperation agreement, the various experiments are carried out by Nagra, the Federal Institute for Geoscience and Natural Resources (BGR) and the Research Centre for Environmental Sciences (GSF); the latter two bodies are supported in this venture by the German Federal Ministry for Research and Technology (BMFT).

NTB 85-47 gives an overview of the GTS and a review of the status of the investigation programme as at August 1985.

This report was produced in accordance with the cooperation agreement between the three partners mentioned previously. The authors have presented their own opinions and conclusions, which do not necessarily coincide with those of Nagra, BGR or GSF.



GRIMSEL-GEBIET

Blick nach Westen

1 Felslabor
2 Juchlistock
3 Räterichsbodensee
4 Grimselsee
5 Rhonetal

GRIMSEL AREA

View looking West

1 Test Site
2 Juchlistock
3 Lake Raeterichsboden
4 Lake Grimsel
5 Rhone Valley

FLG FELSLABOR GRIMSEL
GTS *GRIMSEL TEST SITE*

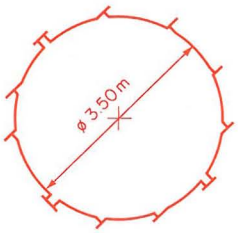
Situation

0 100 m

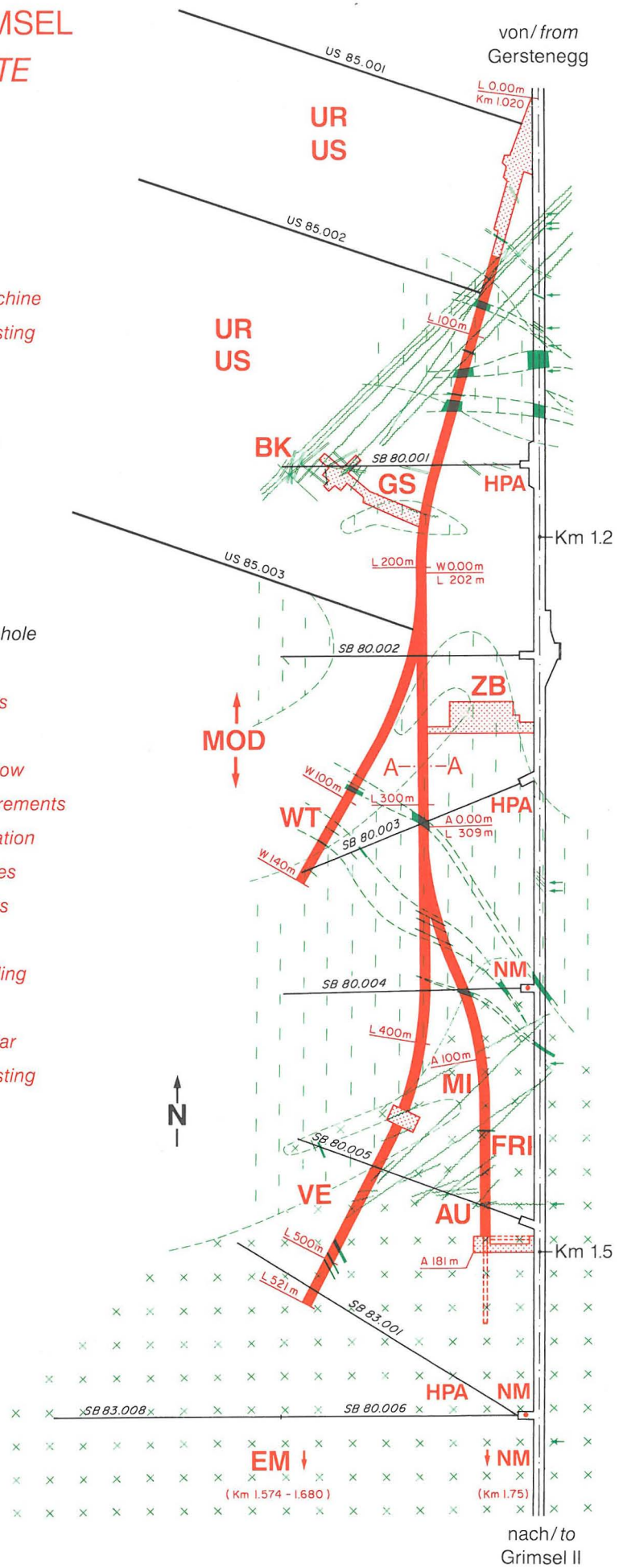
- Zugangsstollen/*Access tunnel*
- Fräsvortrieb/*by tunnel boring machine*
- Sprengvortrieb/*excavated by blasting*
- Zentraler Aaregranit ZAGR / *Central Aaregranite CAGR*
- Biotitreicher ZAGR / *CAGR with high content of biotite*
- Grimsel-Granodiorit / *Grimsel-Granodiorite*
- Scherzone/*Shear zone*
- Lamprophyr/*Lamprophyre*
- Wasserzutritt/*Water inflow*
- SB Sondierbohrung/*Exploratory borehole*
- US US Bohrung/*US borehole*

ZB	Zentraler Bereich/*Central facilities*
AU	Auflockerung/*Excavation effects*
BK	Bohrlochkranz/*Fracture system flow*
EM	El.magn. HF-Messungen/*-measurements*
FRI	Kluftzone/*Fracture zone investigation*
GS	Gebirgsspannungen/*Rock stresses*
HPA	Hydr. Parameter/*Hydr. parameters*
MI	Migration/*Migration*
MOD	Hydrodyn. Modellierung/*H. modeling*
NM	Neigungsmesser/*Tiltmeters*
UR	Untertageradar/*Underground radar*
US	Seismik/*Underground seismic testing*
VE	Ventilationstest/*Ventilation test*
WT	Wärmeversuch/*Heat test*

A — A Schnitt/*Section*



6/88



ZUSAMMENFASSUNG

Die Beseitigung radioaktiver Abfälle soll langfristig und sicher durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen erfolgen. Während in der Bundesrepublik Deutschland die Endlagerung wärmeproduzierender Abfälle in Salzformationen vorgesehen ist, favorisieren andere Länder Sedimente, kristalline oder vulkanische Formation. Die Zusage der Bundesregierung in Deutschland an das Land Niedersachsen, neben den Untersuchungen im Steinsalz auch andere geologische Formationen auf ihre Endlagerfähigkeit zu untersuchen, haben u.a. auch zu einer Kooperation mit der Schweiz geführt.

Das Schweizer Konzept für die Entsorgung radioaktiver Abfälle sieht die Einlagerung in feste, möglichst dichte Gesteinsformationen vor. Zur Erprobung und Weiterentwicklung von Verfahren zum Nachweis der Eignung eines Endlagerstandorts sowie zur Erforschung der Formation Granit als Wirtgestein für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle wird von der NAGRA das "Felslabor Grimsel" (FLG) betrieben. In diesem unterirdischen Labor untersucht die NAGRA zusammen mit externen Partnern die mechanischen, geologischen und hydraulischen Eigenschaften des Gebirges mit Hilfe einer Anzahl von in-situ-Tests. Ein von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung -GSF- durchgeführtes Experiment war der "Wärmetest" (WT). Ein Wärmetest simuliert die Wärmeleistung wärmeproduzierender Abfälle bei der Einlagerung. Derartige Tests wurden an anderen Standorten wiederholt durchgeführt (z.B. Stripa, Asse, Climax). Der Wärmetest im FLG wurde auf die spezifischen Vorgaben des Schweizer Entsorgungsprogramms abgestimmt, welches die Einlagerung in wenig geklüfteten Gebirgspartien mit geringer Wasserführung vorsieht. Die einzulagernden Abfälle werden ca. 30 bis 40 Jahre im Zwischenlager abgekühlt, bis ihre Wärmeleistung bei Einlagerung nicht mehr ausreicht, um gegebenenfalls anstehendes Bergwasser zum Sieden zu bringen.

Unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen wurden für den Wärmetest im FLG folgende Zielsetzungen definiert:

Ziel 1. Erprobung und Weiterentwicklung von Verfahren zur Erkundung, zum Nachweis der Eignung und zur Überwachung eines Endlagers für wärmeproduzierende Abfälle im kristallinen Wirtgestein.

Ziel 2. Untersuchungen der thermischen, mechanischen und hydraulischen Reaktionen eines kristallinen Wirtgesteins auf einen künstlichen Wärmeeintrag.

Ziel 3. Entwicklung und Anwendung eines geeigneten Rechenmodells zur standortspezifischen Modellierung der thermomechanischen Vorgänge im Bereich einer Wärmequelle im kristallinen Wirtgestein.

Planung, Durchführung und Auswertung des Wärmetests erfolgten unter strikter Beachtung der gesetzten Ziele. Bei der Vorbereitung der geomechanischen und geophysikalischen Instrumentierung wurde die Verwendbarkeit der bis dato anderenorts eingesetzten Systeme überprüft und für die spezifischen Bedingungen in diesem Test adaptiert. Während des Betriebs der Systeme im Laufe der Testdauer von ca. 3 Jahren konnte ihre Eignung im wesentlichen nachgewiesen werden. Anderenfalls wurden etwaigen Schwachpunkten durch einen erhöhten Wartungsaufwand Rechnung getragen.

Die gemessenen thermischen, mechanischen und hydraulischen Reaktionen auf den künstlichen Wärmeeintrag werden in diesem Bericht ausführlich dokumentiert und diskutiert. Die thermoinduzierten mechanischen Reaktionen bleiben örtlich begrenzt und erreichen nicht die Größen, die der Eignung einer Endlagerformation abträglich sein könnten. Die Verformungen sind infolge der starken Dehnungsbehinderung durch das umgebende Gebirge sehr klein.

Die aus dieser Dehnungsbehinderung resultierenden Gebirgsspannungen bleiben kleiner als ca. 10 MPa, so daß in einem Endlager in 1200 m Tiefe bei einer maximalen Gebirgstemperatur von 100 °C noch ein hinreichend großer Abstand der resultierenden Gesamtspannung gegenüber der Bruchfestigkeit des Gesteins zu erwarten ist. Eine erhöhte Seismizität konnte während der Testphasen nicht registriert werden. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß infolge der Auf- und Abkühlvorgänge seismische Energie im Kristallbereich freigesetzt wurde.

Zur Gebirgshydraulik wurden Wasserschüttungs- und Druckaufbaumessungen durchgeführt. Die Änderung der Schüttungsraten und der Druckgradienten waren örtlich und zeitlich eng begrenzt. Der Ventilationstest im FLG, in welchem neben anderem ebenfalls die Änderung der hydraulischen Verhältnisse in der Umgebung eines aufgeheizten Hohlraums untersucht wird, bestätigte dieses Ergebnis.

Zur vorbereitenden und versuchsbegleitenden Modellierung der thermomechanischen Verhältnisse im Wärmetest wurde ein einfaches rotationssymmetrisches FEM-Modell verwandt. Die Resultate dienten zunächst zur Auslegung der Instrumentierung und zur Konzipierung des Versuchsablaufs, später dann im Vergleich mit den Messungen zur Beurteilung der Aussagekraft des gewählten Modells im Hinblick auf die gestellte Aufgabe. Zur Beschreibung der Ausbreitung der Temperatur und der Entstehung von Verformungen und Spannungen im Gebirge infolge des künstlichen Wärmeeintrags ist das gewählte einfache Modell ausreichend.

Nach Abschluß der Untersuchungen im Wärmetest können zu den drei oben angeführten Zielen folgende Aussagen gemacht werden:

Ziel 1: Für die Erkundung und Überwachung der Geomechanik eines Endlagerstandorts für wärmeproduzierende Abfälle stehen geeignete Meßverfahren zur Verfügung. Auf einen Wärmetest bei der Erschließung des Endlagers mit den Schwerpunkten Gebirgsspannungen und Gebirgshydraulik sollte nicht verzichtet werden.

Ziel 2: Die Reaktionen des kristallinen Wirtgesteins auf den Wärmeeintrag bleiben lokal begrenzt. Hydraulische thermoinduzierte Effekte sind von nur kurzer Dauer. Die mechanischen Reaktionen infolge der Aufheizung durch die Abfallbehälter gefährden allein nicht die Sicherheit des Endlagers. Sie sind jedoch jeweils mit standortspezifischen Primärzuständen zu überlagern.

Ziel 3: Die relevanten thermomechanischen Reaktionen lassen sich mit relativ geringem Aufwand modellieren. Unverzichtbar jedoch ist die realistische Beschreibung von Gesteinsparametern und Randbedingungen, zu der wenige gezielte Labor- und in-situ-Tests erforderlich sind.

Vorliegender Bericht entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie sonderfinanzierten FE-Projekts: "Untersuchungsprogramm zur Erkundung ausgewählter Eigenschaften von kristallinen Felsformationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (Förderkennzeichen KWA-5315-4)".

INHALTSVERZEICHNIS

		SEITE
ZUSAMMENFASSUNG		IX
INHALTSVERZEICHNIS		XIII
BEILAGENVERZEICHNIS		XV
FIGURENVERZEICHNIS		XVIII
TABELLENVERZEICHNIS		XXI
1	EINLEITUNG	1
2	GEOLOGIE	6
3	WÄRMEEINTRAG	8
3.1	Zielsetzung des Wärmeeintrags	8
3.2	Heizprogramm	10
3.3	Technische Realisierung	16
3.4	Wärmeleistung	17
3.5	Temperaturfeld	22
3.6	Vergleich mit der Modellrechnung	32
3.7	Zusammenfassung	37
4	VERFORMUNGEN DES GEBIRGES	38
4.1	Bedeutung der Verformungen	38
4.2	Großräumige Verformungen	40
4.2.1	Neigungsmessung mit Gezeitenpendeln	41
4.2.2	Präzisionsnivellement	41
4.2.3	Stollenkonvergenzen	49
4.3	Verformungen im erwärmten Bereich	52
4.3.1	Inklinometermessungen	53
4.3.2	Extensometermessungen	56
4.4	Vergleich mit der Modellrechnung	63
4.5	Zusammenfassung	65

5	GEBIRGSSPANNUNGEN	67
5.1	Bedeutung der Gebirgsspannungen	67
5.2	Primärspannungen und Gebirgssteifigkeit	68
5.3	Thermoinduziertes Spannungsfeld	72
5.3.1	Bergwasserdruck	72
5.3.2	Gebirgsdruck	74
5.4	Modellierung des Spannungsfelds	80
5.5	Zusammenfassung	84
6	GEBIRGSHYDRAULIK	85
6.1	Hydrologische Ausgangssituation	86
6.2	Wasserschüttungen in Bohrungen	88
6.3	Gebirgswasserdrücke in Bohrungen	91
6.4	Zusammenfassung	94
7	WÄRMEINDUZIERTE SEISMIZITÄT	96
7.1	Zielsetzung der seismischen Überwachung	96
7.2	Methode	96
7.3	Versuchsfeldbeschreibung	97
7.4	Instrumentierung	100
7.4.1	Bohrlochsonden	101
7.4.2	Leitungssender und -empfänger	102
7.4.3	Transientenspeicher	102
7.4.4	Ereignisdetektor	103
7.4.5	Inbetriebnahme und Ausfallzeiten	104
7.5	Ergebnisse	105
7.5.1	Hammerschlagprofil	105
7.5.2	Fallgewichtsversuche	107
7.5.3	Registrierung anderer Ereignisse	112
7.6	Schlußbetrachtung	115
8	ERGEBNIS DES WÄRMETESTS	117
9	ZUSAMMENFASSUNG	125
	LITERATURVERZEICHNIS	

BEILAGENVERZEICHNIS

Beil. 1.1: Lage der Instrumentenbohrungen

Beil. 1.2: Anordnung der Gebirgsthermometer

Beil. 2.1: Geologischer Längsschnitt durch die Instrumentierungsebene

Beil. 4.1: Stollenkonvergenzen im Querschnitt WT94

Beil. 4.2: Stollenkonvergenzen im Querschnitt WT95

Beil. 4.3 bis 4.5: Inklinometermessungen in Bohrung E3
- während der Vorlaufphase
- während der 1. und 2. Aufheizphase
- von Anfang 1. Abkühlphase bis Ende 2. Abkühlphase

Beil. 4.6 bis 4.8: Inklinometermessungen in Bohrung E2
- während der Vorlaufphase
- während der 1. und 2. Aufheizphase
- von Anfang 1. Abkühlphase bis Ende 2. Abkühlphase

Beil. 4.9 bis 4.11: Inklinometermessungen in Bohrung M1
- während der Vorlaufphase
- Während der 1. und 2. Aufheizphase
- von Anfang 1. Abkühlphase bis Ende 2. Abkühlphase

Beil. 4.12: Geometrie der Extensometer

Beil. 4.13 bis 4.18: Extensometerwege von E1 bis E6 vom 01.03.1985 bis 31.12.1988

Beil. 4.19 bis 4.24: Extensometerwege von E1 bis E6
vom 01.08.1985 bis 31.05.1986

Beil. 4.25: Temperaturverlauf nördlich H2 (E3) vom
01.08.1985 bis 31.05.1986

Beil. 4.26: Temperaturverlauf südlich H1 (E2) vom
01.08.1985 bis 31.05.1986

Beil. 4.27 bis 4.29: Gebirgsspannungen in S1 bis S3 vom
01.08.1985 bis 31.05.1986

Beil. 4.30: Porenwasserdruck in S1 bis S3 vom
01.08.1985 bis 31.05.1986

Beil. 4.31 bis 4.33: Gebirgsmechanische Modellierung - Verformungen

Beil. 5.1: Installation der hydraulischen Druckkissen

Beil. 5.2: Porenwasserdruck in S1, S2, S3

Beil. 5.3: Räumliche Anordnung der hydraulischen Druckkissen

Beil. 5.4: Gebirgsspannungen in S3, Meßstellen 17 bis 20

Beil. 5.5: Gebirgsspannungen in S3, Meßstellen 21 bis 24

Beil. 5.6: Gebirgsspannungen in S3, Meßstellen 17, 18, 21, 22

Beil. 5.7: Gebirgsspannungen in S1, Meßstellen 1 bis 4

Beil. 5.8: Gebirgsspannungen in S1, Meßstellen 5 bis 8

Beil. 5.9: Gebirgsspannungen in S1, Meßstellen 1, 2, 5, 6

Beil. 5.10: Gebirgsspannungen in S2, Meßstellen 9 bis 12

Beil. 5.11: Gebirgsspannungen in S2, Meßstellen 13 bis 16

Beil. 5.12: Gebirgsspannungen in S2, Meßstellen 9, 10, 13, 14

Beil. 5.13: Gebirgsspannungen:
Radialspannungen der oberen Geber

Beil. 5.14: Gebirgsspannungen:
Radialspannungen der unteren Geber

Beil. 5.15: Gebirgsspannungen:
Tangentialspannungen der oberen Geber

Beil. 5.16: Gebirgsspannungen:
Tangentialspannungen der unteren Geber

Beil. 5.17: Gebirgsmechanische Modellierung - FEM-Netz

Beil. 5.18 bis 5.20: Gebirgsmechanische Modellierung -
Gebirgsspannungen

Beil. 5.21: Gebirgsmechanische Modellierung
- Vergleich Rechnung - Messung

Beil. 6.1: Schüttungsmessungen in W1

Beil. 6.2: Schüttungsmessungen in W2

Beil. 6.3: Schüttungsmessungen in W3

Beil. 6.4: Druckaufbaumessungen in W1

Beil. 6.5: Druckaufbaumessungen in W2

Beil. 6.6: Druckaufbaumessungen in W3

FIGURENVERZEICHNIS SEITE

Fig. 1: Solltemperaturen 11

Fig. 2: Temperaturverteilung in der direkten Umgebung von H1 15

Fig. 3: Temperaturverlauf in 15,00 m Teufe nördlich H1 mit Erhitzertemperatur H2 19

Fig. 4: Temperaturverlauf in 15,00 m Teufe südlich H1 mit Erhitzertemperatur H1 20

Fig. 5: Von den Erhitzern ans Gebirge abgegebene Leistung 21

Fig. 6: Temperaturverteilung am 16.08.1986 - Ende der Vorlaufphase 23

Fig. 7: Temperaturverteilung am 01.06.1987 - Ende der 1. Aufheizphase 24

Fig. 8: Temperaturverteilung am 01.03.1988 - Ende der 2. Aufheizphase 25

Fig. 9: Temperaturverteilung am 30.06.1988 - Ende der 1. Abkühlphase 26

Fig. 10: Temperaturverteilung am 18.10.1988 - Ende der 3. Aufheizphase 27

Fig. 11: Temperaturverteilung am 31.12.1988 - Ende der 2. Abkühlphase 30

Fig. 12: Modellierung der Gebirgstemperaturen für den 15.05.1989 (Ende 1. Aufheizphase) 33

Fig. 13: Modellierung der Gebirgstemperaturen
- Vergleich mit Meßwerten nördlich Hl 35

Fig. 14: Modellierung der Gebirgstemperaturen
- Vergleich mit Meßwerten südlich Hl 36

Fig. 15: Lage der Meßpunkte für das Präzisions-
nivellement im FLG 42

Fig. 16: Sohlenhebungen nördlich der Störungszone 45

Fig. 17: Sohlenhebungen südlich der Störungszone 46

Fig. 18: Sohlenhebungen im KWO-Stollen 48

Fig. 19: Lage der Konvergenzmeßquerschnitte 50

Fig. 20: Lage der Inklinometerbohrungen und der
Meßrichtungen 54

Fig. 21: Lage der Extensometer 57

Fig. 22: Gebirgsverformungen in der Umgebung einer
stabförmigen Heizquelle 62

Fig. 23: Lage der Spannungsmonitorstationen 72

Fig. 24: Lage der Entwässerungsbohrungen 89

Fig. 25: Bereich des WT-Stollens im Felslabor Grimsel 98

Fig. 26: Seitliche Aussicht des WT-Stollens 99

Fig. 27: Schematische Darstellung der Anlage zur
Erfassung mikroseismischer Ereignisse 100

Fig. 28: Seismogrammontage des Hammerschlagprofils im WT-Stollen 106

Fig. 29: Seismogramme der Sonde S4 durch Fallgewicht bei TM 70 108

Fig. 30: Seismogramme der Sonde S4 durch Fallgewicht bei TM 95 109

Fig. 31: Seismogramme der Sonde S4 durch Fallgewicht bei TM 121 110

Fig. 32: Registrierung einer elektrischen Störung 113

Fig. 33: 3-Komponenten-Registrierung eines mikroseismischen Ereignisses aus dem Nahbereich der Sonde S3 114

TABELLENVERZEICHNIS SEITE

Tab. 1: Startzeitpunkte der Betriebsphasen der Erhitzer 13

Tab. 2: Kurzzeitige Abweichungen vom Heizprogramm 14

Tab. 3: Meßgenauigkeiten der Nivellements 43

Tab. 4: Lineare Temperaturausdehnungskoeffizienten von Tricosal-Vergußmörtel und Zentralem Aaregranit 76

Tab. 5: Elastizitätsmoduli von Tricosal-Vergußmörtel und Zentralem Aaregranit 76

Tab. 6: Mehrfach gemessene Höchstfördermengen der Bohrungen 90

Tab. 7: Bohrlochansatz- und Sondenkoordinaten 100

Tab. 8: Orientierung der Achsenrichtungen der Aufnehmer bei Abgabe einer positiven Signalspannung 101

Tab. 9: Ausfallzeiten der Erfassungsanlage 105

Tab. 10: Ausbreitung des quasi-stationären Temperaturfelds 118

1 EINLEITUNG

Die Durchführung des Wärmetests mit den in der Zusammenfassung definierten Zielen wurde gemäß den Vorgaben des Schweizer Konzeptes für C-Lager geplant, soweit diese vorlagen. Zur Erkundung der thermomechanischen Belastbarkeit der Granitformation und wegen des Fehlens von Angaben aus dem Endlagerkonzept wurden Parameterstudien vorgesehen. In Kapitel 3.2 - Heizprogramm wird der Versuchsablauf detailliert beschrieben. Um den gestellten Anforderungen an den Wärmetest gerecht werden zu können, war zum einen ein geeignetes Testfeld und zum anderen eine geeignete Ausrüstung erforderlich.

Das Testfeld

Die Erfassung aller denkbarer geologischer und petrographischer Situationen eines potentiellen Endlagerstandortes in einem Test war nicht möglich, zumal allein schon Teufe und Überlagerung im FLG nicht mit denen im Endlager übereinstimmen. Der Versuchsort konnte daher nur so gewählt werden, daß eine konservative Abschätzung der relevanten Effekte möglich war. Aus diesem Grunde wurde die Nachbarschaft von ungestörtem, dichtem Granit und einer ausgeprägten Störungszone gesucht. Diese wurde bei WT 90 gefunden, wo ein breiter Lamprophyrgang mit verschieferten, wasserführenden Übergangszonen den Zentralen Aaregranit nahezu senkrecht durchschlägt. Diese Art der Störung ist sowohl in hydraulischer als auch in mechanischer Hinsicht die ungünstigste Form für ein Endlager. Da eine Einlagerung in der Nähe einer derartigen Störung keinesfalls erfolgen würde, sind die Effekte ausgeprägter als am späteren Endlagerstandort. Der Abstand des Zentrums der Aufheizung zum Teststollen wurde zu 15 m gewählt.

Der Versuchsort in dieser Teufe ist ein Kompromiß zwischen der technischen Realisierbarkeit und der Absicht, möglichst wenig Einflüsse des Stollens auf die Hydraulik, insbesondere durch seine drainierende Wirkung, auf die Gebirgsmechanik durch seinen Einfluß auf die Ablastung und auf das Temperaturfeld durch die Wetterführung zu erhalten.

Der Wärmeteststollen wurde wie alle anderen Teststrecken im FLG im Vollschnittverfahren mit einem Druchmesser von 3,50 m erstellt. Die Ausrichtung im Grundriß ist ca. 30° Richtung Ost von der Nord-Süd-Richtung abweichend. Die in diesem Bericht angegebenen Metrierungen beziehen sich auf das Zentrum der größtenteils seiger nach unten abgeteuften Instrumentierungsbohrungen bei Stollenmeter WT98. In Stollenlängsachse südlich davon gelegene Orte, Richtung Ortsbrust, werden mit positivem Abstand angegeben, nördliche, Richtung Stolleneingang (Gerstenegg), mit negativem. Die Teufenangaben beziehen sich auf die Höhe der Stollensohle bei H1 mit 1730,00 müNN.

Die Ausrüstung

Zur Untersuchung der endlagerrelevanten Effekte und zu den Parameterstudien wurde der Heizbetrieb mit zwei Bohrlocherhitzern gewählt, wobei der Erhitzer H1 unmittelbar neben der Störungszone im Granit und der Erhitzer H2 direkt in der Störungszone installiert wurde. Hierdurch konnte wechselseitig der Einfluß einer solchen Störung untersucht und die thermische Belastung bei gleicher Temperatur variiert werden. Im Umfeld der Erhitzer wurde in einem Vertikalschnitt längs der Stollenachse ein Netz von Meßwertaufnehmern in Instrumentenbohrungen errichtet, um die thermischen, mechanischen und hydraulischen Effekte aus der Aufheizung oder Abkühlung zu erfassen.

Bei ±0,00 m war zwischen 12,00 m und 18,00 m Teufe der Erhitzer H1 angebaut. Er bestand aus drei 2,00 m langen Heizschüssen à 8 kW mit jeweils einem Haupt- und einem Reserveheizkreis sowie einem Kaltschuß zur Aufnahme der Anschlüsse. Zur Überwachung und Messung der Erhitzertemperatur waren außen auf der Bohrlochverrohrung in Abständen von einem Meter jeweils drei Thermometer über den Umfang verteilt. Bei -2,20 m war in gleicher Teufe der technisch identische H2 eingebaut. Die Temperaturen beider Erhitzer wurden mittels zweier unabhängiger Prozeßsteuerungen geregelt.

Zur Registrierung der Gebirgstemperatur wurden 127 Widerstandsthermometer (PT100) im Abstand +7,00 m bis -8,50 m in Teufen von 8,00 m bis 22,00 m installiert. Die in den Bohrungen anderer Meßsysteme eingebauten Thermometer dienten gleichzeitig der Temperaturkompensation der Geber. Zusätzlich wurden 11 NiCr-Ni Thermoelemente zur Überwachung der Erhitzerinnentemperatur verwandt. Bis zum Beginn der Aufheizung von H2 maßen nach 27 Monaten noch 95 % der Gebirgsthermometer zuverlässig.

Nach weiteren 9 Monaten konnten noch 92 % der Temperaturmeßdaten genutzt werden. Durch Überspannung infolge eines Blitzeinschlags ins Gebirge am 01.07.1988 wurde ein Teil der installierten Temperaturfühler zerstört, so daß am Versuchsende noch 74 % der PT100 funktionstüchtig waren. Wegen der Dichte der Instrumentierung zur Temperaturmessung und der großen Redundanz der Erhitzermantelthermometer konnte bis zum Versuchsende die Registrierung der Gebirgstemperaturen, die Temperaturkompensation der anderen Meßsysteme sowie die zuverlässige Erhitzersteuerung gewährleistet werden.

Großräumige Verformungen wurden einerseits mittels Gezeitenpendeln im Umkreis von bis zu 450 m um den Wärmetest gemessen. Andererseits wurde ein Präzisionsnivellement durchgeführt. Dieses Nivellement schloß mit sechs Meßpunkten an das Nivellement der KWO im Hauptzugangsstollen an. An zwei Meßquerschnitten bei WT94 und WT95 wurden Stollenkonvergenzmessungen an jeweils drei Durchmessern und sechs Sehnen registriert.

Im erwärmten Bereich wurden die radialen Verschiebungen in zwei Neigungsmeßpegeln in 0,50 m Abstand zu H1 und einem bei -2,80 m mit einer mobilen Inklinometersonde gemessen. Die axialen Bohrlochverschiebungen wurden mittels fünf FÜnffach-Stangenextensometern aufgenommen. Drei vertikale Extensometer sind bei +0,50 m, -0,50 m und -2,80 m abgeteuft. Der Ansatzpunkt der sich unter 45° am Mittelpunkt von H1 kreuzenden Extensometer lag jeweils bei +15,00 m und -15,00 m. Ein weiteres Extensometer stieß mit ca. 28° Neigung vom Laborstollen aus auf das Erhitzerzentrum zu.

In den drei Bohrlöchern S1, S2, S3 wurden in +1,00 m, +2,00 m und +0,50 m Abstand von H1 (Beilagen 1.1 und 1.2) zwischen Teufen von -14,00 m und -16,00 m die wärmeinduzierten Gebirgsspannungsänderungen gemessen. Je Bohrloch war eine Spannungsmonitorstation mit acht hydraulischen Druckkissen installiert, die zur Erfassung der räumlichen Spannungszustände entsprechend ausgerichtet waren (Beilagen 5.1 und 5.3). In den Bohrlochtiefsten dieser drei Bohrungen war jeweils ein Porenwasserdruckgeber eingebaut.

Zur Untersuchung der Gebirgshydraulik wurden drei Bohrungen bei +1,50 m, -1,00 m und -4,00 m in geologisch unterschiedlichen Bereichen des Versuchsfelds genutzt. Es konnten in einem offenen System die Wasserschüttungsraten und in einem geschlossenen System die Gebirgswasserdrücke gemessen werden.

Die seismische Überwachung des WT erfolgte mittels fünf Bohrlochsonden, die jeweils über einen axialen und zwei radiale Beschleunigungsaufnehmer verfügten. Sie waren im Umfeld des Wärmetests im Abstand bis zu 50 m angeordnet.

Die Daten der automatischen Messungen wurden von einer zentralen Datenerfassungsanlage größtenteils stündlich erfaßt und auf Magnetbändern abgespeichert. Seit Mitte 1988 erfolgte ein täglicher Datentransfer zum Zentralrechner am IfT in Braunschweig.

Der größte Teil der Meßwertaufnehmer registrierte bereits seit März 1985. Von diesem Zeitpunkt an wurde der sogenannte "Nullzustand" ohne einen künstlichen Wärmeeintrag aufgenommen. Im Testfeld selbst waren die Installationsarbeiten bis Juni 1986 abgeschlossen. Der Heizbetrieb begann am 18.08.1986.

2 GEOLOGIE

Die in- und ausländische Diskussion um Endlagerstätten für radioaktive Abfälle räumt den Standorten im Granit beachtliche Vorteile ein. Der Granit weist als Intrusivgestein ein hohes Maß an Homogenität auf, sein Tragverhalten wird durch große Steifigkeit, hohe Festigkeiten und weitgehende Elastizität bestimmt. Wegen des hohen Quarzanteils kann er auch sehr spröde sein. Je nach Standort sind in dem relativ dichten Gestein wasserführende Kluftsysteme zu nennen, die als potentielle Transportwege durch die Geosphäre für Nuklide zur Biosphäre gelten können.

Wegen der vorhandenen Infrastruktur der unterirdischen Kraftwerkanlagen der KWO (Kraftwerke Oberhasli AG) und des hohen Erkundungsgrads in deren Umgebung wurde ein relativ trockener Bereich neben dem Kraftwerkzugangstollen für das Felslabor Grimsel ausgewählt, der fast ausschließlich im granitischen Gestein liegt (siehe GEOTEST, Felslabor Grimsel-Geologie).

Mit einem mittleren Abstand von 50 m westlich des KWO-Zugangsstollens wurde im Bereich von km 1,0 bis km 1,5 ein ca. 1000 m langes Stollensystem erschlossen. Der Laborstollen verläuft exakt in Nord-Süd-Richtung. Das FLG liegt im südlichen Zentralen Aar-Massiv in ca. 400 m Teufe unterhalb des Juchlistocks ca. 1730 müNN. Der WT-Stollen ist um 30° von der Nord-Süd-Richtung abweichend Richtung SSW ausgerichtet (Fig. Seite VII). Im nördlichen Teil - Richtung Hauptzugangsstollen - durchfährt er den Zentralen Aaregranit -ZAGr- und schneidet am südlichen Stoß den biotitreichen Zentralen Aaregranit an. Der südlicher liegende Grimsel-Granodiorit wird nicht tangiert.

Wie in anderen FLG-Bereichen ist der ZAGr auch hier fein bis mittelkörnig und in den meisten Bereichen relativ hell. Er weist eine leichte bis deutliche Paralleltextur auf.

Die die granitischen Gesteine durchschlagenden Lamprophyrgänge sind in jüngeren Phasen der varistischen Orogenese entstanden. Während der alpidischen Orogenese entstanden bereichsweise auch Zerrklüfte, die subhorizontal angelegt sind und meist am Übergang zwischen Lamprophyr und Granit liegen.

Im Verlauf des relativ trockenen WT-Stollens wird eine ca. 8,00 m mächtige Lamprophyrzone aufgeschlossen, deren Kontaktbereich zum Granit stark verschiefert und wasserführend ist (Beilage 2.1).

Sie fällt in Stollenebene sehr steil in südwestlicher Richtung mit ca. 225°/80° bis 85° ein und setzt sich im instrumentierten Bereich des Wärmetests unterhalb des Stollens in gleicher Richtung fort. In Stollenebene sind die Lamprophyrgänge zwischen WT86 und WT94 aufgeschlossen.

Der Erhitzer H1, das Zentrum der Instrumentierung, war bei WT98 12,00 m bis 18,00 m Teufe unterhalb der Stollensohle unmittelbar neben der Störungszone im massiven Granit installiert. Der Erhitzer H2 wurde bei WT95,80 von 12,00 m bis 18,00 m Teufe mit ganzer Länge in der Störungszone eingebaut. Die Instrumentierung lag somit südlich H1 im trockenen, ungestörten Granit die im nördlichen Bereich größtenteils in den von Lamprophyrgängen durchschlagenen Felspartien.

3. WÄRMEEINTAG

3.1 Zielsetzung des Wärmeeintrags

Das Heizprogramm hatte im Rahmen des oben definierten zweiten Ziels die Voraussetzungen für die Untersuchungen zu den Reaktionen des Granits auf einen Wärmeeintrag zu bieten. Der Verlauf der Aufheizung sowie der anschließenden Abkühlung sollte erstens möglichst endlagerrelevant sein und zweitens die Durchführung von Parameterstudien ermöglichen. Für die Parameterstudien sind gegebenenfalls Leistungsabgaben erforderlich, die niedriger und höher als die beim endlagerrelevanten Versuchsablauf sind und sich auch im zeitlichen Verlauf unterscheiden.

Gemäß dem im Projekt GEWÄHR (NAGRA-NGB-85-01) vorgesehenen Konzept zur Endlagerung wärmeproduzierender Abfälle soll das C-Lager in 1200 m Tiefe im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz errichtet werden. In dieser Teufe ist mit einer Gebirgstemperatur von 55 °C zu rechnen. Die einzulagernden Abfälle dürfen also lediglich eine Temperaturanhebung von knapp 50 °C erzeugen, damit die Siedetemperatur des Bergwassers nicht überschritten wird (ca. 104 °C bei offenem System). Diese Forderung gilt natürlich auch für ein Einlagerungsfeld, in welchem sich die Wärmeabgaben mehrerer Quellen überlagern. Das Maß der Aufheizung ist eine abfallspezifische Größe und hängt zum einen vom Inventar, zum anderen von Art und Geometrie der technischen Barrieren (Verglasung, Containment, Bentonitmantel) ab, da hierdurch der Wärmefluß ins Gebirge bestimmt wird. Die standortspezifischen Vorgaben Teufe und Gebirgstemperatur ließen sich wegen der Lage des Felslabors in 1700 müNN und 13 °C nicht erfüllen. Die abfallspezifischen Vorgaben Geometrie, Inventar, Konditionierung, Ummantelung und Lagerungsdichte waren zum Zeitpunkt der Versuchsplanung nicht bekannt. Aus diesen Gründen wurde für den Wärmetest im FLG nicht die Leistungsabgabe der Erhitzer, sondern die Temperatur der Erhitzerbohrlöcher als Zielgröße für die Versuchsdurchführung gewählt.

Für die endlagerrelevanten Fragestellungen erfolgt die Aufheizung also mit ca. 90 °C (Siedetemperatur in 1700 müNN: ca. 93 °C). Die Option zur Vorgabe von geregelten Leistungskurven wurden aber bei der technischen Realisierung vorgesehen. Sowohl der temperatur- als auch der leistungsgeführte Wärmeeintrag bot die Möglichkeit, in Parameterstudien wie zunächst geplant die thermische Belastbarkeit der Formation zu untersuchen. Dieser Programmpunkt kam jedoch letztlich nicht zur Ausführung.

Der Abkühlvorgang ließ sich bezüglich seines zeitlichen Verlaufs im Versuch nicht endlagerrelevant darstellen. Durch die Vorgabe einer größeren Abkühlgeschwindigkeit wurde ein "over-size"-Effekt hervorgerufen, bei welchem die temperaturbedingten Ereignisse größer eintraten als bei der langsameren endlagerrelevanten Abkühlung. Die wiederholte Aufheizung und Abkühlung diente außerdem den Untersuchungen zur Reversibilität geomechanischer und geohydraulischer Zustände, insbesondere der Analyse von elastischen, verzögert elastischen und irreversiblen Anteilen im Spannungs-Verformungs-Verhalten.

3.2 HEIZPROGRAMM

Der planmäßige Betrieb der Erhitzer begann mit der ersten Aufheizphase im August 1986. Zuvor erfolgten Leistungsabgaben im Rahmen der notwendigen Erhitzererprobung sowie zur Schutzheizung der Erhitzer im Bereich zwischen 20 °C bis 30 °C. In dieser sogenannten Nullphase wurden Meßwerte ohne nennenswerten Wärmeeintrag während der 13 Monate von März 1985 bis April 1986 registriert um Informationen über den thermisch unbeeinflußten Zustand des Gebirges zu gewinnen (Tab. 1, Fig. 1). In der 1. Aufheizphase wurde die Temperatur auf der Bohrlochverrohrung von H1 innerhalb von 2 Wochen inkrementell in den Stufen 40 °C und 65 °C auf die Zieltemperatur von 90 °C erhöht.

Nach 9,5 Monaten wurde im Juni 1987 die 2. Aufheizphase mit dem Parallelbetrieb von H1 und H2 gestartet. Ausgehend von der Schutzheizung in H2 mit 30 °C wurden die ersten drei Temperaturstufen von 40 °C, 55 °C und 75 °C aufgebracht (Fig. 3). Nach Abstimmung der Prozeßsteuerung zur Verringerung der Regelbreite auf weniger als ±2,5 °C wurde die Temperatur auf 90 °C angehoben. Ende Januar 1988 erfolgte eine Nachjustierung der Steuerung von H1 mit einer Anhebung der Manteltemperatur um 5 °C.

Nach 9 Monaten Parallelbetrieb beider Erhitzer wurde ab Anfang März 1988 die 1. Abkühlphase mit der kontinuierlichen Reduzierung der Leistung während 3 Monaten auf 50 % der zuletzt abgegebenen Leistungsabgabe eingeleitet. Zur Stabilisierung der Effekte wurde anschließend noch während eines Monats mit dieser reduzierten Leistungsabgabe weitergeheizt. Nach der dritten Aufheizphase mit dem Betrieb beider Erhitzer mit 90 °C für weitere drei Monate begann im Oktober 1988 die zweite Abkühlphase mit der Abschaltung beider Erhitzer. Auch diese Form der Leistungsreduktion war nicht endlagerrelevant.

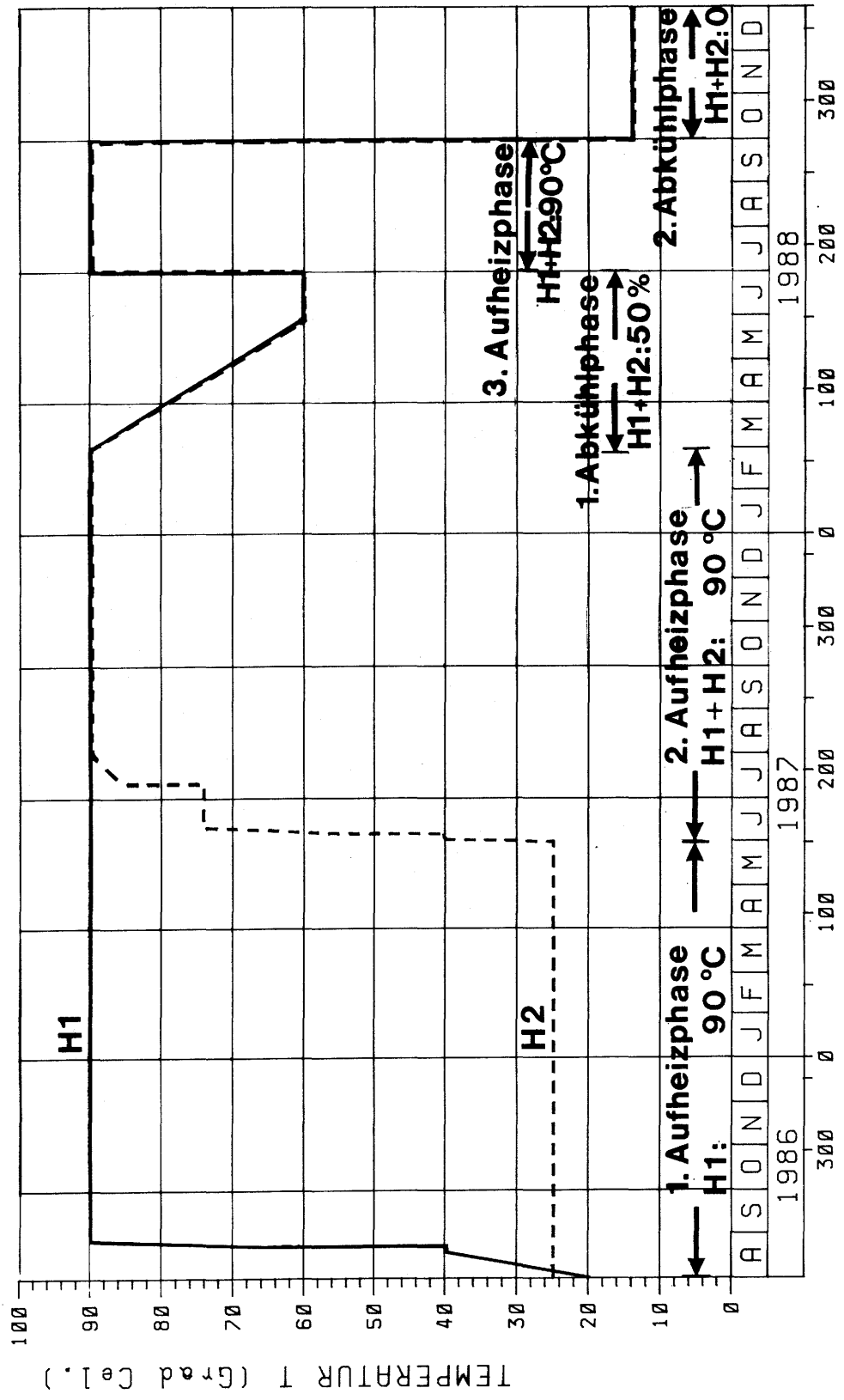


Fig. 1: Solltemperaturen

Sie diente jedoch als "overtest" zur Erzeugung von Effekten, die im Vergleich mit denen der anderen Heiz- bzw. Abkühlphasen die konservative Abschätzung einer endlagerrelevanten Abkühlung ermöglichen können. Als Parameterstudie konnte sie gleichzeitig zur Untersuchung der Reversibilität thermoinduzierter Vorgänge genutzt werden.

Das Heizprogramm des Wärmetests ist sowohl der Tab. 1 als auch dem Diagramm der Fig. 1 zu entnehmen. Angaben über kurzzeitige Abweichungen vom Heizprogramm enthält die Tab. 2. Sie wurden in der Nullphase teilweise bewußt herbeigeführt, um Heiz- und Meßsysteme zu kontrollieren und zu justieren. Derartige Probeheizphasen waren von so kurzer Dauer, daß die Effekte der geplanten eigentlichen Aufheizphasen nicht vorweggenommen wurden.

Mit der Schutzheizung wurden die Erhitzer auf ca. 30 °C temperiert, um die Bildung von Kondenswasser zu vermeiden, die zwangsläufig die Kurzschlußfestigkeit herabgesetzt hätte. Alle Störungen, die während des Erhitzerbetriebes von zweieinhalb Jahren auftraten, waren auf Fehlfunktionen der elektrischen Prozeßsteuerung und nicht auf Fehler der elektrischen Bohrlocherhitzer zurückzuführen.

ab 01.03.1985	Vorlaufphase Messung des Ausgangszustands, Erhitzer- und Instrumentierungstests
ab 08.04.1986	Schutzheizung 20 °C H1 + H2 H1 + H2 : 20 °C
ab 18.08.1986	1. Aufheizphase H1: 40, 65, 90 °C H2: 20 °C
ab 02.06.1987	2. Aufheizphase H1: 90 °C H2: 40, 65, 90 °C
ab 01.03.1988	1. Abkühlphase H1 + H2: kontinuierliche Leistungsverminderung auf 50 % zur 2. Aufheizphase
ab 01.06.1988	H1 + H2: 50 % der Leistung der 2. Aufheizphase
ab 01.07.1988	3. Aufheizphase H1 + H2: 90 °C
ab 18.10.1988	2. Abkühlphase H1 + H2: abgeschaltet
31.12.1988	Ende des Testbetriebs

Tab. 1: Startzeitpunkte der Betriebsphasen der Erhitzer

1985, Juli	Erhitzererprobungen	H1 + H2
1985, August	" "	" "
1986, Januar	" "	" "
1986, April	" "	" "
1986, Juli	" "	" "
1986, August	Stromausfall	
1987, März	Ausfall/Wartung Erhitzersteuerung	H1
1987, Juli	Ausfall/Reparatur Erhitzersteuerung	H1
1988, Januar	Nachregelung Temperatursteuerung	H1
1988, März	Stromausfall sowie zwei automatische Abschaltungen von Temperaturfühlern Anpassung der Erhitzersteuerung	H1
1988, Mai	Automatische Abschaltung H1, Schuß 3, wegen Ausfall von Temperaturfühlern	
1988, Juli	Defekt in der Temperaturerfassung	H1
1988, August	Defekt in der Erhitzersteuerung	H1

Tab. 2: Kurzzeitige Abweichungen vom Heizprogramm

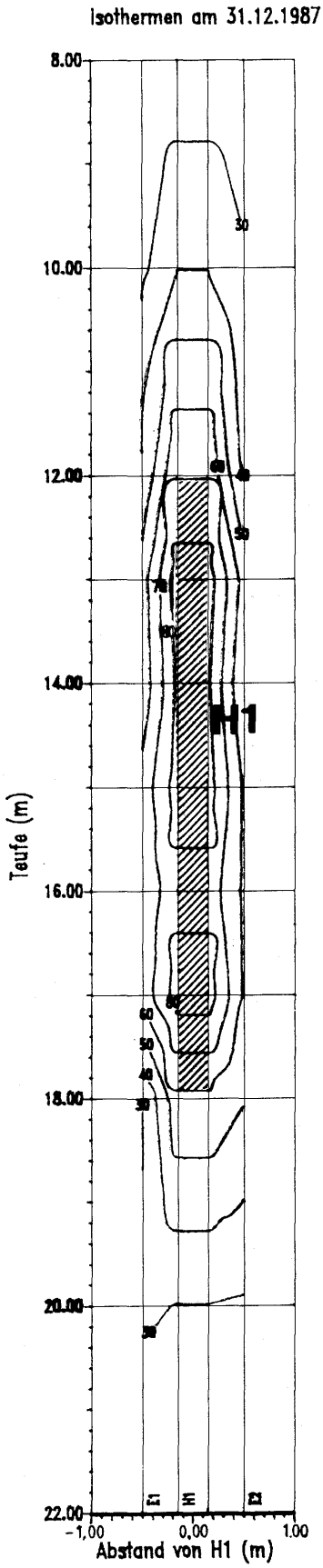


Fig. 2: Temperaturverteilung in der direkten Umgebung von H1

3.3 TECHNISCHE REALISIERUNG

Beide Erhitzer wurden jeweils durch eigene Prozeßsteuerungen versorgt, die jedoch technisch nicht gleichwertig waren. Eine realistische Erprobung eines Erhitzers konnte vor Versuchsbeginn nicht durchgeführt werden, da diese dann den Wärmetest vorweggenommen hätte. Folglich war der Beginn der ersten Aufheizphase gleichzeitig die Erprobungsphase für Erhitzer und Steuerung H1. Die dabei aufgetretenen Über- und Untersteuerungen wurden im Laufe der ersten Aufheizphase mit gebotener Vorsicht optimiert (Fig. 4). Zur Inbetriebnahme von H2 waren die Erfahrungen von H1 verwertet worden, so daß hier die geplante Sollkurve wesentlich kontrollierter angefahren werden konnte (Fig. 3). Auf Grund der regelungstechnischen Eigenheiten von H1 gelang die kontinuierliche Leistungsreduktion während der ersten Abkühlphase mit weniger Erfolg als bei H2. Die Leistung wurde jedoch unter der Berücksichtigung der Fehlsteuerungen stets so nachgeregelt, daß das Integral der Reduzierung den Sollwerten entsprach (Fig. 5).

Jeder der drei Heizschüsse eines Erhitzers mit jeweils 2,00 m Länge wurde unabhängig geregelt, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung über die Teufe zu erzielen (Fig. 2).

Während bei H2 keine gerätebedingten Ausfälle auftraten, mußten bei H1 mehrfach Störungen an der Steuerung beseitigt werden. Nach 1,5 Jahren Heizbetrieb mit 90 °C Außen- und ca. 250 °C Innentemperatur fielen einige Temperaturfühler von H1 aus. Die Steuerung konnte durch Auflegen von Redundanzfühlern jedoch bis zum Ende des Versuchs ordnungsgemäß mit Meßwerten versorgt werden. Lediglich die Temperaturen des unteren Schusses wurden ab Mitte Mai 1988 wegen eines defekten Temperaturfühlers um ca. 20 % bis 30 % zu niedrig registriert. Die tatsächliche Temperatur entsprach aber der Temperatur der oberen Schüsse.

Bis Anfang 1988 lag die Ausfallrate der an den Erhitzern und in den Instrumentenbohrungen installierten Temperaturfühler unter 10 %. Erst während der 1. Abkühlphase nahm sie im stark erhitzten Bereich zu. Durch Überspannungen infolge eines Blitzeinschlags ins Gebirge Anfang Juli 1988 wurde ein größerer Teil der in den Instrumentenbohrungen installierten PT100 zerstört und die Erfassung eines Großteils der Aufnehmer für ca. eine Woche unterbrochen. Die genannten Störungen blieben insgesamt ohne nachteilige Auswirkungen auf den Versuchsablauf.

3.4 Wärmeleistung

Die zur Erzeugung der jeweiligen Solltemperatur benötigte elektrische Leistung ist in Fig. 5 dargestellt. Zu Beginn des Heizbetriebs in H1 wurden Leistungsspitzen bis zu 5,3 kW gemessen (Fig. 5). Danach reduzierte sich die ins Gebirge eingebrachte Leistung von 4,2 kW auf 2,9 kW am Ende der ersten Aufheizphase. Für diesen Zeitraum wurden 21,9 MWh verbraucht.

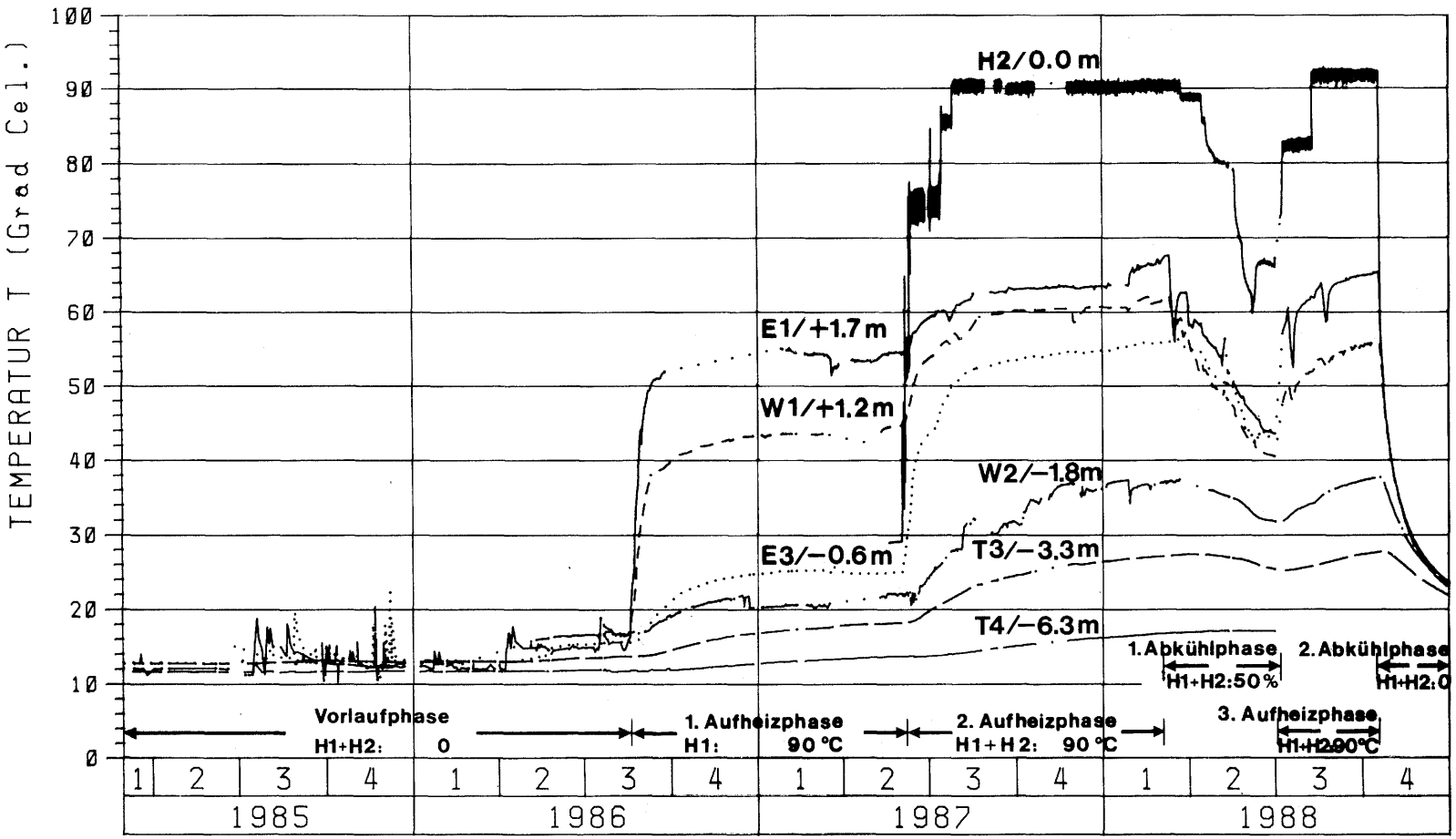
Nach der inkrementellen Aufheizung von H2 auf 90 °C am Anfang der zweiten Aufheizphase betrug die Leistungsabgabe der Erhitzer 2,6 kW bzw. 2,8 kW. Sie verminderten ihre Leistungsabgabe bis zur Nachregelung von H1 im Januar 1988 auf 2,4 kW bzw. 2,8 kW. Bis Februar 1988 wurde eine durchschnittliche Leistung von 2,7 kW je Erhitzer bei einer mittleren Temperatur von 90 °C ins Gebirge eingebracht. Während der 2. Aufheizphase wurde von H1 eine Wärmemenge von 16,5 MWh und von H2 17,1 MWh ins Gebirge abgegeben. Die im Vergleich zur 1. Aufheizphase mit H1 geringere Leistungsabgabe von H2 hat ihre Ursache darin, daß in der Umgebung von H2 das Gebirge in der ersten Aufheizphase bereits aufgeheizt wurde.

Von März bis Ende Mai erfolgte die 1. Abkühlphase mit der kontinuierlichen Leistungsreduzierung auf 50 % (1,3 kW) und einem Monat Heizbetrieb mit dieser Leistung.

Bis auf die kurzzeitigen Fehlsteuerungen infolge Stromausfalls bzw. Ausfalls von Temperaturfühlern konnte die Istleistung im Heizbetrieb als Integral ausreichend genau an die gewünschte Sollkurve angenähert werden. Da die Prozeßsteuerungen im unteren Leistungsbereich keine Möglichkeit zur automatischen Leistungsreduzierung besaßen, wurden sie schrittweise durch manuelle Regelung reduziert. Die von H1 und H2 zum Ende der 1. Abkühlphase abgegebenen Wärmeleistungen betrugen 4,8 MWh (H1) und 5,7 MWh (H2). Dieser Unterschied ergibt sich aus den im Durchschnitt höheren Temperaturen von H2.

Anfang Juli 1988 begann die 3. Aufheizphase mit dem Heizbetrieb beider Erhitzer bei 90 °C. Die Leistungsabgabe verringerte sich nach ca. zwei Monaten auf die gleichen Werte (ca. 2,6 KW), die vor der Leistungsreduzierung für den Heizbetrieb mit 90 °C benötigt wurden. Bis zum Ende der dritten Aufheizphase blieben die Leistungsabgaben dann ohne signifikante Veränderungen. Die insgesamt während der 3. Aufheizphase abgegebenen Wärmemengen betrugen für H1 7,0 MWh und für H2 6,8 MWh.

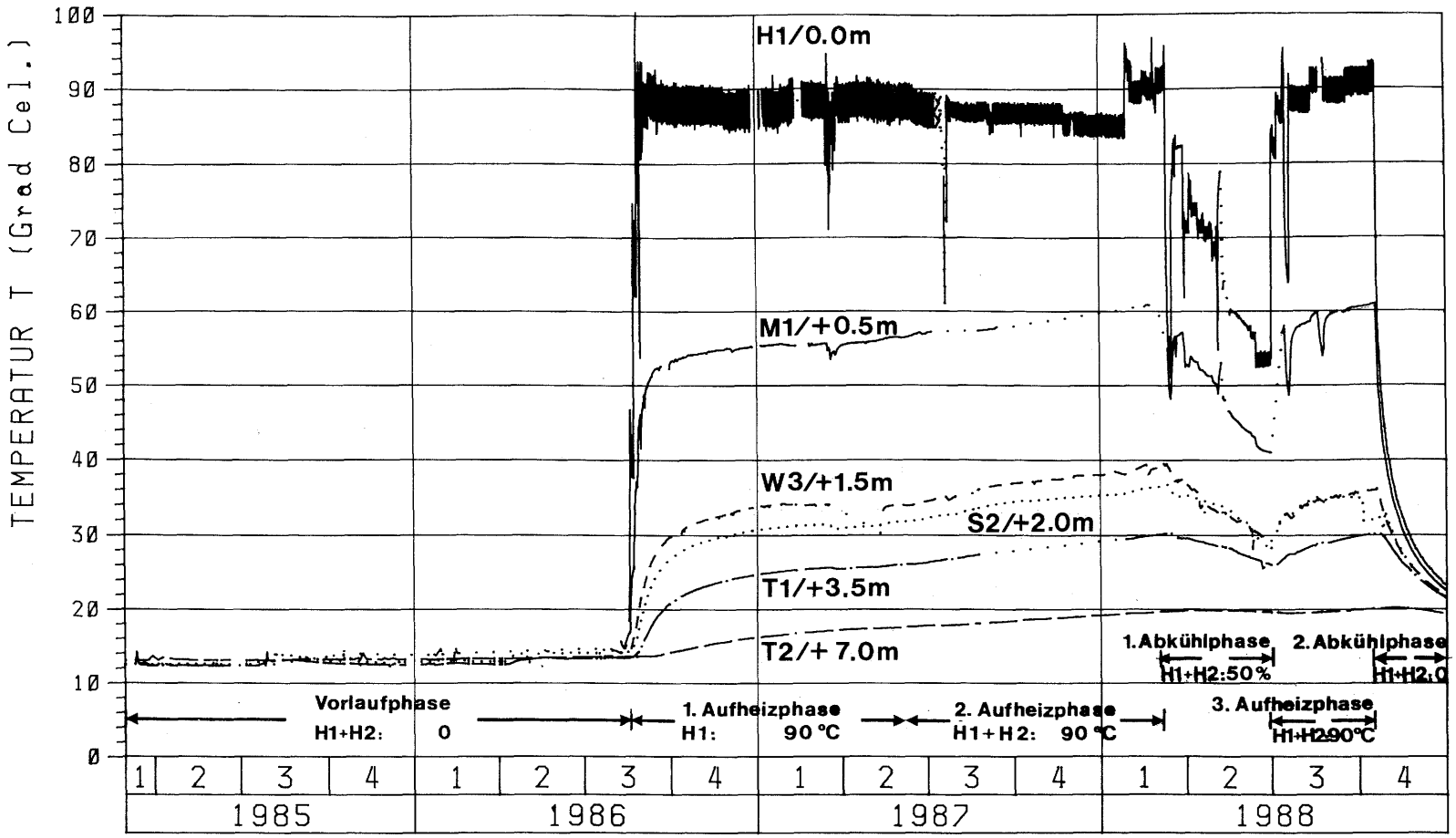
Mit dem Abschalten beider Erhitzer im Oktober 1988 begann die zweite Abkühlphase. Die seit Beginn der ersten Aufheizphase abgegebene Energie betrug 58 MWh (H1) und 30 MWh (H2).



KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE
———	108 H2TE15 008	H 2	-2.2M/15.0M
———	005 E1T0150 005	E 1	-0.5M/15.0M
– – – –	068 W1T0150 005	W 1	-1.0M/15.0M
·····	023 E3T0150 005	E 3	-2.8M/15.0M

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
——·——	071 W2T0150 005	W 2	-4.0M/15.0M
——··——	061 T3T0150 005	T 3	-5.5M/15.0M
———	065 T4T0150 005	T 4	-8.5M/15.0M

Fig. 3: Temperaturverlauf in 15,00 m Teufe nördlich H1 mit Erhitzertemperatur H2.



KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE
———	130 H1TE15 000	H 1	+0.0M/15.0M
———	098 M1T0150 005	M 1	+0.5M/15.0M
- - -	074 W3T0150 005	W 3	+1.5M/15.0M

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
·····	082 S2T0155 004	S 2	+2.0M/14.9M
——·——	053 T1T0150 005	T 1	+3.5M/15.0M
——··——	057 T2T0150 005	T 2	+7.0M/15.0M

Fig. 4: Temperaturverlauf in 15,00 m Teufe südlich H1 mit Erhitzertemperatur H1.

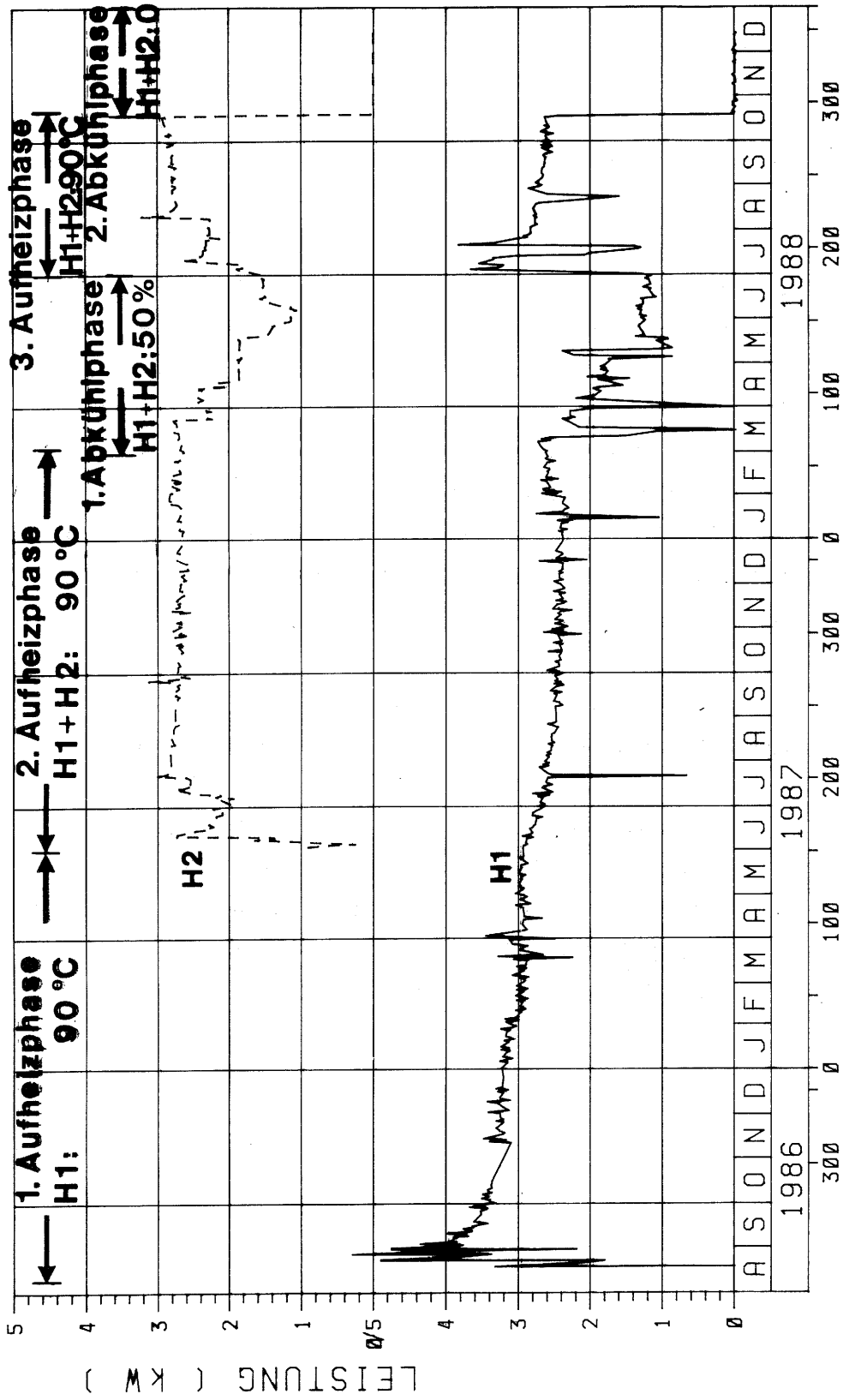


Fig. 5: Von den Erhitzern ans Gebirge abgegebene Leistung

3.5 Temperaturfeld

Die unbeeinflußte Gebirgstemperatur beträgt ca. 12 °C bis 13 °C. Ausgehend von der im April 1986 begonnenen Schutzheizung der Erhitzer zwischen 20 °C und 30 °C auf der Bohrlochverrohrung (Fig. 6), erfolgte ab August 1986 die stufenweise Gebirgsaufheizung bis zur Solltemperatur von 90 °C am Erhitzer. Bis zum Januar 1987 hatte sich innerhalb von 4,5 Monaten in einem Abstand von 0,50 m um H1 ein quasi-stationäres Temperaturfeld eingestellt und bis zum Beginn der 2. Aufheizphase Anfang Juni 1987 innerhalb von 9,5 Monaten auf ein Umfeld von ca. 3,00 m ausgeweitet (Fig. 3, 4, 7). Die wasserführende Störungszone verursachte die Unsymmetrie in Nord-Süd-Richtung. In 15,00 m Teufe betrug die Differenz in 2,00 m Abstand 10 °C und in 3,00 m Abstand 6 °C zwischen den Temperaturen im nördlichen und südlichen Umfeld.

Die Aufheizung von H2 bewirkte zwangsläufig auch einen weiteren Temperaturanstieg in den bis dahin temperaturkonstanten Bereichen südlich H1 (Fig. 8). In 15,00 m Teufe erhöhte sich die Temperatur in 0,50 m Abstand von H1 um 2 °C und blieb ab Anfang Dezember konstant. In 1,50 m Abstand betrug die Erhöhung 4 °C und setzte sich Ende Januar 1988 fort. Das Temperaturfeld zwischen H1 und H2 war bis Anfang Dezember konstant. Nördlich H2 war der Temperaturanstieg in 0,50 m Abstand erst am Ende der 2. Aufheizphase abgeschlossen.

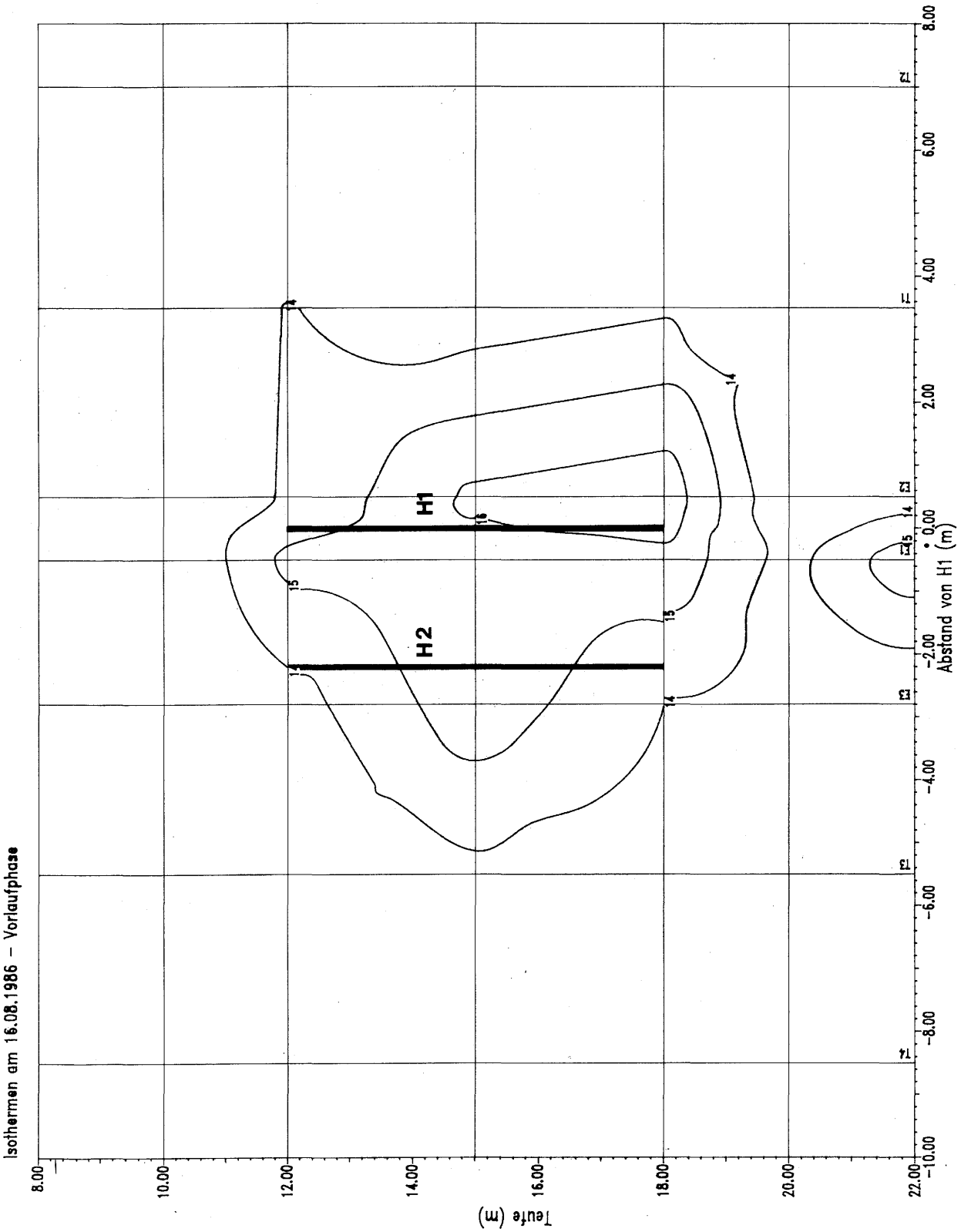


Fig. 6: Temperaturverteilung am 16.08.1986 - Ende der Vorlaufphase

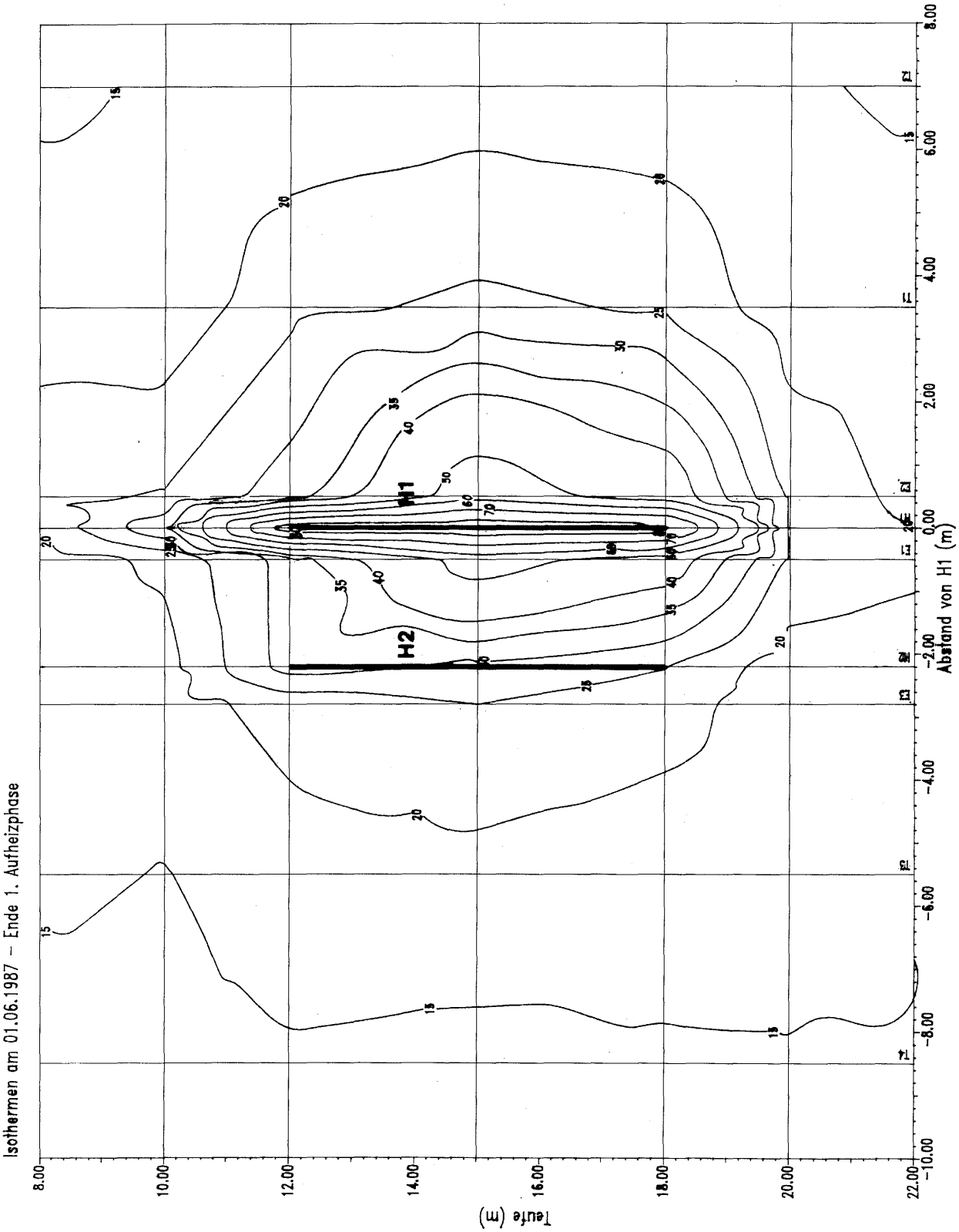


Fig. 7: Temperaturverteilung am 01.06.1987 - Ende der 1. Aufheizphase

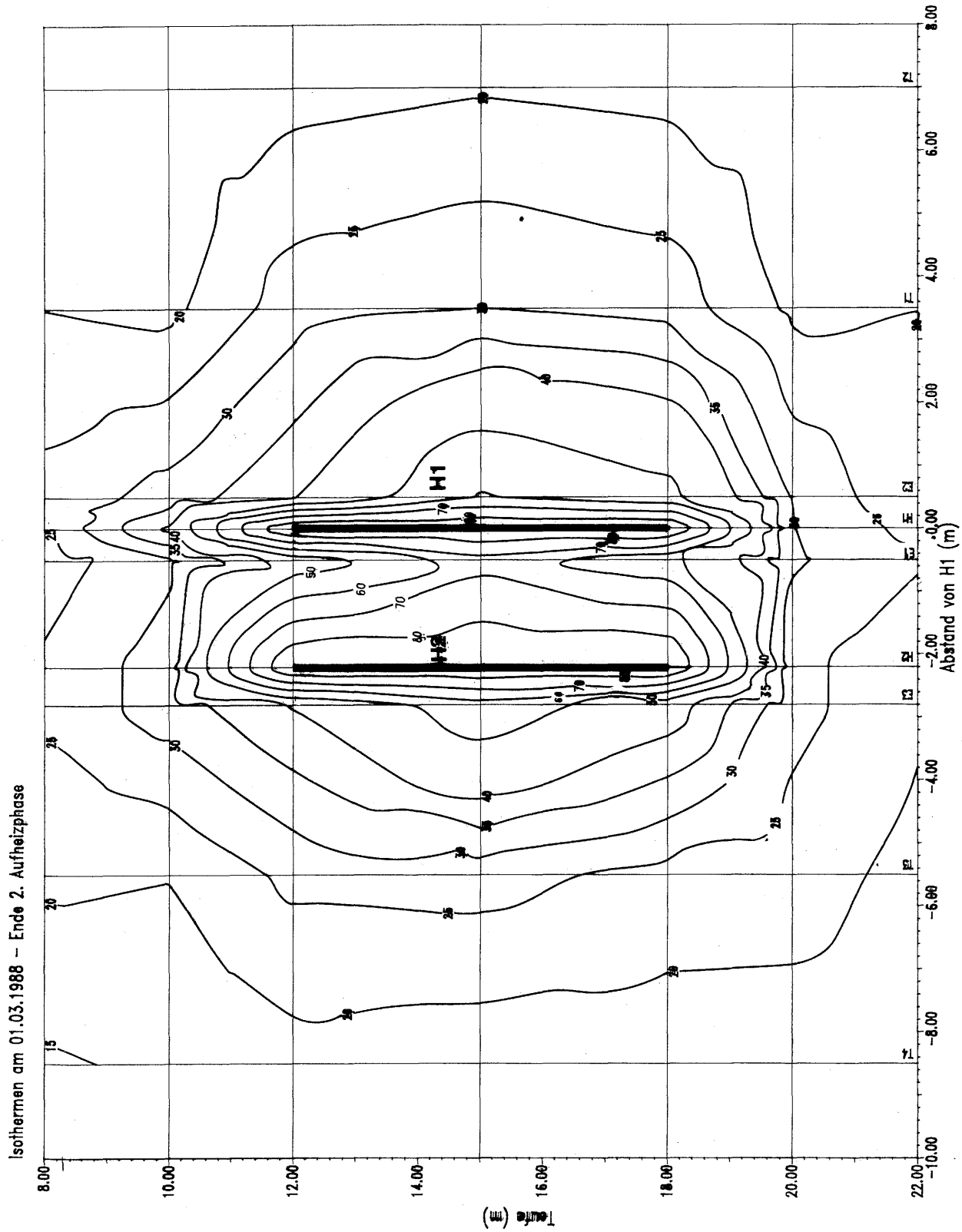


Fig. 8: Temperaturverteilung am 01.03.1988 - Ende der 2. Aufheizphase

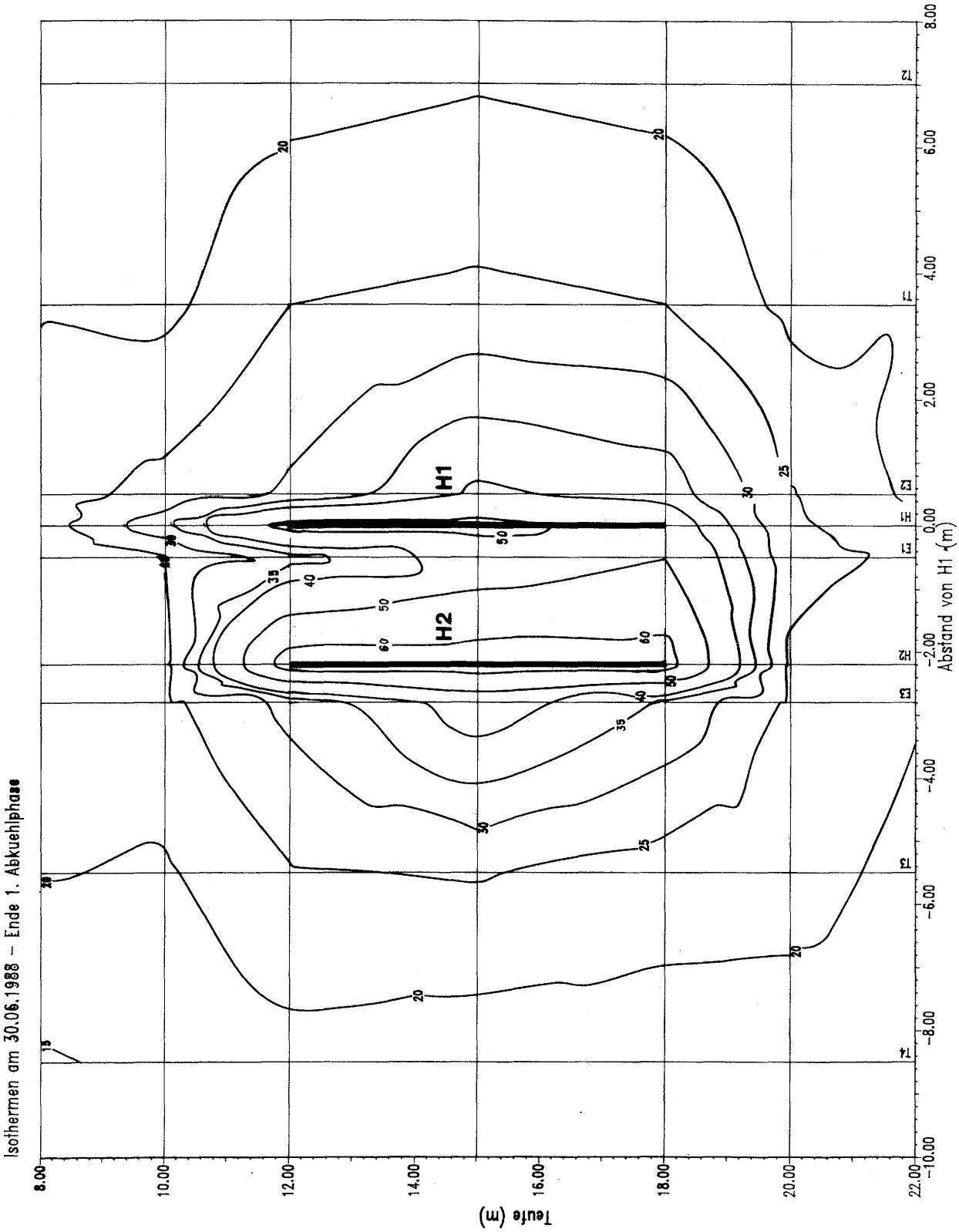


Fig. 9: Temperaturverteilung am 30.06.1988 - Ende der 1. Abkühlphase

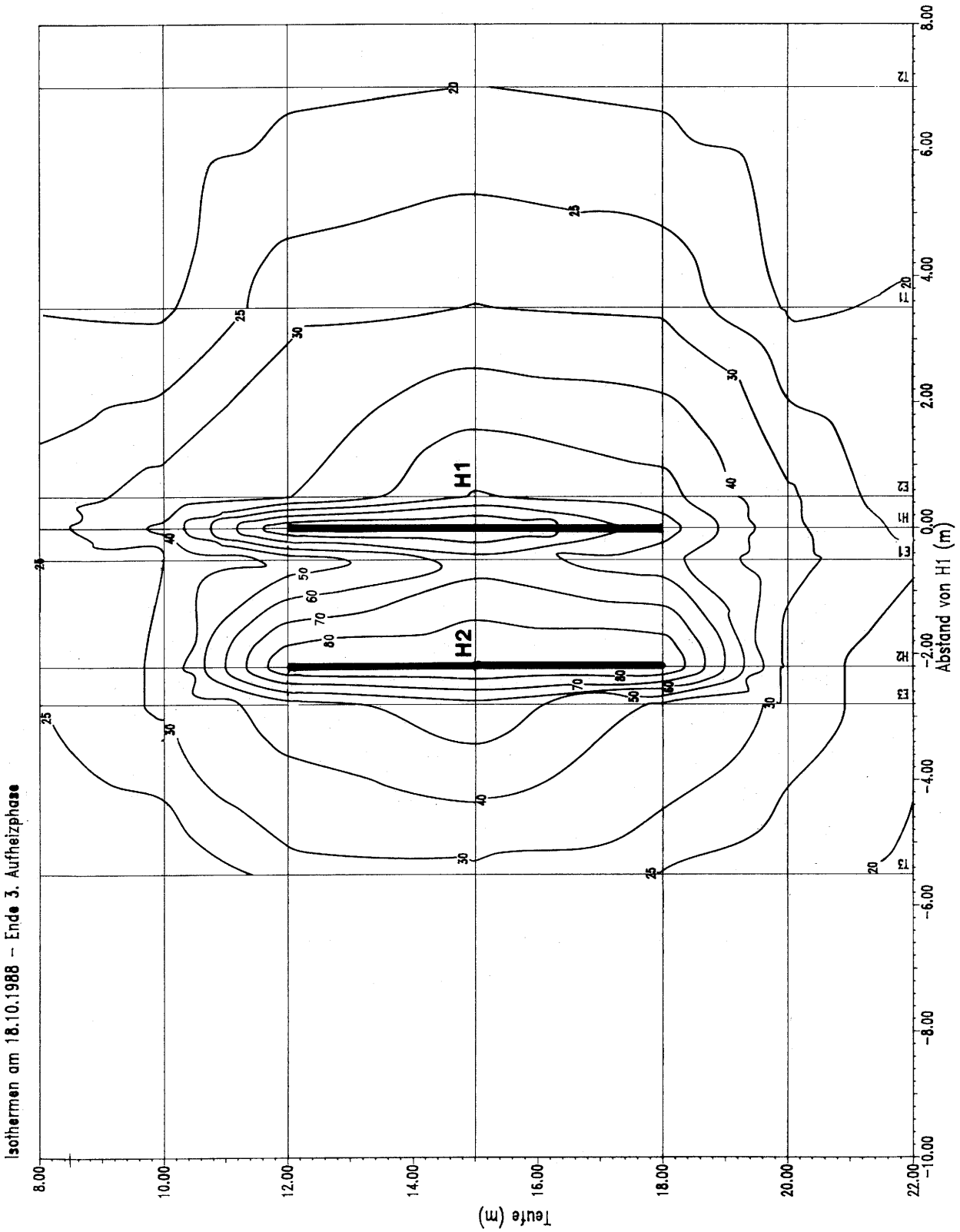


Fig. 10: Temperaturverteilung am 18.10.1988 - Ende der 3. Aufheizphase

Der steilere Verlauf der Temperaturgradienten nördlich H1 wird durch die Wasserführung in der Störungszone verursacht, wie die Schüttungsraten in W2 zeigen. An diesen Stellen wird die Wärmeleitfähigkeit erhöht und die Aufheizung im Umfeld der Wärmequellen verringert.

Die 1. Abkühlphase mit der gleichzeitigen Leistungsverminderung von H1 und H2 ab März 1988 führte in unmittelbarer Nachbarschaft der Erhitzer zu sofortigem Temperaturabfall, der bis Mitte April auch die entfernten Meßpunkte erreichte. Obwohl die abgegebene Leistung während dieser Phase um ca. 20 % und die durchschnittliche Erhitzertemperatur in H2 um 5 °C bis 10 °C größer als in H1 waren, hatte sich die 20-°C-Isotherme südlich H1 weiter ausgebreitet als nördlich H2 (Fig. 9). Die 30-°C-Isothermen wiesen auf beiden Seiten noch die gleiche Ausdehnung auf.

Bis zum Ende der 3. Aufheizphase im Oktober 1988 zeigten die Meßpunkte in einer Entfernung größer als 4,00 m von den Erhitzern wieder die gleichen bzw. geringfügig höhere Temperaturen als vor der 1. Abkühlphase an (Fig. 10). Im Nahbereich kleiner 3,00 m wurde Mitte Oktober der quasi-stationäre Zustand wieder erreicht. Die Temperaturen im Nahbereich von H1 waren am Ende der 2. Aufheizphase geringfügig höher, da zu diesem Zeitpunkt der Erhitzer mit zu großer Solltemperatur betrieben wurde.

Die 2. Abkühlphase begann am 18.10.1988 mit der Abschaltung der Erhitzer. Der zeitliche Temperaturverlauf läßt sich durch eine logarithmische Funktion beschreiben. So gilt für den Meßort im Bohrloch H1 in 15,00 m Teufe

die Funktion

$$\vartheta = \vartheta_0 + \max \Delta\vartheta \cdot \ln(0.88) / \ln(0.537 \cdot t^{1/2} + 0.88)$$

mit

ϑ = Gebirgstemperatur zum Zeitpunkt t

ϑ_0 = Ausgangstemperatur des Gebirges (12 °C)

$\max\Delta\vartheta$ = Differenz zur Ausgangstemperatur zu Beginn der Abkühlphase (78 °C)

t = Zeit in Tagen

Diese Formel gibt die Gebirgstemperatur in den ersten 10 Tagen mit einer Abweichung von maximal 6 % wieder. Vom 50. bis 100. Tag ist sie auf 0,1 °C genau. Diese Näherung gilt für den Zeitraum von einem halben Jahr. Wegen der Abrüstung des Versuchs wurden die Messungen eingestellt, so daß eine weitere Validierung dieses Ansatzes nicht möglich war.

Die vertikale Temperaturverteilung war bei beiden Erhitzern unterschiedlich. Der relative Temperaturverlauf auf den Bohrlochverrohrungen beider Erhitzer ist ähnlich. Die absolute Größe der Temperaturen wird jedoch von den Unterschieden in den geologischen Strukturen beeinflußt.

Am Ende der 3. Aufheizphase weist die Bohrung E1 0,50 m nördlich von H1 in 10,00 m Teufe eine um ca. 5 °C niedrigere Temperatur als die im gleichen Abstand südlich H1 gelegene Bohrung E2 auf (Fig. 11). Ursache hierfür ist wiederum die größere Wärmeableitung in der Störungszone infolge Konvektion bzw. Strömung.

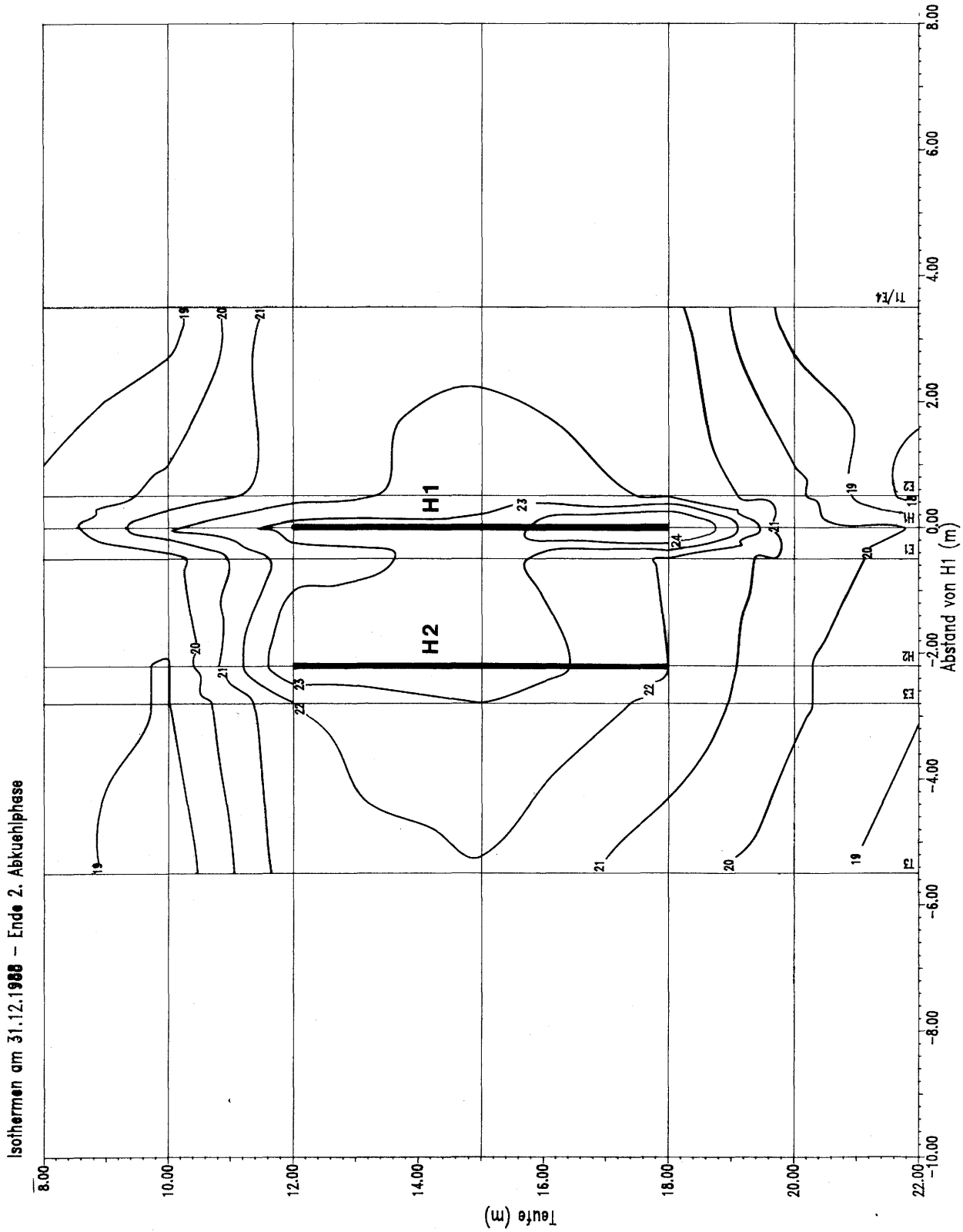


Fig. 11: Temperaturverteilung am 31.12.1988 - Ende der 2. Abkühlphase

Unterhalb H1 sind die Temperaturen in Bohrung E1 höher als in E2. In 22,00 m Teufe beträgt die Differenz 5 °C. Die absolute Temperatur in E1 ist an diesem Punkt 25,8 °C, bei 8,00 m Teufe 24,9 °C. Die Temperaturverteilung unterhalb H2 entspricht eher als die unterhalb von H1 der bei homogenen Verhältnissen zu erwartenden zwiebelförmigen Isothermenstruktur.

Der natürliche Wärmetransport (Konvektion) findet in offenporigen Medien wegen der geringeren Dichte erwärmter Konvektionsmittel (Wasser, Luft) gegen die Schwerkraftrichtung statt. Aufgrund dieser Tatsache bildet sich oberhalb von Wärmequellen eine größere erwärmte Zone als unterhalb aus. Trifft dieses nicht oder nur stellenweise zu, können dafür mehrere Ursachen verantwortlich sein. Ist die Gesamtverteilung achsensymmetrisch zum Mittelpunkt der Wärmequelle, liegt kein offenporiges Medium vor - es kann keine Konvektion stattfinden. Liegt nur stellenweise eine Abweichung vom zwiebelförmigen Isothermenverlauf vor, ist entweder eine partiell unterschiedliche Wegsamkeit beziehungsweise Leitfähigkeit oder eine größere, anders gerichtete Strömung vorhanden, die das Wärmefeld durchquert oder zumindest tangiert.

Granit ist ein offenporiges, relativ homogenes Gestein. Wie die unterschiedlichen Schüttungsraten der einzelnen Bohrlochabschnitte zeigen, liegen in Abhängigkeit vom Trennflächengefüge unterschiedliche Wegsamkeiten und auch unterschiedliche Strömungsrichtungen vor.

Die Aufheizung des Gebirges erzeugte keine signifikanten Änderungen der Schüttungsraten. Die natürlichen Strömungen wurden folglich nicht beeinflußt. Sie waren insbesondere in der Störungszone die Ursache für die nach unten gerichtete Wärmeströmung von H1.

Südlich von H1 in den Teufen 10,00 m und 20,00 m wurden die Gradienten der Isothermen steiler. Im oberen Bereich beschleunigte der oben erwähnte thermodynamische Effekt, im unteren die Kluftwasserströmung den erhöhten Wärmemengenfluß.

Die Isothermen unterhalb 15,00 m Teufe verlaufen nahezu parallel zum Erhitzer. Oberhalb verringern sich ihre Abstände. Auch hier liegt eine aufwärts gerichtete Wärmeströmung vor.

3.6 Vergleich mit der Modellrechnung

Zur Planung der Instrumentierung wurden während der Projektierungsphase Auslegungsrechnungen durchgeführt. Später wurde das erste Jahr der ersten Aufheizphase mit den aktuellen Parametern des Versuchsorts und der tatsächlich eingebrachten Heizleistung modelliert (Fig. 12). Die Modellierung erfolgte nach der FE-Methode an einem rotationssymmetrischen System für ein homogenes und elastisches Gebirge. Durch das Versuchsfeld wurde in einem achssymmetrischen Vertikalschnitt ein zum Erhitzer hin verdichtetes Dreiecknetz gelegt (Beilage 5.17). Als Symmetrieachse wurden die Bohrlochachse von H1 und die 15,00-m-Teufe verwendet. Die Wärmeleitzahl wurde zu λ = 3,6 W/mK und die Wärmekapazität zu ρ = 21,8 Wd/m^{3}K angenommen. Effekte aus vertikaler Konvektion im Bohrloch und im Gebirge infolge Dichteänderung des Porenwassers wurden nicht berücksichtigt.

Das Ergebnis der Modellierung wird in den Fig. 13 und Fig. 14 mit den gemessenen Temperaturverläufen verglichen.

Nach 9 Monaten betrug die maximale Abweichung zwischen den Rechnungen und Messungen 6 °C auf der horizontalen Symmetrieebene südlich H1. Die größte Abweichung in Entfernungen größer ± 1,50 m vom Erhitzer betrug 3 °C. Nördlich H1 war die Übereinstimmung in Abständen größer ± 0,50 m besser als 2 °C.

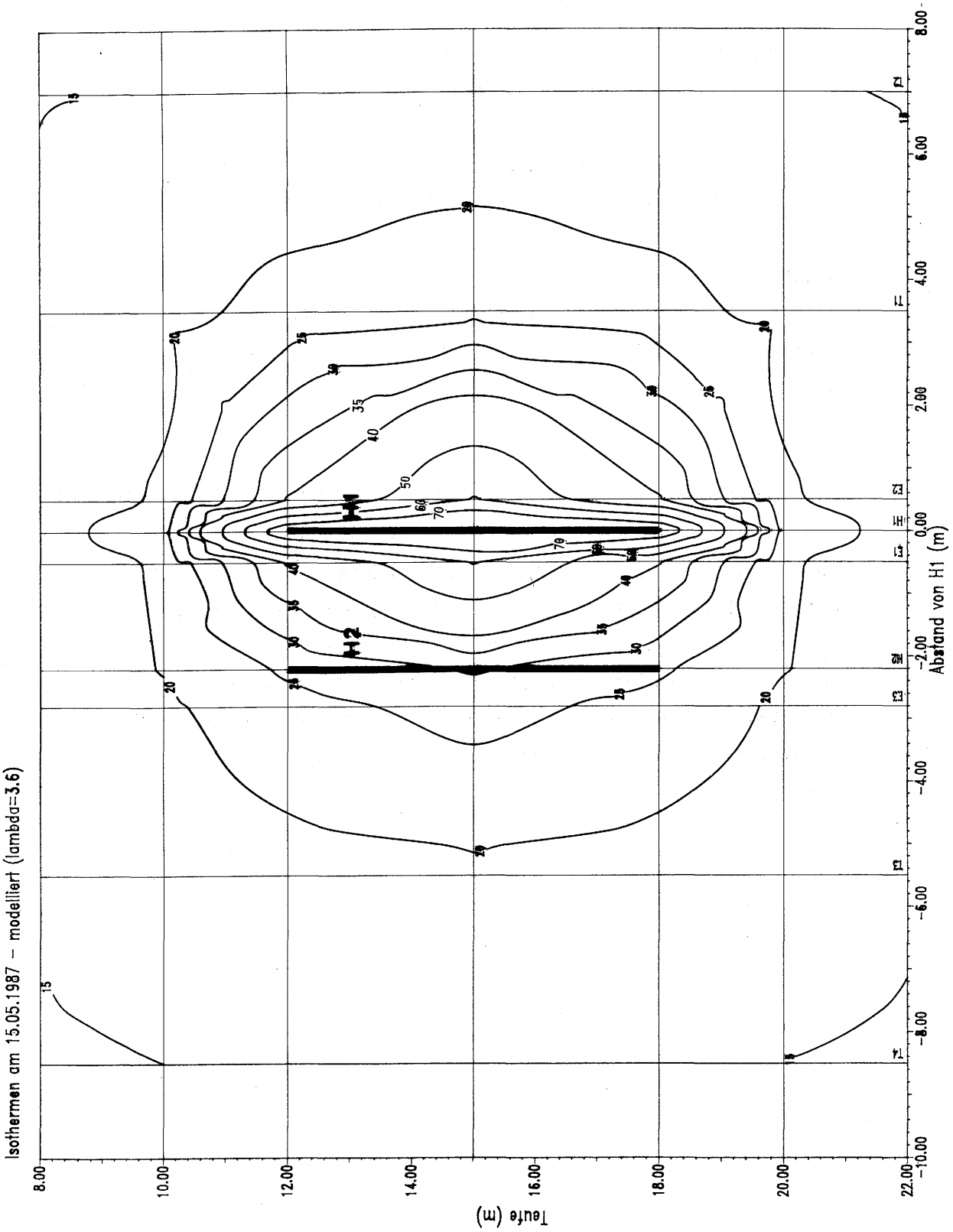


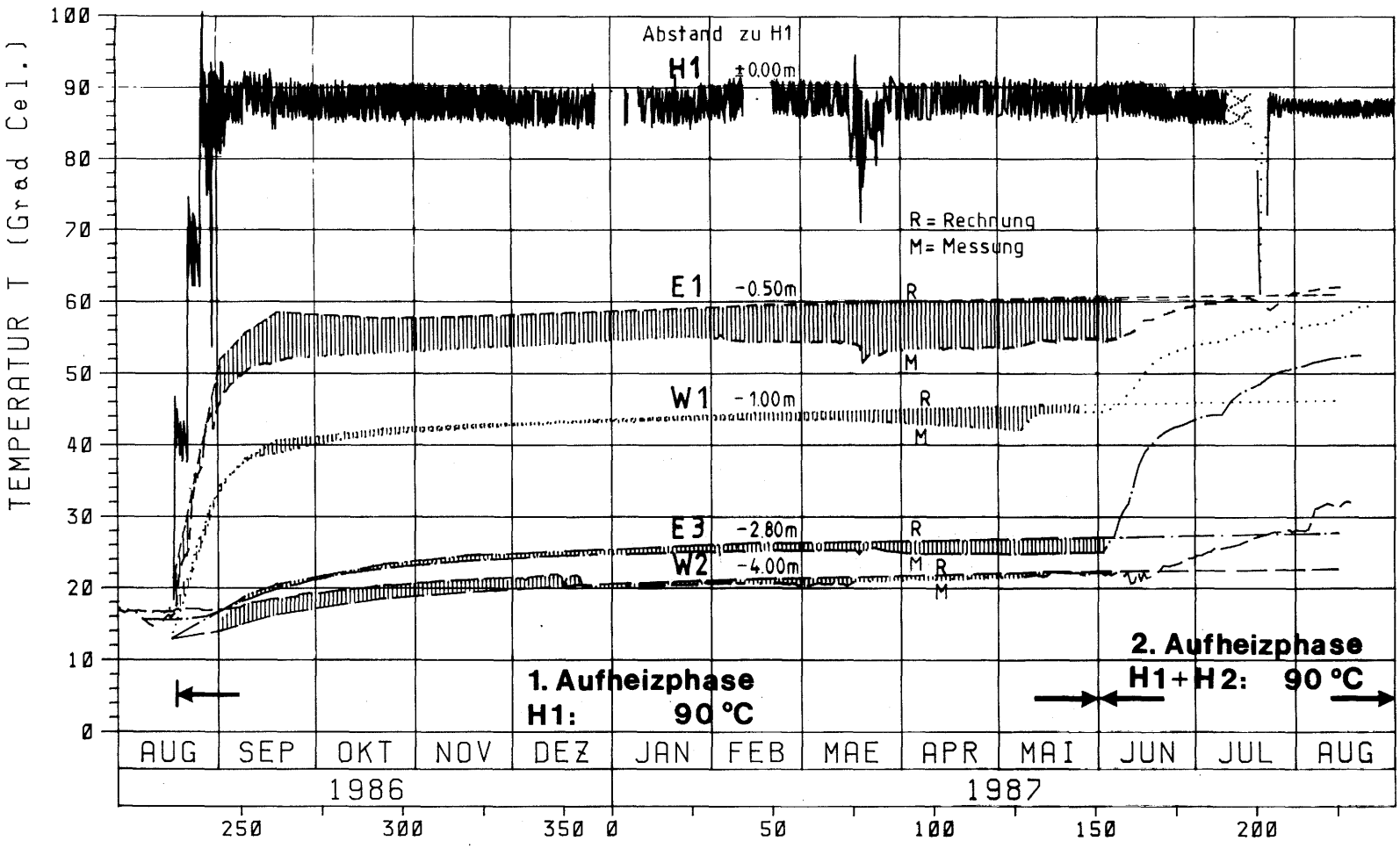
Fig.: 12: Modellierung der Gebirgstemperaturen für den 15.05.1987
(Ende 1. Aufheizphase)

Die gemessenen Temperaturen blieben bis auf die Werte bei +3,50 m Abstand unterhalb den errechneten.

In 18,00 m Teufe wichen die Meßwerte nur im Nahbereich bis ±1,00 m von H1 um maximal 5 °C von denen der Modellierung ab.

Wegen der oben angesprochenen Wärmeströmung waren bei der Modellierung im Horizontalschnitt in Höhe des oberen Endes des Erhitzers derart gute Übereinstimmungen erwartungsgemäß nur nödlich H1 in Abständen größer -0,50 m und südlich größer +7,00 m vorhanden.

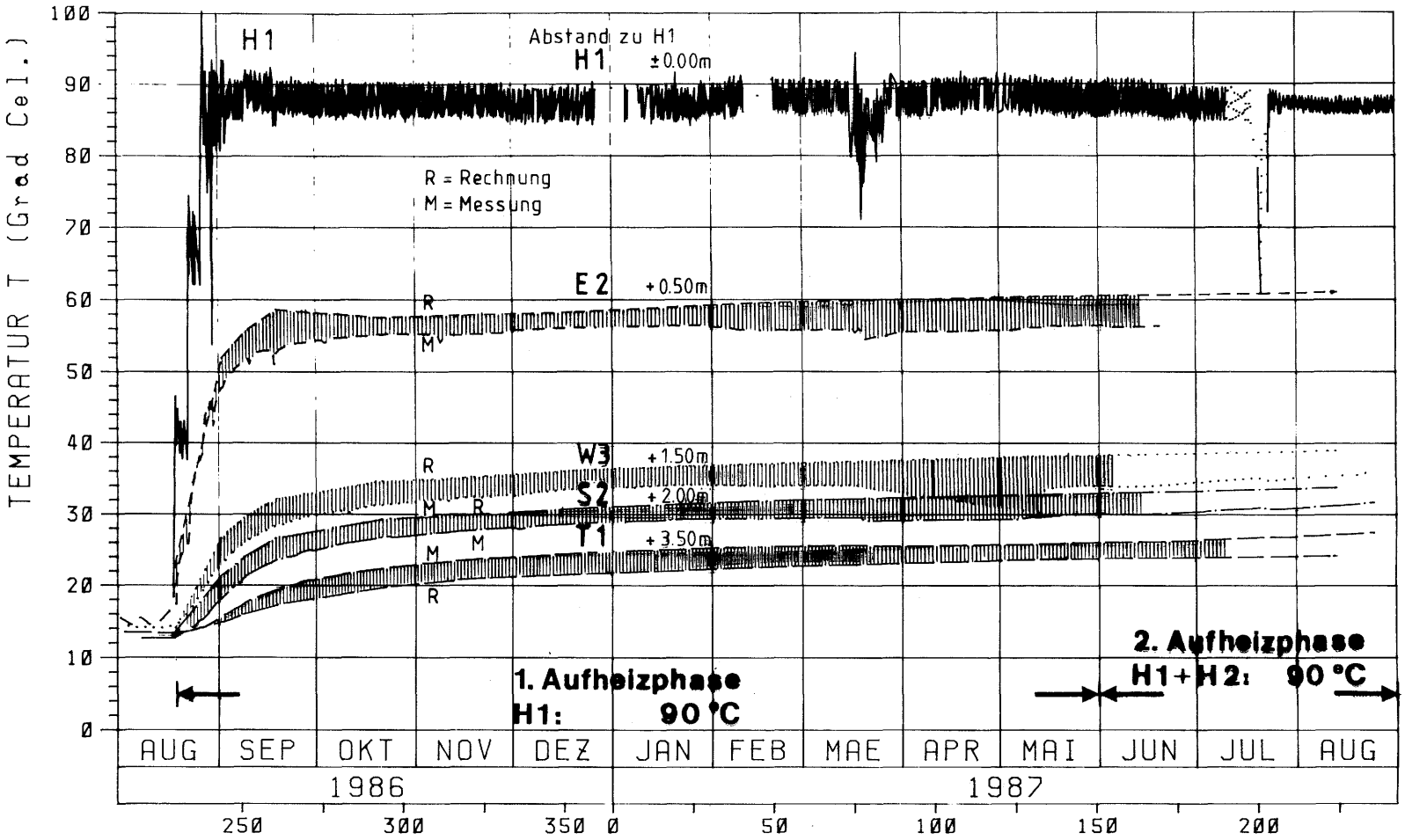
Das gewählte Modell gestattet also mit hinreichender Genauigkeit die Abschätzung der Temperaturverteilungen. Der Einfluß von Feuchtigkeit, natürlichen und thermodynamischen Strömungen in der näheren Umgebung einer Heizquelle kann aber örtlich zu Abweichungen führen. In diesen Fällen sollte eine Parameterstudie mit Grenzwerten durchgeführt werden. Weiterführende Modellierungen sollten die Auswirkungen von Wärmeströmungen in offenporigen Materialien untersuchen, um den vertikalen Wärmefluß besser beschreiben zu können.



KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE
———	130 H1TE15 000	H 1	+0.0M/15.0M
– – – –	005 E1T0150 005	E 1	-0.5M/15.0M
·····	068 W1T0150 005	W 1	-1.0M/15.0M

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
—·—	023 E3T0150 005	E 3	-2.8M/15.0M
—··—	071 W2T0150 005	W 2	-4.0M/15.0M

Fig. 13: Modellierung der Gebirgstemperaturen
Vergleich mit Meßwerten nördlich H1



KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE
———	130 H1TE15 000	H 1	+0.0M/15.0M
– – – –	014 E2T0150 005	E 2	+0.5M/15.0M
·····	074 W3T0150 005	W 3	+1.5M/15.0M

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
—— · ——	081 S2T0150 005	S 2	+2.0M/14.25M
—— —— ·	053 T1T0150 005	T 1	+3.5M/15.0M

Fig. 14: Modellierung der Gebirgstemperaturen
Vergleich mit Meßwerten südlich H1

3.7 Zusammenfassung

Das durch die Aufheizung im Gebirge erzeugte Temperaturfeld ist trotz der ausgeprägten Störungszone im wesentlichen homogen. Örtlich unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten infolge Feuchtigkeitsgehalt, Porosität und Kluftwasserbewegung führen zu lokal begrenzten Einflüssen auf die Ausbreitung des Wärmefelds. In der näheren Umgebung einer Wärmequelle werden diese Auswirkungen durch Wärmeströmungen überlagert. Die Wärmeströmung im schwächer durchfeuchteten Gebirge südlich H2 im Bereich -2,00 m bis +4,00 m beeinflußt das Temperaturfeld stärker als die der Strömung des Kluftwassers.

Der Zeitpunkt des Erreichens des stationären Zustands ist proportional zum Abstand. Nach einem halben Jahr ist das Temperaturfeld auch in größerem Abstand zur Wärmequelle quasi stationär. Die vom Erhitzer erzeugte Temperaturdifferenz auf der Bohrlochverrohrung betrug ca. 80 °C. Sie verringerte sich mit dem Abstand: 0,50 m - 45 °C, 1,00 m - 30 °C, 1,50 m - 16 °C, 2,00 m 13 °C. Diese Angaben sind bei der Planung der Lagerungsdichte im Endlager von Bedeutung.

Die Modellierung beschreibt mit dem Ansatz, dem nur die Wärmeleitung zugrunde liegt, das globale Temperaturfeld hinreichend genau. Einflüsse aus Konvektion müssen nur dann gesondert abgeschätzt werden, wenn ihre Ursachen mehr als nur lokale Auswirkung haben. Der Nahbereich um eine Heizquelle wäre dann strömungsphysikalisch zu untersuchen.

4 VERFORMUNGEN DES GEBIRGES

4.1 Bedeutung der Verformungen

Die Verformungen im Gebirge sind sichtbare oder meßbare Auswirkungen von Spannungsänderungen. Infolge des hohen E-Moduls des Granits von rund 40 GPa bleiben die Verformungen klein (siehe NTB 88-39). Andererseits können bei Überschreiten der Bruchspannung Risse auftreten, die - ebenso wie durch Überspannnung ausgelöste Gleitungen auf vorhandenen Kluftflächen - zu größeren nichtlinearen Verformungen führen.

Im Hinblick auf die Endlagereignung ist die Verformung nur als Integral über einen größeren endlichen Bereich der Formation von Interesse. In diesem Bereich ist die Formation jedoch nicht unbedingt homogen, sondern besteht aus von Klüften zerteilten Felspartien. Die unterschiedlichen Steifigkeiten in dieser Gesteinsmatrix führen dazu, daß die elastischen Gesteinsverformungen zum Teil oder völlig von den Klüften aufgezehrt werden können, so daß die integrale Verformung erheblich kleiner ist als die, die sich rechnerisch bei elastischen Verhältnissen ergeben würde. Entscheidend für die Endlagerformation ist nun, ob die Verformungen zu Verringerungen oder Vergrößerungen der Gebirgspermeabilität führen. Verringerungen können zum Beispiel dadurch entstehen, daß die thermische Expansion des Gesteins zum Schließen von Rissen und Klüften führt. Vergrößerungen der Permeabilität des Gesteinsverbands haben ihre Ursache im Entstehen und in der Weiterentwicklung von Rissen und Verschiebungen auf vorhandenen Kluftflächen. Diese Verformungen bleiben wie die sie verursachenden Zustände - Temperaturen und Spannungen - auf den Bereich von wenigen Metern um die Erhitzer beschränkt.

Aus diesen Verformungen resultierende Permeabilitätsänderungen sind folglich auch von geringerer Bedeutung als zum Beispiel die künstlich geschaffenen Wegsamkeiten durch den Aufschluß des Endlagers.

Die eingesetzten Meßsysteme zur Verformungsmessung dienen hauptsächlich zur Verifizierung der Aussage, daß infolge der starken Dehnungsbehinderung die Verformungen solche Werte nicht überschreiten, die die Formation im Sinne ihrer Endlagereignung schädigen können.

4.2 Großräumige Verformungen

Neben den örtlichen Verformungen im erwärmten Bereich des Testfelds wurde auch das globale Verformungsfeld im Umfeld des Wärmetests kontrolliert. Ziel dieser Beobachtungen war die Wechselwirkung zwischen örtlichen und globalen Verformungen. Diese konnte darin bestanden haben, daß die örtliche Aufheizung weiträumige Effekte induzierte und umgekehrt die Effekte weiträumiger Verformungen die örtliche überlagerten.

Durch Messung der Verformungen von Punkten in- und außerhalb des erwärmten Bereichs konnten z.B. Rückschlüsse auf Änderung der Hydrologie gezogen und die Auswirkungen saisonaler Effekte zur Interpretation der Messungen des näheren Bereichs erkannt werden. Das mikroseismische Untersuchungsprogramm diente in diesem Zusammenhang dazu, das Auftreten von Rissen, deren Ort und deren Ausdehnung zu erkennen. Die verwendeten Meßverfahren mußten hochpräzise sein, da die Verformungen im Granit wegen dessen hoher Steifigkeit sehr klein sind.

4.2.1 Neigungsmessungen mit Gezeitenpendeln

Im Rahmen des Teilvorhabens Neotektonik - NT wurden auch im engeren Umfeld des Wärmetests drei Gezeitenpendel betrieben, um Wechselwirkungen zwischen Effekten aus der Aufheizung und aus großräumigen Verformungen erkennen zu können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im NTB 89-11 vorgestellt.

4.2.2 Präzisionsnivellement

Seit Herbst 1984 (Bezugsmessung) wurden die Höhenlagen von 13 Meßpunkten im KWO-Stollen und sechs Meßpunkten in den FLG-Stollen (Fig. 15) jeweils im Frühjahr bei Stauspiegeltiefstand und Herbst bei Stauspiegelhochstand mittels eines Präzisionsnivellements vermessen. Im Herbst 1988 wurden zwei Messungen durchgeführt.

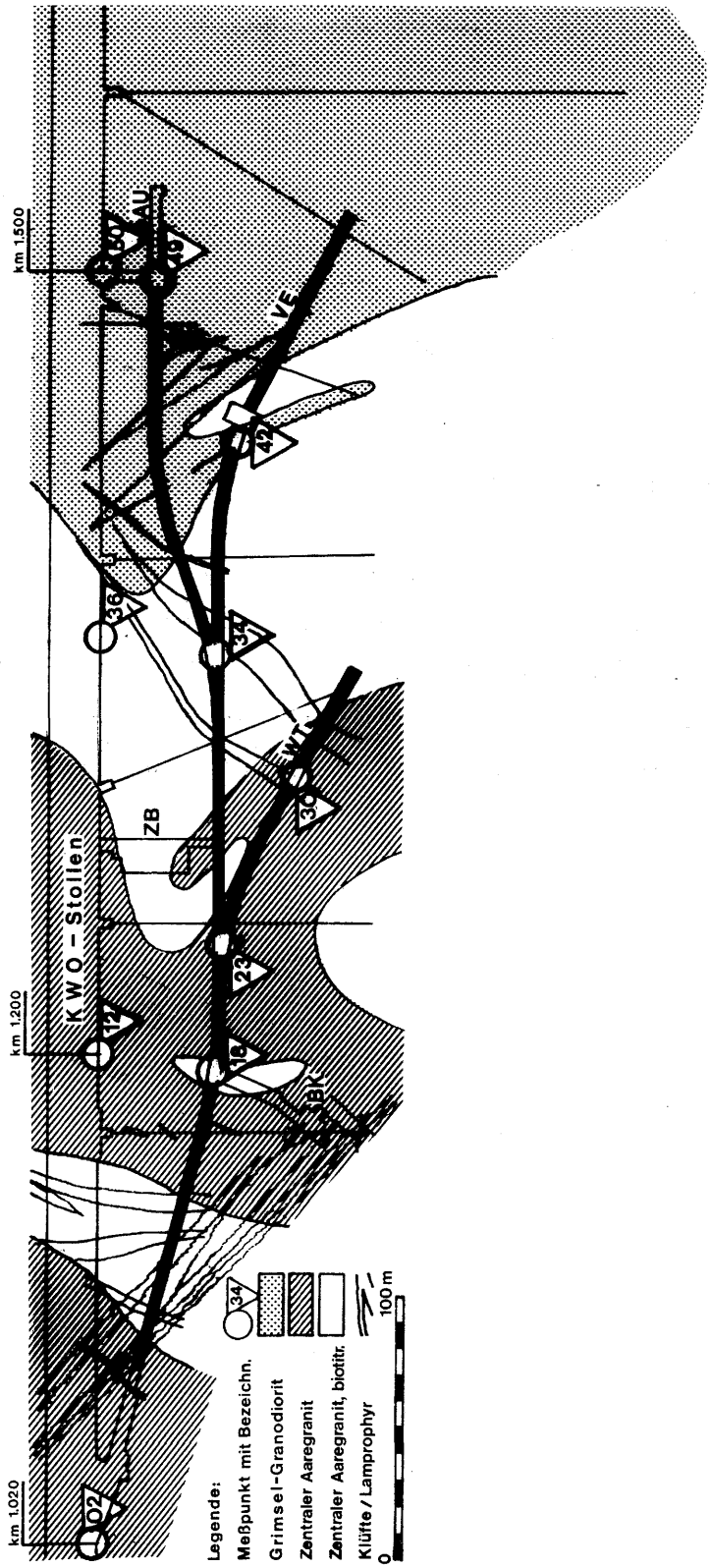


Fig. 15: Lage der Meßpunkte für das Präzisionsnivellement im FLG

Messung Nr.	Datum	Meß-genauigkeit	Differenz Hin-Rück	Größte Einzelabweichung Wert	Meßpunkt	Meß-genauigkeit	Differenz Hin-Rück	Größte Einzelabweichung Wert	Meßpunkt	Abweichung FLG-KWO
		- FLG-Stollen -				- KWO-Stollen -				
1	09.11.84	±0,27	0,46	0,18	10.2-1.8	±0,25	0,51	0,26	12.0-13.6	0,24
2	15.04.85	±0,07	0,14	0,09	10.2-1.8	±0,25	0,01	0,32	13.6-15.0	0,07
3	09.09.85	±0,26	0,68	0,34	2.3-3.4	±0,24	0,42	0,37	15.0-17.5	0,37
4	12.05.86	±0,14	0,01	0,15	2.3-3.4	±0,14	0,20	0,16	10.2-12.0	0,10
5	26.08.86	±0,20	0,03	0,14	2.3-3.4	±0,10	0,19	0,16	12.0-13.6	0,33
6	27.04.87	±0,40	0,11	0,34	3.4-4.9	±0,11	0,09	0,14	15.0-17.5	0,52
7	28.08.87	±0,30	0,57	0,33	3.4-4.9	±0,14	0,37	0,19	13.6-15.0	0,0
8	28.04.88	±0,48	1,27	0,48	2.3-3.4	±0,26	0,46	0,29	13.6-15.0	0,73
9	21.09.88	±0,22	0,59	0,30	3.4-4.9	±0,21	0,06	0,26	10.2-12.0	0,30
10	04.10.88	±0,33	0,21	0,35	10.2-1.8	±0,20	0,12	0,29	12.0-13.6	0,02

Tab. 3: Meßgenauigkeiten der Nivellements in mm

Die Messungen erfolgten mit einer rechnerischen Genauigkeit von ±0.07 mm bis ±0,48 mm (Tab. 3). Dabei ergab sich zwischen den Meßpunkten 02 und 50 eine größte Differenz zwischen Hin- und Rückmessung von 1,265 mm im FLG-Stollen und 0,51 mm im KWO-Stollen. Die größte Einzelabweichung betrug 0,48 mm im FLG-Stollen und 0,37 mm im KWO-Stollen, die größte Differenz zwischen FLG- und KWO-Stollen betrug 0,73 mm.

Die FLG-Stollen liegen ca. 50 m westlich des KWO-Stollens. Die gemessenen Höhenänderungen betragen im KWO-Stollen zwischen +0,65 mm und -0,30 mm und im FLG-Stollen zwischen +0,45 mm und -1,10 mm. Sie sind somit nur etwas größer als die erzielbare Genauigkeit eines Nivellements mit den eingesetzen Equipments. Eine Interpretation muß immer unter diesem Gesichtspunkt geführt werden.

Die Sohlenhebungen im KWO-Stollen korrelieren eindeutig mit den Stauspiegelschwankungen (Fig. 16, 17, 18). Die Größe der Verformungen ist umgekehrt proportional zum Abstand der Meßpunkte zum Grimselstausee. Eine Ausnahme bilden die Sohlenhebungen der 8. und 9. Messung vom 28.04.1988 und 21.09.1988. Zu diesen Zeitpunkten sind die nördlich km 1,5 registrierten Sohlenhebungen gegenläufig zu der bisherigen Periodizität. Das Kontrollnivellement vom 04.10.1988 entsprach bei gleichen Bedingungen wie bei der 9. Messung bis auf den Meßpunkt 12 wieder der langjährigen Periodizität. Die Abweichungen von der Periode lassen sich durch die bei diesen Messungen erhöhten Meßunsicherheiten erklären.

Die Stauspiegelschwankungen führten bei Tiefstand im Frühjahr zu Hebungen und bei Hochstand im Herbst zu Senkungen der Sohle. Langfristig wurde eine Absenkung der Sohle gemessen. Diese Tatsache deutet entweder auf eine kontinuierliche Senkung der Punkte südlich des Meßpunkts 02 oder eine Hebung dieses angenommenen Festpunktes um durchschnittlich 0,05 mm pro Jahr hin.

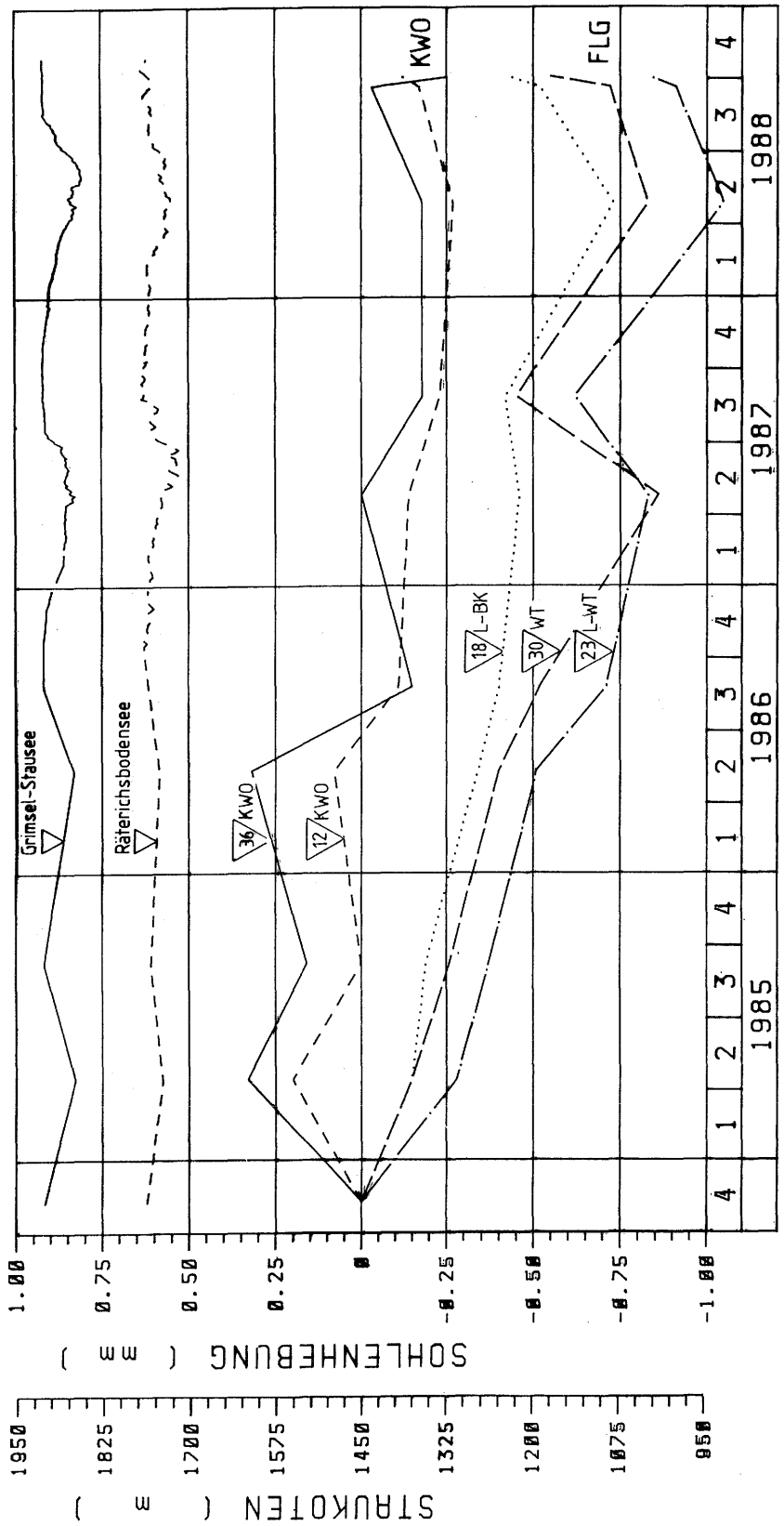


Fig. 16: Sohlenhebungen nördlich der Störungszone

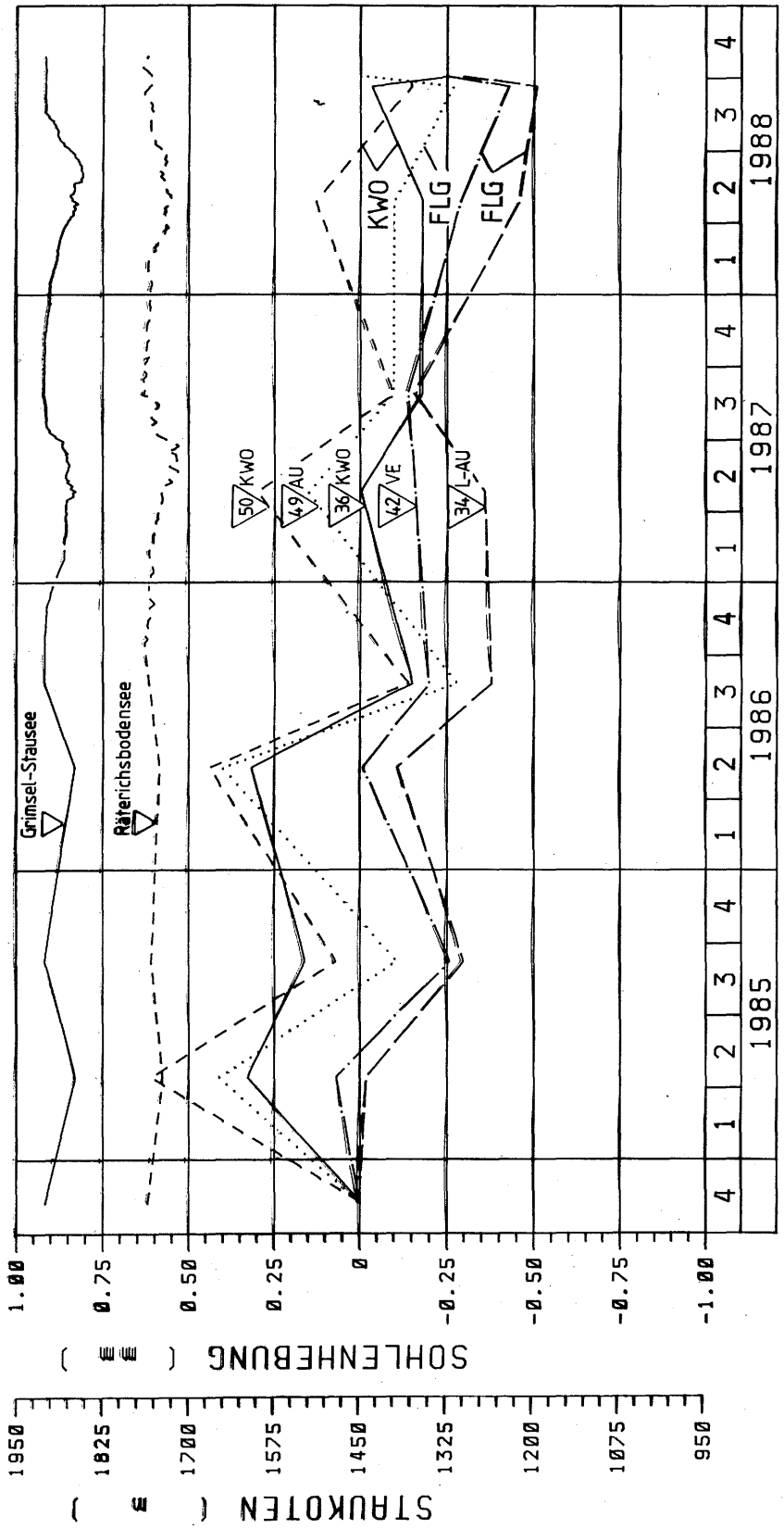
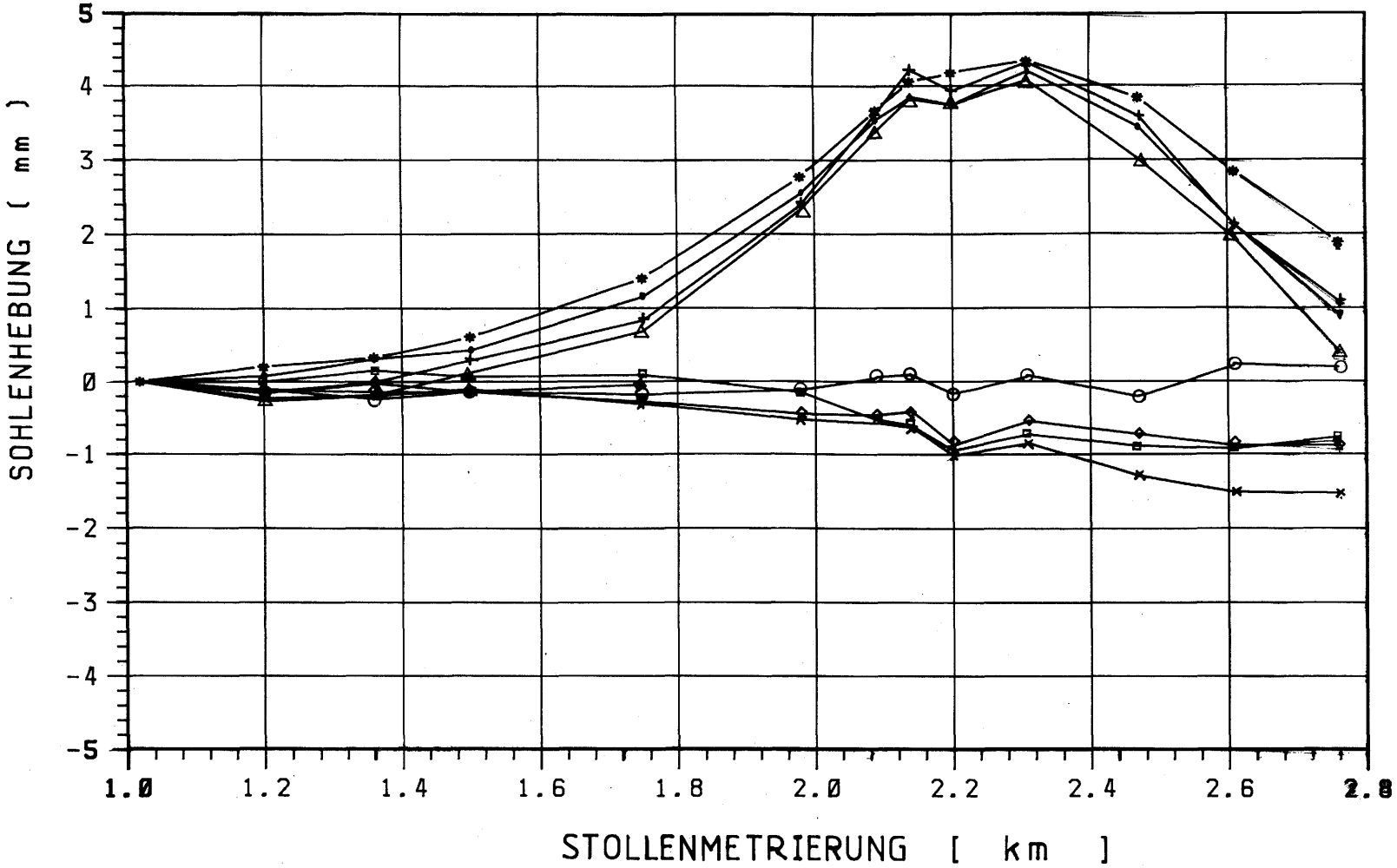


Fig. 17: Sohlenhebungen südlich der Störungszone

Die Stollen im Felslabor reagierten ähnlich wie der Hauptzugangsstollen. Die durchschnittliche Absenkung war umgekehrt proportional zum Abstand zu Meßpunkt 23. Sie betrug hier im Mittel 0,2 mm pro Jahr und verringerte sich auf 0 mm bei Meßpunkt 49. Meßpunkt 18 senkte sich mit durchschnittlich 0,05 mm pro Jahr. Bis zum ersten Nivellement in 1987 senkten sich die Laborstollen gegenüber dem KWO-Stollen stetig ab. Die zweite Messung in 1987 bei Hochstand zeigte jedoch eine Hebung der Laborstollen gegenüber dem KWO-Stollen (Meßpunkt 18, 23, und 30 in Fig. 16 und Meßpunkt 34 und 42 in Fig. 17). Die maximale Hebung erfuhr der Meßpunkt 30 mit ca. 0,4 mm gegenüber der vorausgehenden Messung. Die Sohlenhebungen im KWO-Stollen und am nahegelegenen Meßpunkt Auflockerungstest (49) reagierten jedoch wie zuvor auf die Stauspiegelschwankungen. Die Senkungen blieben ab diesem Zeitpunkt geringer.

Nördlich der Störungszone (Lamprophyr bei WT86 bis WT94,50) bestand im Labor- und WT-Stollen keine signifikante Abhängigkeit der Sohlenhebungen von den Stauspiegelschwankungen (Meßpunkte 18, 23, 30). Südlich des Lamprophyrgangs war diese Abhängigkeit zwar vorhanden, jedoch weniger ausgeprägt als im KWO-Stollen. (Meßpunkte 34, 42, 49). Auch in den FLG-Stollen wichen die Meßwerte der 9. und 10. Messung erheblich voneinander ab.

Die vorliegenden Höhenänderungen ließ sich nicht mit dem Heizbetrieb korrelieren. Der Standort des Versuchs war ja auch bewußt in hinreichendem Abstand zum Stollen gewählt worden, damit die Verformungen infolge örtlicher Erwärmung ohne meßbare Effekte im Stollen blieben.



MESSTELLE, GEBER	Y - WERTE 011 N150485	Y - WERTE 021 N090985	Y - WERTE 031 N120586	Y - WERTE 041 N260886	Y - WERTE 051 N270487	Y - WERTE 061 N280887	Y - WERTE 071 N280488	Y - WERTE 081 N210988	Y - WERTE 091 N041088
MESSQUERSCHNITT	KWO	KWO	KWO	KWO	KWO	KWO	KWO	KWO	KWO
MESSUNG VOM	15.04.1985	09.09.1985	12.05.1986	26.08.1986	27.04.1987	28.08.1987	28.04.1988	210988	041088
MESSUNG NR.	2	3	4	5	6	7	8	9	10
STAUKOTE (M NN)	1862.3	1907.5	1864.4	1908	1862.4	1908.7	1863.74	1907.32	1906.99

Fig. 18: Sohlenhebungen im KWO-Stollen

4.2.3 Stollenkonvergenzen

Zur Interpretation der anderen Verformungsmessungen sowie zur Untersuchung des Verformungsverhaltens in diesem Gebirgsbereich in unmittelbarer Nähe zu einer durchschlägigen Störungszone wurden Stollenkonvergenzen im Stollen oberhalb der erwärmten Zone gemessen.

Seit Oktober 1984 (Bezugsmessung) wurden an einem Stollenquerschnitt bei WT95 (KVG2) unmittelbar südlich der Störungszone und einem Stollenquerschnitt bei WT94 (KVG1) direkt daneben in der Störungszone die Stollenkonvergenz überwacht (Fig. 19). Zwischen jeweils sechs gleichmäßig über den Umfang verteilten Ankerpunkten wurden die Abstandsänderungen jeder der neun möglichen Meßstrecken, drei Durchmesser und sechs Sehnen, mit dem Distometer ISETH (Fa. Kern) unter Verwendung von Invardrähten vermessen.

Da die Konvergenzen gering waren und die Sohlenhebungen vom Heizbetrieb nicht beeinflußt wurden, konnte die Stollensohle als Festpunkt für die Verformungsmessungen im erwärmten Bereich angesehen werden.

Die vierjährigen Meßreihen sind in den Beilagen 4.1 und 4.2 dargestellt. Der Meßbolzen in der Sohle des Querschnitts WT95 hatte sich ab Juni 1985 infolge unzureichender Verankerung gelöst. Ab November 1986 wurde er wiederholt neu gesetzt. Seit Februar 1988 lagen zuverlässige Messungen der betroffenen Meßstrecken vor. Die Messungen auf den Meßstrecken 1, 6 und 7 aus diesem Zeitraum konnten nicht verwandt werden. 1984 wurden zwei, 1985 sechs, 1986 vier, 1987 zwei, 1988 fünf und 1989 eine Messung durchgeführt.

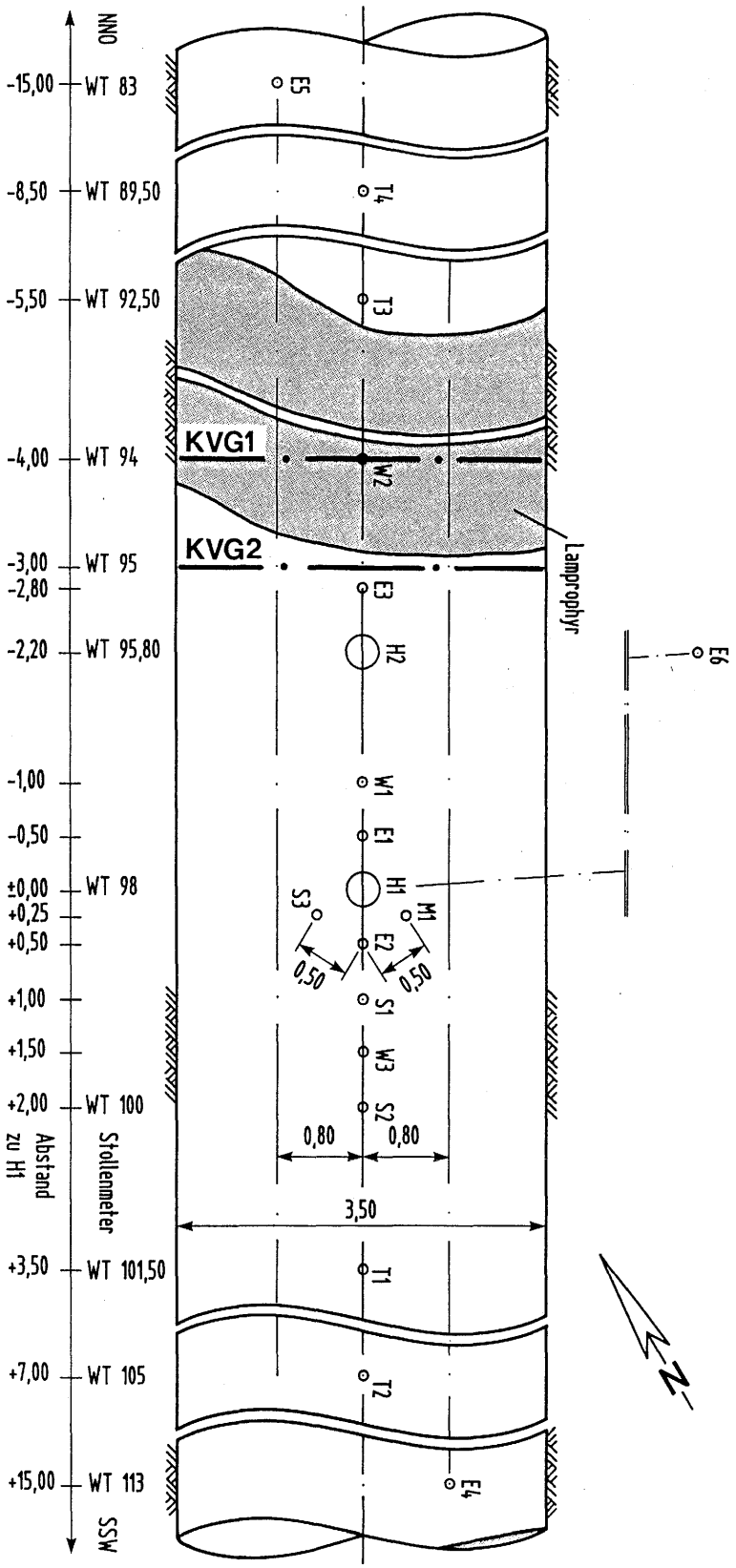


Fig. 19: Lage der Konvergenzmeßquerschnitte

Die größten Konvergenzen in Profil WT95 betrugen ca. ±0,4 mm bzw. 0,11 ‰ und in WT94 weniger als ±0,5 mm bzw. 0,14 ‰. Die Meßgenauigkeit des Distometers wurde zu ±0,02 mm angegeben. Auffallend sind die seit Juli 1985 auftretenden positiven Konvergenzamplituden mit einer Zykluszeit von ca. 14 bis 15 Monaten. Die ersten beiden Zyklen sind in beiden Querschnitten bei fast allen Meßstrecken deutlich erkennbar. Bei WT94 trat der dritte Zyklus nur noch teilweise auf, während bei WT95 der vierte noch erkennbar war. Eine Korrelation dieser Effekte mit natürlichen, saisonalen oder aus dem Wärmetest induzierten Ereignissen war nicht erkennbar. Bei WT94 blieben die Meßstrecken nach anfänglicher Längung bis Ende 1986 relativ konstant.

Seit Mitte 1986 wurden auf den meisten Meßstrecken dieses Querschnitts Verkürzungen von ca. 0,08 mm/a gemessen. Im Querschnitt WT95 war diese Verkürzung nur bei den Meßstrecken erkennbar, die mit dem Firstbolzen verbunden waren.

Bis auf die angesprochene Periodizität war der Verlauf der Meßreihen unstetig. Es bestand weder eine Übereinstimmung der Kurven von Meßstreckenpaaren gleicher räumlicher Anordnung zwischen den beiden Querschnitten, noch sind innerhalb der Meßquerschnitte zwischen gleichgerichteten Meßstrecken ähnliche Verformungen aufgetreten. Eine Korrelation zu dem Heizbetrieb mit Aufheiz- und Abkühlphasen war nicht erkennbar.

4.3 Verformungen im erwärmten Bereich

Die Grundsätze des temperaturbedingten Verformungsverhaltens bei der Aufheizung eines begrenzten Gebirgsvolumens wurden in Abschnitt 4.1 erläutert. Die im unmittelbar durch die Aufheizung betroffenen Bereich eingesetzten Meßsysteme sollten die Aussagen ermöglichen, ob neben anderen auch signifikante Temperatureinflüsse vorhanden sind und ob ihre absolute Größe die Werte der Prognoserechnung nicht überschreitet.

Die Größe der Verformungen war in erster Näherung proportional zu den Isothermen.

4.3.1 Inklinometermessungen

Mit der Inklinometersonde wurden die radialen Bohrlochverschiebungen der Bohrungen E2, E3 und M1 registriert (Fig. 20). In E2 und E3 wurden die Neigungen in Schritten von 0,50 m und in M1 von 1,00 m aufgenommen. Die in den Beilagen 4.3 bis 4.11 aufgetragenen radialen Bohrlochverschiebungen sind die Differenzen der auf das Bohrlochtiefste (angenommener Festpunkt) bezogenen Bohrlochverläufe zu denen der Bezugsmessung. Die dargestellte positive Achse A entspricht der Stollenachse Richtung Ausgang (NNO), die Achse B ist orthogonal dazu (SOO).

Der Sondenhersteller gab die Wiederholgenauigkeit für Messungen mit der 0,50-m-Sonde zu 0,01 mm und die der 1,00-m-Sonde in M1 zu 0,05 mm an. Die in der Praxis erreichte Meßgenauigkeit hing im wesentlichen vom Zustand des Nutenrohrs ab, welches zur Führung der Sonde in den Bohrungen einzementiert war. Die Reproduzierbarkeit des Sondenlaufs wurde durch die Ablagerung von Sedimenten und Korrosionsprodukten in den Nuten beeinflußt. E2 und E3 waren mit Aluminium- und M1 mit Kunststoffverrohrungen ausgerüstet. Die Bezugsmessungen erfolgten am 27.09.1984. Die größten Verschiebungen traten innerhalb der ersten drei Monate bei allen drei Bohrungen in Stollennähe auf. Sie betrugen in M1 6 mm Richtung SSO, (Beilage 4.9), in E2 11 mm Richtung SW (Beilage 4.6) und in E3 8 mm Richtung SO (Beilage 4.3). In M1 und E2 nahmen diese Verformungen bis 2,00 m Teufe auf weniger als die Hälfte ab und verminderten sich in M1 relativ kontinuierlich mit wachsender Teufe. Die Verformungen von E2 waren unstetiger und wechselten mehrfach sprunghaft die Richtung. In 10,00 m Teufe wurde sowohl in E2 als auch in M1 ein stärkerer Sprung registriert. Weitere größere Unstetigkeiten traten auf bei 7,00 m und 12,50 m Teufe in A-Richtung und bei 3,50 m und 15,50 m in B-Richtung.

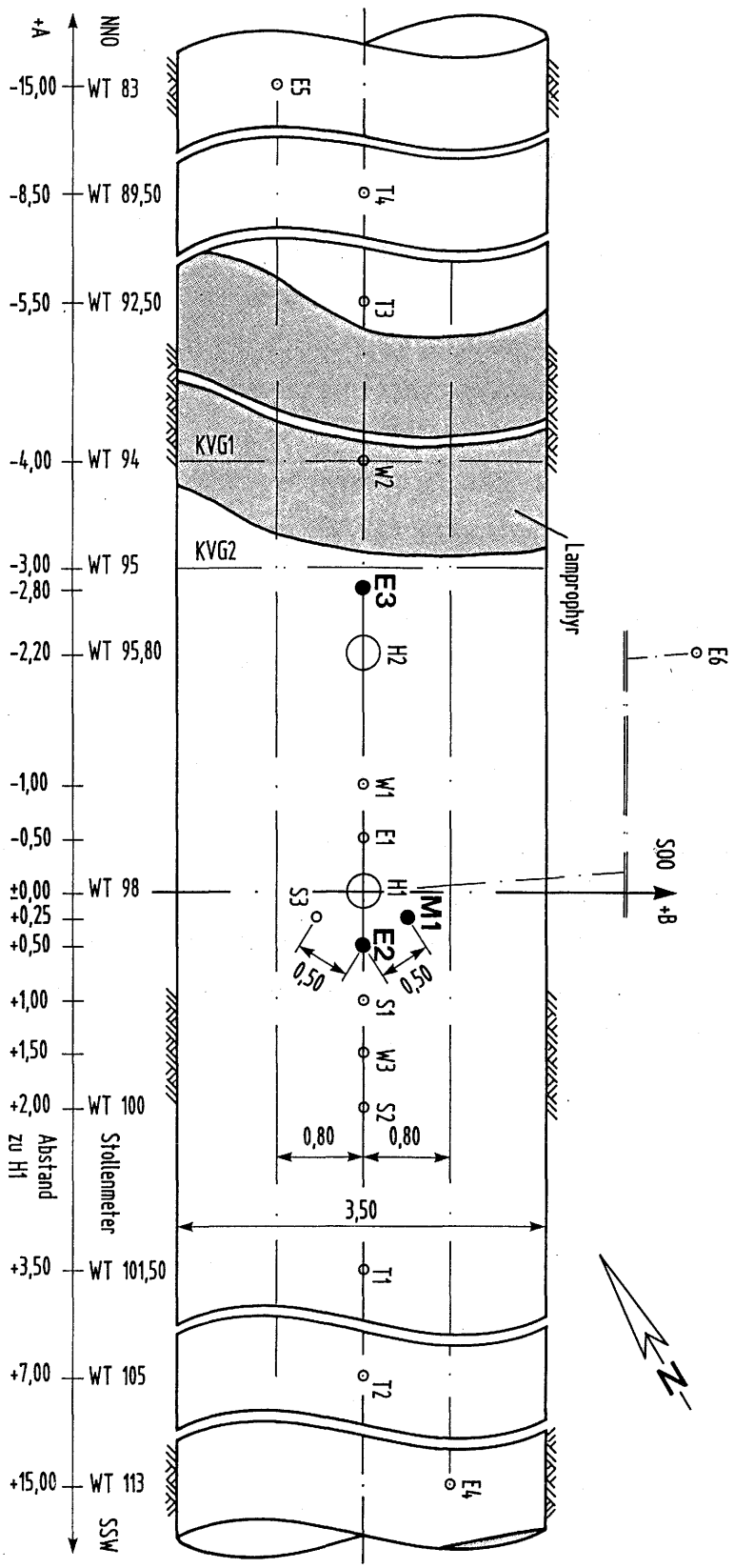


Fig. 20: Lage der Inklinometerbohrungen und der Meßrichtungen

Die Verformungen von E3 wechselten schon zwischen 0,50 m und 1,00 m ihre Richtung von SO nach O und nahmen auf ca. 10 mm zu. Der Größtwert lag bei 4,50 m Teufe mit ca. 12 mm in gleicher Richtung.

In der Folgezeit bis zum Beginn der 1. Aufheizphase im August 1986 betrugen die größten Verformungen in allen Bohrungen 3 mm außer bei einer Messung in E3. Bis auf wenige Ausnahmen waren die Verformungen in diesem Zeitraum in E2 und M1 in B-Richtung mit weniger als 0,5 mm gering. In A-Richtung waren die Beträge größer und in M1 teilweise zunehmend, teilweise abnehmend. Die Unstetigkeiten in den Deformationsverläufen von E3 resultierten aus der Lage dieses Bohrlochs in der Störungszone.

Bei der Bewertung der Absolutwerte dieser Verschiebungen muß jedoch der Einfluß der Darstellung mit dem Bezug auf das Bohrlochtiefste beachtet werden. Bei Annahme eines rotationssymmetrischen Verschiebungsfelds wäre es unter Umständen angebrachter, die Darstellung auf das Erhitzerzentrum zu beziehen.

Die Richtungen und Beträge der Verformungen aus der Vorlaufphase waren sehr unterschiedlich. Dies ist besonders auffällig bei den nur 0,50 m voneinander entfernten Bohrungen M1 und E2.

Der Einfluß des Heizbetriebs auf die radialen Verformungen war nicht signifikant. Die größten Verschiebungen des Bohrlochmunds gegenüber dem Bohrlochtiefsten betrugen seit Beginn der 1. Aufheizphase bis zum Beginn der 3. Aufheizphase in M1 5 mm Richtung Ost (Beilagen 4.10 und 4.11), in E2 bis zur Mitte der 3. Aufheizphase 7 mm Richtung Nord (Beilagen 4.7 und 4.8) und in E3 5 mm bis zu mehreren Zeitpunkten gegen Ende der Testphase in wechselnden Richtungen (Beilagen 4.4 und 4.5). Die Radialverformungen blieben auch während der Gebirgsaufheizung uneinheitlich. Die Separation thermischer Effekte von denen aus anderen zeitabhängigen Verformungen war nicht möglich.

4.3.2 Extensometermessungen

Seit dem 03.03.1985 wurden die axialen Bohrlochverschiebungen in der näheren Umgebung der Erhitzer mit fünf Fünffach- und einem Dreifachstangenextensometer kontinuierlich gemessen (Beilage 4.12). Die Distanzänderungen zwischen den jeweiligem Anker und der Kopfplatte wurden mittels eines Glasfaserstabs übertragen, der in einem einzementierten Hüllrohr geführt wurde.

Die drei Extensometer E1, E2 und E3 waren vertikal in den Abständen -0,50 m, +0,50 m und -2,80 m zu H1 eingebaut (Fig. 21). Die Kopfpunkte von E4 und E5 lagen 0,80 m östlich bzw. westlich der Stollenachse in +15,00 m und -15,00 m Abstand. Sie waren unter 45° geneigt, so daß sie sich bei H1 in 15,00 m Teufe kreuzten (Beilage 1.1). Die Ankerpunkte aller Extensometer waren in Teufen von 8,00 m, 12,00 m, 15,00 m , 18,00 m und 22,00 m angeordnet (Beilage 4.12). Bezugspunkt für die Messung der Verschiebung der Anker war der jeweilige Extensometerkopf mit Ankerpunkt auf der Sohle. Das Dreifachextensometer E6 stieß aus dem Laborstollen unter einem Einfallen von 28° von Osten auf die Erhitzermitte zu und endete 0,50 m vor H1.

Alle Extensometer waren mit Thermometern zur Temperaturkompensation ausgerüstet. Die Erfassung der Verformungen war wegen ihrer geringen Größe schwierig. Nach Erreichen der Zieltemperatur einer Heizphase war die Verformungsrate inclusive Temperaturdehnung der Glasfaserstäbe größtenteils kleiner als 0,2 mm/a oder 4 µm je Woche. Die Genauigkeit des Meßsystems wurde vom Hersteller mit ca. 0,2 mm angegeben.

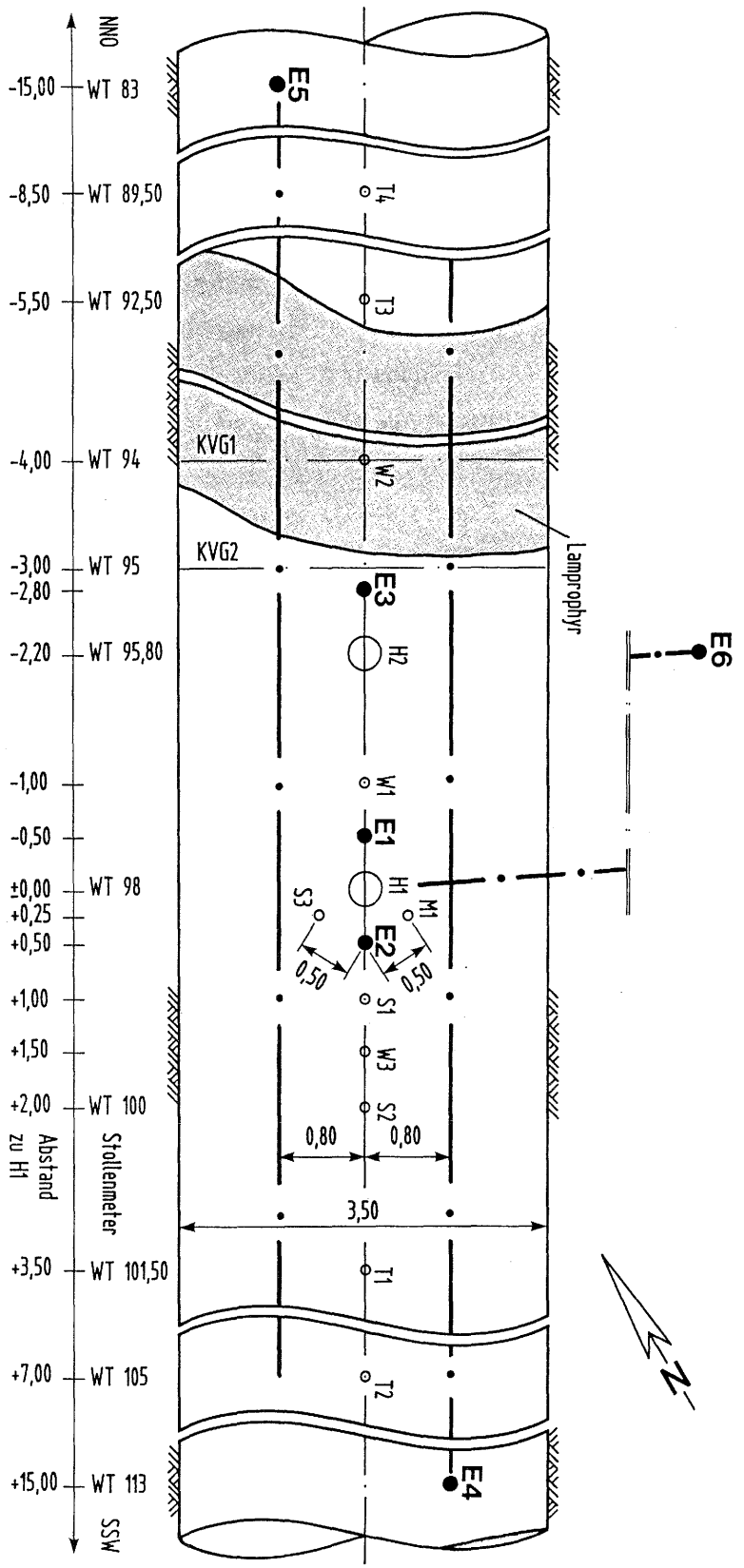


Fig. 21: Lage der Extensometer

Die Reibung zwischen Extensometerstange und Hüllrohr verhinderte die synchrone Registrierung der Verschiebungen (Slip-Stick-Effekt), so daß in erster Näherung eine obere Einhüllende der Meßkurven zu ihrer Interpretation genutzt werden muß. Es dauerte infolge dieses Slip-Stick-Effekts oft sehr lange, bis meßbare Verformungen ablesbar waren und vom "Meßwertrauschen" unterschieden werden konnten. Die Funktionsuntüchtigkeit eines Wegaufnehmers konnte nur bei Totalausfall am Meßbereichsendwert oder nach längerer Zeit am Ausbleiben der Meßdatenentwicklung erkannt werden.

Die Wegaufnehmer der Extensometer wurden in regelmäßigen Intervallen oder bei Bedarf kontrolliert und gewartet. Bei Austausch von Wegaufnehmern entstanden Meßwertsprünge, die bei der Auswertung zu kompensieren waren. Hier war nicht immer eindeutig zu unterscheiden, ob der Meßwertsprung aus dem Austausch oder aus dem Slip-Stick-Effekt resultierte. Aus diesem Grund wurden die Verformungskurven vornehmlich für Zeitbereiche analysiert, in denen die Meßwertentwicklung eindeutig interpretierbar war.

Für die Darstellung wurden die Meßkurven (Beilagen 4.13 bis 4.18) auf den Beginn der 1. Aufheizphase bezogen. Bei positiven Wegen verringerte sich der Abstand zwischen Ankerpunkt und Sohle. Die Meßkurven in der Vorlaufphase begannen in der Regel mit negativen und endeten am Testende mit positiven Wegen.

Zu Beginn der Testphase 1985 traten sehr häufig Meßwertspitzen auf. Sie sind bis auf einige Ausnahmen technischen Störungen zuzuschreiben.

Im Juli und August 1985 fanden zuerst in H1 und anschließend in H2 Erhitzererprobungen statt (Beilagen 4.25, 4.26). Mit der letzten Leistungsabgabe in H2 erfolgte in der Nähe von E1 und E2 eine irreversible Verformung von 0,2 mm im Gebirge oberhalb 8,00 m Teufe (Beilagen 4.19 bis 4.24).

Die vorausgegangenen Leistungsabgaben in H1 erzeugten bei den Spannungsmeßgebern in S3 (+0,50 m) außer bei den Gebern 19 und 23 Spannungsspitzen bis zu 6 bar (Beilage 4.27). Die letzte Temperaturerhöhung in H1 bewirkte jedoch mit Ausnahme der Meßwerte von Geber 19 (Meßrichtung 45° horizontal) nur sehr kleine Spannungsspitzen. Auf die Aufheizung von H2 reagierte nur Geber 19 kurzzeitig. Die Spannungsgeber in S1 (+1,00 m Beilagen 4.28) registrierten kleinere und von denen in S2 (+2,00 m Beilagen 4.29) nur der obere Meßgeber in radialer Richtung deutliche Spannungsspitzen. Die Ursache für die plötzliche Verformung oberhalb 8,00 m nach der ersten Aufheizung von H2 kann der Abbau einer durch die Aufheizung erzeugten Überspannung gewesen sein. Schon bei der letzten Leistungsabgabe in H1 war ein plötzlicher Spannungszuwachs infolge Lastumlagerungen aufgetreten.

Die größte sprunghafte Verschiebung mit einem Wert von 2 mm erfolgte Mitte Januar 1986 ohne vorausgehenden Wärmeeintrag in der Umgebung von E3 (-2,80 m). Bleibende Verformungen wurden nur bei den Ankerpunkten der Teufen 12,00 m und 8,00 m registriert. Es lag eine Diskontinuität zwischen 12,00 m und 15,00 m und eine weitere zwischen 8,00 m und der Sohle vor. Die tiefer liegenden Ankerpunkte in 15,00 m und 18,00 m Teufe hatten eine gleich große, teilweise reversible Verformung, die sich innerhalb von ca. 3 Wochen auf 0,3 mm in 15,00 m Teufe und 0,5 mm in 18,00 m Teufe abbaute.

Offensichtlich hatten in der Störungszone Lastumlagerungen mit größeren Verformungen stattgefunden, wie sie auch im Wärmeteststollen selbst in Form von Abschalungen sichtbar sind.

In den entfernter gelegenen Spannungsmeßgebern wurden keine Spannungsänderungen in Verbindung mit dieser Deformation registriert. Lediglich der Porenwasserdruck entspannte sich einige Tage vorher zeitgleich mit einer geringeren Verkürzung der Meßwege der 15,00- und 18,00-m-Strecken (Beilagen 4.30).

Die im Januar 1986 folgenden Verformungsspitzen in E1 und E2 waren Wärmedehnungen der Glasfaserstäbe aufgrund von Erprobungen von H1. Gleichzeitig wurden kurzzeitige Änderungen der Gebirgsspannungen und Porenwasserdruckspitzen registriert.

Die Anfang April 1986 begonnene Schutzheizung der Erhitzer bewirkte keine Verformungen, wohl aber einen Anstieg der Gebirgsspannungen (Beilagen 4.27 bis 4.29) und erhebliche Schwankungen des Porenwasserdrucks von bis zu 2 bar (Beilage 4.30). Erst mit der kurzzeitigen Temperaturverminderung Ende Mai erfolgte eine nur teilweise reversible positive Verschiebungen der Anker in E1 und E2 Richtung Kopfpunkt. In E2 wurde in 18,00 m Teufe anschließend eine negative Ankerverschiebung Richtung Bohrlochtiefstes von ca. 0,4 mm gemessen. Die größte positive Verschiebung kann wegen eines Datenausfalls mit ca. 0,6 mm bis 0,8 mm nur abgeschätzt werden. Die bleibende Verformung betrug 0,05 mm bis 0,2 mm.

Die geneigten Extensometer zeigten während der Vorlaufphase kaum Verformungen an. Entweder lagen die Ankerpunkte außerhalb des verformten Bereichs oder der Verformungsvektor stand in stumpfem Winkel zur Extensometerrichtung. Konstante Abschnitte in einigen Meßwertverläufen resultieren aus den Ausfällen der Geber.

Verformungen während des Heizbetriebs

Die mit den Stangenextensometern gemessenen Verformungen setzten sich sowohl aus den Gebirgsverformungen wie auch aus den Temperaturdehnungen der Glasfaserstäbe zusammen. Aus diesem Grund mußten die in den Beilagen 4.13 bis 4.18 dargestellten Meßwerte für die Zeit des Heizbetriebs einer Temperaturkompensation unterzogen werden. Die Temperaturdehnung war teilweise erheblich größer als die Gebirgsverformung. Der zur Temperaturkompensation erforderliche lineare Ausdehnungskoeffizient wurde in einem Untersuchungsprogramm des Instituts für Statik an der TU Braunschweig zu $6{,}71 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ bestimmt.

In einem homogenen Gebirge würde sich infolge der Aufheizung ein rotationssymetrisches Verschiebungsfeld einstellen. Für diesen Fall bleiben die Punkte der horizontalen Mittelebene durch den Erhitzer vertikal unverschieblich (Fig. 22, FEM-Modellierung Beilage 4.32). Die Verschiebungen des Granits sind achssymmetrisch zum Erhitzermittelpunkt gerichtet, der sich folglich in "Ruhe" befindet. Die Dehnungen in Richtung der Rotationsachse nehmen von der Mittelebene aus zunächst mit positiven Werten zu und gehen mit zunehmendem Abstand in Stauchungen über. Radial zum Erhitzer steigen die Stauchungen des Gebirges im stark erhitzten Bereich zunächst an und verringern sich allmählich mit zunehmendem Abstand.

Die Meßwerte vor der Temperaturkompensation sind in den Beilagen 4.13 bis 4.18 dargestellt. Die erste Aufheizphase ist aus den Meßwertentwicklungen deutlich an überwiegend positiven Wegen der Ankerpunkte ablesbar. Von E3 (-2,80 m) wurden entsprechend der geringen Aufheizung dieser Gebirgspartie auch nur sehr kleine positive und negative Wege in 15,00 m und 18,00 m Teufe gemessen ($<\pm 0{,}2$ mm).

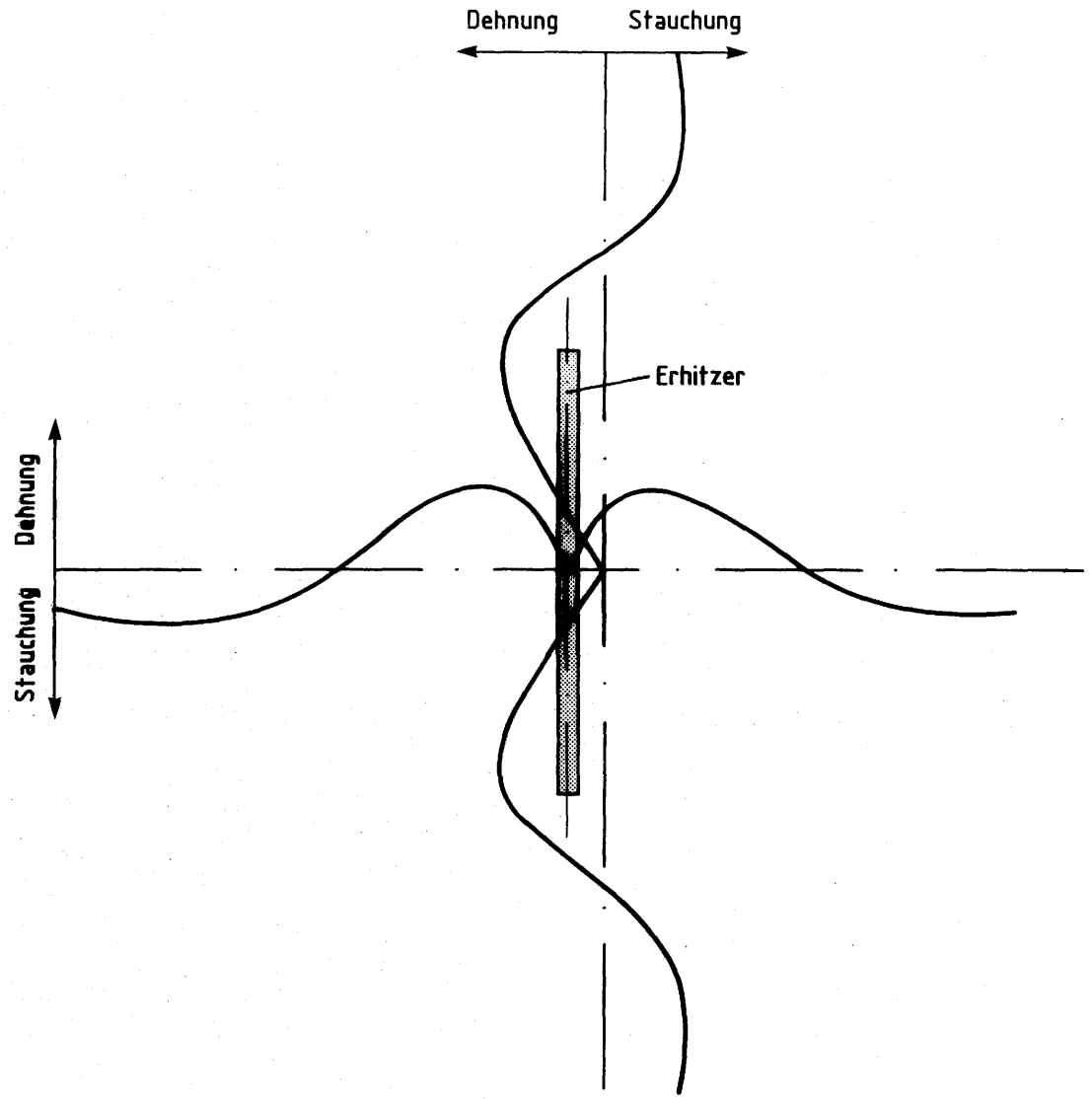


Fig. 22: Gebirgsverformungen in der Umgebung einer stabförmigen Heizquelle

Zusätzlich sind in den Beilagen unten die temperaturkompensierten Extensometerwege eingezeichnet. Die Kompensationen wurden jeweils zum Ende einer Versuchsphase und 2,5 Monate nach Beginn der 1. und 2. Aufheizphase durchgeführt.

Die Kurven entsprechen nicht der oben angegebenen theoretischen Betrachtungen und lassen eine einheitliche Interpretation nicht zu. Die kompensierten Meßwerte sind größtenteils negativ. Der im Labor ermittelte Temperaturausdehnungskoeffizient scheint nur bedingt zur Kompensation der in-situ-Messungen anwendbar. Eine Verringerung würde nur bei einzelnen Extensometern zu plausiblen Ergebnissen führen.

Der widersprüchliche Verlauf der Wege einzelner Extensometerstangen eines Extensometers deutet darauf hin, daß die Ursache eher das unterschiedliche Maß der Bewegungsbehinderung einzelner Stangen ist. Diese Behinderung wird besonders während der beiden Abkühlphasen deutlich. In diesen wurden kaum Verformungen registriert, die reversiblen Vorgängen zugeordnet werden können.

Bis zur Abrüstung des Versuchs im Februar 1989 konnten noch Rückverformungen erfaßt werden, obwohl die Temperaturen des gesamten Testfelds bis Ende 1988 schon unter 25 °C lagen. Da später keine weiteren Versuchsdaten gewonnen werden konnten, können Angaben zum Maß der Reversibilität der Gebirgsverformungen nicht gemacht werden.

4.4 Vergleich mit der Modellrechnung

Aufbauend auf der Modellierung des Temperaturfelds (Kapitel 3.6) wurden die Gebirgsverformungen im ersten Jahr der Aufheizung mit H1 berechnet. Die Resultate sind in den Beilagen 4.31 bis 4.33 zusammengefaßt.

Die berechneten Radialverschiebungen in 0,50 m und 2,00 m Abstand vom Erhitzer betragen in 15,00 m Teufe 0,08 mm und 0,22 mm (Beilage 4.31). In E2 und M1 (0,50 m Abstand von H1) wurden während der 1. Aufheizphase nach ca. 2 Monaten zunächst Bewegungen in Richtung des Erhitzers von maximal 0,5 mm registriert. Sie bildeten sich in der Folgezeit zurück und kehrten sich in der 2. Aufheizphase in Abstandsvergrößerungen zu H1 mit Werten von 0,7 mm und 0,5 mm um.

In E3 (-2,80 m) betrugen die Abstandsvergrößerungen zu H1 nach 2 bzw. 7 Monaten 0,3 mm und 1,8 mm, zu Beginn der 2. Aufheizphase nur noch 0,8 mm.

Die modellierten Vertikalverschiebungen in Höhe des oberen Erhitzerendes betrugen in Bezug auf die horizontale Symmetrieachse in 0,50 m Abstand zu H1 0,22 mm und in 2,00 m Abstand 0,17 mm (Beilage 4.33). Dies entsprach 0,44 mm und 0,34 mm Verschiebung zwischen Unter- und der Oberkante des Erhitzers. Gemessen wurden nach 9,5 Monaten Heizbetrieb in E1 (-0,50 m) o,65 mm, in E2 (+0,50 m) 0,3 mm und in E3 (+2,80 m) 0,45 mm.

Die Modellrechnung ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Inhomogenitäten lieferte also Verformungen, deren Größenordnung mit denen der in-situ-Messung übereinstimmen.

4.5 Zusammenfassung

Von der Vorlaufphase bis zur 2. Abkühlphase wurden sowohl großräumig als auch im Nahfeld die Gebirgsverformungen überwacht. Die Messungen mit den Gezeitenpendeln, die Präzisionsnivellements und die Konvergenzmessungen zeigten keine Auswirkungen des Heizbetriebs. Bei den beiden letztgenannten Verfahren lagen die Meßwerte zum Teil nahe der Meßgenauigkeit, so daß nur durch kleinere Meßraten und statistische Analysen die Sicherheit der Aussagen verbessert werden könnte.

Das globale Verformungsfeld der eigentlichen Testregion wurde vornehmlich durch die Auflaständerungen infolge der Stauspiegelschwankungen bestimmt. Die schubweiche Störungszone verursachte eine Diskontinuität im Verformungsfeld. In der Testregion traten Verformungen nur als Translationen auf, so daß das örtliche Verformungsfeld von den globalen Verformungen nicht beeinflußt wurde. Die Verformungen im erwärmten Bereich wurden durch Extensometer- und Inklinometermessungen erfaßt. Die Verschiebungen, die nach der Kompensation von Temperatur- und Meßeffekten noch mit hinreichender Sicherheit angegeben werden können, wiesen die gleiche Größenordnung wie die Meßgenauigkeit auf. Die Verformungen wurden als Integral eines endlichen Abschnitts der Gesteinsmatrix mit Klüften und dazwischenliegenden Homogenbereichen gemessen. Die größten Verformungen in unmittelbarer Nachbarschaft zum Erhitzer blieben bei den kürzesten Meßabschnitten von 3,00 m kleiner als 0,2 ‰. Da es sich bei diesen Verformungen um Stauchungen handelt, bei denen das Entstehen neuer Risse ausgeschlossen ist, resultieren aus den Verformungen im Nahbereich keine nachteiligen Einflüsse auf die Eignung der Endlagerformation. Weder während der ersten Abkühlphase noch während der zweiten bis zum Abbruch der Messungen bei Versuchsende konnten zeitgleiche Rückbildungen der Verformungen registriert werden.

Die Gebirgsspannungen indes reagierten simultan auf die Reduktion der Wärmeleistung. Das Last-Verformungs-Verhalten ist also von einer Hysterese infolge verzögert-elastischer Anteile bestimmt. Dies ist die Bestätigung für die Beobachtungen während der Aufheizphasen, in denen die Verformungen gegenüber den Spannungen ebenfalls mit erheblicher Verzögerung eintraten.

5. GEBIRGSSPANNUNGEN

5.1 Bedeutung der Gebirgsspannungen

Die Eignung einer Endlagerformation hängt nicht zuletzt von der Standsicherheit des Endlagers ab. Spannungsänderungen und Lastumlagerungen dürfen in Betriebs- und Nachbetriebsphase nicht zu Verformungen führen, die die Integrität der technischen Barrieren beeinträchtigen oder die Durchlässigkeit der geologischen Barrieren signifikant erhöhen.

Vor der Auffahrung des Endlagerbergwerks herrscht im Gebirge der primäre Spannungszustand aus lithostatischem Druck und tektonischen Spannungen. Die Hohlraumerstellung für das Endlager führt zum sekundären Spannungszustand mit Lastumlagerungen auf die Pfeiler zwischen und neben den Hohlräumen. Durch das Einbringen von Abfällen und Versatz, durch die Wärmeproduktion der Abfälle sowie dem festen Verschluß von Bohrungen, Strecken und Schächten ist eine weitere Änderung der Ablastung verbunden. Gegebenenfalls sind durch den Quelldruck der Bentonithülle, Schwankungen im hydrostatischen Druck des Bergwassers, zeitabhängige Verformungen des Gebirges sowie neotektonische Ereignisse ständig Spannungsänderungen möglich. In all diesen Phasen dürfen kritische Spannungszustände so lange nicht auftreten, wie noch Radioaktivität in schädlichen Dosen an die Biosphäre gelangen könnte. Hierzu muß unter anderem für die Betriebs- und Nachbetriebsphase sichergestellt sein, daß die Summe aller Spannungszustände einen hinreichend großen Sicherheitsabstand zur Bruchfestigkeit des Gesteins aufweist.

Die in diesem Wärmetest gemessenen Spannungen sind die Änderungen von Gebirgs- und Bergwasserdruck seit Beginn der Messungen. Sie sind vornehmlich die Reaktionen auf den Wärmeeintrag. Zusätzlich sind aber auch Anteile aus tektonischen Einflüssen und zeitabhängigen Verformungen enthalten, die in der Vorlaufphase vor Beginn der Aufheizung teilweise bereits zu beträchtlichen Spannungszuwächsen geführt haben (Beilagen 4.27 - 4.29).

5.2 Primäres Spannungsfeld

Die Messung der Primärspannungen im Gebirge ist keine triviale Aufgabe. Die Applikation der Geber im Gebirge ist nicht ohne Störung des Primärspannungszustands möglich. Da Verfahren zur direkten Messung von Primärspannungen nicht zur Verfügung stehen, werden Verformungen gemessen und mit Hilfe einer im Labor oder in situ ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehung in Spannungen umgerechnet. Aber auch die Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist nicht unproblematisch.

Im Juchlistock sind bislang im Rahmen des Kraftwerkskavernenbaus und der Untersuchungen im FLG wiederholt in-situ-Spannungsmessungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind widersprüchlich (Greiner 1976, EPFL 1980, Interfels 1983, gbm 1983): Die EPFL ermittelte im Hauptzugangsstollen unter dem Grimselsee die größere horizontale Hauptspannung zu 18 MPa. Bei einem errechneten Überlagerungsdruck von 7,2 MPa ergab sich eine Seitendruckziffer $\lambda_0 = 2,5$. Die Auswertung der Verformungsmessung erfolgte mit einem E-Modul aus Dilatometerversuchen von 19,6 GPa. Interfels hingegen gibt für die Messungen im Bereich des FLG in guter Übereinstimmung mit dem rechnerischen Überlagerungsdruck die Vertikalspannung zu $\sigma_1 = 13$ MPa an. Bei einer gemessenen größeren horizontalen Hauptspannung von $\sigma_2 = 10$ MPa beträgt die Seitendruckziffer hier $\lambda_0 = 0,75$. Im Dilatometerversuch wurde ein E-Modul von 18,3 GPa ermittelt.

Gegenstand der Messungen der gbm waren die Spannungsumlagerungen beim Fräservortrieb des Auflockerungstests (AU) im FLG. In zwei Erkundungsbohrungen wurden hierzu CSIRO-Zellen eingeklebt, die während der Auffahrung kontinuierlich die Entstehung des relativen sekundären Spannungszustands registrierten. Später wurde durch Überbohren der Geber der absolute sekundäre Spannungszustand bestimmt. Unter der Annahme der Gültigkeit des Superpositionsgesetzes ergibt sich der primäre Zustand aus der Subtraktion des relativen vom absoluten sekundären Spannungszustand.

Die Resultate aus der Bohrung AU 83.026 sind wegen ihrer Nähe zum Ausbruch für diese Betrachtung nicht zu verwenden. Für die Bohrung AU 82.002 ergeben sich die Vertikalspannungen zu 4,0 MPa und die Horizontalspannungen zu 9,6 MPa beziehungsweise 6,8 MPa. Die zugehörigen Seitendruckziffern liegen also hier zwischen $\lambda_0 = 1,7$ und $\lambda_0 = 2,4$. Die Berechnung der Spannungen aus den gemessenen Verformungen erfolgte hier mit einem E-Modul von 20 GPa.

Die aus Verformungen berechneten Spannungen sind direkt proportional zum in die Rechnung eingeführten E-Modul. Im Auftrag der Nagra hat die SOLEXPERTS AG in vier Sondierbohrungen Dilatometerversuche durchgeführt. Die hierbei ermittelten Steifezahlen liegen für das unverritzte Gebirge zwischen 20 und 40 GPa. Die Auswertung der Versuche bei höheren Lasten im Entlastungspfad führt stets zu Werten über 25 GPa.

Der Einfluß der Querdehnzahl auf die Spannungsberechnung ist vergleichsweise gering. Sie wurde in den o.g. Auswertungen zwischen $\nu = 0,20$ und $\nu = 0,25$ angesetzt.

In situ gemessene Gesteinsparameter zur Auswertung der in-situ-Messungen sind denen aus Laborversuchen im allgemeinen vorzuziehen. Laborversuche sind jedoch besser zur Ermittlung von Standardkennwerten, zur Klassifizierung und zum Vergleich der Gesteine geeignet. Felsmechanische Laboruntersuchungen an Gesteinen aus dem FLG-Bereich wurden von der ETHL durchgeführt (NIB 81-01). Als E-Modul von Zentralem Aaregranit, Grimsel-Granodiorit, Aplit und Lamprophyr wurden dabei Werte zwischen 42 GPa und 60 GPa ermittelt. Querdehnzahlen ergaben sich zwischen $\nu = 0,33$ und $\nu = 0,40$. Die Abweichungen zwischen den in-situ- und Laborergebnissen resultieren zum einen aus dem unterschiedlichen Umfang der Gefügestörung von Bohrkern und Bohrlochwand. Zum anderen wurden die Bohrkerne im Labor in einem einaxialen Druckversuch geprüft, wohingegen die im

Dilatometerversuch ermittelte Steifigkeit das Integral über den mehr oder minder inhomogenen Gesteinsverband in der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs war.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Resultate bei der Primärspannungsmessung muß man nun nicht nur die Auswirkung der unterschiedlichen Werkstoffparameter auf die Auswertung, sondern auch die besonderen Verhältnisse an den jeweiligen Meßorten berücksichtigen. Um bei der in-situ-Messung des primären Gebirgsspannungszustands im Bereich des FLG und bei den Meßverfahren als solchen zu vertrauenswürdigeren Ergebnissen zu kommen, wurde im FLG von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - (BGR) das Vorhaben "Gebirgsspannungen" (GS) durchgeführt (siehe NTB 39-88).

Es diente zur Überprüfung, Bewertung und Weiterentwicklung von Methoden zur Primärspannungsmessung in tiefen Bohrlöchern. Über die Durchführung und die Ergebnisse dieser Versuche hat die BGR in mehreren Berichten referiert. In einer Vielzahl von Dilatometerversuchen wurden i.a. E-Moduli von 35 GPa bis 45 GPa gemessen, so daß mit hinreichender Sicherheit ein Mittelwert von 40 GPa in die Auswertung eingeführt werden konnte. Die zuverlässigsten Spannungsmessungen konnten mit den zwei- und dreidimensionalen BGR-Überbohrsonden erzielt werden. Als Vertikalspannung wurde in guter Übereinstimmung mit dem rechnerischen Überlagerungsdruck 11-14 MPa gemessen. Die größte horizontale Hauptspannung lag in den meisten Fällen zwischen 25 MPa und 45 MPa. Die Seitendruckziffer $\lambda = 2$ bis $\lambda = 3$ bestätigte den Wert $\lambda = 2{,}5$ der EPFL. Das Verhältnis der größeren zur kleineren Hauptspannung zwischen 1,1 und 2,0 wurde von der deutlichen Paralleltexturierung bestimmt.

In guter Näherung ist der primäre Spannungszustand im Wärmetest dem der Lokation des Versuchs GS gleichzusetzen. Bei etwa gleicher Überlagerung weist das Testfeld ähnliches Gestein und ähnliche Textur auf.

5.3 Thermoinduziertes Spannungsfeld

5.3.1 Bergwasserdruck

Zur Messung des Bergwasserdrucks waren jeweils im Tiefsten der Bohrungen S1, S2 und S3 hydraulische Porenwasserdruckgeber eingebaut (Fig. 23, Beilagen 1.1 und 5.1). Sie waren durch Sandbettung von der darüberliegenden Bohrlochzementation der hydraulischen Druckkissen getrennt. Seit dem Einbau im Dezember 1984 bis zum Beginn der ersten Aufheizphase im August 1986 hatten sich Wasserdrücke von 0,14 (S2), 0,17 (S1) und 0,35 MPa (S3) eingestellt. Die Werte von 0,14 MPa und 0,17 MPa entsprachen in guter Näherung dem hydrostatischen Druck in 16 m Tiefe unter dem drainierenden Teststollen. Die Bohrung S3 lag offensichtlich im Bereich eines anderen Bergwasserhorizonts.

Die Entwicklung der Wasserdrücke ab August 1986 mit der ersten Aufheizphase ist in Beilage 5.2 dargestellt. Der abrupte Wärmeeintrag führte zum sofortigen Anstieg des Wasserdrucks um Werte, deren Größe umgekehrt proportional zum Abstand der Meßorte zum Erhitzer war. Der Größtwert trat in S3 mit 0,85 MPa auf. Diese thermoinduzierten Wasserdrücke resultierten zum einen aus der thermischen Ausdehnung des Wassers in den Poren und Klüften, zum anderen aus der Verringerung des Volumens der Poren und Klüfte infolge der thermischen Ausdehnung des Gesteins.

Die Zuwächse zu Beginn der ersten Aufheizphase bauten sich so schnell wieder ab, wie es die Permeabilität des Gesteinsverbands erlaubte. Dieser Vorgang dauerte in S1 und S2 ca. einen Monat. S3 benötigte ca. ein halbes Jahr zur Rückkehr zum Ausgangsdruck. Anschließend erfolgte jedoch ein plötzlicher Abfall um 1 MPa unter den Ausgangsdruck. Dieser Effekt war durch den Wärmeeintrag nicht zu erklären.

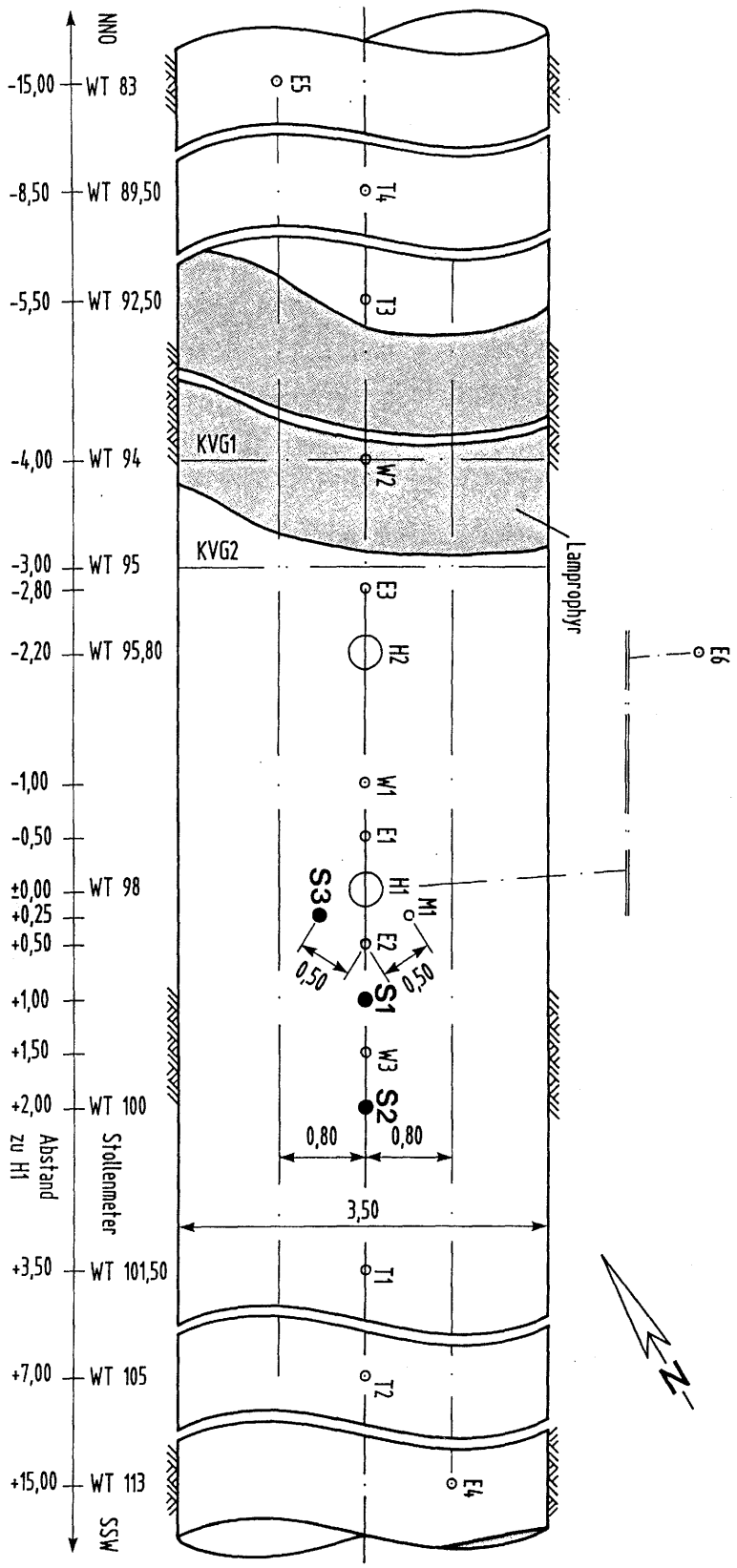


Fig. 23: Lage der Spannungsmonitorstationen

Da die Bohrung S3 gemäß den Beobachtungen der Nullphase einem anderen Bergwassersystem zuzuordnen war als S1 und S2, war dieser Effekt aber auch kein Widerspruch zu den Verhältnissen in S1 und S2.

Der Beginn der zweiten Aufheizphase mit der Aufnahme des Heizbetriebs von H2 führte nicht zu Reaktionen des Bergwasserdrucks an den drei Meßorten. Da die Sonde S2 in 2 m Abstand zum Erhitzer anfangs der ersten Aufheizphase nur gering auf den Wärmeeintrag reagierte, war jetzt bei einem Mindestabstand von ca. 2,80 m zur zweiten Wärmequelle kein Einfluß zu erwarten gewesen, auch wenn die Temperaturregelung in H1 nicht für konstante Temperaturen an den S-Bohrungen gesorgt hätte.

Die Druckänderungen an den Sonden S1 und S2 im zweiten und dritten Quartal 1987 waren mit Einflüssen aus dem Testbetrieb im WT oder auch im BK nicht korrelierbar. Während der ersten und zweiten Aufheizphase erfolgte im Rahmen der Schüttungsmessungen eine Wasserabsenkung über die Bohrungen W1, W2 und W3 (siehe 6.2). Anfang 1988 wurde in diesen drei Bohrungen die Schüttungsmessung durch die Druckaufbaumessungen abgelöst (siehe 6.3). Der Fortfall der Wasserabsenkung bewirkte Druckanstiege in S1 und S2. Die Abkühlung der ersten Abkühlphase blieb ohne Einfluß, da die Temperaturreduktion kontinuierlich und nur um einen geringen Betrag - in 0,50 m Abstand zu H1 nur um ca. 10 °C - erfolgte (siehe 3.3).

Der plötzliche Wärmeeintrag zu Beginn der dritten Aufheizphase zeigte sich als Druckanstieg von ca. 0,02 MPa an allen drei Meßorten, der sich jedoch in S1 und S3 wieder rasch abbaute. Die schlagartige und totale Leistungsreduktion mit Beginn der 2. Abkühlphase führte in S1 und S2 zum Spannungsabfall auf die Werte am Ende der Nullphase, bei S3 auf den Wert, der anfangs der 2. Aufheizphase gemessen wurde.

Während der fünf Betriebsphasen wurden nur beim abrupten Leistungseintrag zu Beginn der ersten Aufheizphase drastische Druckschwankungen im Bergwasser registriert, die jedoch örtlich und zeitlich eng begrenzt blieben. Die größte thermoinduzierte Druckdifferenz blieb unter 1 MPa.

5.3.2 Gebirgsdruck

Meßverfahren

Zur Messung der thermoinduzierten Gebirgsspannungen waren in den Bohrungen S1, S2 und S3 Spannungsmonitorstationen installiert (Fig. 23, Beilage 5.1). Jede Station bestand aus acht hydraulischen Druckkissen (System Glötzl) zur Registrierung der sechs Komponenten des räumlichen Spannungsfelds. Die radialen und tangentialen Meßrichtungen waren jeweils doppelt instrumentiert (Beilage 5.3). Hydraulische Druckkissen gestatten das direkte Messen von Gebirgsspannungen. Die gesonderte Ermittlung der Gebirgssteifigkeit wie bei den indirekten Verfahren mit Verformungsmessung ist nicht erforderlich. Der Expansionsdruck der Quecksilberfüllung in den Gebern bei Erwärmung führt proportional zur Steifigkeit des Gebirges zu virtuellen Spannungen, die experimentell oder rechnerisch kompensiert werden müssen.

Einbauverfahren

Die essentielle Voraussetzung für die Messung von Gebirgsspannungsänderungen mit fest installierten Gebern in einer Gebirgsformation mit überwiegend elastischen Eigenschaften ist die Herstellung des Kraftschlusses zwischen Gebern und Gebirge bei der Installation. Der Zementationsmörtel zur Verbindung des Gebers mit dem Gebirge sollte die gleichen mechanischen Eigenschaften aufweisen wie das Gebirge, damit unterschiedliche Steifigkeiten und unterschiedliche

Temperaturausdehnungskoeffizienten nicht zu einer Verfälschung der Meßwerte führen, die dann wieder rechnerische kompensiert werden müßten. Sowohl hydraulisch erhärtende Bindemittel als auch Kunstharze schrumpfen bei der Erhärtung. Damit durch diesen Schrumpf die angestrebte Kraftschlüssigkeit zwischen Geber, Mörtel und Gebirge nicht verlorengeht, ist diesem durch eine zusätzliche Nachinjektion oder aber durch eine Volumenexpansion des Mörtels entgegenzuwirken. Muß bei Spannungsänderungen mit positiven Zuwächsen gerechnet werden, ist ein angemessenes Maß an negativer Vorspannung erforderlich.

Letztlich darf sich das zeitabhängige Verhalten des Einbaumörtels nicht von dem der Gesteinsformation unterscheiden.

Für die Zementation der hydraulischen Druckkissen in diesem Wärmetest wurde aufgrund der o.g. Überlegungen ein hydraulisch erhärtender Vergußmörtel gewählt (Tricosal-Vergußmörtel Superfluid, Chemische Fabrik Grünau), der laut Herstellerangabe mit einem Quellvermögen von ca. 0,5 Volumenprozent ausgerüstet ist. Die relevanten thermomechanischen Werkstoffparameter dieses Mörtels sowie zum Vergleich auch die der Bohrkerne aus den S-Bohrungen wurden vom Institut für Statik der TU Braunschweig in Laborversuchen ermittelt. Das Gebirge in der Nähe der Erhitzer und somit auch der Mörtel konnte während des Testverlaufs Zustände zwischen vier Grenzfällen annehmen:

- naß und kalt
- naß und warm
- trocken und warm
- trocken und kalt.

Die thermomechanischen Eigenschaften von Granit und Vergußmörtel sind von diesen Zuständen abhängig. Die wesentlichen Ergebnisse sind in den nachstehenden Tabellen angegeben. Bei der Bewertung muß beachtet werden, daß die untersuchten Seriengrößen statistisch hinreichend gesicherte Aussagen nicht immer zuließen.

α_T	VGM	Granit
trocken	1.22	0.79
naß	1.06	0.76

Tab. 4: Lineare Temperaturausdehnungskoeffizienten von Tricosal-Vergußmörtel und Zentralem Aaregranit [10^{-5} K^{-1}]

E	VGM		Granit	
	kalt	warm	kalt	warm
trocken	23.4	19.4	33.5	34.1
naß	36.8	28.6	25.7	37.2

Tab. 5: Elastizitätsmoduli von Tricosal-Vergußmörtel und Zentralem Aaregranit (Prismen 4x4x16 cm) [GPa]

Die Tendenzen der beiden dargestellten Parameter α_T und E zwischen den Grenzzuständen waren für Granit und VGM uneinheitlich. Generell wies der Granit bei etwas größeren E-Moduli einen geringeren Temperaturausdehnungskoeffizienten auf. Bei der Messung von Gebirgsspannungen infolge Temperaturänderungen kompensieren sich diese Abweichungen teilweise.

Die Monitorstationen wurden werksseitig in zwei Zylinder (ϕ 120 mm x 1000 mm) aus Vergußmörtel eingebracht (Beilage 5.3) und nach einer Erhärtungszeit von ca. vier Wochen nachgespannt und kalibriert. Durch diese Vorfertigung blieb das Verhalten des weitaus größeren Teils der Zementation kontrollierbar. Bei der Bohrlochmontage wurden der Ringspalt von ca. 10 mm sowie der Raum oberhalb der Sonden mit dem gleichen Mörtel verfüllt.

Ergebnisse

Im Verlauf der Nullphase zwischen dem Sondeneinbau Ende 1984 und dem Beginn der ersten Aufheizphase im August 1986 hatten sich infolge nicht differenzierbarer Einflüsse wie Bergwasserdruck, zeitabhängige Spannungsumlagerungen und Quelldruck der Zementation an den einzelnen Druckkissen Drücke zwischen 0,5 MPa und 2,0 MPa aufgebaut. Da alle Geber eindeutig Druckspannungen anzeigten, war die unmittelbare Registrierung der Spannungsänderungen der anschließenden Aufheiz- und Abkühlphasen möglich. Die Ergebnisse sind in den Beilagen 5.4 bis 5.16 wiedergegeben. Position und Orientierung der Geber sind in den Beilagen 5.1 und 5.3 dargestellt. In den Meßwertverläufen wurden solche Meßwerte eliminiert, denen eindeutig Störungen im Meßsystem zuzuordnen waren.

Die Reaktionen der Geber auf Ausfälle an den Erhitzern zeigen sich als Sprünge in den Meßkurven. In der Bohrung S3, nächstgelegen zu den Erhitzern, reagierten die Sonden so unmittelbar auf den Wärmeeintrag, daß die Regelintervalle der Erhitzer sichtbar wurden. Mit zunehmender Entfernung glätteten sich die Kurven.

Die Geschwindigkeit des Aufbaus der thermoinduzierten Spannungen war proportional zum Abstand von der Wärmequelle. An entfernteren Meßpunkten erfolgte der Spannungsanstieg stark verzögert. Aber auch in Erhitzernähe waren noch nach Jahresfrist Spannungszuwächse zu beobachten, die aus zunehmender Einspannung durch die Erwärmung entfernterer Bereiche resultierten. Nach der ersten Abkühlphase wurden die Höchstspannungen sehr viel rascher erreicht als bei der Ersterwärmung, da das Gebirge nach viermonatiger Abkühlung noch sehr große Wärmemengen gespeichert hatte.

Die örtliche Geologie, vornehmlich die Störungszone unmittelbar nördlich von H1, ließ die Ausbildung eines rotationssymmetrischen Spannungszustands nur bedingt zu.

Die Beträge von Vertikal-, Radial- und Tangentialspannungen unterschieden sich wenig und deuten auf einen nahezu gleichförmigen räumlichen Spannungszustand hin. Auch die restlichen Spannungskomponenten erreichten derartige Werte. Die Größe der Unterschiede in den Beträgen macht aber auch deutlich, daß die Symmetrie durch die örtlichen Gegebenheiten beeinträchtigt wurde. Im Vergleich der jeweils zwei Radial- und Tangentialspannungen der drei Bohrungen (Beilagen 5.6, 5.9 und 5.12) stellte sich das wärmeinduzierte Spannungsfeld bezüglich der Teufe als grundsätzlich homogen dar.

Der Geber 3 in Bohrung S1 registrierte im Oktober 1987 einen eklatanten Spannungsabfall innerhalb von drei Tagen von 7,6 MPa auf 1,0 MPa (Gesamtspannung). Dieses Ereignis war weder mit einer Anlagenstörung noch mit den Aufzeichnungen der übrigen Meßsysteme zu korrelieren. Es konnte folglich nur eine lokale Gefügestörung eingetreten sein, die zum fast totalen Abbau der Gebirgsspannung führte. Anschließend nahm der Geber allmählich erneut Last auf. Dieser Vorgang wiederum muß zeitabhängigen Verformungen bei relativer Lastkonstanz zugeschrieben werden, die die Verformung, die zum Spannungsabfall führte, ausglichen.

Da die experimentelle Kompensation des Temperatureffekts der hydraulischen Druckkissen sehr schwierig ist, wurde der Aufbau der Zwängungsspannungen in den Gebern durch eine FEM-Rechnung modelliert. Hiernach entsteht für die gegebenen Verhältnisse im Wärmetest bei einer Temperaturdifferenz von 100 K eine temperaturbedingte Spannung im Geber von ca. 3,0 MPa. Am Ende der zweiten Aufheizphase Anfang 1988 herrschten an den Bohrungen S3, S1 und S2 Temperaturen von 60 °C, 55 °C und 36 °C. Den Temperaturdifferenzen ab August 1986 (46 °C, 41 °C, 22 °C) entsprechen folglich temperaturbedingte Spannungen von 1,4 MPa, 1,2 MPa und 0,7 MPa. Die rechnerische Kompensation der Temperatureffekte ist insbesondere bei den erhitzernahen Meßorten äußerst aufwendig, so daß in den Beilagen 5.4 bis 5.16 darauf verzichtet wurde.

Die Interpretation wird hierdurch nicht beeinträchtigt. Die gemessenen Spannungsänderungen sind proportional zu den jeweiligen Temperaturen im Rahmen der oben angeführten Werte ebenso wie die Relationen der Meßwerte aus Bohrlöchern unterschiedlicher Distanzen zu den Erhitzern lediglich etwas zu groß dargestellt.

In den Beilagen 5.13 bis 5.16 werden die Änderungen der radialen und tangentialen Gebirgsspannungen in den beiden instrumentierten Teufen miteinander verglichen. Während der drei Aufheizphasen bestand direkte Proportionalität der Spannungen zur Temperatur bzw. inverse Proportionalität zum Abstand vom Erhitzer. Die Relationen der Spannungen sind in den vier Darstellungen ähnlich. In den Abkühlphasen kehrten sich die Proportionalitäten zunächst um, wobei die Spannungen im erhitzernächsten Bohrloch S3 zunächst sogar unter die Werte aus der Nullphase sanken. Ursache hierfür war der rasche Abbau der Temperaturspitzen in unmittelbarer Umgebung der Erhitzer und der nur allmähliche Temperaturabfall in den weitaus größeren Bereichen des Versuchsfelds. Dieser Zustand führte zu positiven (Zug-) Spannungsdifferenzen, die unmittelbar am Erhitzer, wo hier nicht gemessen wurde, betragsmäßig hätten größer als die Druckspannungen aus dem Spannungszustand ohne künstliche Erwärmung werden und zu Rißbildungen führen können. Dieser Effekt bliebt jedoch auf den engsten Bereich um die Wärmequelle und auf Primärspannungszustände begrenzt, bei denen das Bohrloch nicht in allen Richtungen hinreichend überdrückt war. Der abrupte Ausfall der Heizleistung ist zudem nicht endlagerrelevant und nur bei der Rückholung von Gebinden denkbar, die aber nicht vorgesehen ist. Letztlich würden eng begrenzte Gefügezerstörungen ohne Nachteil für die Sicherheit der Endlagerformation sein.

Die größten Druckspannungsänderungen im Abstand von 0,50 m von der Wärmequelle blieben also kleiner als 10 MPa. Mit zunehmendem Abstand vom Erhitzer wurden sie rasch geringer. Zugspannungen können nur bei schlagartigen Abkühlvorgängen unter bestimmten Voraussetzungen auftreten und bleiben dann aber lokal eng begrenzt.

5.4 Modellierung des Spannungsfelds

Die Berechnung der thermoinduzierten Gebirgsspannungen baut auf der bereits in 3.5 und 4.4 diskutierten Modellierung des Temperatur- und Verschiebungsfelds auf. Versuchvorbereitend und -begleitend wurden fünf FEM-Modellierungen von Prof. Duddeck vom Institut für Statik - TU Braunschweig durchgeführt:

1. Thermomechanische Auslegungsrechnung
2. Abschätzung der Auswirkung einer Kluftzone
3. Stabilitätsuntersuchung an der Bohrlochverrohrung
4. Rechnerische Abschätzung des Temperatureffekts hydraulischer Druckkissen
5. Thermomechanische Modellierung der ersten Aufheizphase.

Die thermomechanische Auslegungsrechnung diente vornehmlich der Planung der Instrumentierung und des Versuchsablaufs. Die wesentliche Aussage war, daß infolge der allseitig großen Dehnungsbehinderung kleine Verformungen zu großen Spannungen führten. Die Modellierung der Auswirkung einer Kluftzone hatte zum einen wiederum die Aufgabe, notwendige Angaben zur Auslegung der Instrumentierung zu liefern, zum anderen aber auch eine Abschätzung zu ermöglichen, mit welchem Aufwand bei zukünftigen Modellierungen Kluftzonen diskretisiert werden müssen. Für diese Modellierung wurde ein konservativer Ansatz mit einer luftgefüllten Kluftzone mit steilem Einfallen gewählt. Gegenüber dem ersten Modell ergaben sich jenseits der Kluft geringere Temperaturen und Spannungen, während auf den Kluftflächen größere Gleitungen auftraten. In unmittelbarer Nähe der Erhitzer traten infolge des Wärmestaus an der Luftschicht in der Kluft höhere Temperaturen und Spannungen ein. Diese Art der Kluft ist aber nicht realistisch. Vielmehr muß von wassergefüllten Klüften ausgegangen werden, deren Flächen eine nennenswerte Schubsteifigkeit aufweisen und in vielen Fällen noch im Gebirge enden.

Die Modellierung mit Kluft ergibt für den engsten Bereich um die Wärmequelle Temperatur- und Spannungszustände, die auf der sicheren Seite liegen. Für das übrige Feld ist die Modellierung ohne Kluft maßgeblich. Die absolute Größe der Verformungen ist in beiden Fällen gering.

Bei der Planung des Heizprogramms wurde die Stabilitätsuntersuchung an der Bohrlochverrohrung benötigt. Es war zu vermeiden, daß infolge zu schnellen Anstiegs der Temperatur die Verrohrung kollabierte und zur Zerstörung der Erhitzer führte. Bei dem geplanten Versuchsablauf mit Höchsttemperaturen von 90 °C war die Standsicherheit der Verrohrung jedoch in keiner Phase gefährdet.

Die rechnerische Abschätzung zum Temperatureffekt der zur Gebirgsspannungsmessung verwandten hydraulischen Druckkissen diente zur Temperaturkompensation dieser Meßwerte (siehe 5.4). Berechnet wurde die Beanspruchung des Gebirges infolge der thermischen Ausdehnung der Quecksilberfüllung in diesen Gebern. Für die gebirgsmechanischen und thermischen Parameter des Gebirges im Bereich des Testfelds muß mit reinen Temperaturspannungen von ca. 3,0 MPa je 100 K gerechnet werden.

In der Modellierung der Aufheizeffekte des ersten Versuchsjahrs wurde der tatsächliche Leistungseintrag gemäß 3.2, Fig. 5 simuliert. Zur Beschreibung des Gebirges wurden folgende Parameter verwandt:

- k (Wärmeleitzahl) : 3,6 W/mK
- ρ (spezifische Wärmekapazität) : 21,8 Wd/m^{3}K
- α_t (Wärmeausdehnungskoeffizient) : $5{,}0 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}

Die Diskretisierung im Nahbereich des Erhitzers ist in Beilage 5.17 dargestellt. Die wesentlichen Resultate sind auf den Beilagen 5.18 bis 5.20 als Diagramme zusammengefaßt. Die größte Radialspannung infolge Aufheizung tritt in ca. 80 cm Abstand zum Erhitzer mit 3,5 MPa, die größte Vertikalspannung in ca. 0,50 m Abstand mit 4,8 MPa ein. In 15 m Abstand sind die thermoinduzierten Spannungen nahezu abgeklungen. Von Erhitzermitte bis zu seinen Enden reduzieren sich die Spannungsänderungen um ca. 50 %. Die inhomogenen Temperaturverläufe längs der Erhitzerachse (Beilage 5.20, v = 0,00 m) haben ihre Ursache in der Diskretisierung. Der Spannungsabfall auf 0 am Bohrloch (Beilagen 5.18, 5.19 und 5.21) ist die Folge des lastfreien Rands an dieser Stelle.

Die Ergebnisse von analytischem Ansatz, FEM-Modellierung und in-situ-Messung sind in Beilage 5.21 exemplarisch für die Radialspannungen vergleichend gegenübergestellt.

Der analytische Ansatz gilt für den ebenen Formänderungszustand eines Kreisrings, der vom Innen- zum Außenrand einen logarithmischen Temperaturabfall von 90 °C auf 14 °C aufweist (Worch, 1967). Der Innendruckmesser ist durch das Erhitzerbohrloch bestimmt. Als Außendruckmesser wurde mit b = 10,0 m ein Bereich gewählt, in dem die Erwärmung nach Abschluß der Aufheizphasen kleiner 0,5 °C blieb. Der analytische Ansatz gibt den Spannungsverlauf in guter Näherung wieder. Die rechnerischen Werte sind direkt proportional zu E und α_T. Variation in deren Streubreich würden zur Deckung von experimenteller und analytischer Lösung führen.

Die angegebene Kurve der FEM-Modellierung wurde aus den oben angegebenen Ergebnissen dadurch berechnet, daß der zunächst angesetzte Temperaturausdehnungskoeffizient von $\alpha_T = 5{,}0 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ durch den später im Labor unter realistischen Voraussetzungen ermittelten Wert $\alpha_T = 7{,}8 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ ersetzt wurde.

Für ρ und k wurden Parameter in die Rechnung eingeführt, die der Literatur entnommen und nicht am anstehenden Gebirge ermittelt wurden. Eine bessere Näherung von FEM-Modellierung und Messung besonders im erhitzernahen Bereich wäre mit realistischeren Parametern durchaus möglich. Im Abstand größer als 1,5 m ist die Übereinstimmung von FEM-Modellierung, analytischem Ansatz und Messung ohnehin vollauf befriedigend.

Zur in Beilage 5.21 dargestellten Meßkurve wurden die Meßwerte der Beilagen 5.13 und 5.14 unter Berücksichtigung der Temperaturkompensation verwandt. Bei Berücksichtigung der Doppelinstrumentierung der Radialrichtung und Einführung von Grenzwerten der Temperaturkorrektur ergibt sich der dargestellte Bereich für die gemessenen Spannungen.

5.5 Zusammenfassung

Die im Wärmetest dem Gebirge aufgeprägte Wärmeleistung führte nur zu einer lokalen Erwärmung in Erhitzernähe. Der weitaus größere Teil des Gebirges blieb kalt und behinderte mit großer Steifigkeit eine thermische Expansion der erwärmten Gebirgspartie. Hieraus resultierten Zwängungsspannungen, die mit zunehmendem Abstand vom Erhitzer infolge ihrer Verteilung auf ein größeres Gebirgsvolumen überproportional rasch abklangen. Der Größtwert der thermoinduzierten Gebirgsspannungen wurde mit ca. 9 MPa in 0,50 m Abstand zur Wärmequelle gemessen.

Außer bei bestimmten plötzlichen, nicht endlagerrelevanten Abkühlvorgängen traten nur Druckspannungsänderungen und keine Zugspannungen auf. Diese Druckspannungen verminderten eher die Gefahr des Gleitens auf Kluftflächen durch Erhöhung des Kontaktdrucks als daß sie Gleiterscheinungen begünstigen würden.

Die Bergwasserdrücke reagierten nicht auf langsame Temperaturänderungen. Plötzliche Temperaturänderungen können kurzzeitig zu lokal begrenzten Reaktionen führen.

Für ein projektiertes Endlager in 1200 m Tiefe gelten diese Ausführungen analog. Zwar werden in Strecken und Silos eine Anzahl von Wärmequellen gleichzeitig ein entsprechend größeres Gebirgsvolumen aufheizen, doch wird die gegenüber diesem Test um das Dreifache größere Überlagerung für ebenfalls steife Einspannung sorgen. Die notwendige Analyse der spezifischen Verhältnisse am Endlagerstandort bleibt dem Wärmetest im dortigen Erkundungsbergwerk vorbehalten.

6 GEBIRGSHYDRAULIK

Die hydraulische Situation ist eines der wichtigsten Kriterien zur Beurteilung der Eignung eines potentiellen Endlagerstandorts. Die Auswahl erfolgt aufgrund der geologischen und hydrogeologischen Gesamtsituation insbesondere im Hinblick auf die Lage des Endlagerbereichs zu wasserführenden Kluftsystemen, Verwerfungen, Größe und Ausbildung der Überdeckung, etc. Die Wasserfließzeiten vom Endlager durch die Geosphäre zur Biosphäre müssen möglichst groß sein, damit etwa transportierte Radionuklide ihre Toxizität verlieren können. Die Retardation wiederum beeinträchtigt die Ausbreitung der Radionuklide mit dem Bergwasser durch Matrixdiffusion und Sorption. Mit der Menge des das Endlager durchströmenden Bergwassers steigt auch die Transportkapazität für Nuklide. Während geringe Wassermengen nicht unerwünscht sind, um die Bentonitummantelung zum Quellen zu bringen und dadurch ihre Dichte zu erhöhen, kann stetiger Wasserzufluß zur Errosion der Bentonithülle führen. Eine der Hauptforderungen für die Endlagereignung sind also geringer Wasserzufluß und lange Fließwege bei geringer Permeabilität der Formation.

Untersuchungen zur Gebirgshydraulik im Rahmen eines Wärmetests wurden bereits in STRIPA durchgeführt (LBL-12574). Um die Änderung der Wasserwegsamkeit und der Wassermengen im Umfeld einer Wärmequelle zu erkennen, wurde der zeitliche Verlauf der Zutrittsraten des Bergwassers in Bohrlöcher gemessen. In STRIPA lag ein stark geklüftetes Gebirge mit sehr viel größerer Wasserführung als im FLG vor, so daß erhebliche Wassermengen aus diesen Bohrungen gefördert werden konnten. Falls wärmeinduzierte Wegsamkeitsänderungen reversibel sind, bleibt ihre Bedeutung für die Endlagereignung gering, denn die Wärmeabgabe der Abfälle wird nach relativ kurzer Zeit abgeklungen sein, während die Radioaktivität der Abfälle noch sehr viel länger ein Gefährdungspotential darstellt.

Andere Versuchsprogramme im FLG befassen sich mit der Gebirgshydraulik originär oder als Teilaspekt: Bohrlochkranzversuch - BK, Auflockerungstest - AU, Ventilationstest - VE, Migration - MI.

6.1 Hydrologische Ausgangssituation

Das FLG befindet sich in einer relativ trockenen Region des Juchlistocks. Sie ist von einer Anzahl von mehr oder weniger mächtigen Lamprophyren unter fast senkrechtem Einfallen durchzogen. Die verschieferten Übergangszonen der Lamprophyre zum Granit sind teilweise verschiefert und als Hauptaquifere anzusehen. Die gesamte Gesteinsmatrix, sowohl die Klüfte als auch die Porenräume, sind als praktisch wassergesättigt anzusehen. Es liegt zunächst immer ein hydraulisches Zweiphasensystem vor, in welchem nur durch ungewöhnliche künstliche Einflüsse Luft eingebracht werden kann. Der Gebirgsaufschluß durch die alten (KWO) und neuen (FLG) Stollen drainiert das Gebirge durch die Abführung des austretenden Bergwassers sowohl in fließender Form als auch gasförmig durch die Bewetterung. In der Formation bestehen mehrere Gebirgswasserhorizonte, die in den unterschiedlichen geologischen Strukturen unterschiedliche Bergwasserdrücke hervorrufen.

Die Situation im Wärmetest ist gleich der im übrigen FLG. Der Wärmeteststollen führt das zutretende Wasser durch Sohlenabfluß und Ventilation ab. Der eigentliche Testbereich unterhalb des Stollens ist von dieser Drainage a priori nicht betroffen. Sind jedoch Strukturen des eigentlichen Testbereichs bei großer Permeabilität durch die Auffahrung aufgeschlossen worden, so ist der Bergwasserhorizont bis auf die Stollensohle abgesenkt. Bis auf die söhlige Seismikbohrung (B4) und die Entwässerungsbohrungen (W) waren alle Bohrungen durch Zementation verschlossen worden, um die Drainage des erwärmten Gebirgsvolumens möglichst gering zu halten.

Durch die Wasserförderung aus den drei Entwässerungsbohrungen wurde während eines großen Teils der Testzeit der Bergwasserspiegel auf die Teufen der jeweiligen Förderhorizonte abgesenkt. Während des restlichen Teils der Testzeit waren auch diese Bohrungen verschlossen, so daß die Drainierung des erwärmten Bereichs weitestgehend vermieden wurde.

6.2 Wasserschüttungen in Bohrungen

Die Untersuchungen der hydraulischen Verhältnisse im aufgeheizten Bereich wurden in den drei Bohrungen W1, W2 und W3 durchgeführt (Fig. 24). W1 lag in der Übergangszone von Granit und Lamprophyr, W2 direkt im Lamprophyr und W3 vollständig im Zentralen Aaregranit. Diese Bohrungen waren durch Packer in 5, 6 und 4 Abschnitte mit unterschiedlicher geologischer Struktur unterteilt. Seit August 1986 wurde aus jedem dieser 15 Abschnitte das zutretende Bergwasser gefördert und seine Menge mit einer automatischen Meßanlage registriert. Die durch das äußerst aggressive Bergwasser verursachte Korrosion und teilweise auch Verschmutzung führten wiederholt zu Störungen an der Bohrlochausrüstung. Zur Kontrolle des störungsempfindlichen automatischen Wassermengenmeßsystems wurden die Schüttungen jedes Bohrlochs zusätzlich ausgelitert.

Zumindest die Gesamtschüttung eines Bohrlochs konnte auf diese Weise zuverlässig registriert werden (Meßgenauigkeit 0,005 l). Die Meßwerte der einzelnen Abschnitte wurden mit einer Genauigkeit von 10 % ermittelt. Der Wasserzutritt erfolgte intermittierend in mehreren sich überlagernden Perioden.

Die gemessenen Schüttungen änderten sich von Tag zu Tag um durchschnittlich 20 %. Es waren sowohl rhythmische Schwankungen mit Zykluszeiten von ca. 5 bis 10 Tagen als auch langfristige Änderungen der Schüttungen bis zu mehreren Monaten erkennbar. Auch die Anteile der Abschnitte am Zufluß schwankten. Die jeweiligen Schüttungsmengen und ihre Perioden hingen von den spezifischen Wegsamkeiten der Formation ab. Der intermittierende Wasserzutritt entstand dadurch, daß das Bergwasser zunächst die Fließwiderstände zu überwinden hatte, bevor es zu einem Ausfluß kam.

Die größten Schüttungen (bis zu 300 ml/h) wurden in dem Abschnitt unterhalb 11 m Teufe im Bereich des Lamprophyrs (W2, Beilage 6.2) gemessen.

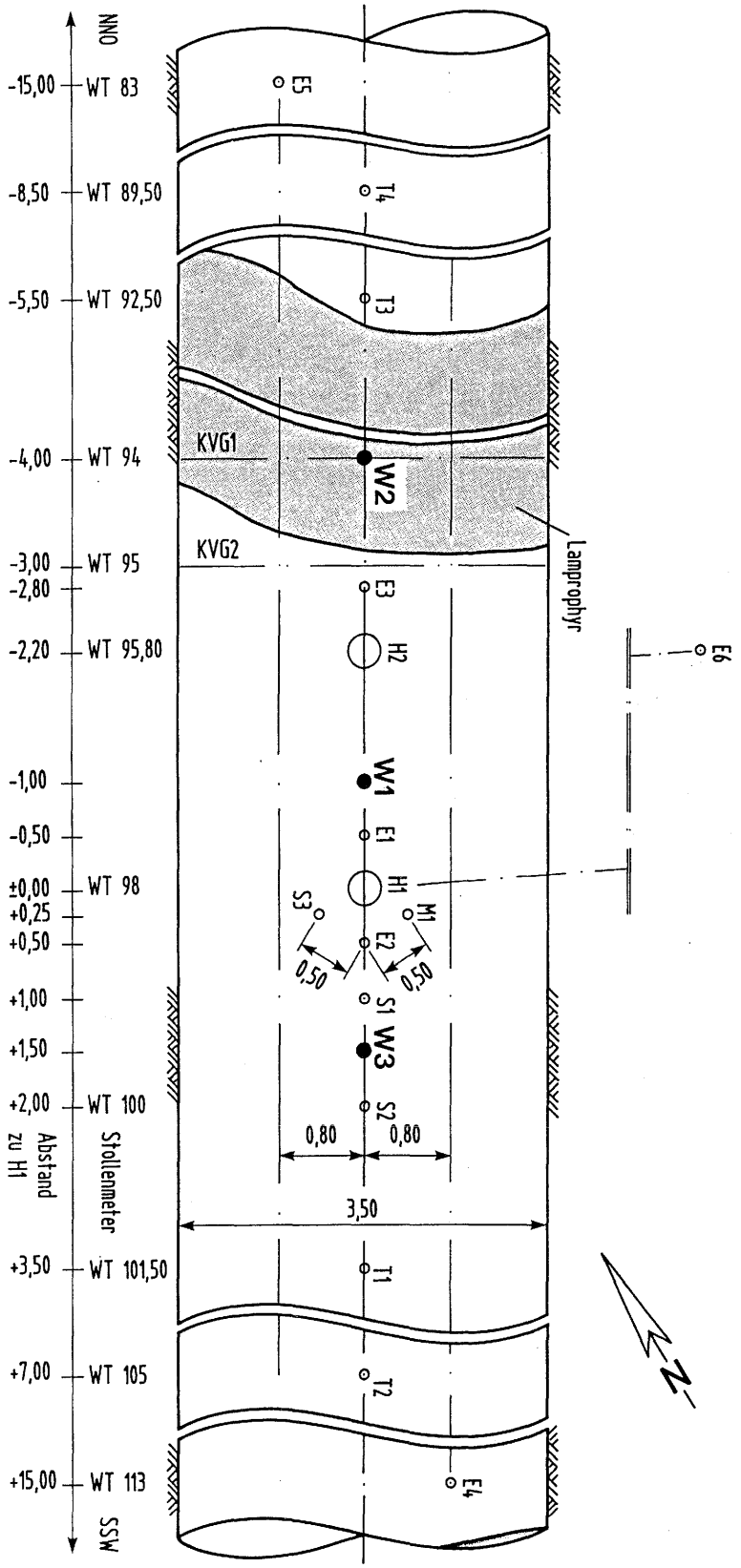


Fig 24: Lage der Entwässerungsbohrungen

Auch in W3 zwischen 0 m und 10 m Teufe im ungestörten Granit wurden nennenswerte Schüttungen (ca. 80 ml/h) gemessen (Beilage 6.3). Die Schüttungen in allen Abschnitten von W1 waren geringer als 10 ml/h im Mittel, obwohl die unteren Abschnitte in der Störungszone lagen (Beilage 6.1).

Wasserschüttung in ml/h

	W1	W2	W3
10 - 20	x		
50 - 100			x
100 - 300		x	

Tab. 6: Mehrfach gemessene Höchstförderungen der Bohrungen (Tagesmittelwerte)

Die durchschnittlichen Schüttungsraten waren in W1 < 20 ml/h, in W2 < 300 ml/h und in W3 < 100 ml/h. Dies entsprach spezifischen Schüttungen von < 0,02 ml/(min•m), < 0,2 ml/(min•m) und < 0,08 ml/(min•m).

Ähnliche Schüttungsraten wurden in GEOTEST, "Felslabor Grimsel - Geologie", Tab. 20, ermittelt. In Bohrung SB8002 wurden zwischen Bohrmeter 95 bis 100 nördlich der Störungszone 0,1 ml/(min•m) gemessen. In Bohrung SB8003 zwischen Bohrmeter 43 bis 73 südlich der Störungszone ergaben sich 0,04 ml/(min•m). Korrelationen der Schüttungsraten zu saisonalen Ereignissen (Klima, Stauspiegelschwankungen etc.) oder episodischen Vorgängen (Aktivitäten im Bohrlochkranzversuch-BK, Druckaufbau in der US-Bohrung am Beginn des WT-Stollen, etc.), waren nicht erkennbar. Ein Einfluß der örtlichen Aufheizung konnte nicht festgestellt werden.

6.3 Gebirgswasserdrücke in Bohrungen

Ab April 1988 wurden die Entwässerungsbohrungen nacheinander auf Druckaufbaumessungen in den nunmehr verschlossenen Bohrlochabschnitten umgestellt.

Bei den Dichtigkeitsprüfungen der abgepackerten Abschnitte wurden zwischen einzelnen Horizonten Umläufigkeiten bei Drücken zwischen 5 bar und 15 bar festgestellt. Hierbei kann es sich um systembedingte Undichtigkeiten oder die Durchlässigkeit des Gebirges handeln. Meßwerte unter den Werten aus der Umläufigkeitsprüfung geben also die tatsächlichen Druckverhältnisse wieder.

Im Mai 1988 wurde eine Revision der Anlage durchgeführt. Hierbei wurde ein Prüfdruck von ca. 5 bar in den einzelnen Bohrlochabschnitten aufgebracht und dessen Abbau bis auf den anstehenden Bergwasserdruck beobachtet. Weitere Tests Mitte Juli, Anfang August und Anfang September zeigen sich in Unregelmäßigkeiten der Meßverläufe. Die Kurven der Beilagen 5.4 bis 5.6 stellen die Gebirgswasserdrücke in der Höhe der Abschnitte dar. Sie ergeben sich folglich aus den Meßwerten zuzüglich dem Druck der Wassersäule zwischen dem Druckaufnehmer im Stollen und dem Meßabschnitt im Bohrloch.

Die Bohrung W1 liegt offensichtlich über ihre gesamte Länge im Bereich des ungestörten, geringpermeablen Lamprophyrs. Die Dichtigkeit der Abschnitte wurde in der Umläufigkeitsprüfung nachgewiesen. Die geringen Förderungen bei den Schüttungsmessungen hatten bereits auf die geringe Permeabilität der Formation um W1 hingewiesen. Die sich nur langsam über mehrere Tage abbauenden Druckspitzen Anfang August 1988 sind auf Dichtigkeitstests zurückzuführen. Sie bestätigen die geringe Permeabilität.

Die Druckverläufe in W2 lassen einen gemeinsamen Bergwasserhorizont für alle Abschnitte erkennen. Die einzelnen Abschnitte waren durch die verschieferte Übergangszone zwischen Lamprophyr und Granit miteinander verbunden.

Die Resultate von W3 sind nicht eindeutig. Technische Mängel können insbesondere beim 3. Abschnitt nicht ausgeschlossen werden. Im obersten Abschnitt bis 10 m Teufe lag ein Zufluß aus dem sohlennahen Bereich vor, da hier nennenswerte Mengen gefördert wurden, jedoch nur ein langsamer Druckaufbau auf ca. 0,9 bar erfolgte.

Während der Heizphasen konnten lediglich in W3 Korrelationen mit den Leistungsabgaben der Erhitzer festgestellt werden. Das Auftreten des hohen Gebirgswasserdrucks in W3 (+1,50 m) bis 6,5 bar zu Beginn der Druckaufbaumessungen im April / Mai 1988 stimmte mit dem Zeitpunkt des Anstiegs des Bergwasserdrucks an den Porenwasserdruckgebern im Mai 1988 in der nahegelegenen Spannungsmonitorstation S2 (+2,00 m) überein. Weitere Wechselwirkungen ließen sich mit Sicherheit nicht nachweisen. Die Druckanstiege an den Porenwasserdruckgebern können allerdings auch als Wechselwirkung auf den Verschluß der Entwässerungsbohrungen gewertet werden.

Gegen Ende der 3. Aufheizphase trat im Oktober 1988 in den unteren Abschnitten von W2 sowie bei W1 und W3 in den Abschnitten oberhalb 16 m Teufe eine geringe Zunahme des Gebirgswasserdrucks ein. Die Abschaltung der Erhitzer bewirkte bei den meisten Abschnitten bis Mitte November einen Druckabfall um maximal 0,1 bar. In S1 und S3 fiel der Bergwasserdruck um ca. 0,5 bar, in S2 um ca. 0,2 bar. Bis zum Abrüsten der Meßeinrichtungen Mitte Februar 1989 konnten noch einige hier nicht dargestellte Meßreihen erfaßt werden. In diesem Zeitraum stiegen die Drücke im 2. Abschnitt von W1 um 0,5 bar und im 3. um 0,2 bar. In den Abschnitten von W2 wurde eine Druckzunahme von 0,1 bis 0,2 bar gemessen.

In W3 nahm der Gebirgswasserdruck im 1. Abschnitt um 0,1 bar, im 2. um 0,7 bar und im 4. um 1,1 bar zu. Der Porenwasserdruck stieg im gleichen Zeitraum an den drei Meßpunkten nur um ca. 0,1 bar an.

Aufgrund der Messungen der 2. Abkühlphase ließ sich die Abschnitte von W1 in zwei Druckbereiche unterteilen. Im oberen stollennächsten Abschnitt war der Druck kleiner als 0,4 bar und in den restlichen Abschnitten 1,6 bar bis 2,2 bar. Damit ergeben sich Bergwasserhorizonte bis 7 m über Stollensohle entsprechend 1737 müNN. In W2 stellten sich in den beiden oberen Abschnitten Drücke von 1,5 bar und 1,7 bar ein, während der Druck im 3. Abschnitt weiter stetig fiel. In den unteren drei Abschnitten herrschten Drücke zwischen 3,0 und 3,3 bar. Damit lagen die Druckhorizonte in der Störungszone zwischen 4 m und 19 m über Stollensohle bzw. 1734 müNN bis 1749 müNN. In W3 wurden zuletzt Bergwasserdrücke von 0,9 bar, 2,2 bar und 3,2 bar im 1., 2. und 4. Abschnitt gemessen. Die Druckdifferenz zwischen dem 2. und 4. Abschnitt entsprach dem Druck der Wassersäule zwischen den Abschnitten, so daß sich für diese Teufen ein gemeinsamer Horizont von 12 m über Stollensohle entsprechend 1742 müNN ergab. Der Druckhorizont für den oberen Abschnitt lag bei 8 m über Stollensohle entsprechend 1738 müNN.

6.4 Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Einflusses eines künstlichen Wärmeeintrags auf die hydraulischen Verhältnisse im Testfeld wurden Schüttungs- und Druckaufbaumessungen in Bohrlöchern durchgeführt. Die Bohrlöcher waren gemäß ihren unterschiedlichen geologischen Strukturen durch Packer in mehrere Abschnitte unterteilt. Die durchschnittlichen Schüttungsraten betrugen in W1 < 0,02 ml/(min•m), in W2 <0,2 ml/(min•m) und in W3 < 0,08 ml/(min•m). Der Zufluß pulsierte mit mehreren einander überlagernden Zyklen. Auch die Anteile der einzelnen Abschnitte an der Schüttung variierten. Homogene Granitbereiche wiesen in der Regel sehr geringe Permeabilitäten auf (W3 unterer Bereich). Es können jedoch auch ohne Klüfte und Risse größere Permeabilitäten infolge hoher Porosität vorhanden sein, wie es sich aufgrund der Förderungen aus dem obersten Abschnitt von W3 zeigt. Die Lamprophyre sind nicht weniger dicht als der homogene Granit. Auch hier waren keine nennenswerten Schüttungen meßbar (W1). Die verschieferten Übergangszonen zwischen Granit und Lamprophyr sind erwartungsgemäß die Hauptaquifers der Formation. Aus den Abschnitten von W2 wurden die bei weitem größten Wassermengen gefördert.

Eine Abhängigkeit der Wasserschüttungen von der Aufheizung oder anderen Einflüssen wurde nicht beobachtet. Der Wärmeeintrag kann lediglich dazu beigetragen haben, aus den Bereichen nahe der Entwässerungsbohrungen das Wasser vorzeitig auszupressen. Da im nicht oder weniger aufgeheizten Umfeld die Verhältnisse nicht beeinflußt wurden, fehlte ein entsprechendes Wassermehr- oder -minderangebot. Die geringfügige Änderung der Druckgradienten am Bohrloch vermochte hieran nichts zu ändern. Die Messungen zur Wasserzutrittsänderung im Ventilationstest bei aufgeheizter Bewetterung führte zum selben Ergebnis. Bei einer zunächst erhöhten Wasserspende blieb der Feuchtigkeitsaustrag im Schnitt konstant.

Nach Umstellung der Entwässerungsanlage auf Druckaufbaumessung im April 1988 wurden am nunmehr geschlossenen System Gebirgswasserdrücke bis 6,5 bar gemessen. In der Bohrung W1 im geringpermeablen Lamprophyr fand erwartungsgemäß während der Versuchsdauer kein nennenswerter Druckaufbau statt. In der Störungszone stieg der Druck bis zum Ende des Versuchs in den Abschnitten von W2 unterhalb 11 m bis 3,3 bar an, während in den oberen drei Abschnitten zuletzt bis 1,7 bar gemessen wurde. Im obersten Abschnitt von W3 im Zentralen Aaregranit verhinderte die große Permeabilität einen nennenswerten Druckaufbau. Die unteren drei Abschnitte reagierten nach ihrem Verschluß zunächst mit Druckanstiegen bis 6,5 bar und dann allmählichem Abfall auf 1,4 bar bis 2,1 bar zu Beginn der 3. Aufheizphase. In der 2. Aufheizphase wurden noch vereinzelt Druckschwankungen bis zu ca. 1 bar registriert, die jedoch dem Abkühlvorgang nicht eindeutig zuzuordnen sind und wohl eher durch andere natürliche Faktoren verursacht wurden. Ebenso wie bei den Bergwasserdruckmessungen in den S-Bohrungen reagierten hier in den W-Bohrungen die Drücke nicht auf die Aufheiz- und Abkühlvorgänge, da die Permeabilität des Gebirges immer noch groß genug war, um örtlich eng begrenzten Spannungsänderungen einen Ausgleich mit dem Umfeld zu ermöglichen.

7 WÄRMEINDUZIERTE SEISMIZITÄT

7.1 Zielsetzung der seismischen Überwachung

Neben den rein gebirgsmechanischen Beobachtungen sollte auch die eventuell induzierte mikroseismische Aktivität erfaßt werden. Die Ursache hierfür wäre der plötzliche Abbau von Zwängungen im Gebirge, die sich u. a. auch aufgrund thermischer Vorgänge aufbauen.

Ein seismisches Ereignis ist immer ein Indiz dafür, daß die Spannungen innerhalb eines Gebirgsbereichs die Festigkeitsgrenze überschritten haben. Es kommt zu einem Riß. Ein Teil der dabei freigesetzten Energie breitet sich in Form elastischer Wellen durch das Gebirge aus und kann mit entsprechend geeigneten Sensoren erfaßt werden.

Lage, Größe und Häufigkeit von Rissen kennzeichnen eine Schwächezone im Gebirge. Diese galt es zu lokalisieren und mit den Umgebungsbedingungen zu interpretieren.

7.2 Methode

Da die Lage, die flächenhafte Ausdehnung und die Entstehungszeit eines Risses zunächst unbekannt sind, mußte ein Meßsystem aufgebaut werden, mit dem die notwendigen Parameter zur Bestimmung der Unbekannten gemessen werden konnten.

Die Lage des Herdes sollte eindeutig bestimmbar sein. Daher waren die Beobachtungspunkte (Stationen) räumlich anzuordnen. Die Bestimmung der drei Raumkoordinaten des Herdes erfolgt über drei voneinander unabhängigen Laufzeitdifferenzen von vier Stationen mit bekannter Lage unter Annahme eines homogenen und isotropen Geschwindigkeitsmodells für den Bereich des WT-Stollens. Die Ein-

satzzeiten bei einer weiteren Station ermöglichen über die Methode der kleinsten Fehlerquadratsummen die Angabe des Ortungsfehlers (Flach et al., 1982).

Die flächenhafte Ausdehnung eines Risses steht in enger Beziehung zu dem Frequenzinhalt des seismischen Signals. Je größer die Rißfläche ist, desto tiefere Frequenzen beherrschen das seismische Signal. Nach Lee et al. (1981) steht die obere Eckfrequenz fg, oberhalb der das Spektrum des Schwingweges steil abfällt, in unmittelbarer Beziehung zur Herdausdehnung r.

$$r = 2.34 \cdot V \cdot (2 \cdot \pi \cdot fg)^{-1}$$

Darin bedeutet: r der Radius der idealisierten Rißfläche, V die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressions- oder Scherwelle und fg die obere Eckfrequenz des Wegspektrums. Die Sensoren müssen daher für ein breites Spektrum empfindlich sein und dürfen die Signale innerhalb des Bereiches nicht zu stark verzerren.

Die absolute Entstehungszeit eines Risses (Herdzeit) ist hier nicht von so großer Bedeutung, sie sollte aber ausreichend genau sein, um die Reihenfolge der Ereignisse festlegen zu können und eine Korrelation mit Versuchsbedingungen des Heizprogramms ermöglichen.

In Anlehnung an Erfahrungen ähnlicher Versuche im Salzbergwerk Asse wurde die Anlage zum Registrieren mikroseismischer Ereignisse im Felslabor konzipiert und mit bekannten Komponenten aufgebaut.

7.3 Versuchsfeldbeschreibung

Für den Wärmetest (WT) wurde ein besonderer Stollen im Granit des Felslabors Grimsel im Vollschnittverfahren hergestellt. Durch dieses Verfahren wurde das Gebirge gegenüber einem sprengtechnischem Vortrieb weitgehend geschont.

Fig. 25 zeigt einen vereinfachten Riß eines Teiles des gesamten Felslabors mit dem WT-Stollen.Die dargestellte Fläche beträgt 160 m x 100 m. Der WT-Stollen hatte eine Gesamtlänge von etwa 140 m und einen kreisrunden Querschnitt von 3,5 m Durchmesser. Der Hauptstollen, mit dem Zugang zum Zentralbereich, verläuft in Richtung N-S.

In der Nähe des geheizten Gebirgsbereiches wurde der Stollen von einigen steileinfallenden Lamprophyren geringer Mächtigkeit durchschlagen. Diese Zonen sind in dem Riß ebenfalls dargestellt. S1 - S5 kennzeichnen die Lagen der mikroseismischen Sonden.

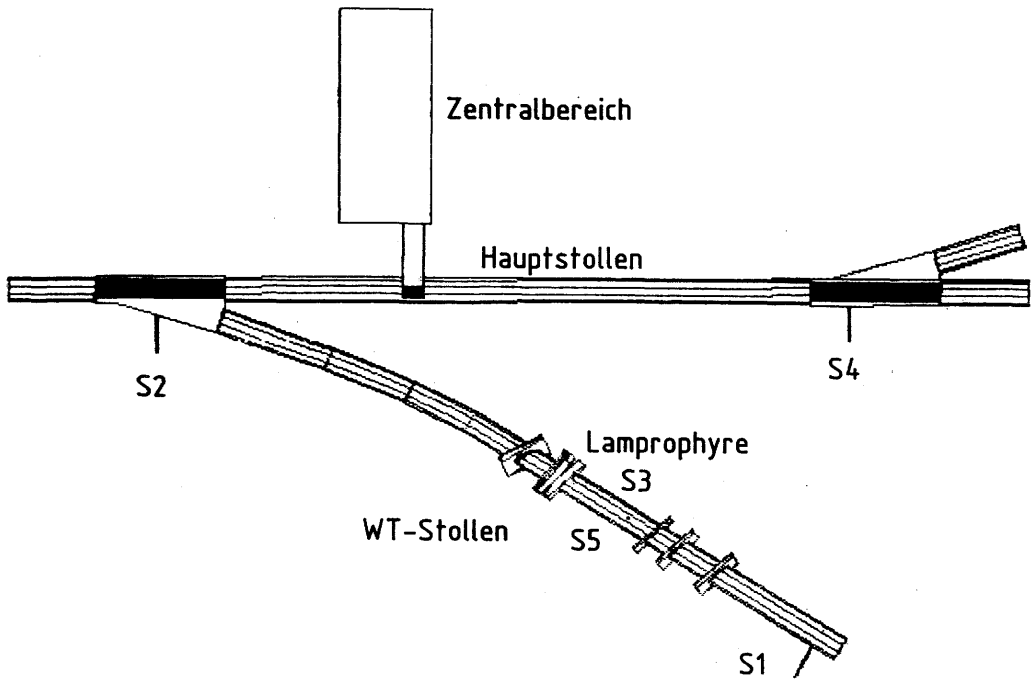


Fig. 25: Bereich des WT-Stollens im Felslabor Grimsel

Fig. 26 zeigt einen Blick auf den WT-Stollen aus dem Niveau der Stollenachse. Neben den Vertikalbohrungen für die Sonden S3 und S5 sind auch die Erhitzerbohrungen H1 und H2 zu erkennen. Die Sonde S4 im Hauptstollen ist durch den WT-Stollen verdeckt.

Die Bohrungen für die Sonden S1, S2 und S4 lagen horizontal und hatten eine Tiefe von 5 m. Die Vertikalbohrungen für die Sonden S3 und S5 waren 20 m bzw. 30 m tief.

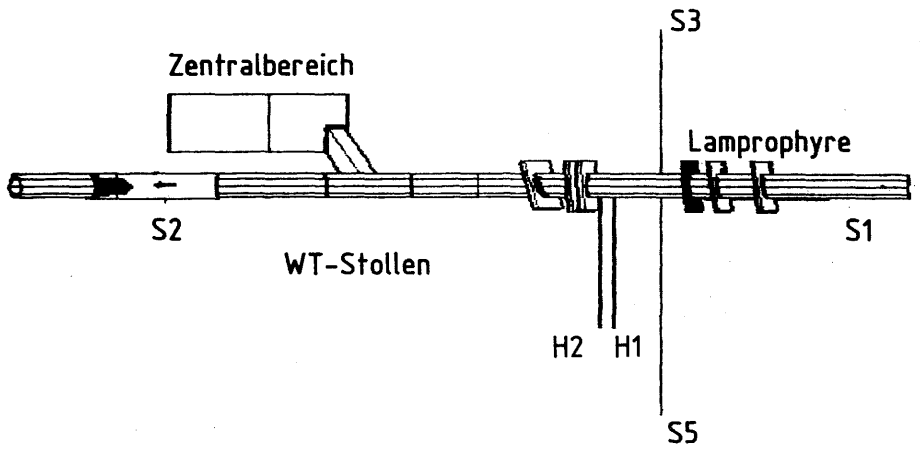


Fig. 26: Seitliche Ansicht des WT-Stollens

Das zur Erfassung der mikroseismischen Aktivität aufgebaute Array hatte die Form zweier Dreieckspyramiden mit der gemeinsamen Grundfläche S1, S2, S4 und den gegenüberliegenden Spitzen S3 bzw. S5.

Die Erhitzer H1 und H2 lagen etwa nördlich der Bohrung für S5. Die Erhitzer waren jeweils 8 m lang und lagen 10 m unterhalb der Stollensohle. H1 lag im Granit, H2 etwa 2,2 m weiter nördlich in einer Lamprophyrzone.

Die Tab. 7 gibt die Koordinaten der Bohrlochansatzpunkte für die Sonden S1 bis S5 sowie die Lage der Sondenmitten im Bohrloch an.

Bohrloch	R-Wert	H-Wert	Z	Sonde
BOWT 84.032	667'448.74 '443.48	159'042.10 '042.01	1732.23 1732.51	S4
BOWT 84.033	'448.57 '443.27	'144.03 '144.59	1731.32 1731.51	S2
BOWT 84.034	'400.07 '395.64	'047.79 '050.78	1732.41 1732.60	S1
BOWT 84.035	'419.45 '419.67	'077.05 '075.32	1730.13 1700.13	S5
BOWT 84.036	'419.54 '419.91	'076.98 '077.10	1733.64 1753.64	S3

Tab. 7: Bohrlochansatz- und Sondenkoordinaten

7.4. Instrumentierung

Die Anlage zur Erfassung mikroseismischer Ereignisse bestand aus Sensoren, Verstärkern, Übertragungsleitungen, Transientenspeicher, Triggereinheit und Aufzeichnungsanlage. Eine schematische Darstellung zeigt Fig. 27.

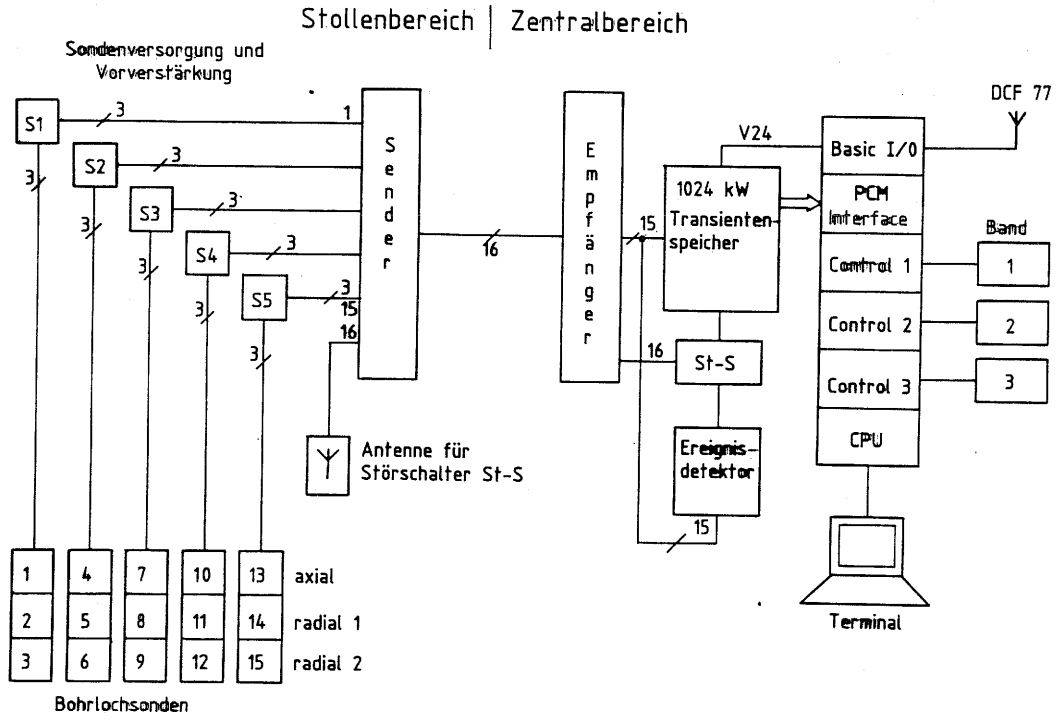


Fig. 27: Schematische Darstellung der Anlage zur Erfassung mikroseismischer Ereignisse

7.4.1 Bohrlochsonden

Jede der 5 Stationen bestand aus einer Bohrlochsonde, in die 3 Beschleunigungsaufnehmer eingebaut waren. Ein Aufnehmer war in axialer Richtung orientiert, die anderen beiden in radialer Richtung senkrecht zueinander. Mittels einer elektrisch betriebenen Vorrichtung wurden die Sonden im Bohrloch verspannt. Beim Einbau der Sonden mit einem Setzgestänge konnte eine gezielte Ausrichtung der 3 Komponenten erreicht werden.

Die Tab. 8 gibt die Achsenrichtungen gegenüber geographisch Nord der einzelnen Aufnehmer der Sonden an, bei denen eine positive Signalspannung erzeugt wurde. Aus den Richtungen der Signalamplituden der Ersteinsätze ist die Herdrichtung abschätzbar.

Sonde 1	Kanal-Nr.		
BOWT 84.034	1	2	3
+ in Richtung	304°	unten	214°

Sonde 2	Kanal-Nr.		
BOWT 84.033	4	5	6
+ in Richtung	276°	unten	186°

Sonde 3	Kanal-Nr.		
BOWT 84.036	7	8	9
+ in Richtung	oben	32°	302°

Sonde 4	Kanal-Nr.		
BOWT 84.033	10	11	12
+ in Richtung	269°	unten	179°

Sonde 5	Kanal-Nr.		
BOWT 84.035	13	14	15
+ in Richtung	unten	32°	122°

Tab. 8: Orientierung der Achsenrichtungen der Aufnehmer bei Abgabe einer positiven Signalspannung.
(Kanal-Nr. ist die Belegung der Eingänge am Transientenspeicher).

Verwendet wurden Beschleunigungsaufnehmer der Firma PCB Piezotronics Inc. U.S.A., Typ 308 B02 (ultrasensitiv). Diese Aufnehmer zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeit (1V/g; g = Erdbeschleunigung) und große Bandbreite (bis über 6 kHZ) aus. Die Auflösung beträgt $1 \cdot 10^{-4}$ g. Im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 3 kHz liegt die Abweichung vom Kalibrierwert bei 100 Hz unter $\pm$ 3 %. Für den Frequenzbereich bis 6 Hz wird vom Hersteller eine maximale Abweichung von $\pm$ 10 % angegeben.

Der eingebaute Vorverstärker wurde über die Signalleitung versorgt. Außerhalb des Bohrloches befanden sich die Stromversorgungseinheiten und ein weiterer Spannungsverstärker, der nach geringem Umbau eine maximale Verstärkung von 50fach erlaubte. Die Vollaussteuerung der Verstärker erfolgte bei $\pm$ 5 V ($\pm$ 100 $\cdot$ 10^{-3}g).

7.4.2 Leitungssender und -empfänger

Über Koaxkabel wurden die Signale von jeder Station zu einem 16kanaligen Leitungssender vom WT-Stollen zum Leitungsempfänger im Zentralbereich geführt. Diese Einrichtung behob den Leitungsverlust der Signalspannungen und sorgte für störungsfreie Übertragung der elektrischen Signale. Zur Übertragung der seismischen Signale wurden 15 Kanäle benötigt.

7.4.3 Transientenspeicher

Im Zentralbereich des Felslabors befand sich die Registrierapparatur. Sie bestand u. a. aus einem 16kanaligen Transientenspeicher. Hier wurden die Signale gefiltert (Grenzfrequenz 10 kHz) und mit 12 bit Auflösung digitalisiert. Die Abtastfrequenz betrug 50 kHz. Der Speicher hatte eine Kapazität von 2^{16} Meßwerten pro Kanal.

Aus der Abtastfrequenz und der Kapazität ergibt sich eine Speichertiefe von etwa 1,3 s.

Durch ein Triggersignal wurde der Speicherinhalt konserviert. Er stand damit zur Aufzeichnung auf einen Datenträger zur Verfügung. Nach der Übertragung des Speicherinhaltes auf den Datenträger wurde der Speicher mit neuen Signalen überschrieben. Das Triggersignal zum Konservieren des Speicherinhaltes lieferte der Ereignisdetektor.

7.4.4 Ereignisdetektor

Der Ereignisdetektor arbeitete mit den 15 Analogsignalen, die am Leitungsempfänger parallel zu den Ausgängen für den Transientenspeicher anlagen. Das Gerät war ein Pegeldetektor mit einer nachgeschalteten Logik. Erst wenn an mindestens 2 der 15 Eingänge die eingestellten Signalpegel erreicht bzw. überschritten wurden, gab er den Triggerimpuls an den Transientenspeicher ab. Die Pegel waren für jeden Kanal getrennt einstellbar. Die Bodenunruhe an den Stationen war ein ständig anstehendes Signal. Die Pegel wurden auf den 4fachen Wert der Bodenunruhe eingestellt. Damit wurde die Intensität des Minimalereignisses festgelegt, dessen Amplituden an mindestens 2 der 15 Kanäle diesen Wert erreichen mußten.

Ein Triggersignal konnte schon von einer Sonde ausgelöst werden, da in ihr 3 Aufnehmer montiert waren. Lag ein Triggerimpuls vor, so wurde stets eine 15kanalige Registrierung durchgeführt.

Durch Einstellen des Pegels bis zu seinem Maximalwert konnten im Bedarfsfall einzelne Kanäle aus dem Triggervorgang ausgeschaltet werden.

Die Triggertätigkeit mußte aus verschiedenen Gründen eingeschränkt werden.

Während der allgemeinen Arbeitszeit im Felslabor Grimsel wurden künstlich erzeugte Ereignisse in so großer Zahl registriert, daß mittels einer Schaltuhr der Ereignisdetektor abgeschaltet werden mußte. Unwirksam blieb der Detektor von montags bis freitags zwischen 7.00 Uhr und 18.30 Uhr. Während der Nacht und über das Wochenende war der Detektor aktiv.

Ohne bisher erklärbare Ursache traten zeitweise elektrische Störungen in schneller Folge auf, die innerhalb kurzer Zeit die Registrierkapazität der Anlage erschöpften. Die Störungen wurden über die in den Bohrlöchern ausliegenden Sondenkabel eingestreut und aktivierten den Ereignisdetektor. Unterdrückt wurde die Registrierung dieser Störungen mit einem schnellen, funktechnisch arbeitenden Schalter am Triggerausgang des Ereignisdetektors.

7.4.5 Inbetriebnahme und Ausfallzeiten

Die Anlage zur Erfassung der mikroseismischen Aktivität wurde gegen Ende des Jahres 1984 aufgebaut. Im anschließenden Zeitraum des Probebetriebes stellte sich heraus, daß die Verstärker für höhere Verstärkungen umgebaut werden mußten. Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Spannungsversorgung waren notwendig, um die Komponenten vor Zerstörung zu schützen.
Eine gravierende Änderung des Datenerfassungssystems im Zentralbereich führte zu einer weiteren Verzögerung der Inbetriebnahme der Anlage. Mit einer fehlerfreien Registrierung von Ereignissen konnte Ende September 1986 begonnen werden.

Größere Lücken im Überwachungszeitraum, die u. a. auch auf den Ausfall von elektrischen Komponenten zurückzuführen sind, sind in Tab. 9 aufgeführt:

24.12.86 - 05.01.87
05.02.87 - 17.02.87
26.02.87 - 04.04.87
21.10.87 - 09.11.87
09.03.88 - 28.04.88
09.07.88 - 28.09.88

Tab. 9: Ausfallzeiten der Erfassungsanlage

Die angegebenen Daten beziehen sich auf den letzten bzw. ersten Tag, für den eine Registrierung vorliegt.

7.5 Ergebnisse

Im Anschluß an den Aufbau der Anlage wurde die Funktionstüchtigkeit getestet. Zunächst waren für alle 15 Aufnehmer niedrige Eingangspegel am Ereignisdetektor eingestellt. Das bedeutet, daß eine 15spurige Registrierung erfolgte, wenn z. B. die Signale von 2 Aufnehmern einer Sonde die Triggerkriterien erfüllten. Die Ereignisse für den Test wurden mit einem Hammerschlag künstlich erzeugt. Nach den Tests wurden die Einstellungen am Ereignisdetektor zunächst unverändert beibehalten. Es galten somit zur Erfassung natürlich ausgelöster Ereignisse die gleichen Triggerbedingungen.

7.5.1 Hammerschlagprofil

Entlang des WT-Stollens wurde zwischen den markierten Tunnelmetermarken TM 50 und TM 130 mit 10 m Abstand jeweils 1 Hammerschlag mit einem 5-kg-Hammer ausgeführt. Jeder der Hammerschläge löste eine Registrierung aus. Fig. 28 zeigt die Registrierung der Hammerschläge am Ort der Sonde S1, die am Ende des WT-Stollens etwa bei TM 140 in einer 5 m tiefen Horizontalbohrung plaziert war. Dargestellt sind als Beispiele die Signale der axialen Komponente K1.

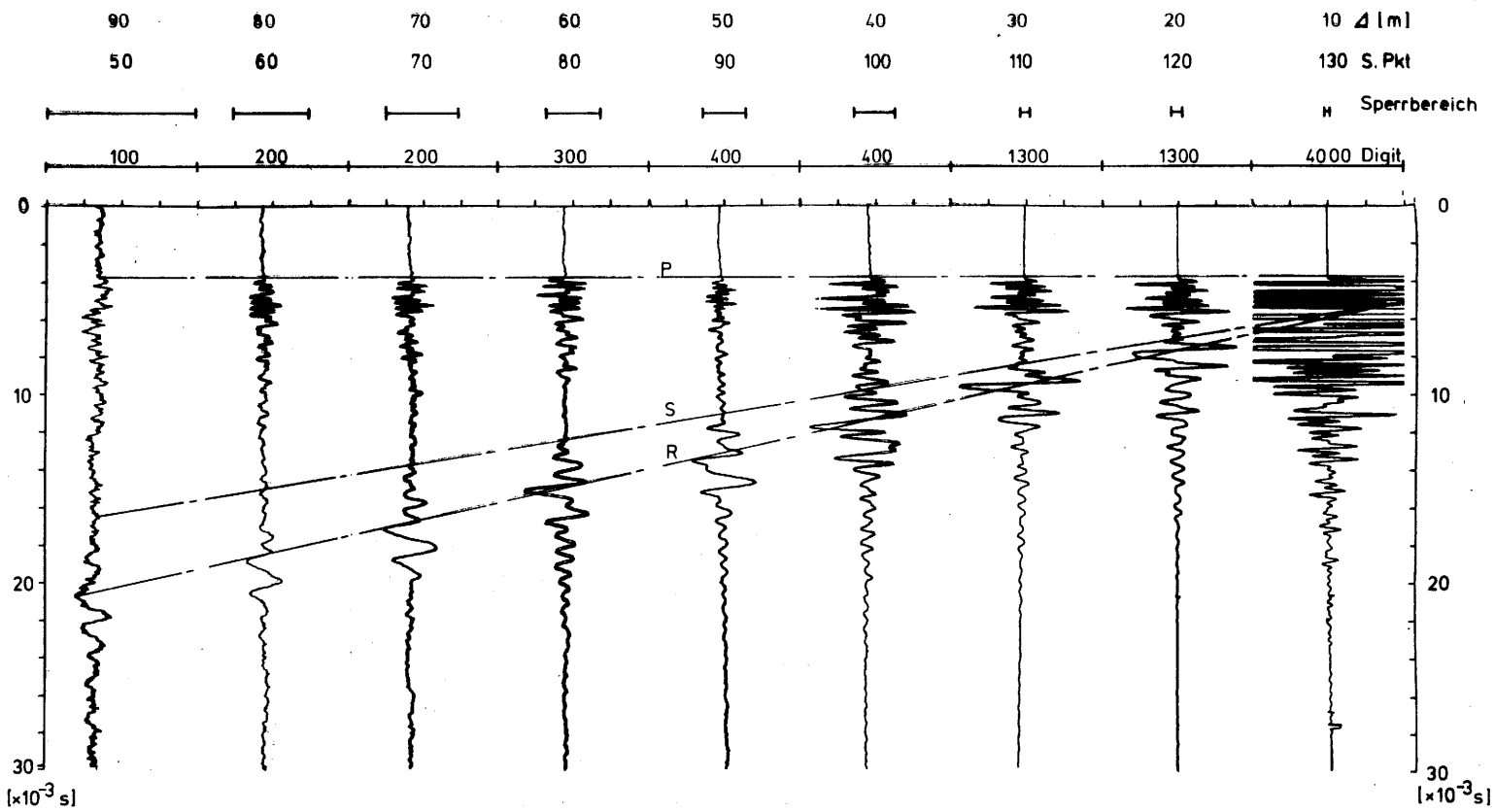


Fig. 28: Seismogrammontage des Hammerschlagprofils im WT-Stollen.
Δ = Entfernung zwischen Schlagpunkt (S.Pkt) und Sonde S1. Sperrbereich = Sperrbereich des Ereignsdetektors. P = Ersteinsatz der Kompressionswelle (Vp = 5300 m/s), S = Einsatz der Scherwelle (V_S = 3020 m/s), R = Einsatz der Oberflächenwelle (V_r = 2680 m/s)

Aus den Abständen zwischen den Schlagpunkten und den Sonden S1 bzw. S2 wurde die Wegdifferenz für das seismische Signal bestimmt. Mit der dazugehörigen Laufzeitdifferenz ergab sich bei Annahme homogener und isotroper Ausbreitungsbedingungen die Kompressionswellengeschwindigkeit zu V_p = 5303 $\pm$ 54 m/s. Außer den Ersteinsätzen der Kompressionswelle sind auch die der Scherwelle und einer Oberflächenwelle erkennbar. Für sie erhält man mittlere Werte von V_s = 3020 m/s bzw. V_r = 2680 m/s.

Für Schlagpunktentfernungen unter 90 m zur Sonde S1 sind die Seismogramme als qualitativ gut zu bezeichnen. Zu beachten sind die verschiedenen Maßstäbe für die Signalamplituden in der Abbildung. Der Sperrbereich des Ereignisdetektors ist als Balken bei jedem Seismogramm angegeben. Erst wenn die Signalamplituden Werte außerhalb der Balkenlänge erreichen, wird der Ereignisdetektor aktiv. Es ist ersichtlich, daß ein Ereignis, dessen Intensität einem Hammerschlag in 60 m Entfernung zur Sonde S1 vergleichbar ist, eine Aufzeichnung auslösen würde.

Die Intensität der Hammerschläge war für größere Entfernungen als 60 m zwischen Schlagpunkt und Sonde S1 nicht ausreichend zur Aktivierung des Ereignisdetektors durch die Aufnehmer der Sonde S1. Da die Sonden S3 und S5 (eingesetzt in den Vertikalbohrungen) näher zu den betreffenden Schlagpunkten lagen, sind die Triggerkriterien durch diese Sonden erfüllt worden.

7.5.2 Fallgewichtsversuche

An drei ausgewählten Punkten im WT-Stollen wurden Fallgewichtsversuche ausgeführt. Sie wurden als notwendig erachtet, da bei einem Fallgewicht eine bessere Reproduzierbarkeit des Quellensignals erreicht wird. Die Fallgewichtsversuche wurden an den Tunnelmetermarken TM70, TM95 und TM121 durchgeführt, weil an diesen Stellen die geschnittene Streckensohle nicht durch Installationen versperrt war.

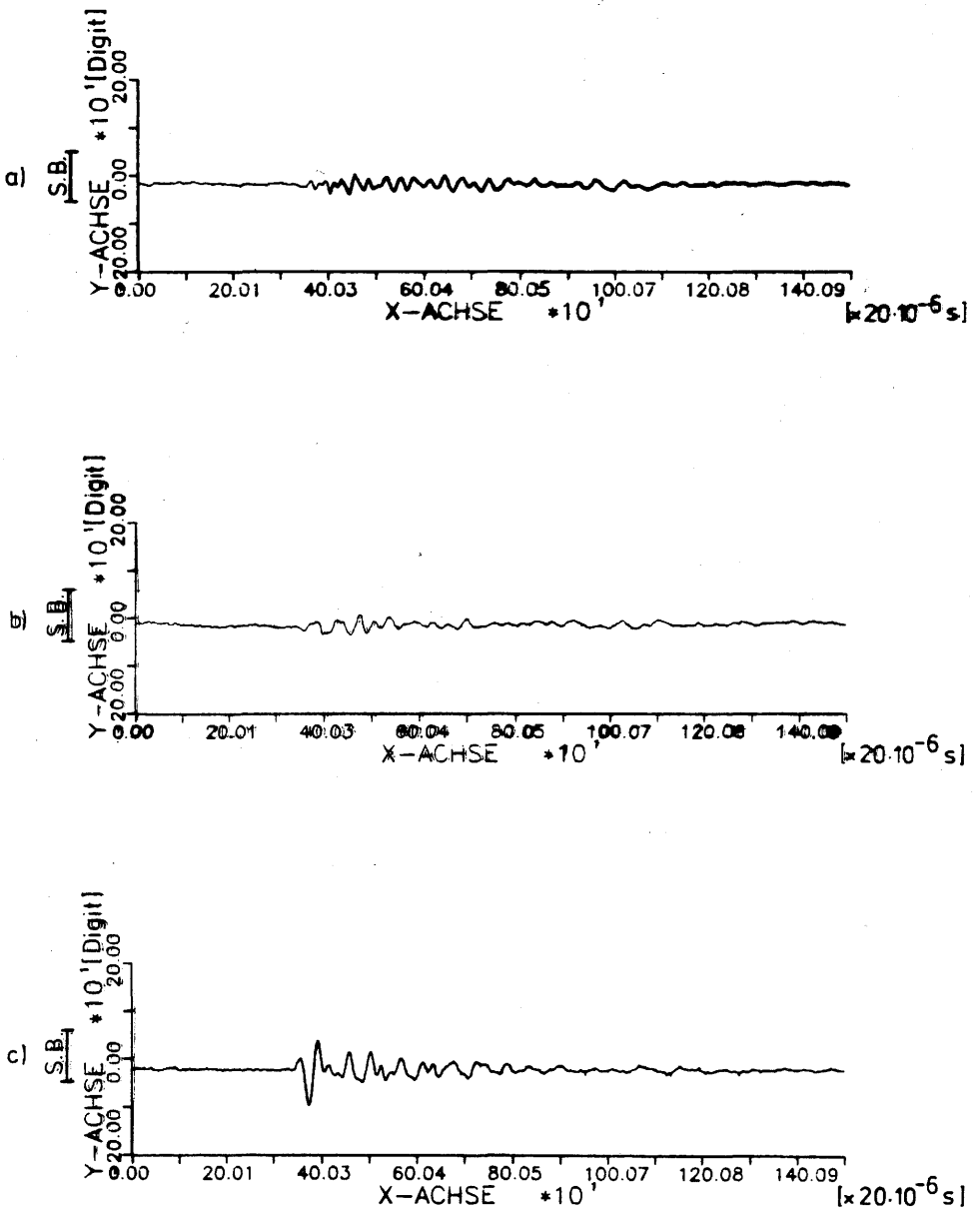


Fig. 29: Seismogramme der Sonde S4 durch Fallgewicht bei TM 70 (Δ ca. 60 m)

a) axiale Komponente (Kanal 10)

b) radiale Komponente 1 (Kanal 11)

c) radiale Komponente 2 (Kanal 12)

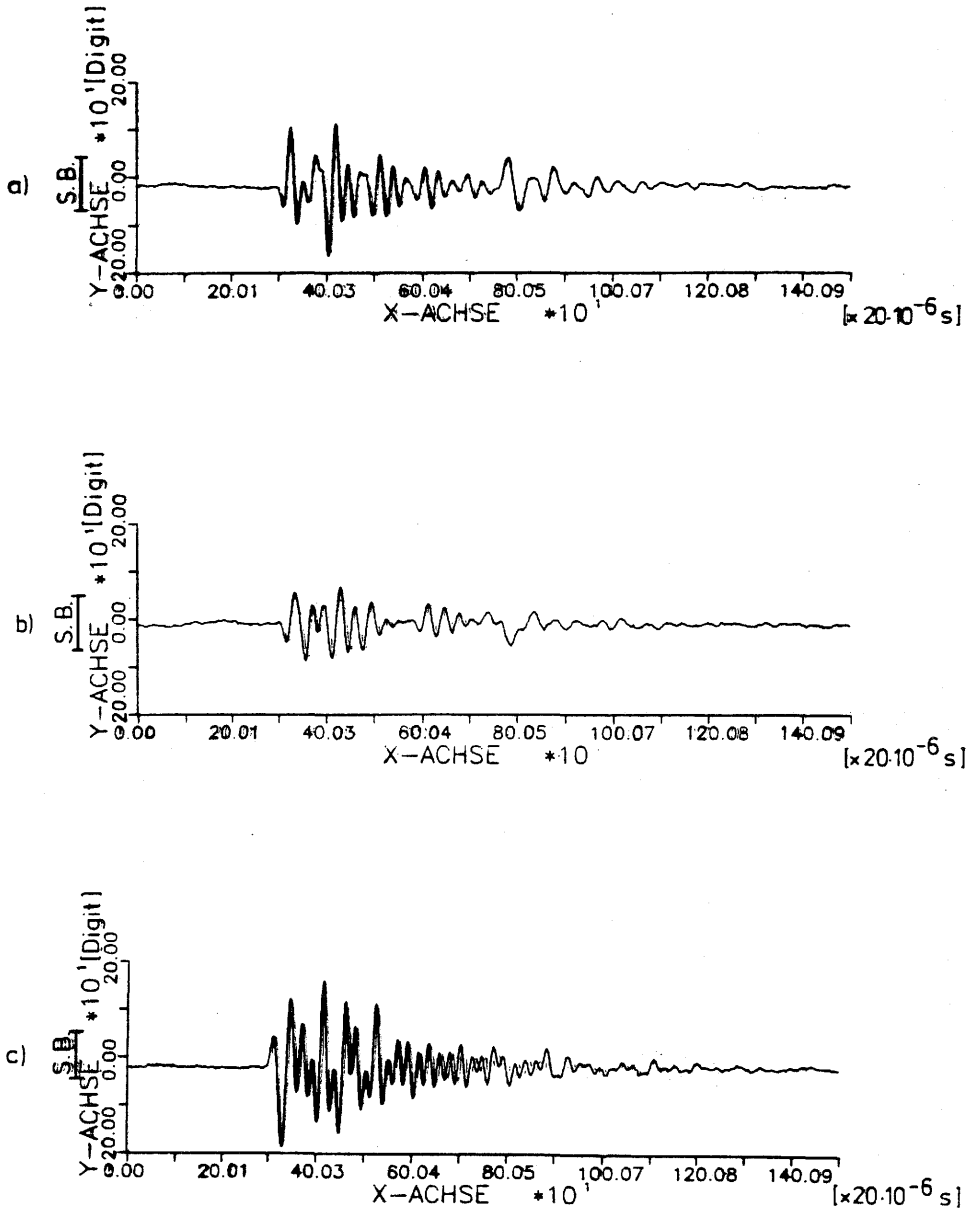


Fig. 30: Seismogramme der Sonde S4 durch Fallgewicht bei TM 95 (Δ ca. 45 m)

a) axiale Komponente (Kanal 10)

b) radiale Komponente 1 (Kanal 11)

c) radiale Komponente 2 (Kanal 12)

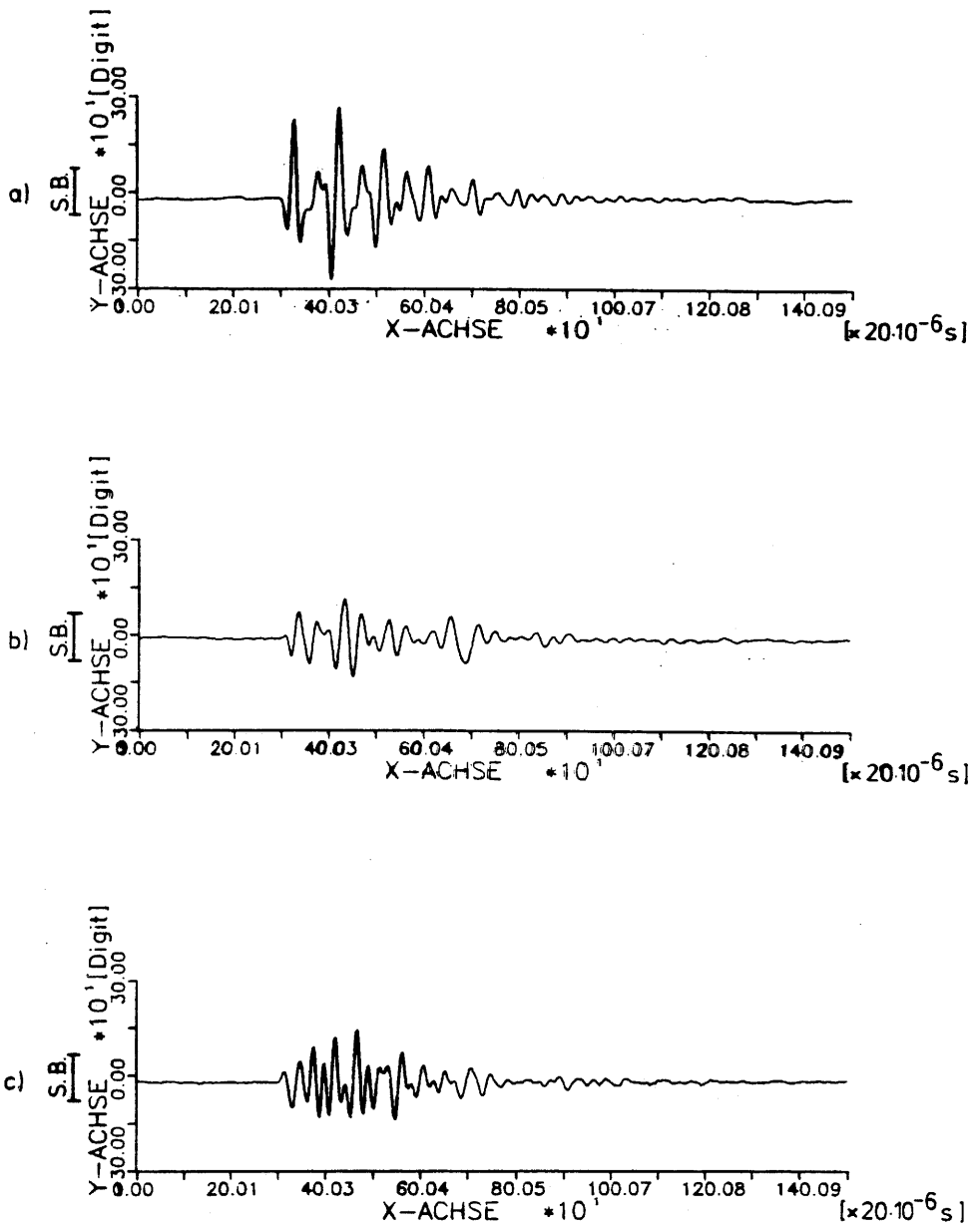


Fig. 31: Seismogramme der Sonde S4 durch Fallgewicht bei TM 121 (Δ ca. 38 m)

a) axiale Komponente (Kanal 10)

b) radiale Komponente 1 (Kanal 11)

c) radiale Komponente 2 (Kanal 12)

Da jeder Fallgewichtsversuch eine Registrierung auslöste, wurden die Triggerkriterien für den Ereignisdetektor von mindestens 2 der 15 Aufnehmer erfüllt.

Als Beispiel sind die Seismogramme der 3 Komponenten der Sonde S4 in den Fig. 29 bis 31 dargestellt. Die Sonde S4 lag außerhalb des WT-Stollens am Eingang zur Strecke in den Ventilationstest in einer 5 m tiefen Horizontalbohrung. Die Entfernungen zwischen der Sonde S4 und den Anregungspunkten lagen bei 63 m, 45 m und 38 m.

Selbst an der Sonde S4 wurden die eingestellten Pegel bei den beiden letzten Entfernungen deutlich überschritten und hatten dadurch ein Triggersignal erzeugt. In den Fig. 29 bis 31 geben die Balkenlängen den Sperrbereich des Ereignisdetektors an.

Die Richtungen der Erstausschläge der 3 Komponenten sind nutzbar zur Abschätzung der Herdrichtungen. In den Seismogrammen der Fig. 29 sind die Erstausschläge der axialen und lotrechten Komponente zu schwach entwickelt. Die horizontale Komponente zeigt jedoch einen deutlichen positiven Ausschlag, was in Verbindung mit der Tab. 2 (Abschnitt 7.4.1) darauf hinweist, daß die Anregung aus nördlicher Richtung erfolgte. Dort liegt auch, von der Sonde S4 aus gesehen, die Position der Tunnelmetermarke TM 70.

In den beiden anderen Fällen sind auch die Erstausschlagsrichtungen der axialen Komponenten klar erkennbar. Die axialen Komponenten in den Fig. 30 und 31 zeigen negative Amplitudenwerte und weisen darauf hin, daß die Anregung aus westlicher Richtung kam. Für die lotrechte Komponente sind nur sehr schwache positive Anschläge zu erwarten, da die Anregungspunkte nur wenig unterhalb des Niveaus der Sonde S4 lagen.

7.5.3 Registrierungen anderer Ereignisse

Auf Grund der durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse konnte davon ausgegangen werden, daß die Anlage zur Registrierung mikroseismischer Ereignisse geeignet war. Ereignisse wurden zu Beginn des Erfassungszeitraumes auch in großer Zahl registriert. Nur wurde festgestellt, daß diese durch bauliche Aktivtäten im Bereich des Wärmeteststollens ausgelöst wurden. Hier wurde Abhilfe durch die Einführung einer programmierbaren Schaltuhr geschaffen, die den Ereignisdetektor kontrolliert abschaltete (Abschnitt 7.4.4).

Weiterhin zeichnete sich die Sonde S4 (Eingang zum Ventilationstest) durch häufige Triggerung des Ereignisdetektors aus. Die Signale waren nur auf den Kanälen 10, 11 und 12 sichtbar. Eine Kontrolle dieses Bereiches nach sichtbaren auslösenden Ursachen war ohne Erfolg. Da diese Sonde eine relativ große Entfernung zu den Erhitzern im WT-Stollen hatte, wurden die Eingangspegel der betreffenden Kanäle am Ereignisdetektor auf die Maximalwerte gestellt. Damit lieferte die Sonde S4 keine Triggersignale mehr zur Aktivierung des Ereignisdetektors, blieb für die Aufzeichnung von Ereignissen jedoch unverändert empfindlich.

Die große Häufigkeit elektrischer Störungen löste zusätzlich Registrierungen aus. Sie konnten mit der in Abschnitt 7.4.4 beschriebenen Maßnahme sehr effektiv eingeschränkt werden, aber nicht vollständig ausgeschaltet werden. Fig. 32 zeigt als Beispiel die Registrierung eines elektrisch eingestreuten Störsignales, wobei von jeder Sonde S1 bis S5 die axiale Komponente dargestellt wurde. Die großen Signale stammten von den beiden Sonden S3 und S5, die in den 20 m bzw. 30 m tiefen Vertikalbohrungen installiert waren.

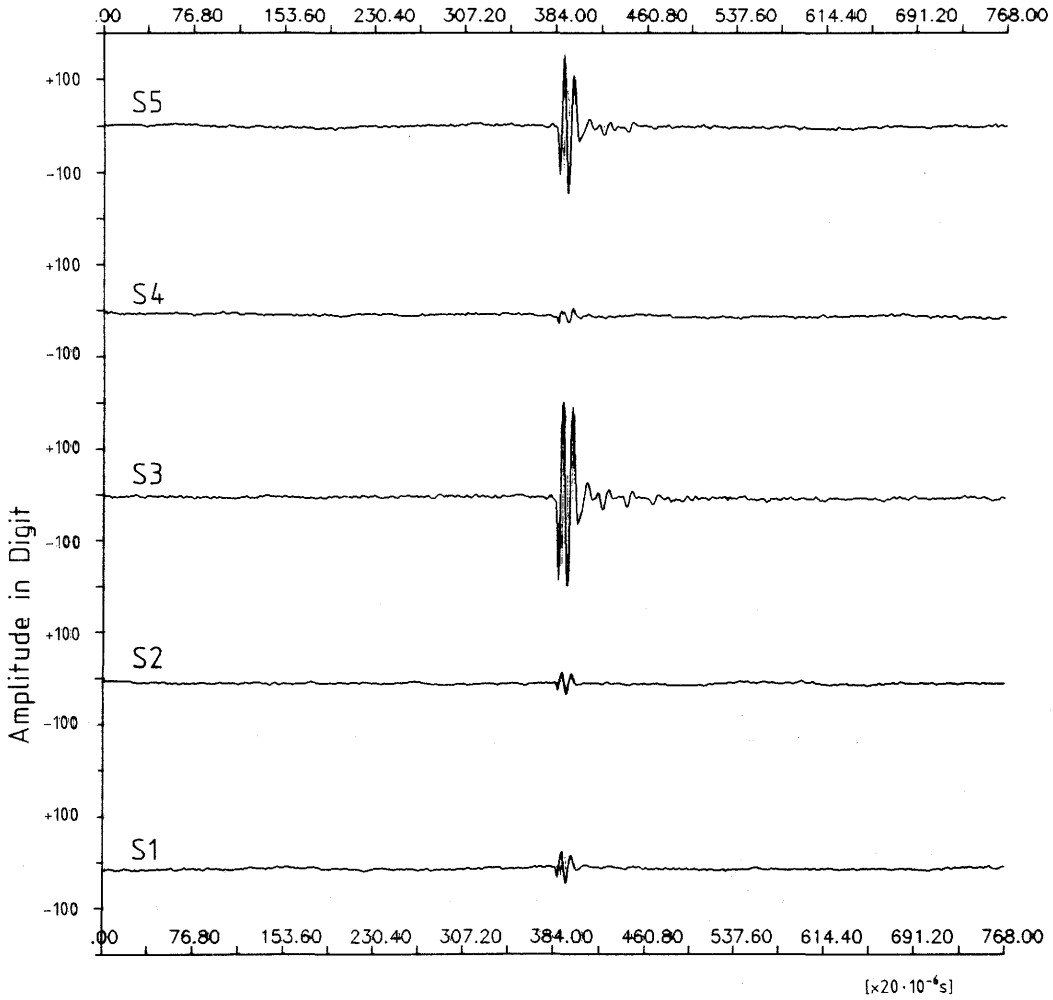


Fig. 32: Registrierung einer elektrischen Störung

Die Aufzeichnung dieser Signale zeigte jedoch, daß die Anlage funktionierte und auch für ein seismisches Signal aufzeichnungsbereit war. Während des gesamten Überwachungszeitraumes wurden ausschließlich Störsignale im gesamten Stationsnetz und vereinzelt mikroseismische Ereignisse im Nahbereich einzelner Sonden aufgezeichnet.

Die Unterscheidung der Signale war eindeutig. Die Störsignale waren auf allen Kanälen in ihrem Schwingungsbild identisch und ohne meßbaren Laufzeitunterschied. Die Amplituden der 3 Signale einer Sonde waren gleich.

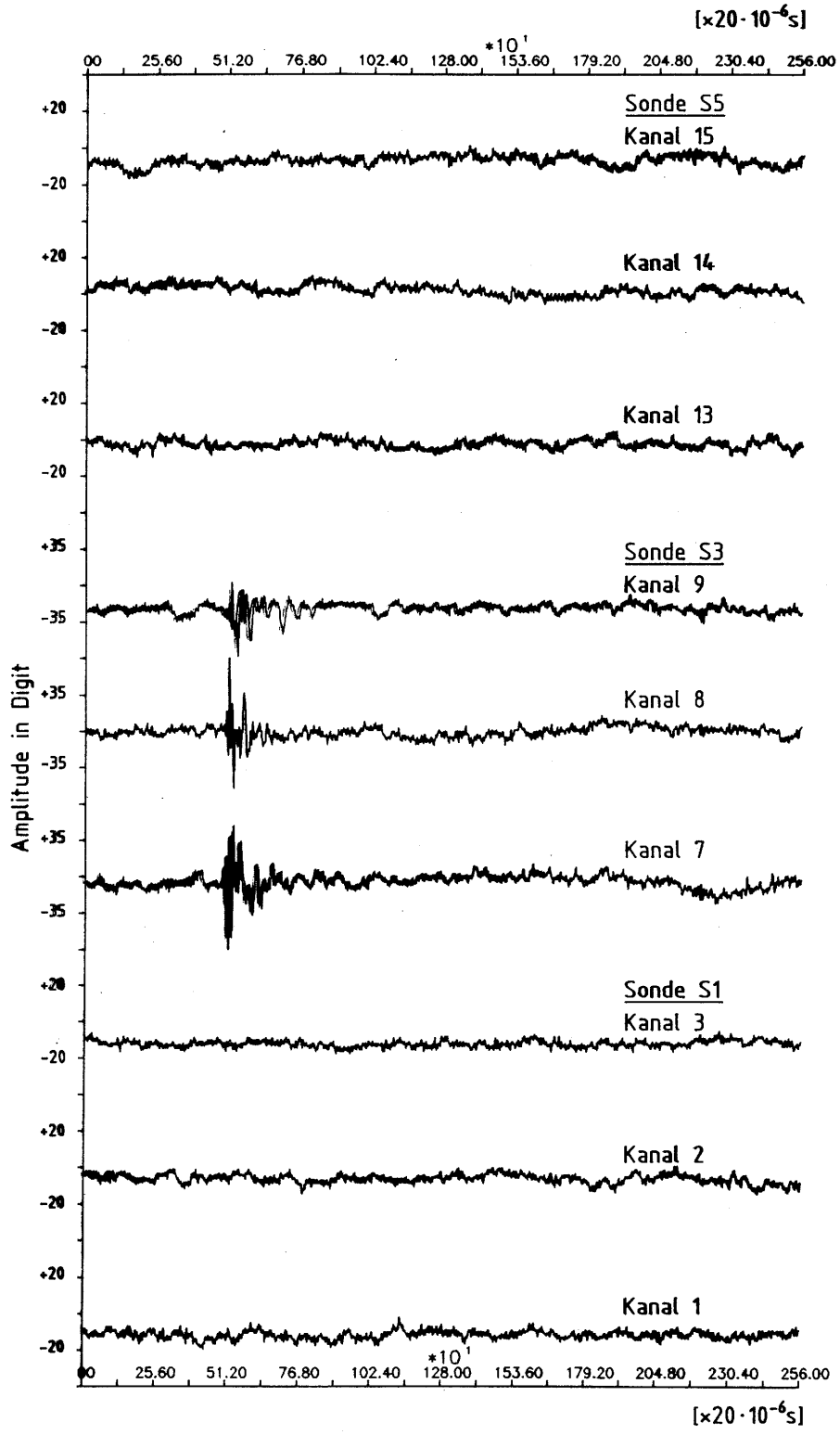


Fig. 33: 3-Komponenten-Registrierung eines mikroseismischen Ereignisses aus dem Nahbereich der Sonde S3

Bei den mikroseismischen Ereignissen im Nahbereich einer Sonde unterschieden sich die Signale in den 3 Komponenten. Es wurde kein Fall beobachtet, bei dem auch von einer anderen Sonde ein solches Signal sichtbar aufgezeichnet wurde. Fig. 33 zeigt die Registrierung eines typischen mikroseismischen Ereignisses aus der unmittelbaren Umgebung der Sonde S3. Dargestellt sind die 3 Komponenten dieser Sonde und der Nachbarsonden S1 und S5. Auf den Spuren der Nachbarsonden ist das Ereignis nicht zu erkennen.

7.6 Schlußbetrachtung

Zur Überwachung der mikroseismischen Aktivität im Zusammenhang mit dem Eintrag von Wärmeenergie in einem begrenzten Gebirgsbereich wurde im Felslabor Grimsel eine Anlage zur Erfassung mikroseismischer Ereignisse aufgebaut. Es wurde mit Hammerschlägen und Fallgewichtsversuchen nachgewiesen, daß die Anlage die künstlich erzeugten Ereignisse registrierte. Seismische Störsignale, die durch bautechnische Tätigkeiten verursacht wurden, machten eine Begrenzung der Überwachungszeit notwendig. Der Ereignisdetektor wurde durch eine programmierbare Uhr während der allgemeinen Arbeitszeit ausgeschaltet. Die Registrierung elektrischer Störsignale, die sich im gesamten Gebirgsbereich ausbreiteten, konnte mit einem schnellen funktechnisch arbeitenden Schalter wirkungsvoll eingeschränkt werden. Die durch den Schalter nicht erfaßten Störsignale zeigten sich jedoch indirekt nutzbar für den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Anlage.
Bei der Aufzeichnung natürlicher Ereignisse blieben die Signale auf einzelne Sonden beschränkt. Ihre Ursache ist in natürlichen Entspannungsvorgängen des Gebirges in unmittelbarer Sondennähe zu vermuten. Ereignisse, deren Intensität ausreichend groß war, um an mehreren Stationen erkennbare Signale zu erzeugen, sind nicht festgestellt worden.

Wenn durch die Aufheizung und Abkühlung des von den Erhitzern beeinflußten Gebirgsbereiches überhaupt seismische Energie abgestrahlt wurde, dann in so energiearmem Maße, daß die meßtechnische Erfassung der Vorgänge mit den installierten Instrumenten und deren Anordnung nicht möglich war. Eine Überwachung mit Sensoren für einen wesentlich höheren Frequenzbereich seismischer Signale hätte in einem engräumigen Gebirgsbereich durchgeführt werden müssen, wobei die Auswahl des Gebirgsbereiches wegen der geringen Reichweite der seismischen Signale problematisch ist.

8 ERGEBNIS DES WÄRMETESTS

Im Wärmetest im Felslabor Grimsel wurden während der Versuchsdauer von vier Jahren die thermomechanischen und hydraulischen Reaktionen eines kristallinen Wirtgesteins auf einen künstlichen Wärmeeintrag untersucht. Mehrere Aufheiz- und Abkühlvorgänge dienten Studien von Parametern oder endlagerrelevanter Vorgänge. Mit aktuellem Bezug zum schweizer Endlagerkonzept (Projekt GEWÄHR) war die maximale Gebirgstemperatur von 90 °C in den einzelnen Testphasen kleiner als die Siedetemperatur des Bergwassers an diesem Ort. Als Testfeld wurde eine Zone im kompakten Zentralen Aaregranit gewählt, die in unmittelbarer Nachbarschaft zu einer senkrecht einfallenden Störungszone lag.

Das Temperaturfeld

Die von den elektrischen Bohrlocherhitzern abgegeben Wärmemengen verteilten sich je nach Gebirgsstruktur durch konduktive und/oder konvektive Vorgänge im Testfeld. Die Störungszone als Hauptaquifer verursachte ein unsymmetrisches Temperaturfeld. Das durchströmende Bergwasser führte zu Wärmeverlusten und zu steilen Temperaturgradienten in der horizontalen Ausbreitung. Die vertikale Temperaturverteilung infolge Wärmeleitung wird durch Konvektionsvorgänge überlagert. Die Gradienten sind unterhalb der Wärmequellen steiler als oberhalb.

Die horizontale Ausbreitung des Temperaturfelds nach Erreichen quasi-stationärer Zustände ist in der Tab. 10 zusammengefaßt:

		Abstand [m]			Abstand [m]		
		Ende 2. Aufheizphase			Ende 3. Aufheizphase		
Isotherme	Teufe [m]	12,0	15,0	18,0	12,0	15,0	18,0
20 °C	nördlich H2	5,50	5,30	4,9	---	---	---
	südlich H1	6,40	6,80	6,5	6,50	7,00	6,60
30 °C	nördlich H2	2,60	3,00	2,4	2,80	3,10	2,30
	südlich H1	3,00	3,50	3,2	2,90	3,60	3,30
50 °C	nördlich H2	0,40	1,10	0,5	0,50	1,20	0,40
	südlich H1	0,40	1,60	0,8	0,40	1,50	1,00

Tab. 10: Ausbreitung des quasi-stationären Temperaturfelds

Im Horizontalschnitt durch die Wärmequellen reduziert sich die Temperatur auf einer Strecke von ca. 1,50 m um 40 °C auf 50 °C. Im Abstand von 7,00 m beträgt die Reduktion bereits 70 °C. Die Erhöhung gegenüber der Ausgangstemperatur ist nur noch 7 °C. Im Abstand von 10,00 m ist die Temperaturerhöhung kleiner als 1 °C.

Das Verformungsfeld

Das großräumige Verformungsfeld ist durch standortspezifische Einflüsse bestimmt. Für das FLG waren überwiegend die Stauspiegelschwankungen der benachbarten Stauseen, Auswirkungen des Klimas und die der Region eigene Tektonik maßgeblich. Die Kontrolle dieser Verformungen ergab für das Nahfeld keine Translationen mit zusätzlicher Beanspruchung. Die Störungszone wirkte als Scherfläche und bildete eine Diskontinuität im Verlauf der vertikalen Verschiebungen. Die Verformungen im Nahfeld um die Wärmequellen war von der allseits großen Einspannung durch die nicht erwärmten Gebirgsbereiche geprägt.

Die thermoinduzierten Verformungen sind das Integral aus den unterschiedlichen Komponenten des Gesteinsverbands. Homogene Granitbereiche, eingeschlossenes Fremdgestein, gestörte Zonen und Klüfte verformen sich gemäß ihrer eigenen thermomechanischen Parameter und des Einspanngrads in den anderen Komponenten. Die verformungsweichen Klüfte bieten steifen Gesteinen Raum für thermische Expansion. Die im Wärmetest gemessenen integralen Verformungen mit Bezugslängen von 3,00 m oder mehr ergaben nur sehr geringe Werte, meist in der Größenordnung der Meßgenauigkeit der Meßsysteme. Die Messungen bestätigten somit die vorgenannten Annahmen zum Verformungsverhalten der Gesteinsstruktur. Die schubweiche Störungszone führte auch hier wieder zur Diskontinuität der vertikalen Komponente des Verschiebungsvektors. Die örtlich begrenzte Aufheizung übte keinen Einfluß auf großräumige Verformungsvorgänge aus. Eine Wechselwirkung zwischen großräumigen Effekten und denen im Nahfeld bestand nicht.

Die thermoinduzierten Verformungszustände bildeten sich bei Abkühlung nur verzögert zurück. Diese Hysterese bewirkt die Speicherung von Verformungsenergie im Gebirge, die sich allmählich oder schlagartig entspannen muß.

Spannungsfeld

Das thermoinduzierte Spannungsfeld resultiert aus der Dehnungsbehinderung, die das nicht erwärmte Gebirgsvolumen der Expansion des erwärmten Bereichs um die Wärmequellen entgegensetzt. Es überlagert sich dem sekundären Spannungszustand, der durch die Hohlraumerstellung hervorgerufen wurde. Weitere zusätzliche Spannungen können durch Änderungen der Hydraulik und zeitabhängige Last- bzw. Spannungsumlagerungen im Gesteinsverband entstehen. Die Bergwasserdrücke wurden lediglich beim Aufbringen großer Temperaturinkremente in räumlich und zeitlich eng begrenztem Ausmaß betroffen. Die größte Druckdifferenz in unmittelbarer Nähe zur Wärmequelle wurde mit ca. 1,0 MPa gemessen.

Die Änderungen der Gebirgsdrücke entstanden synchron mit und proportional zu den Temperaturen. Die größte Spannungsänderung trat mit ca. 9 MPa direkt an der Wärmequelle auf. Die fortschreitende Erwärmung entfernterer Bereiche führte auch für Meßorte in quasi-stationären Bereichen des Temperaturfelds durch die Zunahme des Einspanngrads zu weiteren Spannungsanstiegen. In den Abkühlphasen erwies sich das thermisch induzierte Spannungsfeld als weitgehend reversibel. Bei plötzlichem Ausfall der Energiezufuhr entstanden im Erhitzerzentrum durch den Abbau der Temperaturspitzen bezogen auf den gemessenen Spannungszustand zu Beginn der Aufheizung positive (Zug-)Spannungsdifferenzen. Bei der endlagerrelevanten langsamen Abkühlung und bei den zu erwartenden Primärspannungszuständen ist jedoch nicht mit Gesamtspannungen im Zugbereich zu rechnen.

Das Spannungsfeld entsprach im wesentlichen einem rotationssymmetrischen Zustand, in welchem die drei Hauptspannungen gleich sind. Durch die Störungszone wurde dieser jedoch merklich beeinflußt.

Thermomechanische Modellierung

Die thermomechanische Modellierung erfolgte nach der FE-Methode an einem rotationssymmetrischen Modell. Das Gebirge wurde als homogen und elastisch angenommen. Der Einfluß der Störungszone wurde konservativ abgeschätzt. Als Werkstoffkennwerte wurden die im Testfeld ermittelten Parameter eingeführt.

Das Temperaturfeld wurde mit guter Näherung zur Messung modelliert. Die Berechnung der Verformungen erbrachte sehr kleine Verschiebungen für das homogene Gebirge. Diese Werte konnten im Detail durch die Messungen am inhomogenen Gebirge nicht validiert werden. Die Meßwerte waren aber auch sehr klein und bezüglich ihrer Aussage im Hinblick auf die Endlagertauglichkeit einer Formation vernachlässigbar.

Bei der Berechnung der thermoinduzierten Gebirgsspannungen konnten die Messungen im Bereich größer als 1,50 m um die Wärmequellen mit guter Übereinstimmung genähert werden. Im Bereich näher als 1,50 m zum Erhitzer traf das Modell nurmehr unzureichend zu und führte hier zu geringeren Spannungen. Die Aussagekraft des Modells wird hierdurch nur unwesentlich eingeschränkt.

Gebirgshydraulik

Zur Erforschung etwaiger thermoinduzierter Änderungen der Gebirgshydraulik wurden die Drücke und Schüttungen des Gebirgswassers in Bohrungen im erwärmten Bereich beobachtet. Die Wasserschüttungen traten intermittierend in mehreren sich überlagernden Zyklen auf. Ihre Größe wurde von der Dichtigkeit der jeweiligen Formation bestimmt. Dabei erbrachte ungeklüfteter Granit mit hoher Porosität ähnlich große Zuflüsse wie geklüftete Formationen aus dichtem Gestein. Der Wärmeeintrag hatte keinen signifikanten Einfluß auf die Schüttungen. Vermehrte oder verminderte Zuflüsse traten nicht auf, da die geringen Verformungen die Wasserwegsamkeiten nicht entscheidend zu verändern vermochten und der Wassernachschub aus entfernteren, nicht aufgeheizten Regionen konstant blieb. Die geringfügige Veränderung des Druckgradienten durch die kleinformatigen Bohrungen blieb von geringerem Einfluß. Die Druckaufbaumessungen zeigten trotz der Nähe des darüberliegenden Teststollens die Existenz verschiedener Bergwasserhorizonte. Der spezifische Druck in jeder der beobachteten Strukturen konnte vom Stollen nur soweit reduziert werden, wie es ihre Permeabilitäten zuließen.

Druckmessungen fanden in Versuchsphasen statt, in denen die Änderungen der Temperaturen infolge der Regelung der Wärmequellen oder infolge der Speicherkapazität des Gebirges laminar verliefen. Derartige Vorgänge führten nicht zu signifikanten Schwankungen in den Bergwasserdrücken. Diese Aussage wird von den Bergwasserdruckmessungen in den S-Bohrungen bestätigt. Zur Erfassung standortspezifischer Parameter, zur Beurteilung der Formation und als Grundlage der Modellierung sollte der Wärmetest im Erkundungsbergwerk am Endlagerstandort die nachstehenden Schwerpunkte aufweisen:

- Aufnahme der Temperaturen längs einer Achse zur in-situ-Messung der Wärmeleitfähigkeit,

- Beobachtungen des Gebirgsspannungszustands nach Auffahrung ohne Aufheizung zur Kompensation der Gebirgsspannungen im erwärmten Bereich,

- Beobachtungen des Gebirgsspannungszustands nach Auffahrung mit Aufheizung.

Eine ausgeprägte Störungszone wird möglichst weiträumig umfahren werden. Deshalb sind nennenswerte Verschiebungen nicht zu erwarten. Verformungsmessungen sind nicht erforderlich. Untersuchungen zur Gebirgshydraulik in Form von Schüttungs- oder Druckaufbaumessungen sind nur dann erforderlich, wenn die Durchströmung der Endlagerregion einen dem im Wärmetest im FLG ähnlichen oder größeren Umfang aufweist. Bei trockeneren Verhältnissen und geringeren Permeabilitäten werden die hydraulischen Parameter in den Testprogrammen zur Migration untersucht.

Bei der Planung dieses Wärmetests im FLG wurden einige wichtige Fragestellungen nicht berücksichtigt, da damals endlagerspezifische Angaben teilweise noch nicht vorlagen und der Versuch nicht überfrachtet werden sollte. Der Versuch selbst hat außerdem die Beurteilung der Bedeutung einiger Aspekte verändert. Im Wesentlichen sind hierbei unterblieben:

- Untersuchungen zur thermomechanischen Belastbarkeit der Formation durch Aufheizprogramme mit Temperaturen über dem Siedepunkt. Zielsetzung wäre zum einen die planmäßige Einlagerung bei höherer Temperatur und Reduktion der Verweilzeiten im Zwischenlager. Zum anderen könnten Aussagen zur Sicherheit gegen thermomechanische Überbeanspruchung bei unplanmäßiger Überschreitung der zulässigen Gebirgstemperatur gemacht werden. In diesem Zusammenhang könnte auch die Problematik der Radiolyse bei Strahlung untersucht werden.

- Untersuchungen zum Chemismus der Gesteine bei erhöhten Temperaturen. In den Gesteinen finden bei den hier vorgesehenen Vorgängen bereits Umwandlungsprozesse statt. Diese sowie ihre Wechselwirkung mit dem Chemismus der Bentonithülle können nachhaltige Auswirkungen auf die Permeabilität und Retardation aufweisen. Die Bedingungen für die Korrosivität der Stahlbehälter werden verändert.

- Untersuchungen zur Wechselwirkung der mechanischen Spannungen infolge der Aufheizung und des Quelldrucks der Bentonithülle. Gemäß GEWÄHR sind Stahlbehälter und Bentonithülle für einen gleichförmigen Spannungszustand von 30 MPa zu dimensionieren. Dieser Wert ist in einem in-situ-Test zu verifizieren, besonders deshalb, weil in einer texturierten Formation mit einem anisotropen Spannungszustand gerechnet werden muß. Bei unsymmetrischer Belastung ist jedoch mit vorzeitigem Versagen der technischen Barrieren zu rechnen.

- Untersuchungen zur Seismizität im Kristallbereich. Im Rahmen des Seismikprogramms im Wärmetest im FLG wurden Hinweise gefunden, daß thermische Beanspruchungen des Granits durch seismische Freisetzung von Energie im Kristallbereich abgebaut wurden. Diese Gefügeveränderungen haben gegebenenfalls nachhaltige Auswirkungen auf die mechanische und hydraulische Integrität der geologischen Barriere.

Inwieweit die vorgenannten offenen Fragen letztlich für die Aussagen zur Endlagereignung von Bedeutung sind, kann erst nach Ablauf der Untersuchungen zu diesen entschieden werden.

9. Zusammenfassung

Der Wärmestest im Felslabor Grimsel wurde unter Berücksichtigung der standortspezifischen Gegebenheiten und der Vorgaben des Schweizer Endlagerkonzeptes in den Jahren 1985 bis 1988 durchgeführt. Im wesentlichen diente er drei Zielsetzungen:

Ziel 1: Erprobung und Weiterentwicklung von Verfahren zur Erkundung, zum Nachweis der Eignung und zur Überwachung eines Endlagers für wärmeproduzierende Abfälle im kristallinen Wirtgestein.

Ziel 2: Untersuchungen der thermischen, mechanischen und hydraulischen Reaktionen eines kristallinen Wirtgesteins auf einen künstlichen Wärmeeintrag.

Ziel 3: Entwicklung und Anwendung eines geeigneten Rechenmodells zur standortspezifischen Modellierung der thermomechanischen Vorgänge im Bereich einer Wärmequelle im kristallinen Wirtgestein.

Im Rahmen der Untersuchungen zu Ziel 1 wurden weitgehend verfügbare Systeme aus der Baumeßtechnik adaptiert. Der vergleichende Einsatz verschiedener Systeme für eine Meßaufgabe wurde nicht durchgeführt, da die ausgewählte Instrumentierung für das zweite Ziel zur Verfügung stehen mußte.

Alle Systeme haben die in sie gesetzten Erwartungen erfüllt, wenn auch wie zum Beispiel bei der Entwässerungsanlage teilweise ein erhöhter Unterhaltungsaufwand erforderlich war, der bei einem zukünftigen Einsatz durch technische Modifikationen zu reduzieren wäre.

Bei Langzeitmessungen ist die Korrosionsbeständigkeit der Meßsysteme von großer Bedeutung. Vor jedem Einsatz sind am geplanten Standort entsprechende Analysen durchzuführen, um mit der Ausführung der Meßsysteme einen bestmöglichen Korrosionsschutz zu gewährleisten. Je nach geplanter Einsatzdauer und Zugänglichkeit zu Wartungszwecken sollten die unvermeidlichen Ausfallraten durch Redundanz bei der Instrumentierung berücksichtigt werden.

Bei dem Untersuchungsprogramm zum zweiten Ziel wurden die thermomechanischen und hydraulischen Reaktionen des Gebirges auf den Wärmeeintrag registriert. Sie waren geprägt durch das relativ trockene Versuchsfeld mit der wasserführenden Diskontinuität und die signifikaten Spannungsänderungen aus der Aufheizung infolge der starken Dehnungsbehinderung durch das umgebende Gebirgsmassiv.

Die Temperaturen des erwärmten Gebirges wurden mit elektrischen Widerstandsthermometern ohne technische Probleme überwacht. Sie werden bei zukünftigen Untersuchungen vornehmlich bei der in-situ-Messung thermischer Parameter, der punktuellen Validierung der Modellrechnung und als Grundlage für die Temperaturkompensation anderer Meßsysteme Verwendung finden. Die Temperaturverteilung läßt sich bei homogenen Verhältnissen mit hinreichender Genauigkeit modellieren.

Die Wasserführung in der Formation beeinflußte die Temperaturverteilung. Die Aufheizung hatte aber, abgesehen von kurzzeitigen Effekten, keinen Einfluß auf die Druckverhältnisse und die Wasserwegsamkeiten. Die Untersuchungen zur Gebirgshydraulik am Endlagerstandort können auch für den Bereich wärmeproduzierender Abfälle auf die in anderen Bereichen angewandten Verfahren beschränkt bleiben.

Die als Integral über wenige Meter gemessenen Verformungen waren von zu geringer Größe, als daß sie in einem Endlager dessen Integrität hätten gefährden können.

Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit den Auslegungsrechnungen der Planungsphase. Die Überwachung thermoinduzierter Deformationen ist nur bei signifikanten Diskontinuitäten erforderlich.

Die Gebirgsspannnungen zeigen die Beanspruchung der Formation infolge von Auflast und Tektonik, Hohlraumerstellung, Aufheizung, Versetzen und Verschließen. Zur Messung von Spannungsänderungen wurden mit Erfolg Spannungsmonitorstationen aus hydraulischen Druckkissen eingesetzt. Die aus der Dehnungsbehinderung resultierenden thermoinduzierten Gebirgsspannungsänderungen blieben kleiner als 10MPa. Sie sind mit den jeweils standortspezifischen Primär- und Sekundärspannungszuständen zu überlagern, um Aussagen zum Sicherheitsabstand gegenüber Grenzzuständen zu erhalten. Die Aufnahme sowohl der Spannungszustände vor Einlagerung als auch die durch die Erwärmung infolge der Einlagerung verursachten Spannungsänderungen wird am Endlagerstandort eine der vorrangigen Aufgaben sein.

Eine örtlich begrenzte Überschreitung der Tragfähigkeit der Gesteinsformationen kann zu schlagartigen Entlastungen führen, die von den Spannungsmonitorstationen nur unvollständig und in ihrer Lage überhaupt nicht erfaßt werden können. Das zur Überwachung derartiger Ereignisse im Wärmetest eingesetzte seismische Array ist in der Lage, Aussagen über den Beanspruchungszustand des Gebirges zu liefern, sobald dieser durch seismische Ereignisse erkennbar wird. In diesem Wärmetest wurden wärmeinduzierte seismische Ereignisse nicht registriert. Im zukünftigen Endlager bei Überlagerung der Einwirkungen mehrerer Wärmequellen und Formationen mit höherer Vorbelastung hat ein derartiges Meßverfahren unbedingt seine Berechtigung.

Die unter dem dritten Versuchziel durchgeführten Arbeiten zur Modellierung sollten Aufschluß darüber bringen, welcher Aufwand für die thermomechanischer Modellierung erforderlich ist und in welchem Umfang in-situ-Messungen zur Validierung der Rechnung erforderlich sind.

Die rechnerische Modellierung des Wärmetests wurde an einem rotationssymmetrischen Ansatz mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Zur Verifizierung diente eine analytische Näherung an einem Scheibenmodell. Die Güte der Modellierung ist von der realistischen Beschreibung der relevanten Gebirgsparameter abhängig. Der analytische Ansatz mit rotationssymmetrischem Scheibenmodell und logarithmischer Temperaturverteilung zeigt bereits gute Übereinstimmung mit der Messung.

Der Wärmetest im Felslabor Grimsel hat einige wichtige Erkenntnisse zur Endlagerung wärmeproduzierender Abfälle gebracht und offene Problemstellungen aufgezeigt. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen kann das Erkundungs- und überwachungsprogramm am Endlagerstandort gezielt geplant und durchgeführt werden. Die Aufgaben des Wärmetests in diesem Programm sind eindeutig definierbar.

Wir möchten es an dieser Stelle nicht versäumen allen denen zu danken, die uns bei der Planung, Durchführung und Auswertung des Versuchs unterstützt haben.

Unser Dank gilt zum einen unseren Partnern von der NAGRA, insbesondere auch den Damen und Herren der örtlichen Leitung H. Abplanalp, T. Baer, P. Streich und H.P. v.Allmen.

Zum anderen gilt er den Mitarbeitern des IfT, die durch ihr Engagement vor Ort bei der Durchführung und im IfT bei der Auswertung den ordnungsgemäßen Ablauf erst möglich machten: V. Behrens, K. Bock, F. Fretwurst, H. Geest, W. Hänsel, L. Hartwig, W. Harz, G. Hensel, O. Jungherr, G. Kappei, M. Köchling, Th. Meyer, M. Pelz, C. Rupp, Th. Stiegel, Th. Strelow, E. Taubert, J. Thielemann, A. Tostmann, R. Vogt und C. Wittbold.

Zu guter Letzt soll die Mühe Anerkennung finden, die unsere Damen im Sekretariat -H. Geschke, A. Holzmann, M. Lauenstein- mit diesem Bericht und seinen zahlreichen Änderungen auf sich genommen haben.

LITERATURVERZEICHNIS

ALDER, J.-C., DIEBOLD, P., ISSLER, H., KOWALSKI, E., MCCOMBIE, C., NOLD, A., ROMETSCH, R., THURY, M. (1985): Projekt Gewähr 1985 Radioaktive Abfälle: Eigenschaften und Zuteilung auf die Endlagertypen. - NAGRA Proj.-Ber. NGB85-02. NAGRA, Baden.

BGR (1984/85/86): Gebirgsspannungen Felslabor Grimsel, Schweiz - BMFT-Forschungsvorhaben KWA 53034; 2. Bericht 1984; 3. Bericht 1985; 4. Bericht 1986. - Berichte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

BINNALL, E., DUBOIS, A., HAUGHT, R., HUSTRULID, W., NELSON, P., PRATT, H., SCHRAUF, T., SIMONSON, E. (1979): Instrumentation, Evaluation, Calibration, and Installation for Heater Tests Simulating Nuclear Waste in Crystalline Rock, Sweden. - LBL-8313, SAC-25, UC-70.

CARLSSON, H. (1978): Stress Measurements in the Stripa Granite. - LBL-7078, SAC-04, UC-70.

CARLSSON, H. (1978): A Pilot Heater Test in the Stripa Granite. - LBL-7086, SAC-06, UC-70.

CARLSSON, H., NELSON, P.H., RACHIELE, R., REMER, J.S. (1981): Water Inflow into boreholes during the Stripa heater experiments. - LBL-12574, SAC-35, UC-70.

CHAN, T., COOK, N.G.W., JEFFRY, J., WITHERSPOON, P.A. (1979): Determination of In-Situ Thermal Properties of Stripa Granite from Temperature Measurements in the Full-Scale Heater Experiments: Methods and Primary Results. - LBL-8424, SAC-24, UC-70.

BGR (1989): A. Pahl, S. Heusermann, V. Bräuer, W. Glöggler Gebirgsspannungsuntersuchungen - Felslabor Grimsel
NAGRA-NTB 88-39, NAGRA, Baden

COOK, N.G.W. (1978): Mechanical and Thermal Design Considerations for Radioactive Waste Repositories in Hard Rock. Part I: An Appraisal of Hard Rock for Potential Underground Repositories of Radioactive Waste. - LBL-7073, SAC-10, UC-70.

COOK, N.G.W., WITHERSPOON, P.A. (1978): Mechanical and Thermal Design Considerations for Radioactive Waste Repositories in Hard Rock. Part II: In-Situ Heating in Hard Rock: Their Objectives and Design. - LBL-7073, SAC-10, UC-70.

EPFL (1980): Umwälzwerk Grimsel-Oberaar, Kaverne Grimsel II. Schlußbericht über die durchgeführten felsmechanischen Untersuchungen und Messungen. Bericht an die Kraftwerke Oberhasli AG, Innertkirchen.

FLACH, D. GOMMLICH, G. HENTE, B. (1982): Mikroseismische Überwachung von Bergwerken zur Tieflagerung radioaktiver Abfälle. Glückauf-Forschungshefte, Jahrg. 43, H. 2, S. 58/62

GBM (1984): Spannungsmessungen im Felslabor Grimsel 1983. - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH, Rheinstetten; Bericht an die Nagra/Baden.

GEOTEST (1988): Felslabor Grimsel, Geologie. - NAGRA Techn. Ber. NTB87-14. NAGRA, Baden.

GREINER, G. (1976): In-situ-Spannungsmessungen Grimsel. - Karlsruhe.

INSTITUT FÜR BODEN, FELS UND FUNDATIONSTECHNIK (1981): Sondierbohrungen Juchlistock Grimsel - Felsmechanische Laboruntersuchungen. - Institut für Boden, Fels und Fundationstechnik der ETH Lausanne, NAGRA NIB81-01.

INSTITUT FÜR STATIK (1983): Berechnung des Spannungs- und Verformungsverhaltens eines Gebirgskörpers bei Temperaturerhöhung infolge einer Wärmequelle (1. Modell). - Institut für Statik der TU Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik.

INSTITUT FÜR STATIK (1983): Spannungs-Verformungs-Untersuchungen im Erhitzerfeld infolge einer Wärmequelle in Granit-Gebirge mit einzelnen Kluftflächen (2. Modell). - Institut für Statik der TU-Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik.

INSTITUT FÜR STATIK (1984): Bestimmung des linearen Temperaturausdehnungskoeffizienten von Tricosal-Vergußmörtel. - Institut für Statik der TU-Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik; Bericht gsf-2.

INSTITUT FÜR STATIK (1984): Ermittlung der Temperaturausdehnungskoeffizienten von Glasfaserstäben im Temperaturbereich von 10 °C bis 250 °C. - Institut für Statik der TU-Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik.

INSTITUT FÜR STATIK (1984): Untersuchungen zum Spannungs-Dehnungs Verhalten von Tricosal-Vergußmörtel.- Institut für Statik der TU-Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik, Bericht gsf-3.

INSTITUT FÜR STATIK (1985): Bestimmung des linearen Temperaturausdehnungskoeffizienten und Untersuchungen zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Granitgestein. - Institut für Statik der TU-Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik; Bericht gsf-4.

INSTITUT FÜR STATIK (1986): Berechnung der Verformungen eines Granitkörpers mit zylindrischem Hohlraum bei Temperaturerhöhung infolge einer Wärmequelle (3. Modell). - Institut für Statik der TU-Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik.

INSTITUT FÜR STATIK (1987): Berechnungen von Spannungen und Ver-Verformungen infolge eines Temperaturfeldes. (4. Modell). - Institut für Statik der TU-Braunschweig, Abteilung für experimentelle Statik.

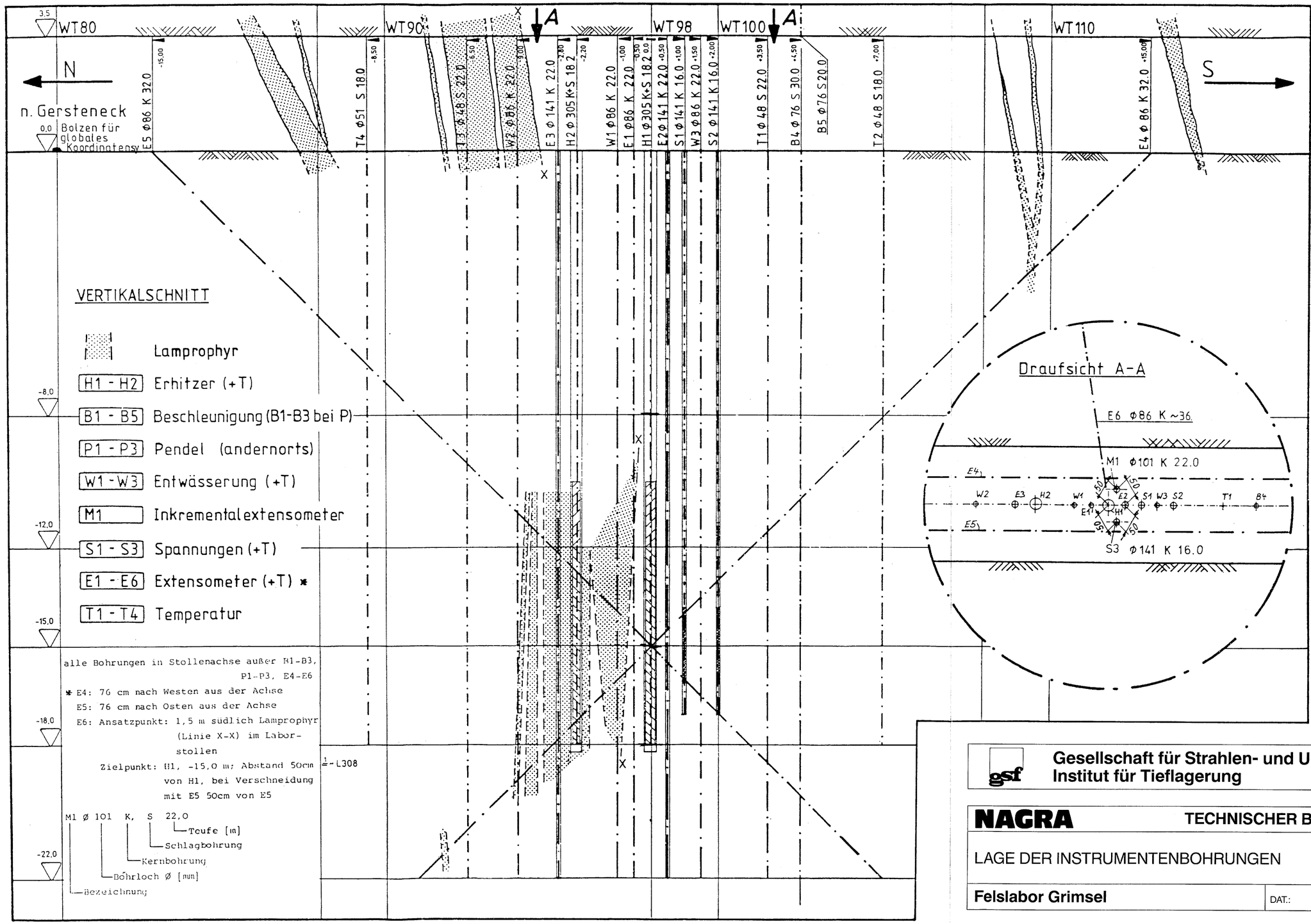
INTERFELS (1983): Bericht über geotechnische Messungen in situ im Felslabor Grimsel der NAGRA. - Bericht an die Nagra, Baden.

LEE, W.H.K., STEWART, s.W. (1981): Principles and Applications of Microearthquake Networks. Academic Press

NAGRA (1985): Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt GEWÄHR.- NAGRA Projektbericht NGB85-01. NAGRA, Baden.

SOLEXPERTS (1984): NAGRA; Felslabor Grimsel Auflockerungszone DILATOMETER 95. - SOLEXPERTS.

WORCH, G. (1967): Elastische Scheiben Beton-Kalender 1967, II, S. 1 ff, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München

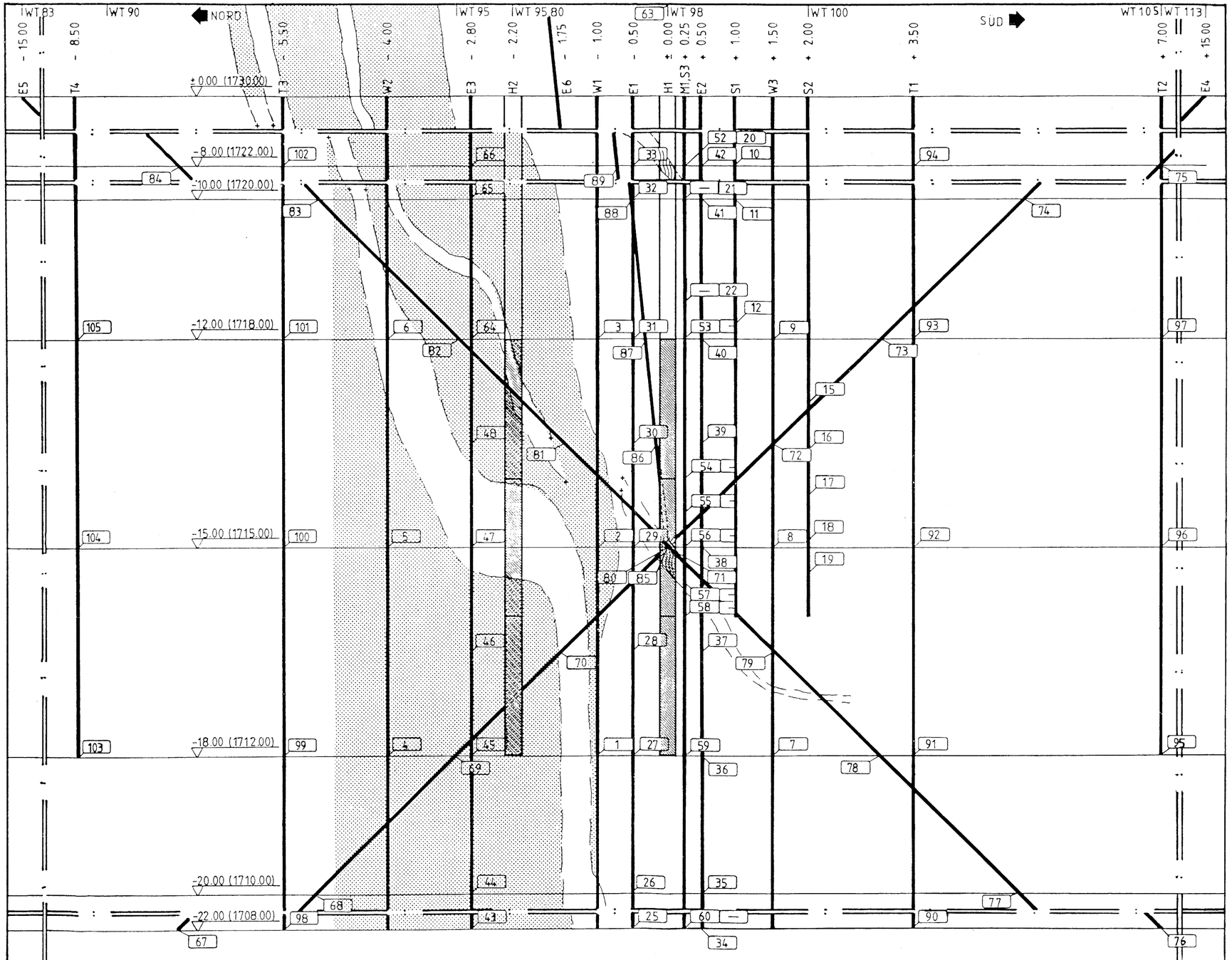


Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

LAGE DER INSTRUMENTENBOHRUNGEN

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 1.1**



79 Temperaturfühler

Lamprophyr

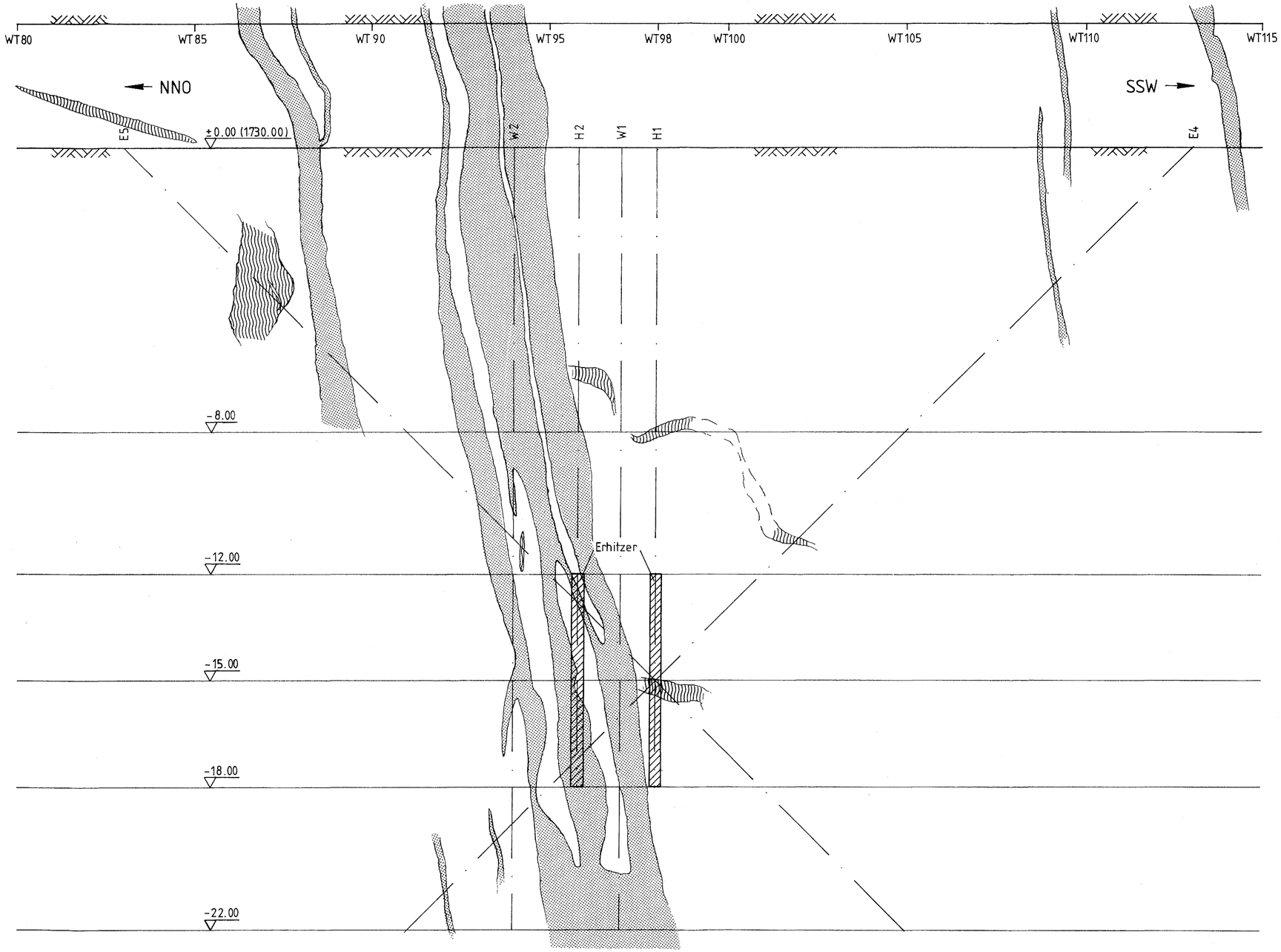
Aplit

gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

ANORDNUNG DER GEBIRGSTHERMOMETER

Felslabor Grimsel | DAT.: | BEILAGE 1.2



WT98 Stollenmetrierung

Kernbohrung

Zentraler Aaregranit (ZAGr)

Lamprophyr

Aplit

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEOLOGISCHER LÄNGSSCHNITT DURCH DIE INSTRUMENTIERUNGSEBENE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 2.1**

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

STOLLENKONVERGENZEN IM QUERSCHNITT WT94

Felslabor Grimsel | DAT.: | **BEILAGE 4.1**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND	MESSSTRECKE	KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND	MESSSTRECKE	KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND	MESSSTRECKE
———	011 KVG1-1 001	KVG1	-4.00M	1 - DURCHM.	———	014 KVG1-4 004	KVG1	-4.00M	4 - SEHNE	———	017 KVG1-7 007	KVG1	-4.00M	7 - SEHNE
- - - -	012 KVG1-2 002	KVG1	-4.00M	2 - DURCHM.	- - - -	015 KVG1-5 005	KVG1	-4.00M	5 - SEHNE	- - - -	018 KVG1-8 008	KVG1	-4.00M	8 - SEHNE
·····	013 KVG1-3 003	KVG1	-4.00M	3 - DURCHM.	·····	019 KVG1-9 009	KVG1	-4.00M	9 - SEHNE	·····	016 KVG1-6 006	KVG1	-4.00M	6 - SEHNE

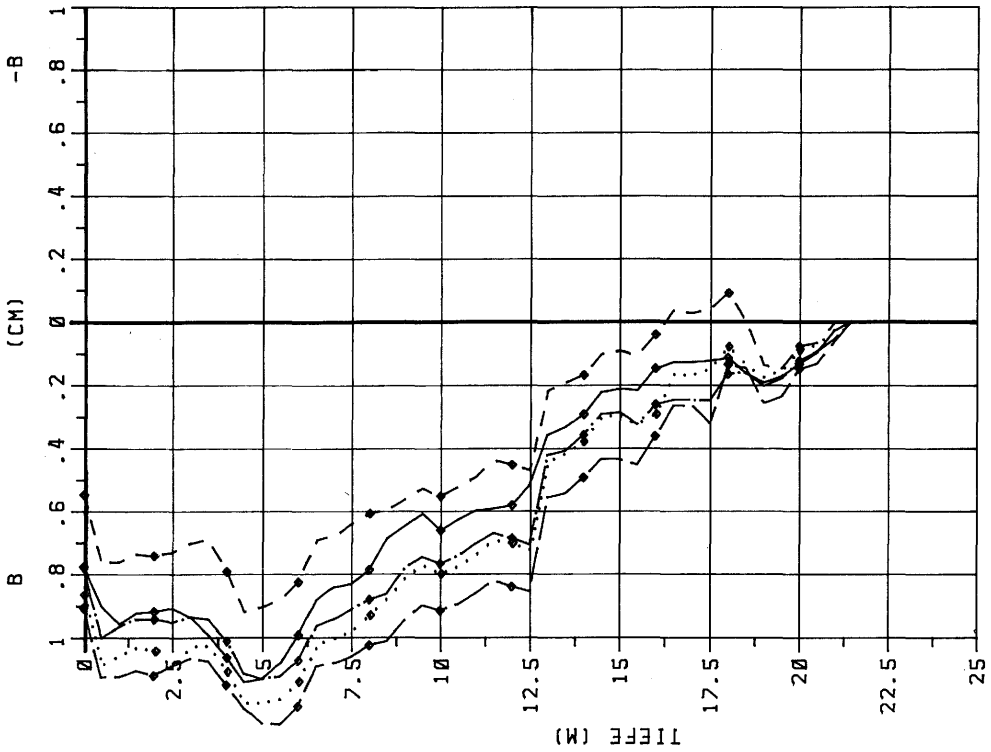
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

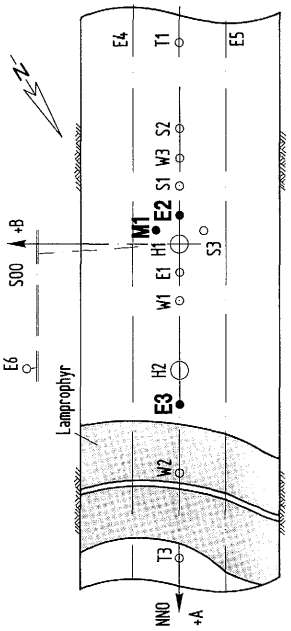
NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

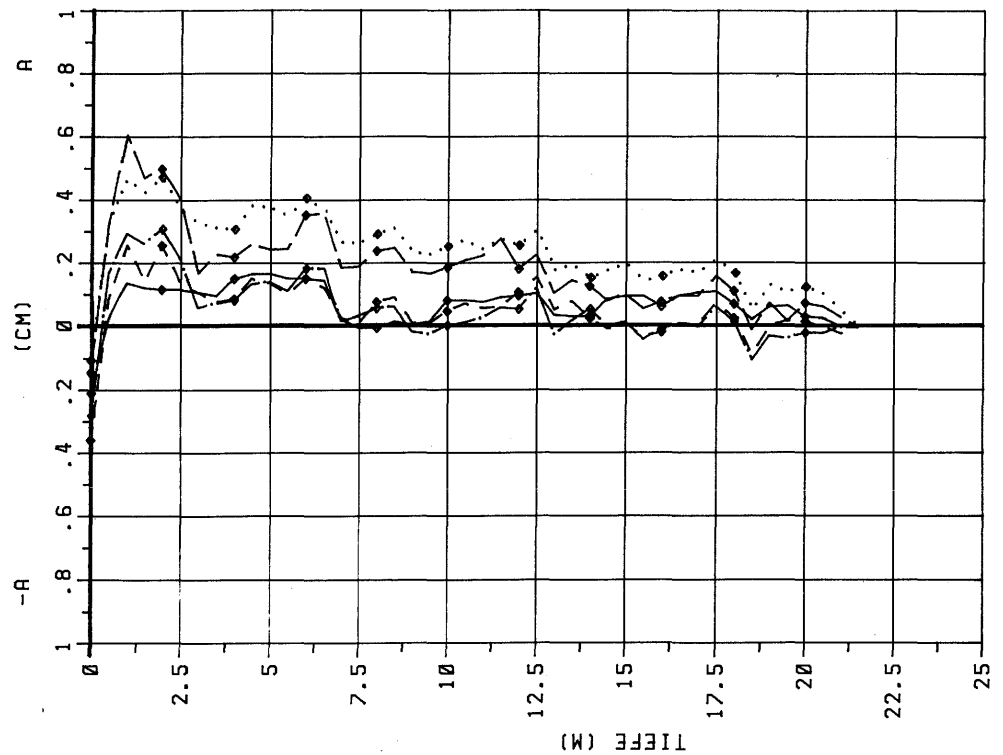
STOLLENKONVERGENZEN IM QUERSCHNITT WT95

Felslabor Grimsel | DAT.: | **BEILAGE 4.2**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND	MESSSTRECKE	KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND	MESSSTRECKE	KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND	MESSSTRECKE
———	021 KVG2-1 001	KVG2	-3.00M	1 - DURCHM.	———	024 KVG2-4 004	KVG2	-3.00M	4 - SEHNE	———	027 KVG2-7 007	KVG2	-3.00M	7 - SEHNE
- - - -	022 KVG2-2 002	KVG2	-3.00M	2 - DURCHM.	- - - -	025 KVG2-5 005	KVG2	-3.00M	5 - SEHNE	- - - -	028 KVG2-8 008	KVG2	-3.00M	8 - SEHNE
.....	023 KVG2-3 003	KVG2	-3.00M	3 - DURCHM.	.....	029 KVG2-9 009	KVG2	-3.00M	9 - SEHNE	.....	026 KVG2-6 006	KVG2	-3.00M	6 - SEHNE







DEFORMATION **E3**

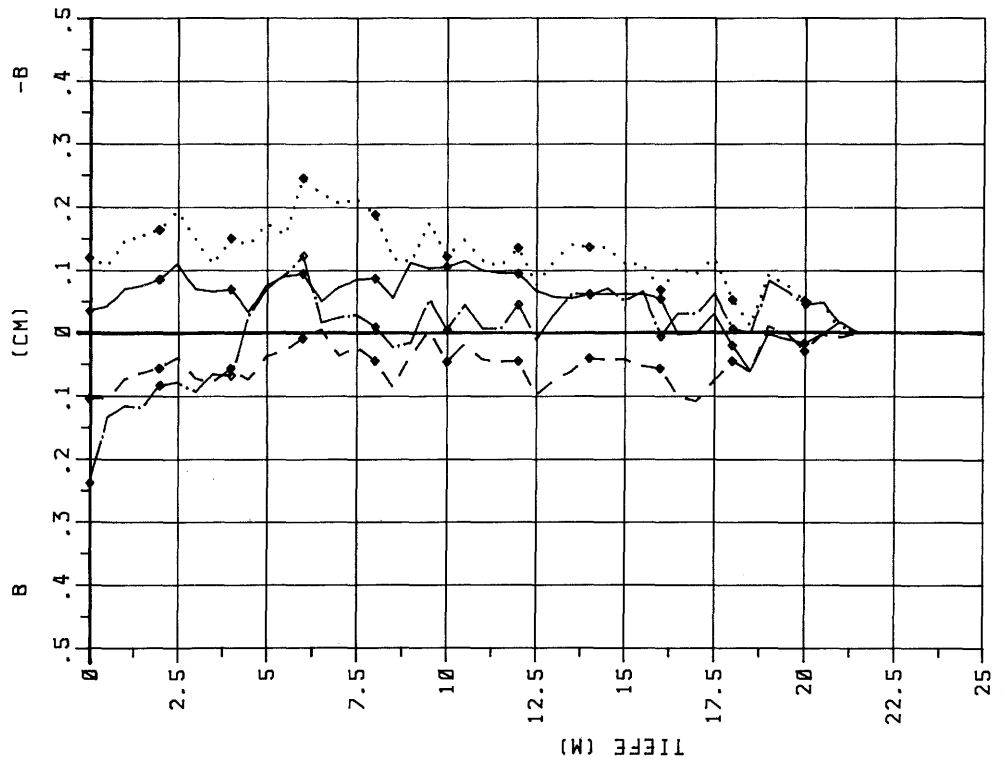
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
———	2	3	110285	1	270984	137.5	21.5	.5
— ◆ — ◆ —	2	9	090985	1	270984	347	21.5	.5
·····	2	11	051285	1	270984	434	21.5	.5
——·—·—·	2	12	120286	1	270984	503	21.5	.5
— ◆ — ◆ —	2	18	190886	1	270984	691	21.5	.5

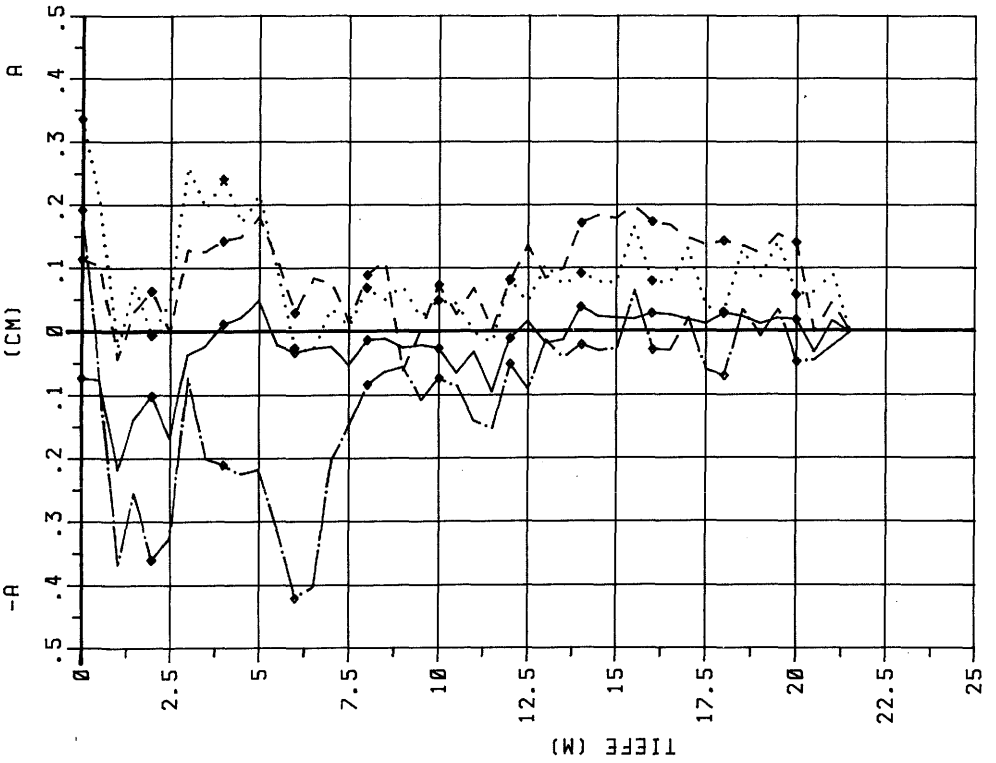
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG E3
WÄHREND DER VORLAUFPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.3





DEFORMATION **E3**

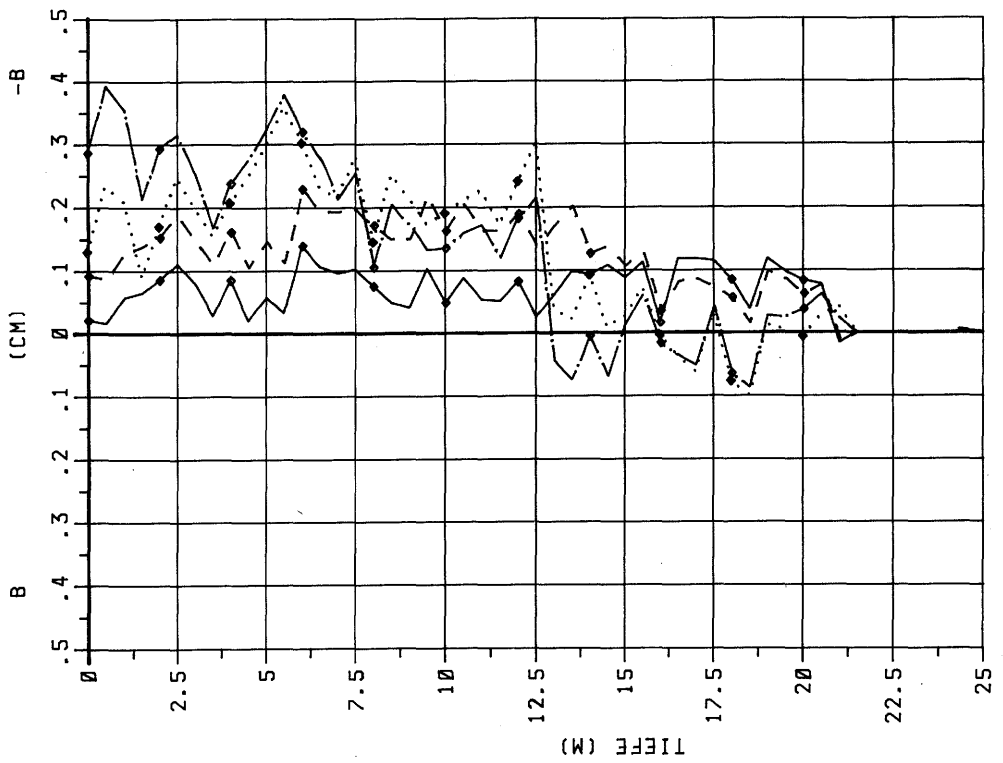
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
———	2	35	081086	18	190886	50	21.5	.5
– – –	2	38	180387	18	190886	211	21.5	.5
·····	2	41	201087	18	190886	427	21.5	.5
—·—	2	42	170388	18	190886	576	21.5	.5

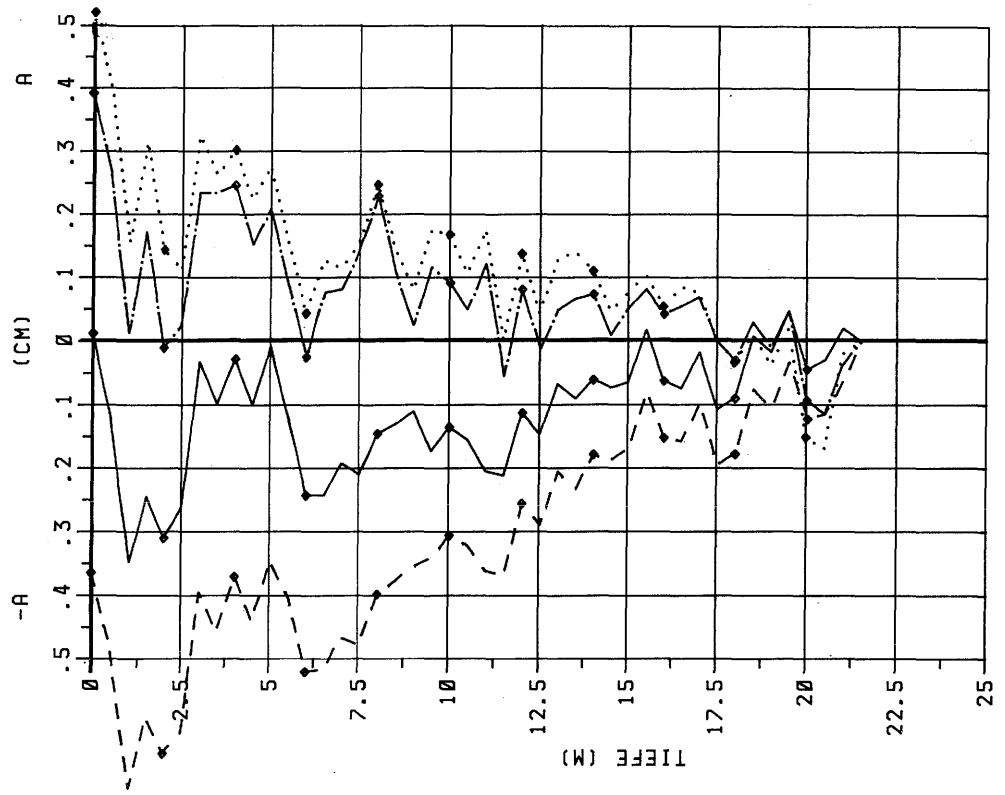
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG E3
WÄHREND DER 1. UND 2. AUFHEIZPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.4





DEFORMATION **E3**

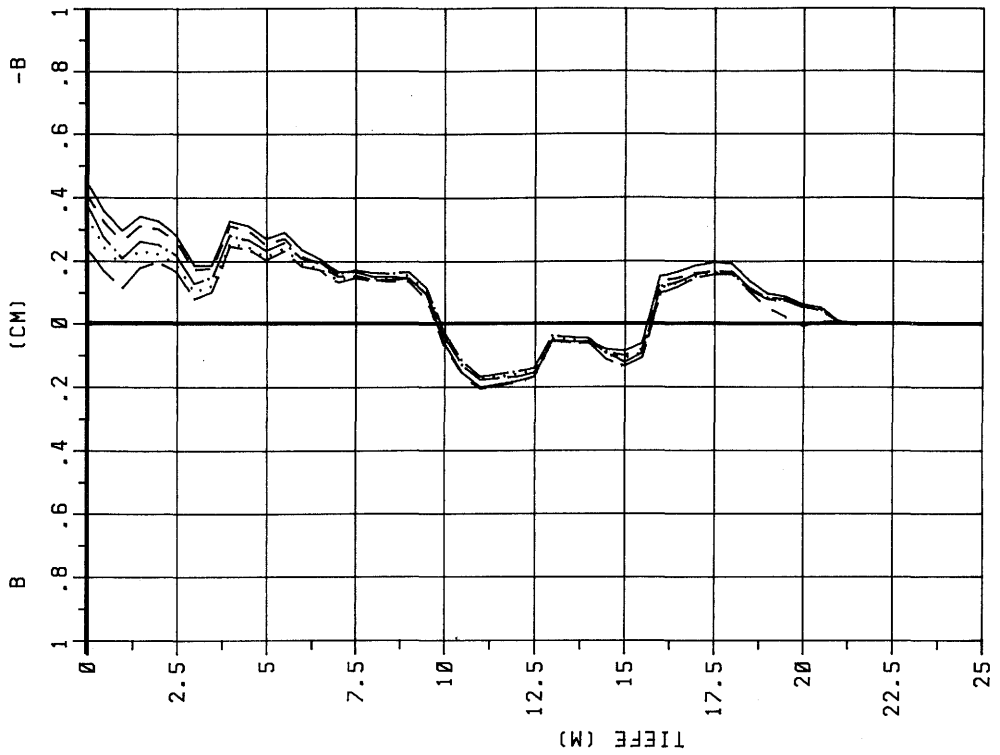
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
———	2	43	200588	18	190886	640	21.5	.5
– – –	2	44	200788	18	190886	701	21.5	.5
·····	2	46	130988	18	190886	756	21.5	.5
—·—	2	47	071288	18	190886	841	21.5	.5

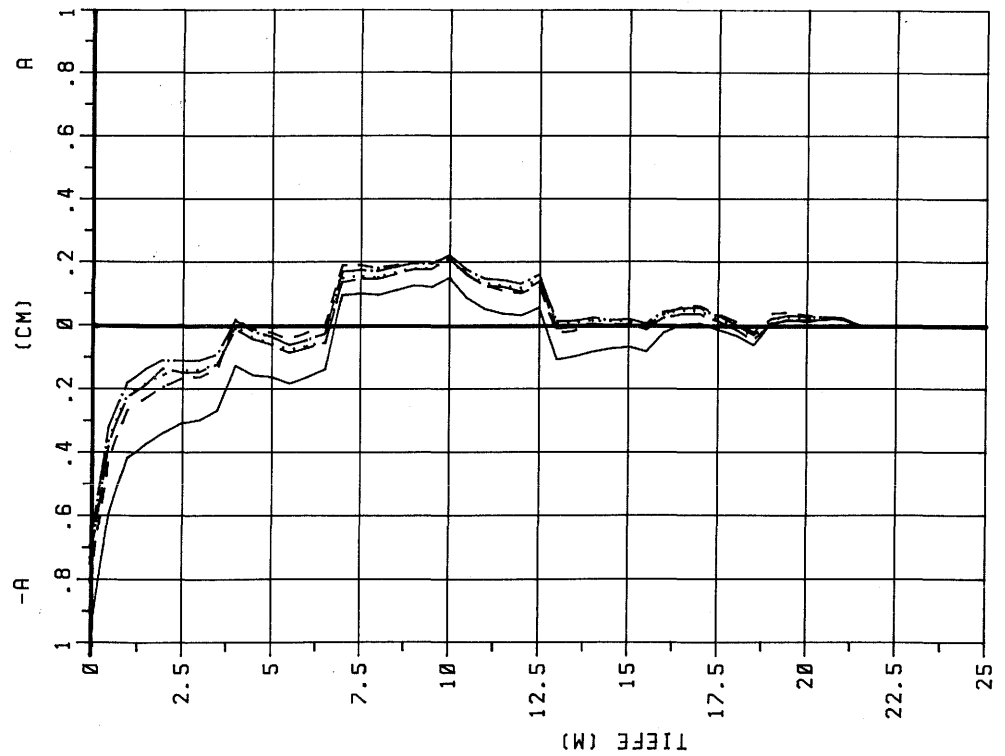
gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG E3
VON ANFANG 1. ABKÜHLPHASE BIS ENDE 2. ABKÜHLPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.5





DEFORMATION **E2**

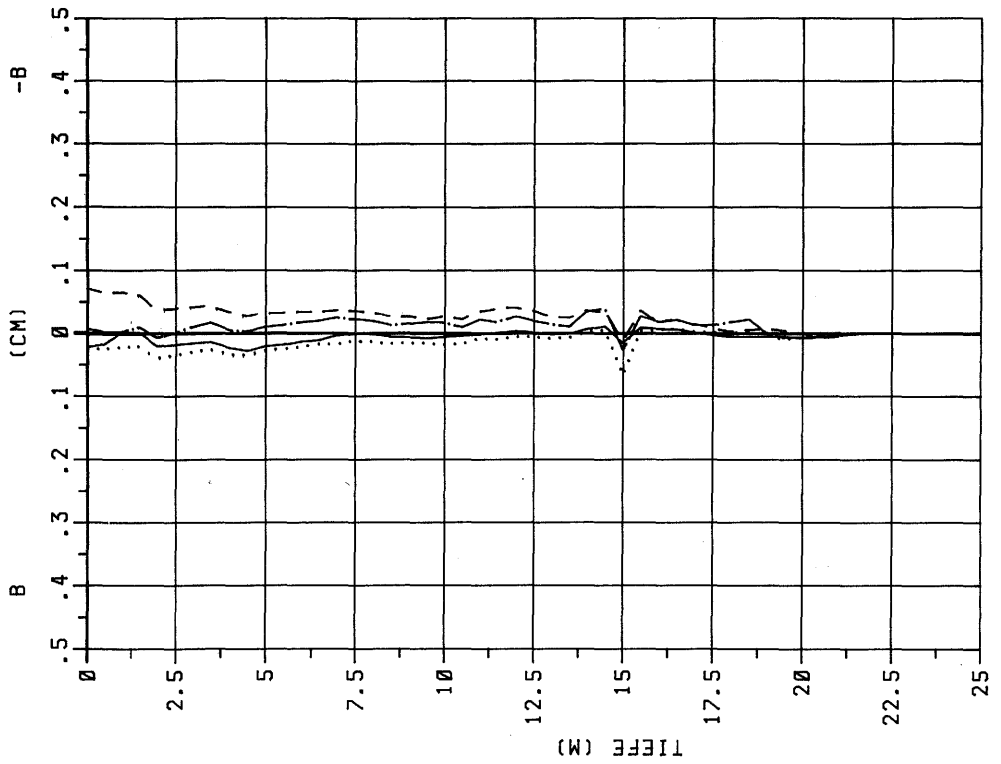
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
———	1	2	110285	1	270984	137	21.5	.5
– – – –	1	10	090985	1	270984	347	21.5	.5
.....	1	12	051285	1	270984	434	21.5	.5
—·—·—	1	19	060686	1	270984	617	21.5	.5
— — —	1	23	180886	1	270984	690	21.5	.5

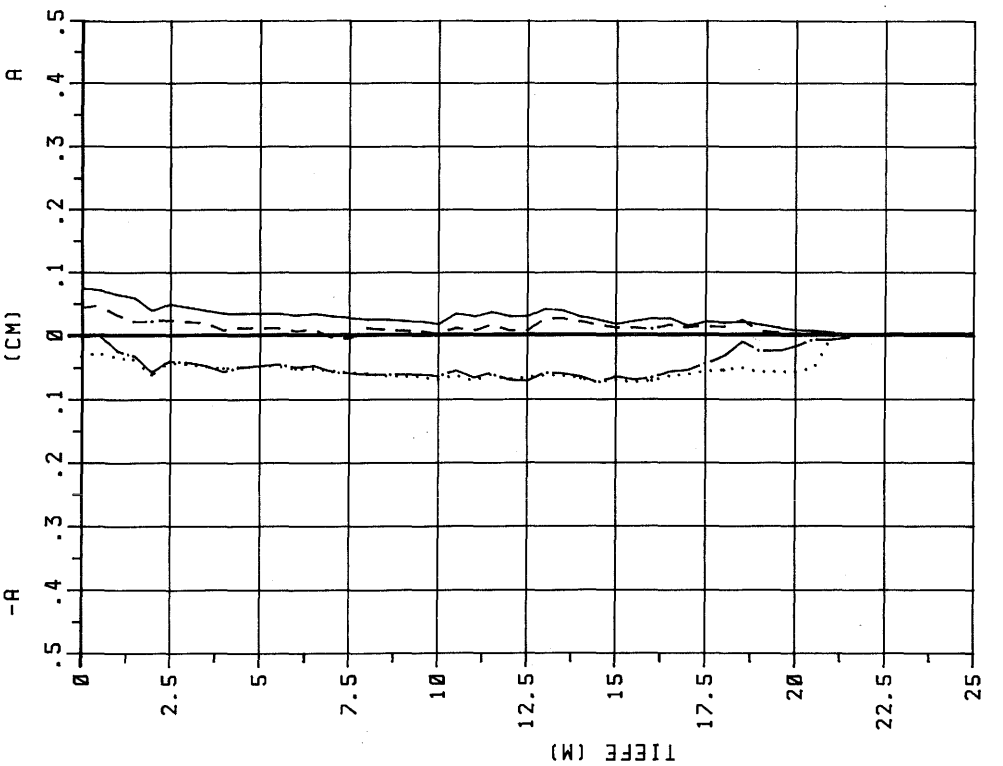
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG E2
WÄHREND DER VORLAUFPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.6





DEFORMATION **E2**

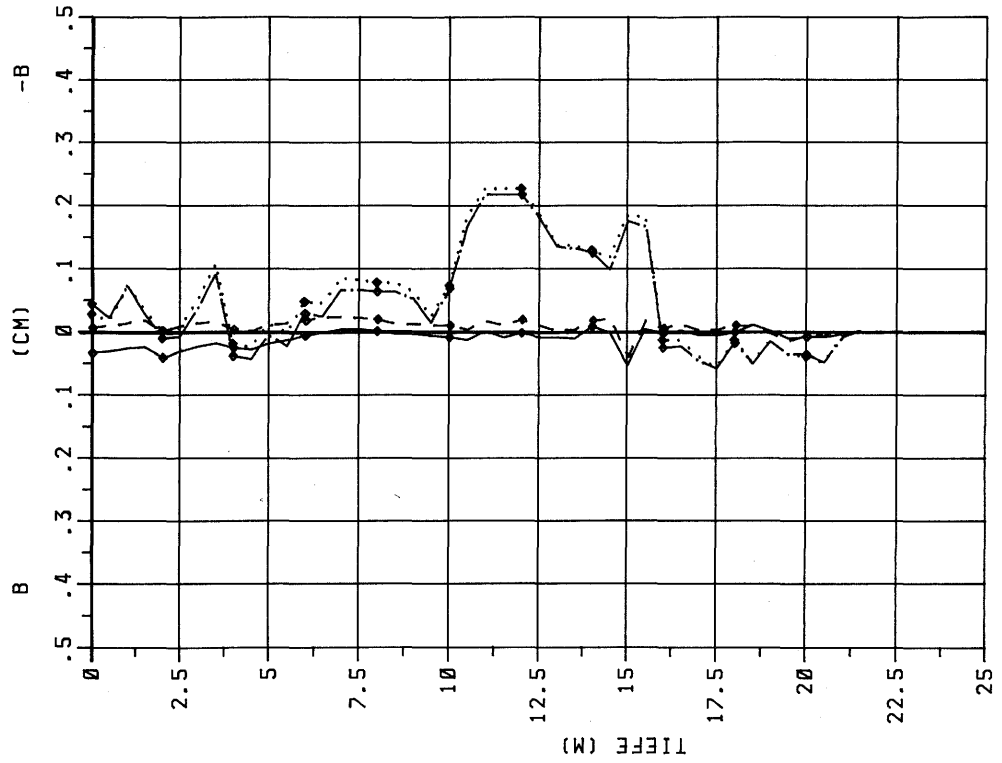
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
———	1	40	081086	23	180886	51	21.5	.5
– – – –	1	43	170387	23	180886	211	21.5	.5
.....	1	50	201087	23	180886	428	21.5	.5
—·—·—	1	51	170288	23	180886	548	21.5	.5

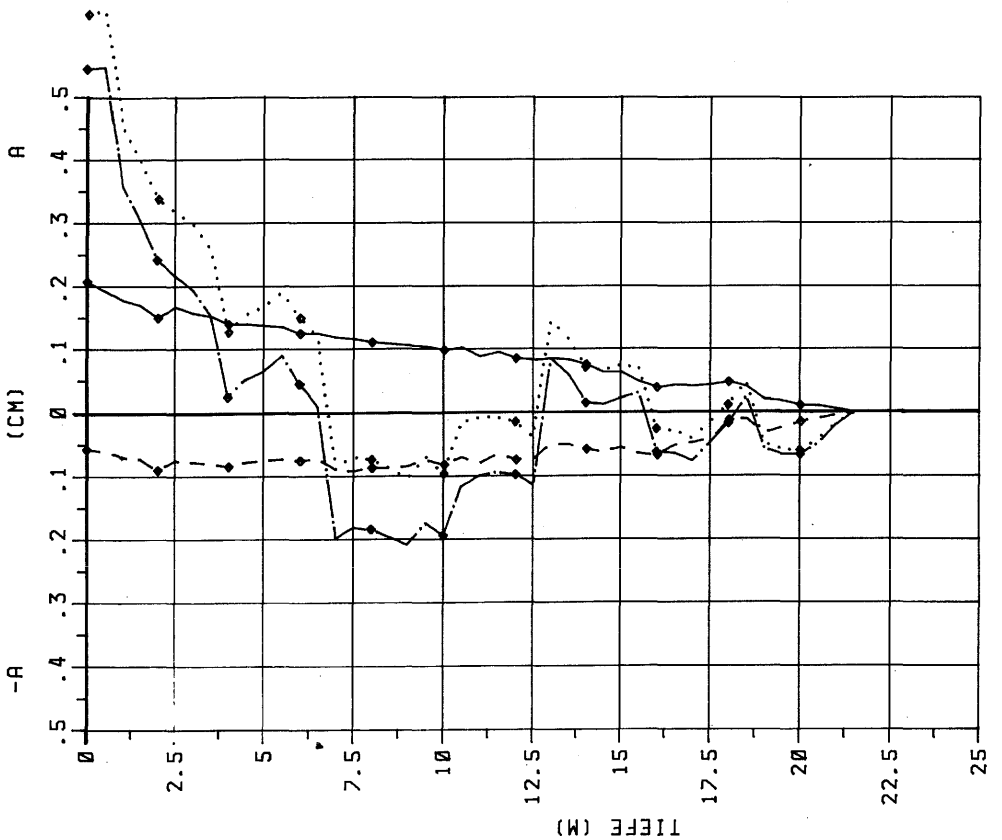
gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG E2
WÄHREND DER 1. UND 2. AUFHEIZPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.7





DEFORMATION **E2**

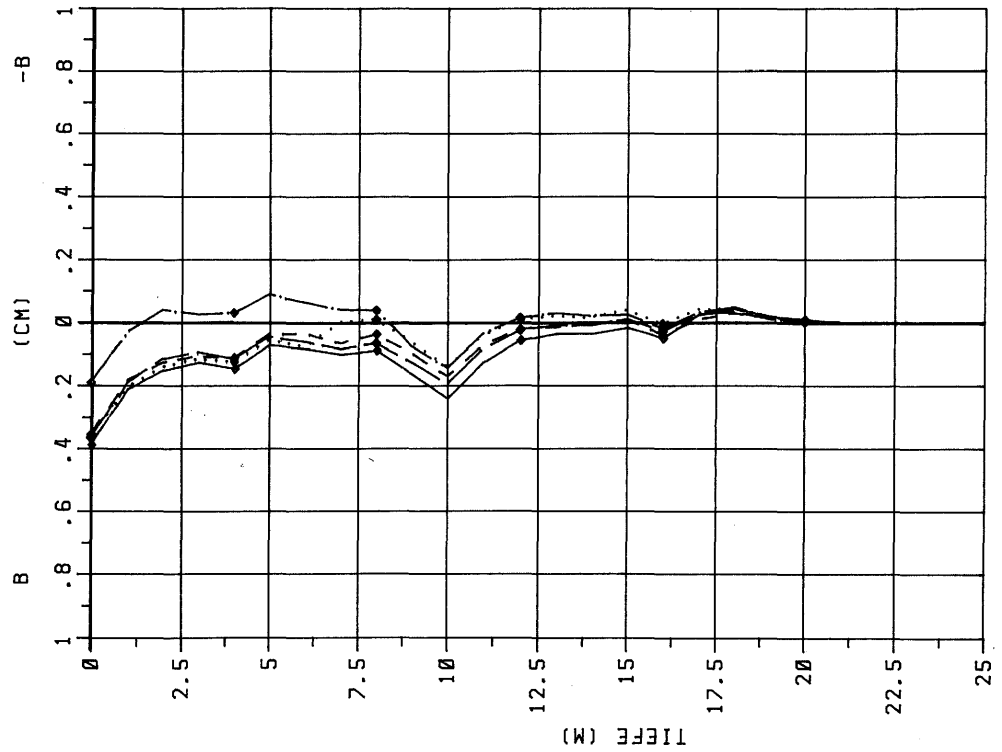
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
——◆——	1	52	170388	23	180886	578	21.5	.5
– – ◆ – –	1	53	200788	23	180886	703	21.5	.5
·····◆·····	1	54	090988	23	180886	753	21.5	.5
——◆·——	1	55	071288	23	180886	842	21.5	.5

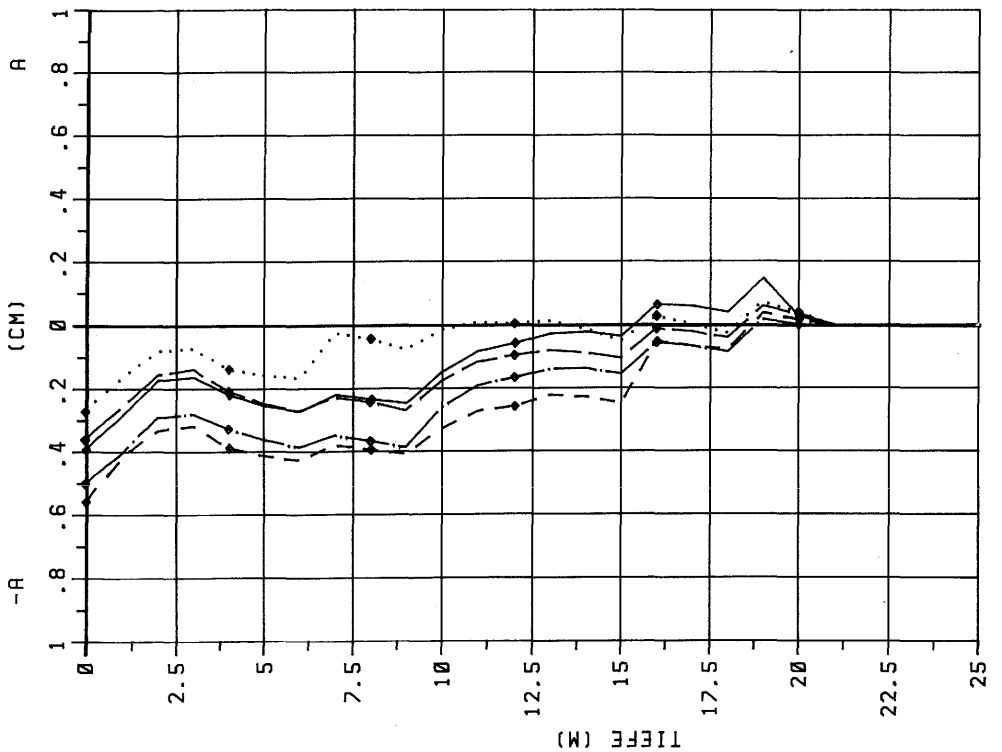
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG E2
VON ANFANG 1. ABKÜHLPHASE BIS ENDE 2. ABKÜHLPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.8





DEFORMATION **M1**

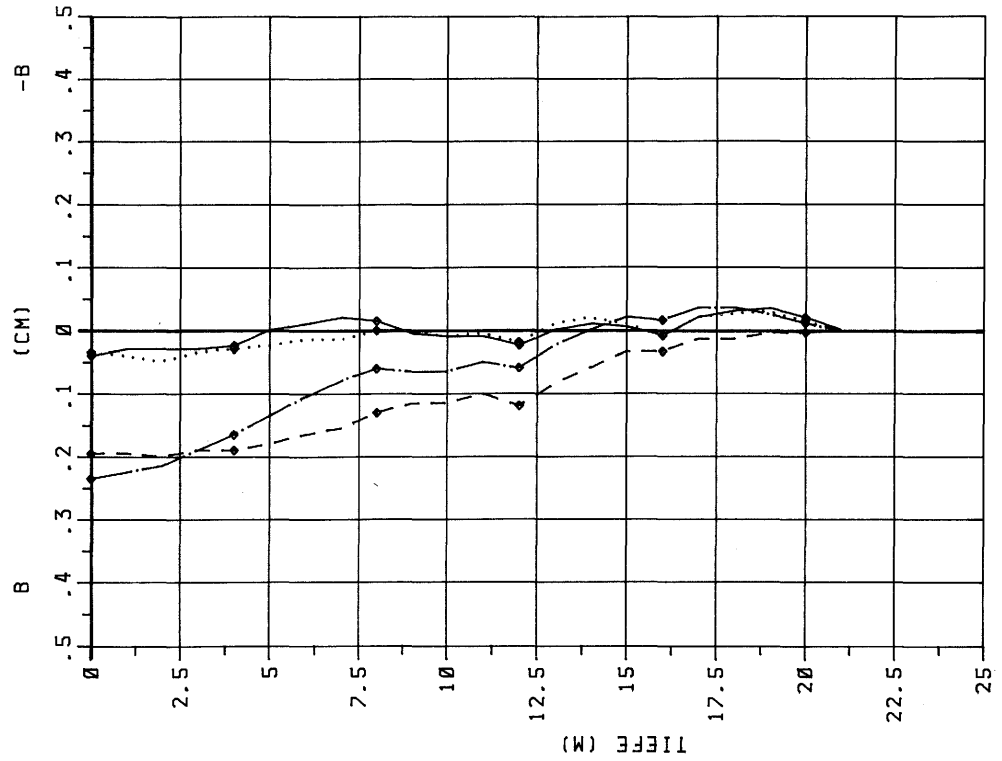
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
———	3	2	120285	1	270984	138	21	1
– – –	3	7	090985	1	270984	347	21	1
·····	3	8	051285	1	270984	434	21	1
——·—·	3	9	120286	1	270984	503	21	1
———	3	13	120886	1	270984	684	21	1

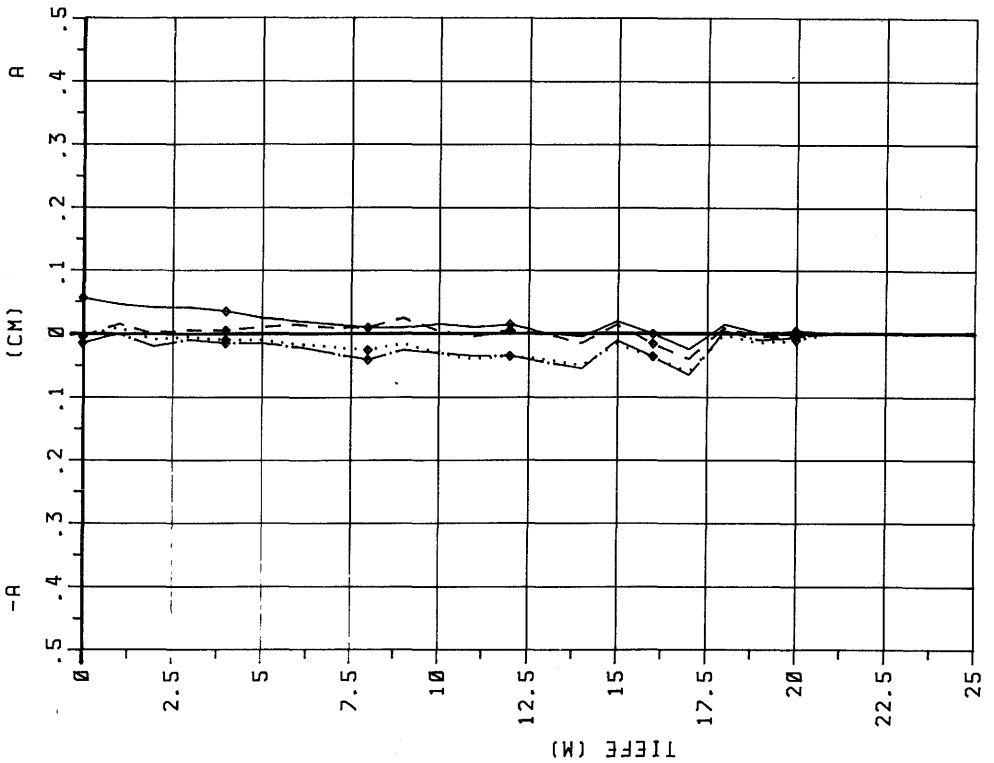
gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG M1
WÄHREND DER VORLAUFPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.9





DEFORMATION **M1**

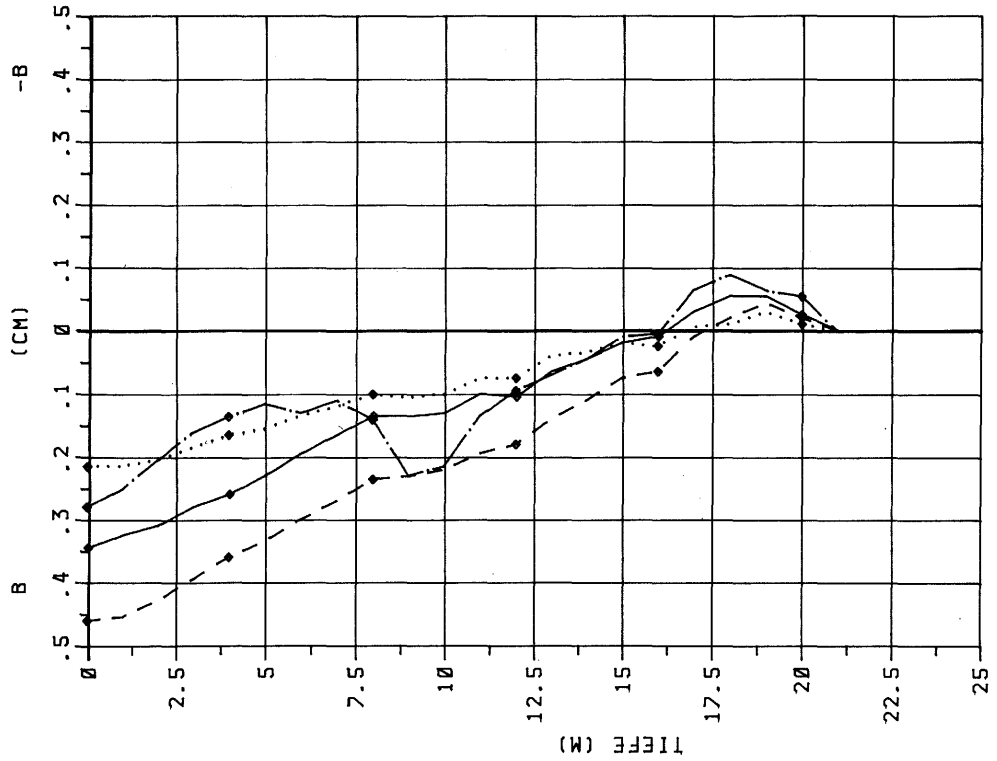
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
——◆——	3	25	Ø41Ø86	13	12Ø886	53	21	1
– – ◆ – –	3	29	17Ø387	13	12Ø886	217	21	1
·····◆·····	3	34	211Ø87	13	12Ø886	435	21	1
——·◆·——	3	35	17Ø288	13	12Ø886	554	21	1

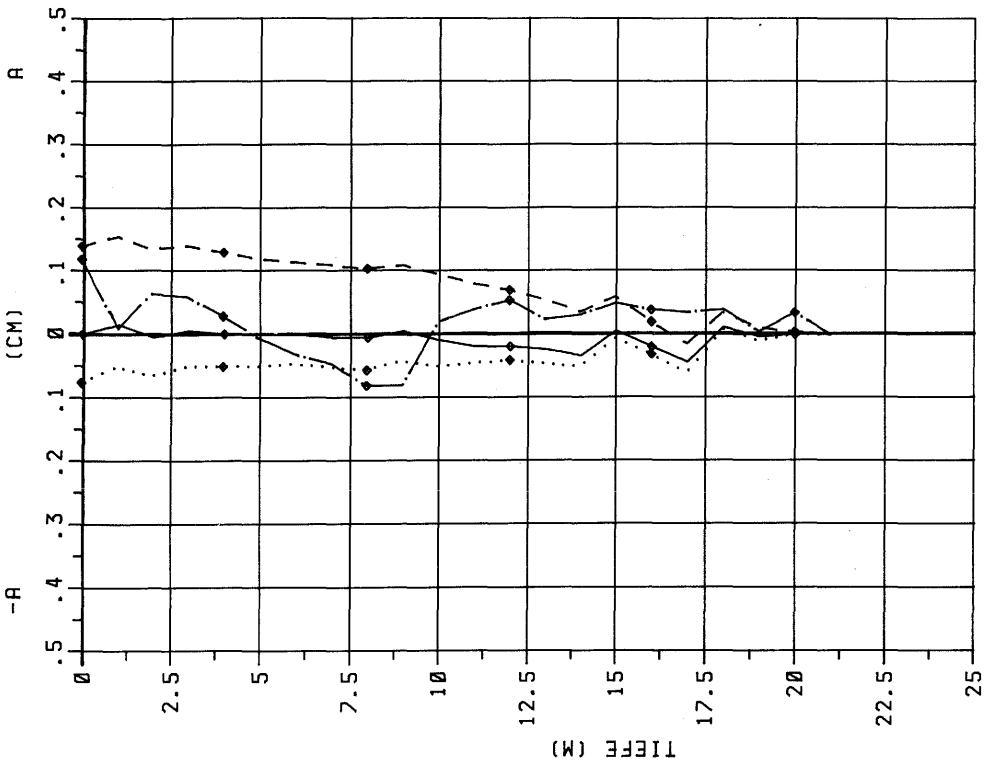
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG M1
WÄHREND DER 1. UND 2. AUFHEIZPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 4.10**





DEFORMATION **M1**

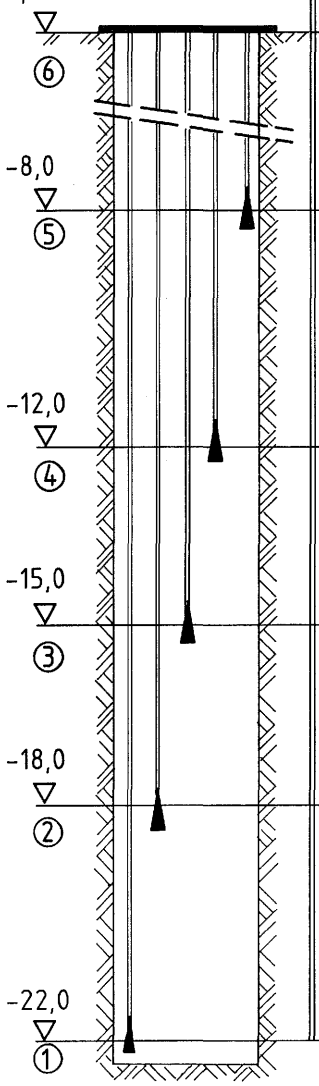
KURVE	MS	MR	DATUM	MR	DATUM	DIFF-TAGE	TIEFE (M)	SL (M)
——◆——	3	36	210388	13	120886	587	21	1
– – ◆ – –	3	37	210788	13	120886	709	21	1
·····◆·····	3	38	090988	13	120886	759	21	1
—·—◆—·—	3	39	061288	13	120886	847	21	1

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INKLINOMETERMESSUNGEN IN BOHRUNG M1
VON ANFANG 1. ABKÜHLPHASE BIS ENDE 2. ABKÜHLPHASE

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.11



Bohrloch	E1	E2	E3	E4	E5	E6
	Meßstellenbezeichnung / Meßstellennummer					
⑥	E1-W-08 / 61	E2-W-08 / 66	E3-W-08 / 71	E4-W-08 / 76	E5-W-08 / 81	E6-W-08 / 86
⑤	E1-W-12 / 62	E2-W-12 / 67	E3-W-12 / 72	E4-W-12 / 77	E5-W-12 / 82	E6-W-12 / 87
④	E1-W-15 / 63	E2-W-15 / 68	E3-W-15 / 73	E4-W-15 / 78	E5-W-15 / 83	E6-W-15 / 88
③	E1-W-18 / 64	E2-W-18 / 69	E3-W-18 / 74	E4-W-18 / 79	E5-W-18 / 84	
②	E1-W-22 / 65	E2-W-22 / 70	E3-W-22 / 75	E4-W-22 / 80	E5-W-22 / 85	

Länge [m]	22,05	22,05	22,08	32,07	32,06	34,47
Richtung [Az°]	0	0	0	31	211	297
Neigung	-90°	-90°	-90°	-45°	-45°	-28°

① Ankerpunkt

gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEOMETRIE DER EXTENSOMETER

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 4.12**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
———	Ø61 E1-W-Ø8 ØØ5	E 1	-Ø.5M/Ø8.ØM
– – – –	Ø62 E1-W-12 ØØ4	E 1	-Ø.5M/12.ØM
·····	Ø63 E1-W-15 ØØ3	E 1	-Ø.5M/15.ØM

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
——·——	Ø64 E1-W-18 ØØ2	E 1	-Ø.5M/18.ØM
——··——	Ø65 E1-W-22 ØØ1	E 1	-Ø.5M/22.ØM

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 3. 1985 BIS 31. 12. 1988

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 4.13

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
———	Ø66 E2-W-Ø8 Ø05	E 2	Ø.5M/Ø8.ØM
– – –	Ø67 E2-W-12 Ø04	E 2	Ø.5M/12.ØM
·····	Ø68 E2-W-15 Ø03	E 2	Ø.5M/15.ØM

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
——·——	Ø69 E2-W-18 Ø02	E 2	Ø.5M/18.ØM
——··——	Ø7Ø E2-W-22 Ø01	E 2	Ø.5M/22.ØM

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 3. 1985 BIS 31. 12. 1988

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.14

gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
———	Ø71 E3-W-Ø8 ØØ5	E 3	-2.8M/Ø8.ØM
– – – –	Ø72 E3-W-12 ØØ4	E 3	-2.8M/12.ØM
·····	Ø73 E3-W-15 ØØ3	E 3	-2.8M/15.ØM

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
——·——	Ø74 E3-W-18 ØØ2	E 3	-2.8M/18.ØM
——— ·	Ø75 E3-W-22 ØØ1	E 3	-2.8M/22.ØM

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 3. 1985 BIS 31. 12. 1988

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 4.15

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
———	Ø76 E4-W-Ø8 ØØ5	E 4	+7.ØM/ 8.ØM
- - - -	Ø77 E4-W-12 ØØ4	E 4	+3.ØM/12.ØM
·····	Ø78 E4-W-15 ØØ3	E 4	Ø-Ø.8M/15.ØM

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
——·——	Ø79 E4-W-18 ØØ2	E 4	-3.ØM/18.ØM
——··——	Ø8Ø E4-W-22 ØØ1	E 4	-7.ØM/22.ØM

gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 3. 1985 BIS 31. 12. 1988

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 4.16

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
———	Ø81 E5-W-Ø8 ØØ5	E 5	-7.ØM/ 8.ØM
– – –	Ø82 E5-W-12 ØØ4	E 5	-3.ØM/12.ØM
·····	Ø83 E5-W-15 ØØ3	E 5	W-Ø.8M/15.ØM

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
——·——	Ø84 E5-W-18 ØØ2	E 5	+3.ØM/18.ØM
——··——	Ø85 E5-W-22 ØØ1	E 5	+7.ØM/22.ØM

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

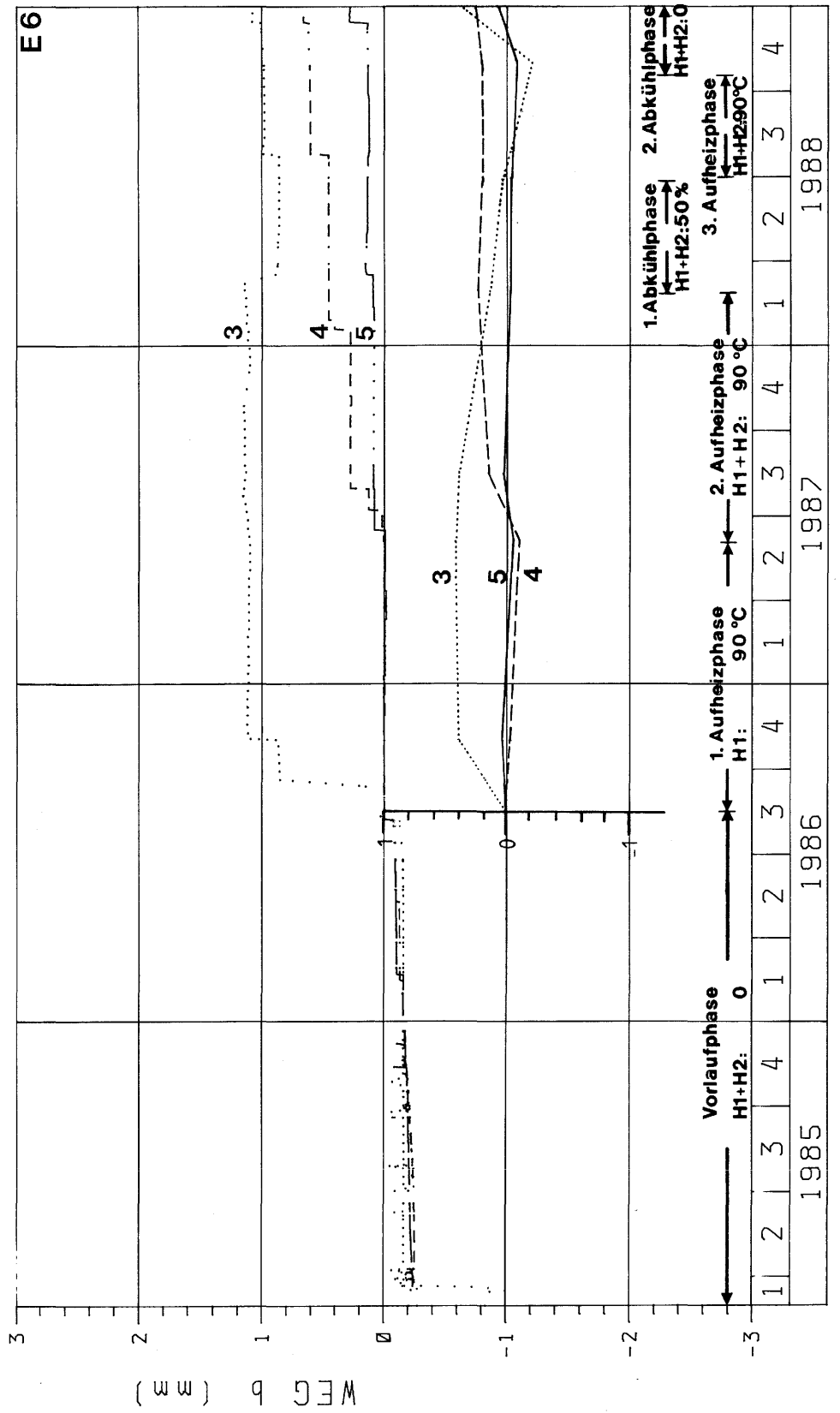
NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 3. 1985 BIS 31. 12. 1988

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 4.17



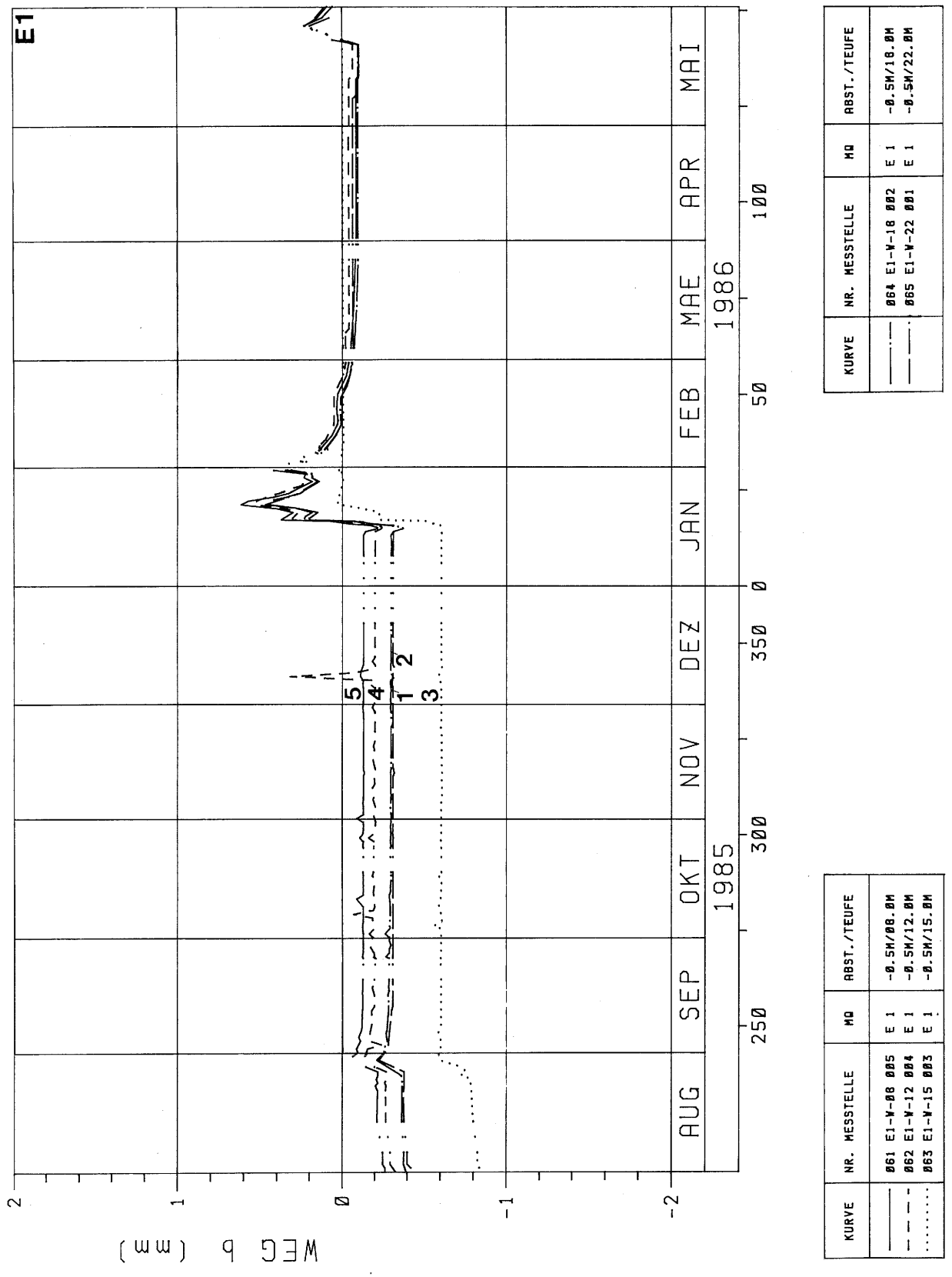
KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./TEUFE
———	006 E6-W-08 005	E 6	15.5M/08.0M
– – – –	007 E6-W-12 004	E 6	7.0M/12.0M
.....	008 E6-W-15 003	E 6	0.6M/15.0M

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 3. 1985 BIS 31. 12. 1988

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.18



Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.19

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

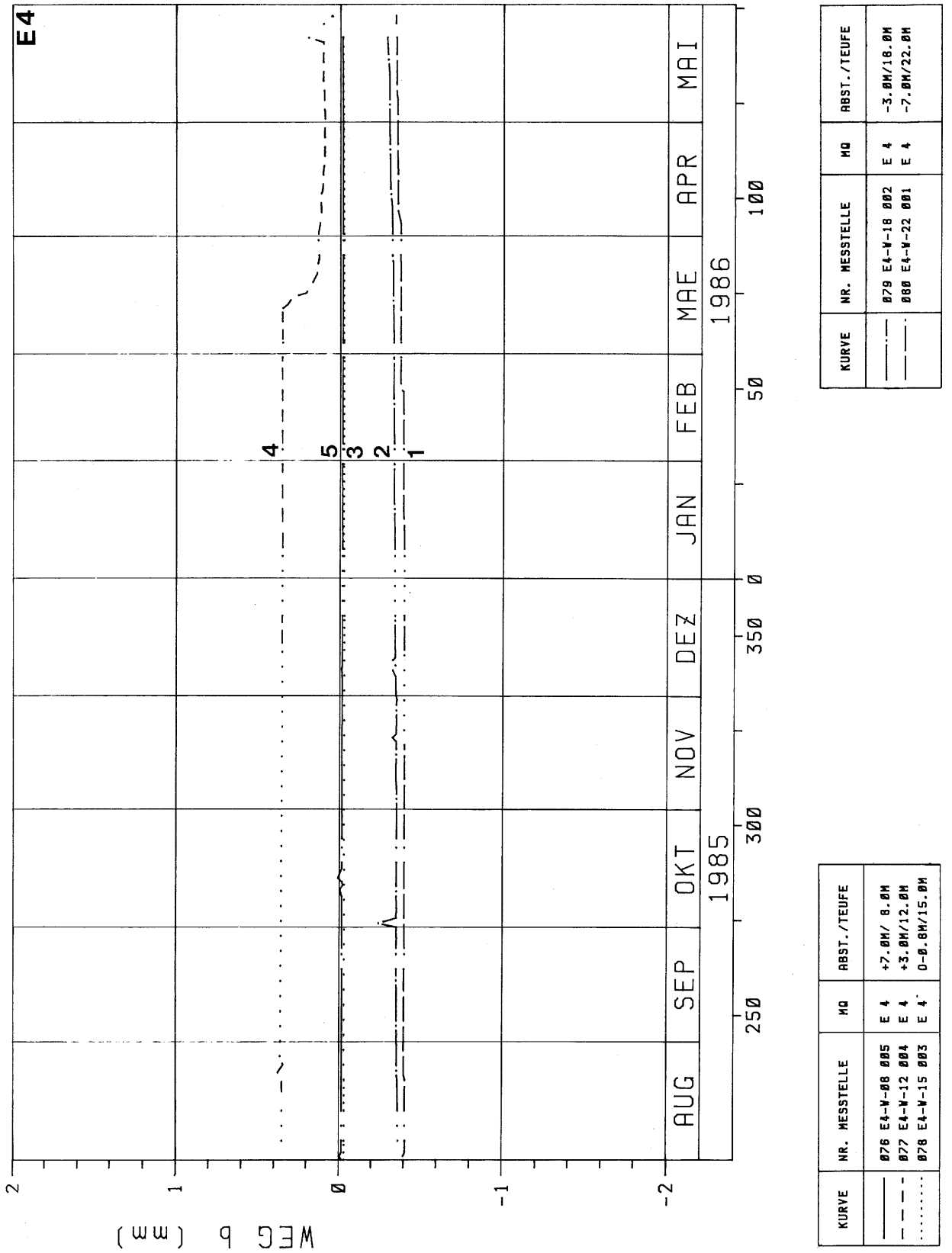
Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.20

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.21

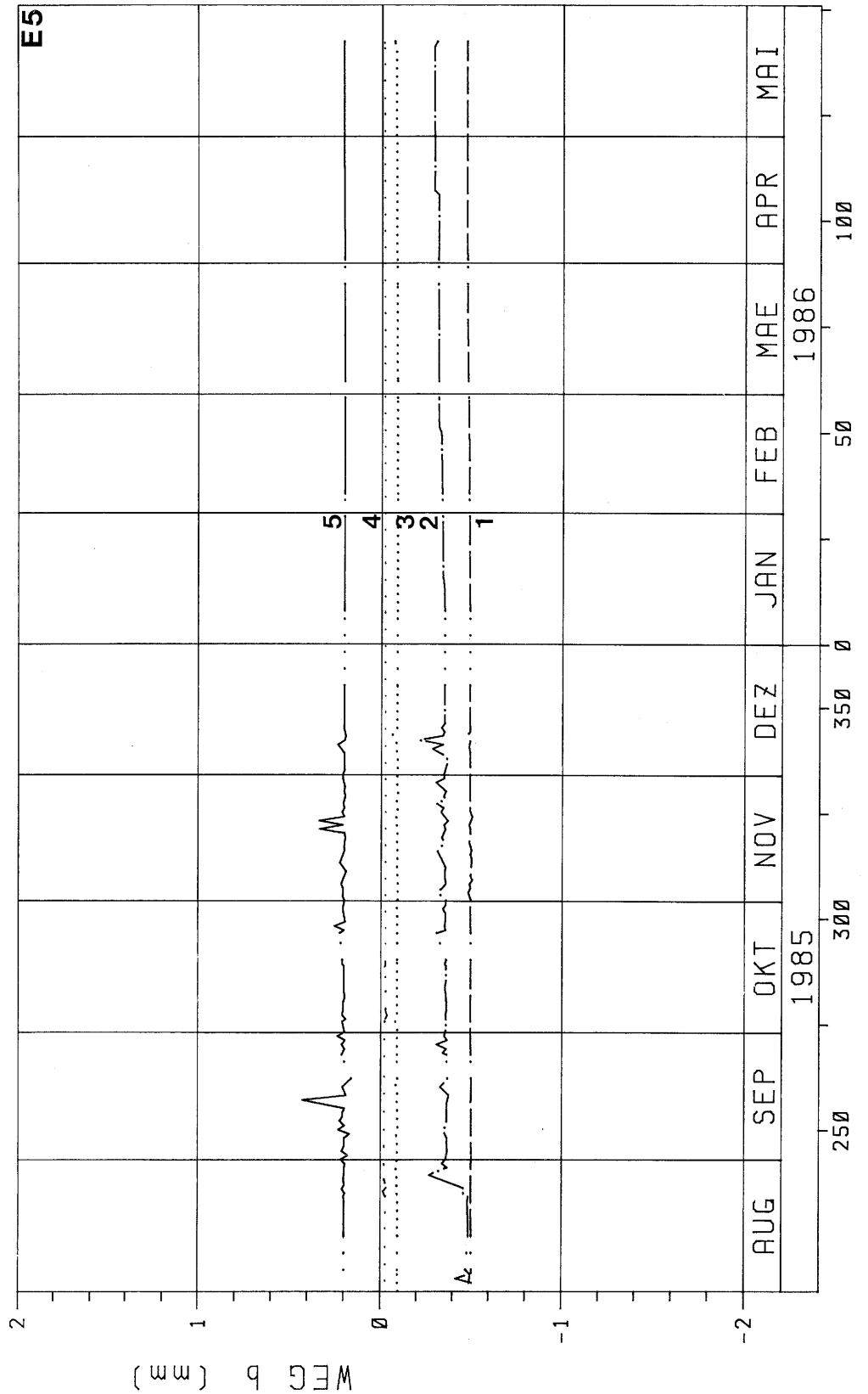


gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 4.22**

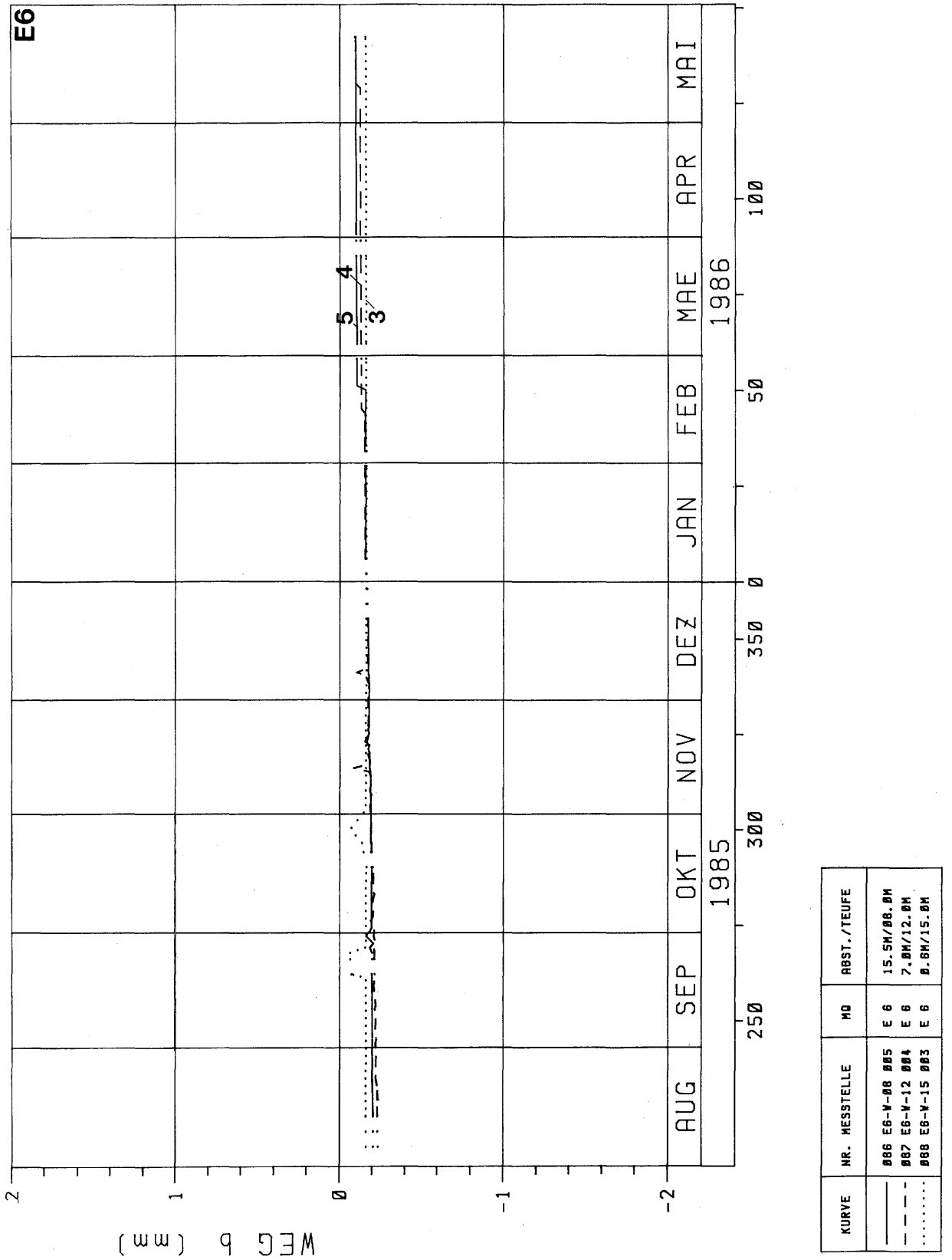


gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.23



Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

EXTENSOMETERWEGE VON E1 BIS E6
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.24

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

TEMPERATURVERLAUF NÖRDLICH H2 (E3)
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.25

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

TEMPERATURVERLAUF SÜDLICH H1 (E2)
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.26

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	Ø17 S3-I 17	S 3	Ø.5M/-13.48	I-RADIAL
- - - -	Ø18 S3-II 18	S 3	Ø.5M/-13.73M	II-TANGENT.
·····	Ø19 S3-III 19	S 3	Ø.5M/-13.98M	III-45GR.HOR

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	Ø2Ø S3-IV 2Ø	S 3	Ø.5M/-14.13M	IV-VERTIKAL
——— ·	Ø23 S3-VI 23	S 3	Ø.5M/-15.2M	VI-45GR.RAD.

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S1 BIS S3
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 4.27

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	001 S1-I 1	S 1	1.0M/-13.38M	I - RADIAL
- - - -	002 S1-II 2	S 1	1.0M/-13.63M	II-TANGENT.
.....	003 S1-III 3	S 1	1.0M/-13.88M	III-45GR.HOR

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	004 S1-IV 4	S 1	1.0M/-14.03M	IV=VERTIKAL
——— ·	005 S1-I 5	S 1	1.0M/-14.65M	I - RADIAL

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S1 BIS S3
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel

DAT.:

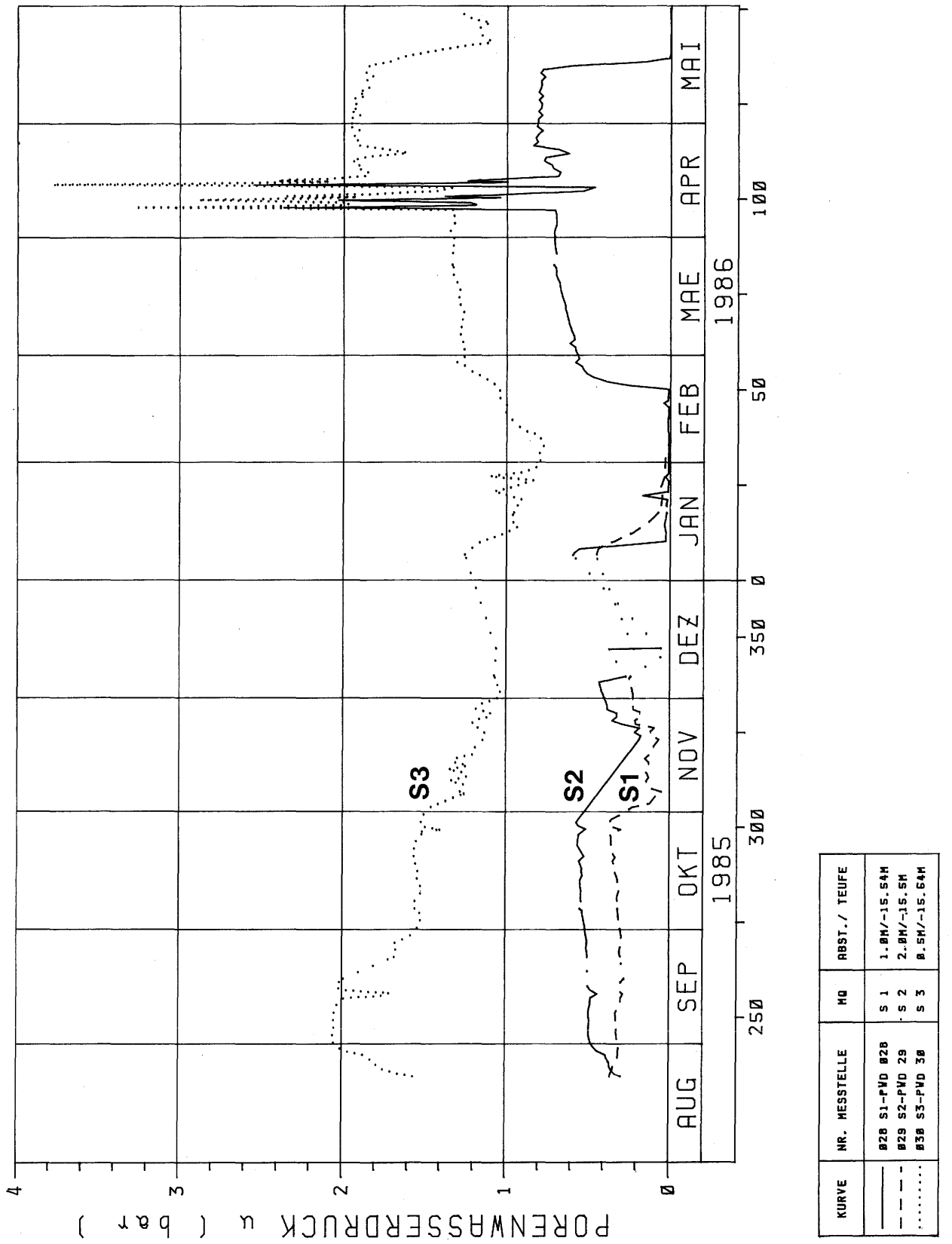
BEILAGE 4.28

gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S1 BIS S3
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.29

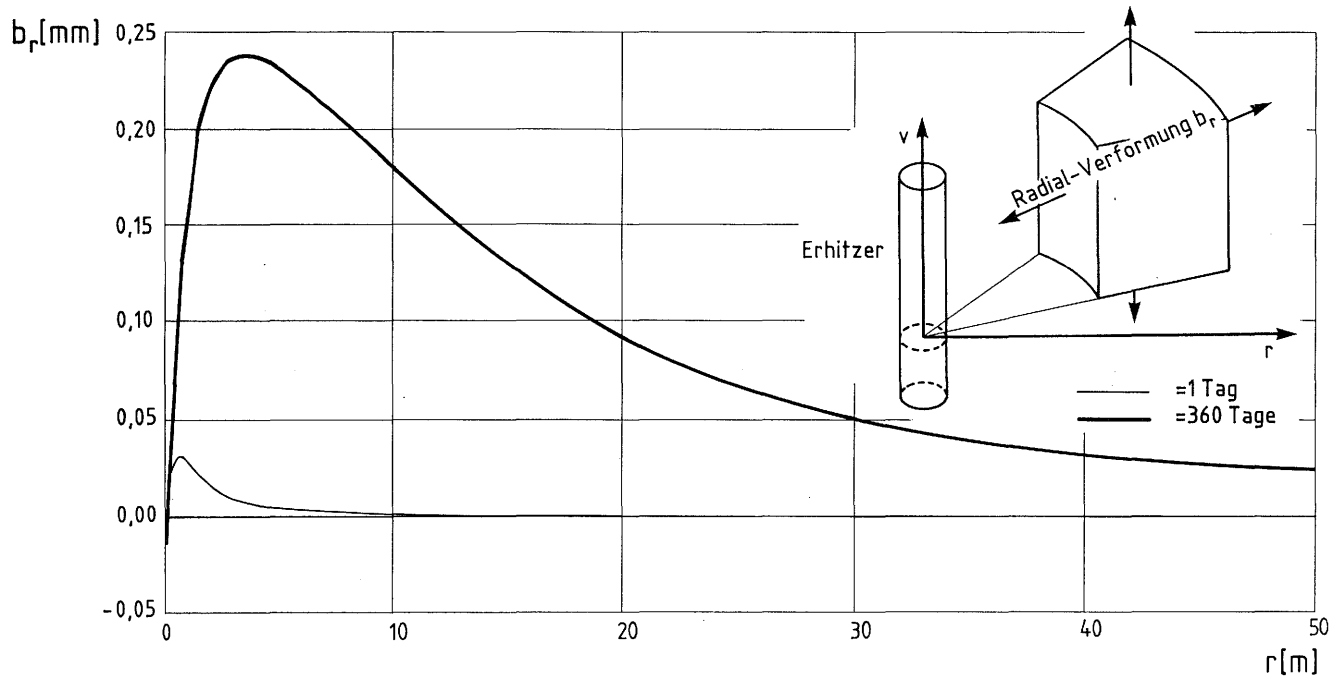


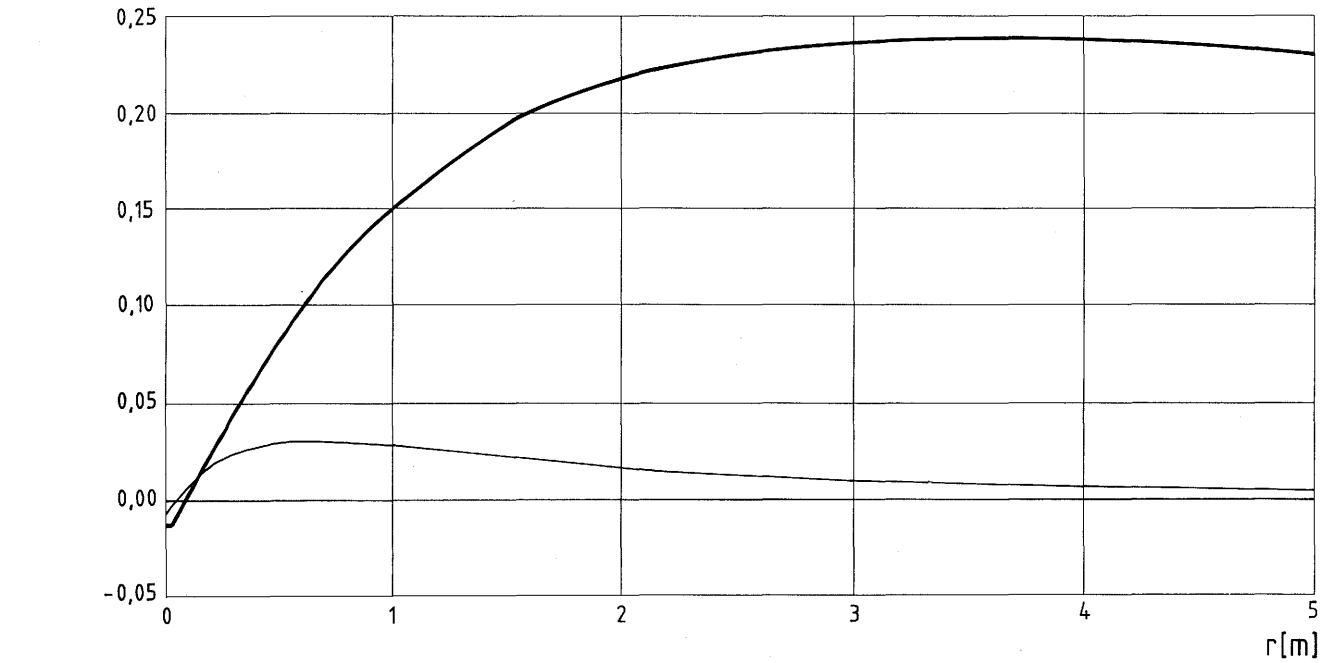
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

PORENWASSERDRUCK IN S1 BIS S3
VOM 1. 8. 1985 BIS 31. 5. 1986

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 4.30



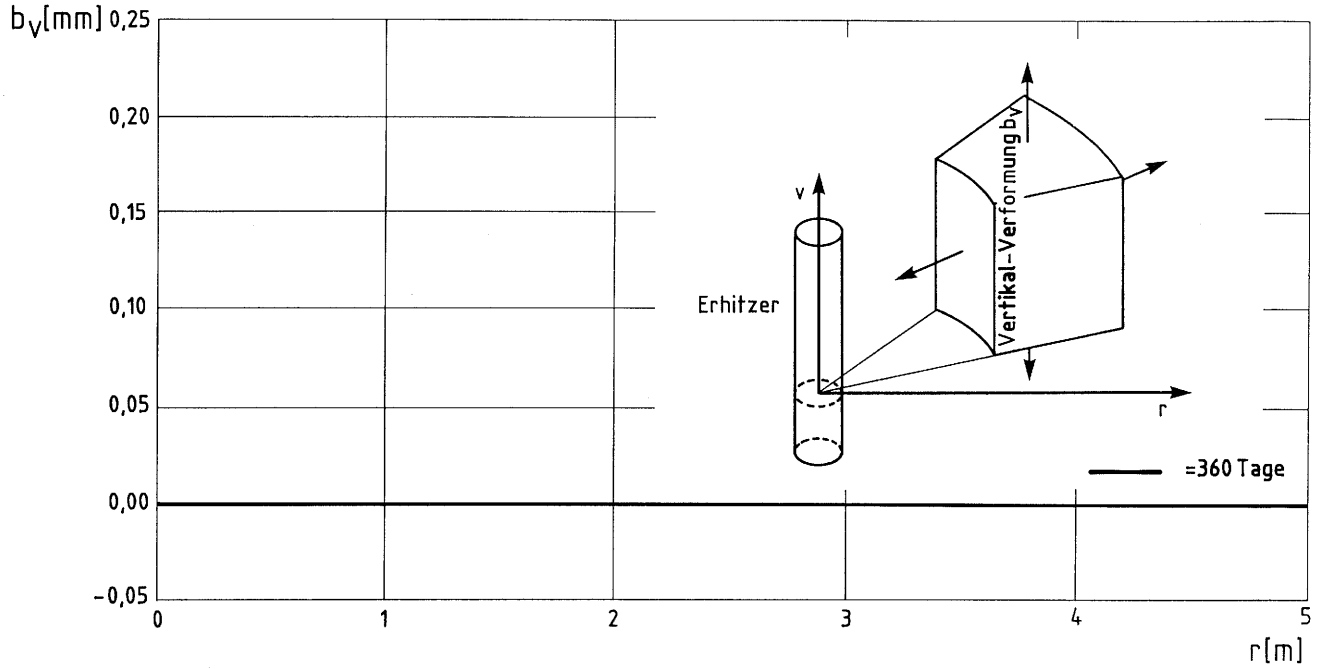


Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

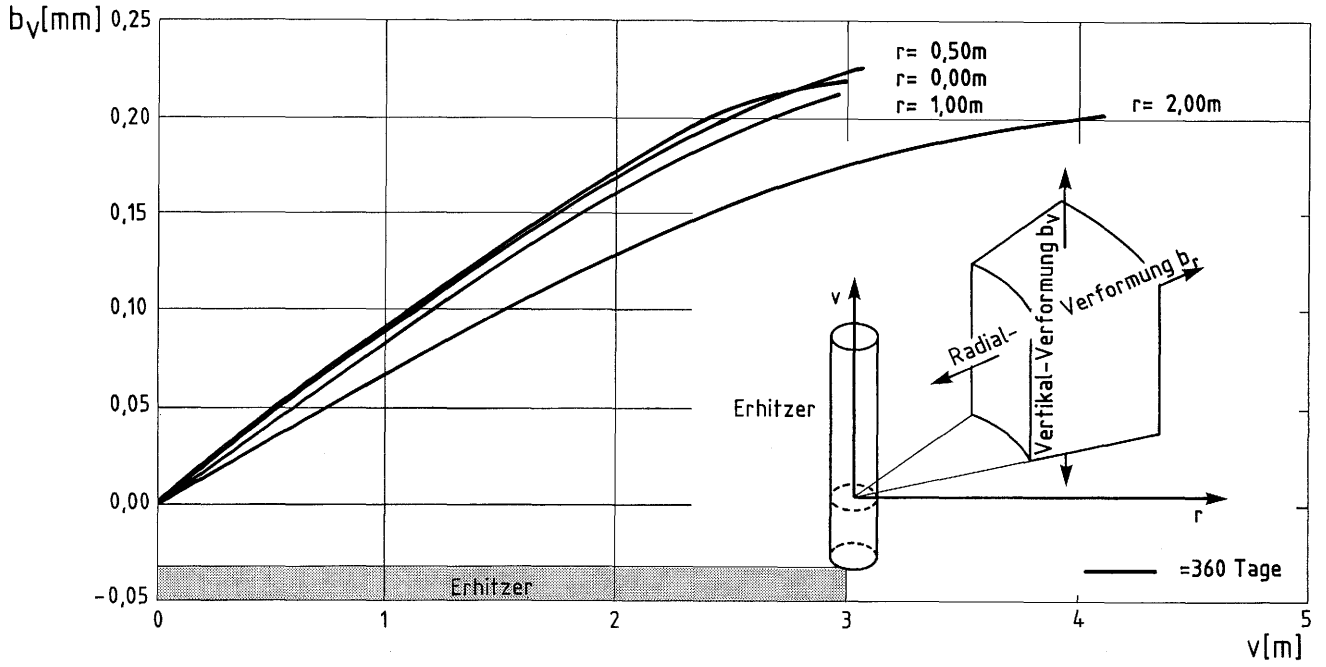
GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG – VERFORMUNGEN

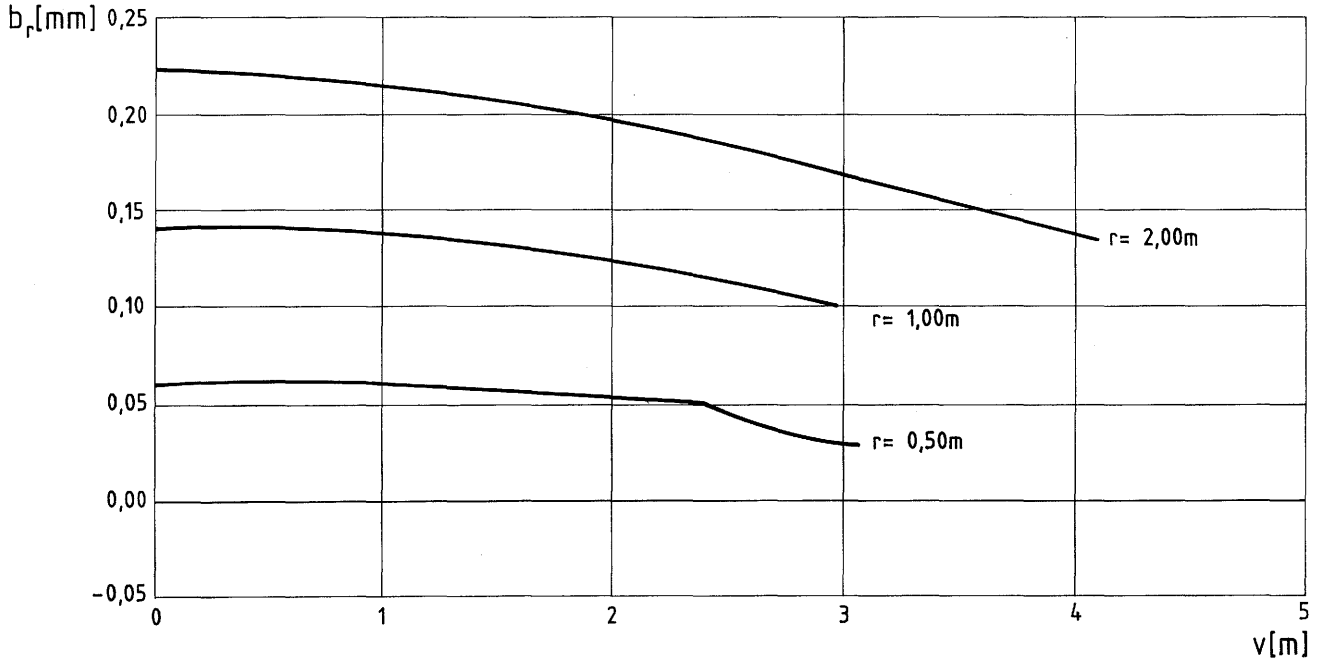
Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 4.31**



gsf	**Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung** **Institut für Tieflagerung**

NAGRA	**TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**	
GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG – VERFORMUNGEN		
Felslabor Grimsel	DAT.:	**BEILAGE** 4.32



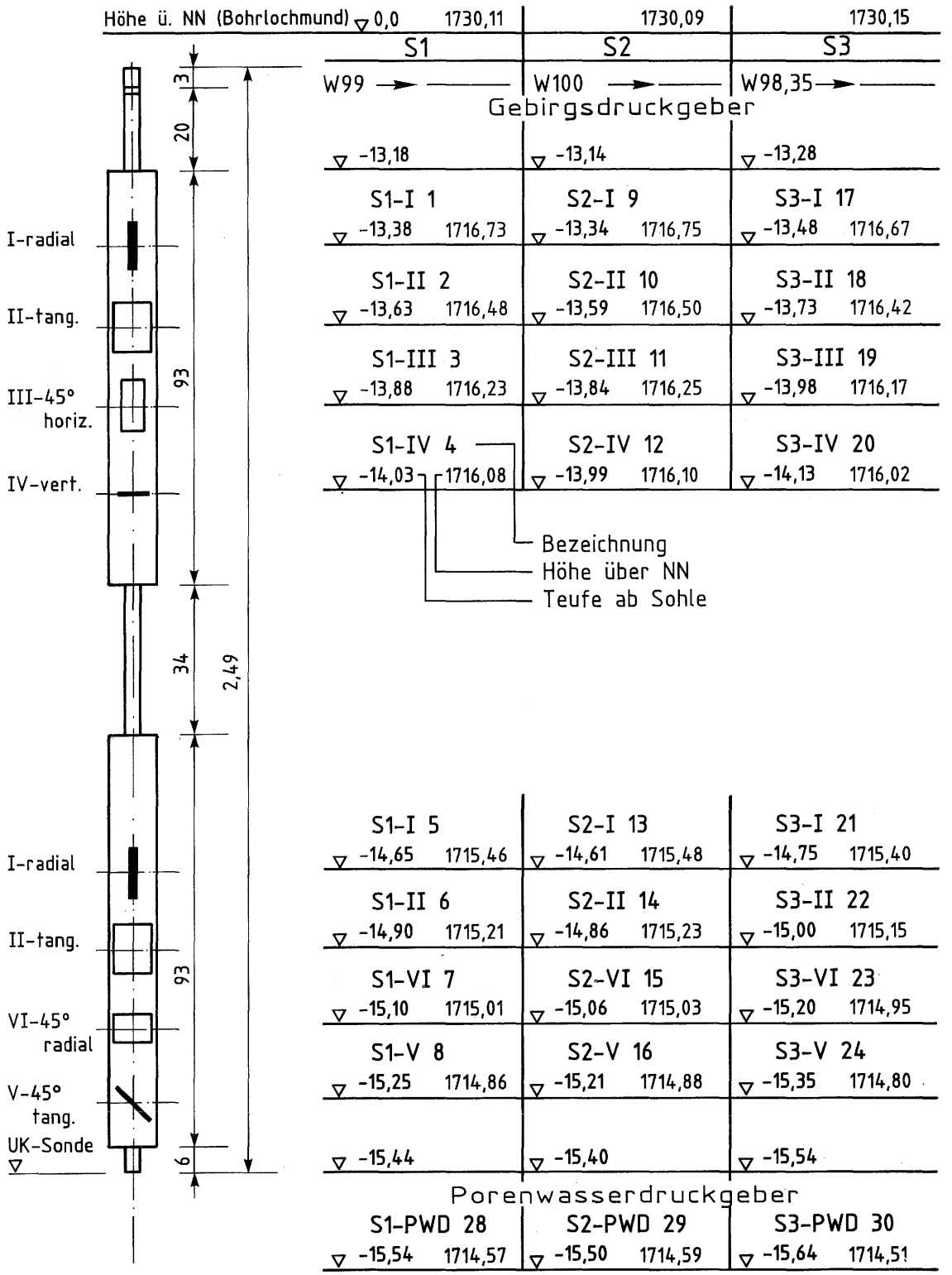


gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG – VERFORMUNGEN

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 4.33**



Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

INSTALLATION DER HYDRAULISCHEN DRUCKKISSEN

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.1**

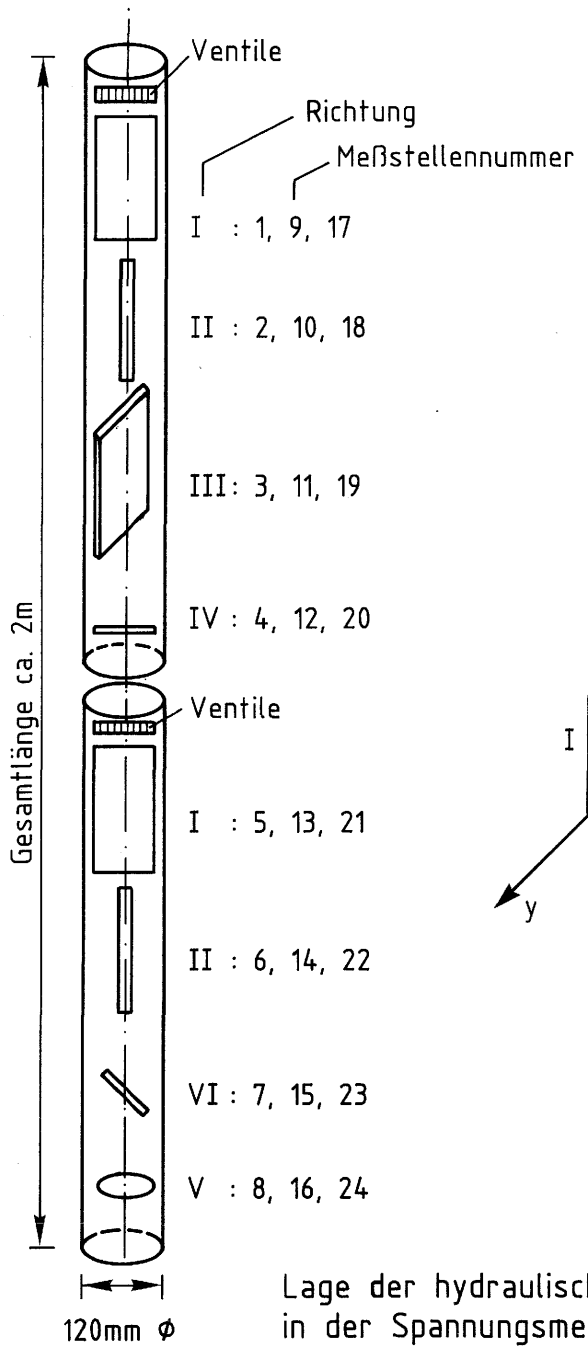
KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE
———	Ø26 S1-PWD Ø26	S 1	1.ØM/-15.54M
– – –	Ø29 S2-PWD 29	S 2	2.ØM/-15.5ØM
·····	Ø3Ø S3-PWD 3Ø	S 3	Ø.5M/-15.64M

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

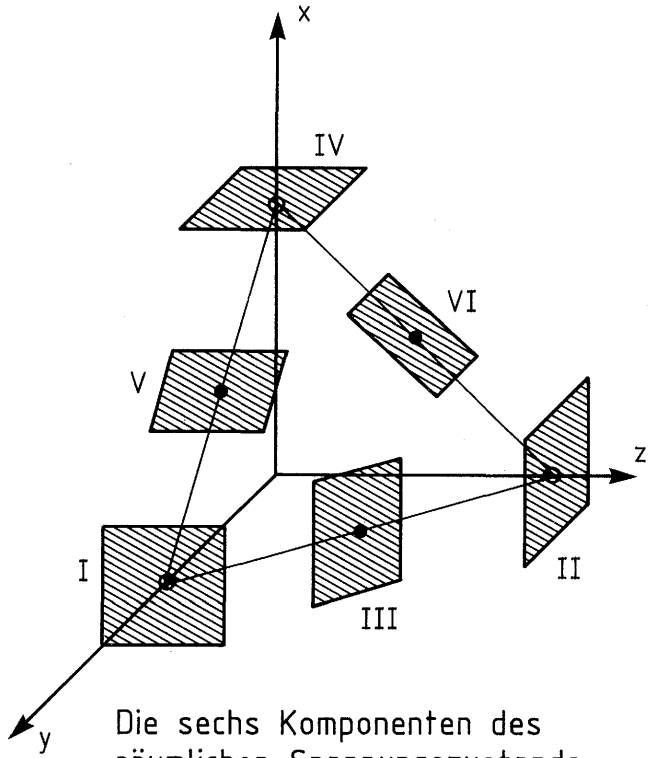
NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

PORENWASSERDRUCK IN S1, S2, S3

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.2**



Lage der hydraulischen Druckkissen in der Spannungsmeßsonde



Die sechs Komponenten des räumlichen Spannungszustands

gsf	**Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung Institut für Tieflagerung**

NAGRA	**TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**	
RÄUMLICHE ANDORDNUNG DER HYDRAULISCHEN DRUCKKISSEN		
Felslabor Grimsel	DAT.:	**BEILAGE** 5.3

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	Ø17 S3-I 17	S 3	Ø.5M/-13.48M	I - RADIAL
- - - -	Ø18 S3-II 18	S 3	Ø.5M/-13.73M	II-TANGENT.
·····	Ø19 S3-III 19	S 3	Ø.5M/-13.98M	III-45GR.HOR

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	Ø20 S3-IV 20	S 3	Ø.5M/-14.13M	IV-VERTIKAL

gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S3, MESSSTELLEN 17 BIS 20

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 5.4

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	Ø21 S3-I 21	S 3	Ø.5M/-14.75M	I - RADIAL
– – – –	Ø22 S3-II 22	S 3	Ø.5M/-15.ØØM	II-TANGENT.
·····	Ø23 S3-VI 23	S 3	Ø.5M/-15.2ØM	VI-45GR.RAD.

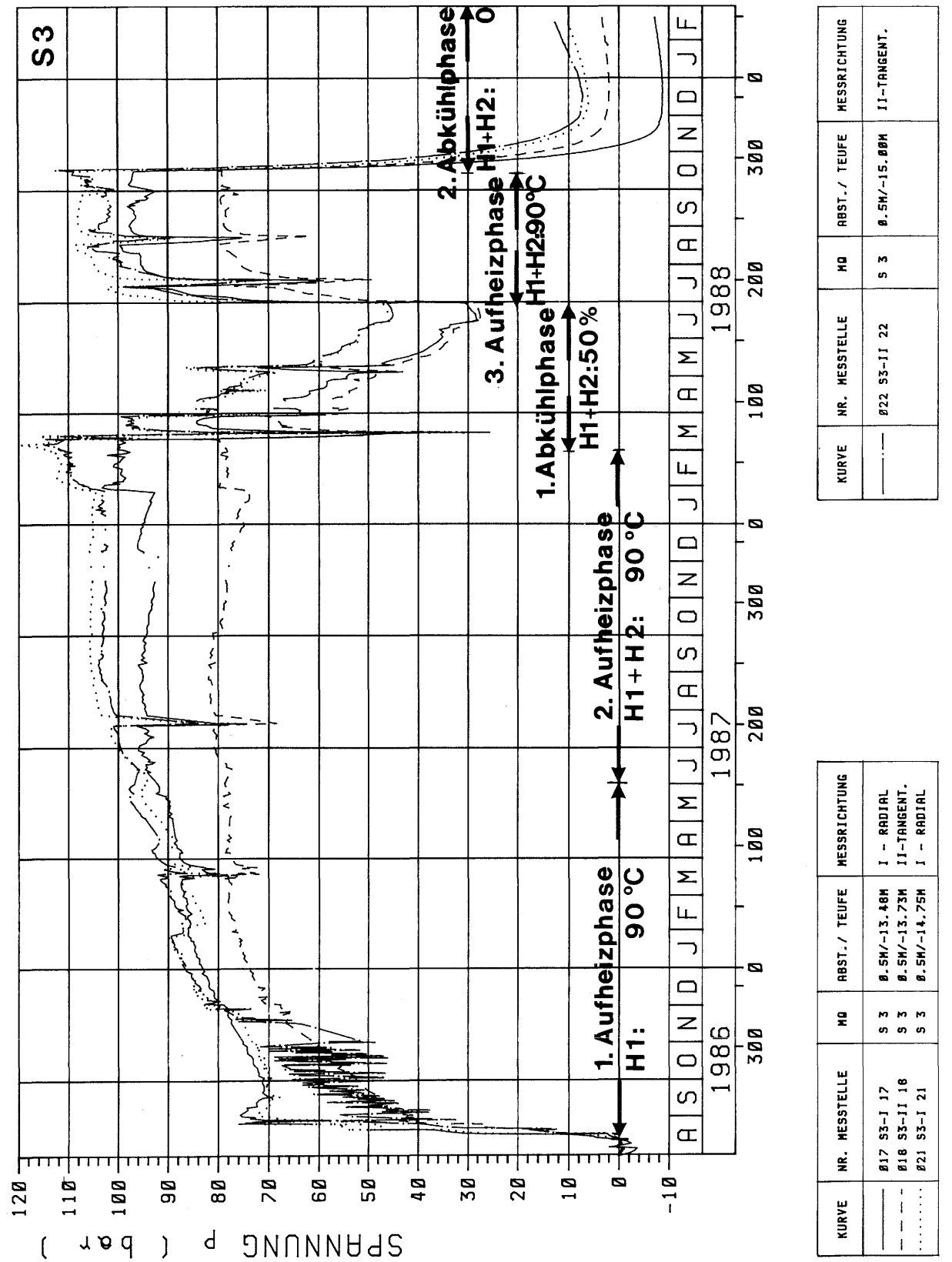
KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	Ø24 S3-V 24	S 3	Ø.5M/-15.35M	V-45GR.TANG.

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S3, MESSSTELLEN 21 BIS 24

Felslabor Grimsel | DAT.: | **BEILAGE 5.5**



gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S3, MESSSTELLEN 17, 18, 21, 22

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.6**

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S1, MESSSTELLEN 1 BIS 4

Felslabor Grimsel | DAT.: | **BEILAGE 5.7**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	001 S1-I 1	S 1	1.0M/-13.38M	I - RADIAL
– – – –	002 S1-II 2	S 1	1.0M/-13.63M	II-TANGENT.
·····	003 S1-III 3	S 1	1.0M/-13.88M	III-45GR.HOR

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	004 S1-IV 4	S 1	1.0M/-14.03M	IV-VERTIKAL

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	005 S1-I 5	S 1	1.0M/-14.65M	I - RADIAL
– – – –	006 S1-II 6	S 1	1.0M/-14.90M	II-TANGENT.
·····	007 S1-VI 7	S 1	1.0M/-15.10M	VI-45GR.RAD.

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	008 S1-V 8	S 1	1.0/-15.25	V-45GR.TANG.

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S1, MESSSTELLEN 5 BIS 8

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.8**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	001 S1-I 1	S 1	1.0M/-13.38M	I - RADIAL
– – – –	002 S1-II 2	S 1	1.0M/-13.63M	II-TANGENT.
·····	005 S1-I 5	S 1	1.0M/-14.65M	I - RADIAL

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	006 S1-II 6	S 1	1.0M/-14.90M	II-TANGENT

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S1, MESSSTELLEN 1, 2, 5, 6

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.9**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	009 S2-I 9	S 2	2.0M/-13.34M	I - RADIAL
– – – –	010 S2-II 10	S 2	2.0M/-13.59M	II-TANGENT.
·····	011 S2-III 11	S 2	2.0M/-13.84M	III-45GR.HOR

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	012 S2-IV 12	S 2	2.0M/-13.99M	IV-VERTIKAL

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S2, MESSSTELLEN 9 BIS 12

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.10**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	013 S2-I 13	S 2	2.0M/-14.61M	I - RADIAL
– – – –	014 S2-II 14	S 2	2.0M/-14.86M	II-TANGENT.
·····	015 S2-VI 15	S 2	2.0M/-15.06M	VI-45GR.RAD.

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	016 S2-V 16	S 2	2.0M/-15.21M	V-45GR.TANG.

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S2, MESSSTELLEN 13 BIS 16

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.11**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	009 S2-I 9	S 2	2.0M/-13.34M	I - RADIAL
– – – –	010 S2-II 10	S 2	2.0M/-13.59M	II-TANGENT.
·····	013 S2-I 13	S 2	2.0M/-14.61M	I - RADIAL

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
——·——	014 S2-II 14	S 2	2.0M/-14.86M	II-TANGENT.

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN IN S2, MESSSTELLEN 9, 10, 13, 14

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.12**

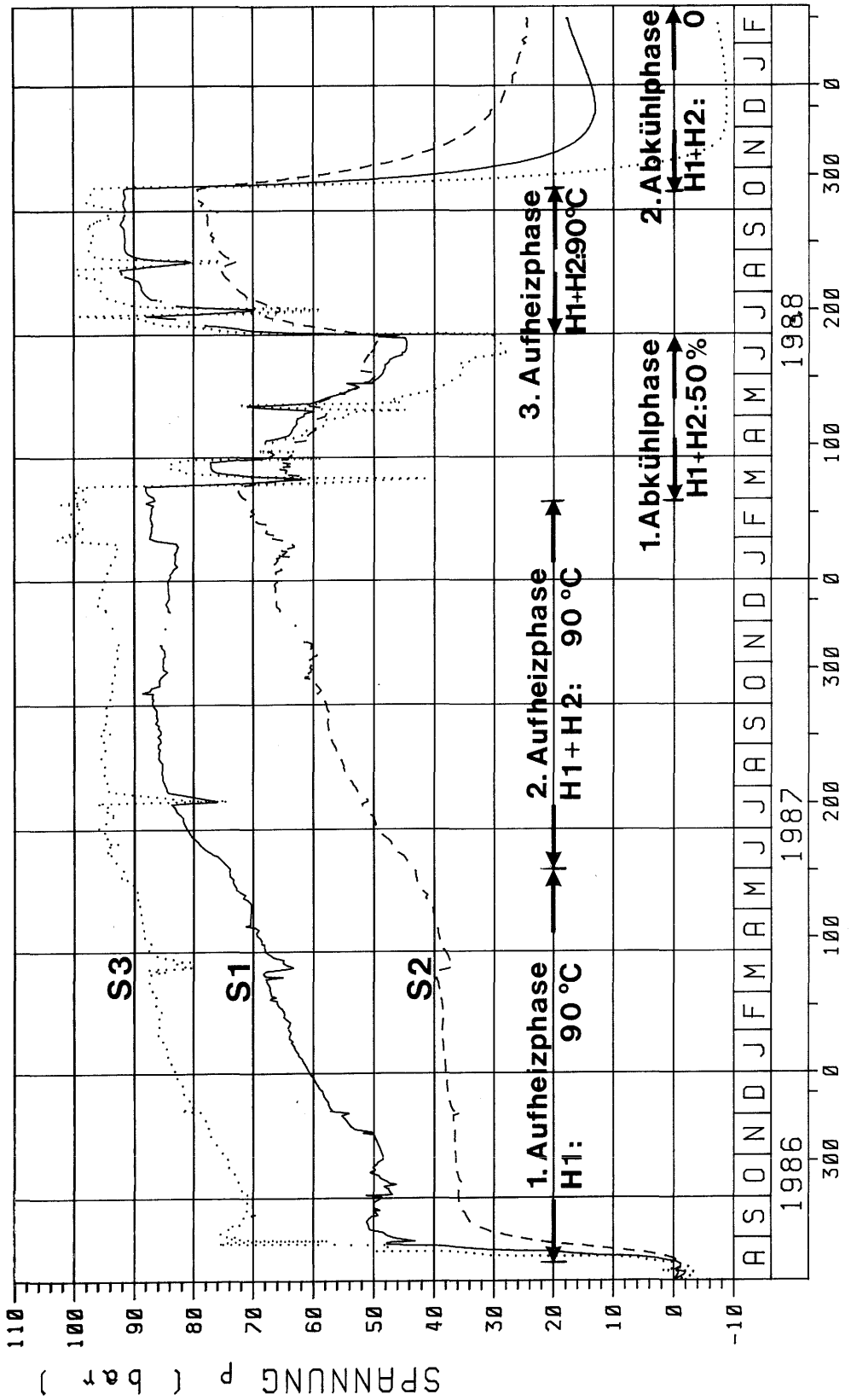
KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	005 S1-I 5	S 1	1.0M/-14.65M	I - RADIAL
– – – –	013 S2-I 13	S 2	2.0M/-14.61M	I - RADIAL
·····	021 S3-I 21	S 3	0.5M/-14.75M	I - RADIAL

gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

GEBIRGSSPANNUNGEN:
RADIALSPANNUNGEN DER OBEREN GEBER

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 5.13



KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	001 S1-I 1	S 1	1.0M/-13.30M	I - RADIAL
– – – –	009 S2-I 9	S 2	2.0M/-13.34M	I - RADIAL
.....	017 S3-I 17	S 3	0.5M/-13.48M	I - RADIAL

gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN:
RADIALSPANNUNGEN DER UNTEREN GEBER

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 5.14

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	002 S1-II 2	S 1	1.0M/-13.63M	II-TANGENT.
– – – –	010 S2-II 10	S 2	2.0M/-13.59M	II-TANGENT.
.....	018 S3-II 18	S 3	0.5M/-13.73M	II-TANGENT.

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSSPANNUNGEN:
TANGENTIALSPANNUNGEN DER OBEREN GEBER

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE** 5.15

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABST./ TEUFE	MESSRICHTUNG
———	006 S1-II 6	S 1	1.0M/-14.90M	II-TANGENT.
– – – –	014 S2-II 14	S 2	2.0M/-14.86M	II-TANGENT.
·····	022 S3-II 22	S 3	0.5M/-15.00M	II-TANGENT.

gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

GEBIRGSSPANNUNGEN:
TANGENTIALSPANNUNGEN DER UNTEREN GEBER

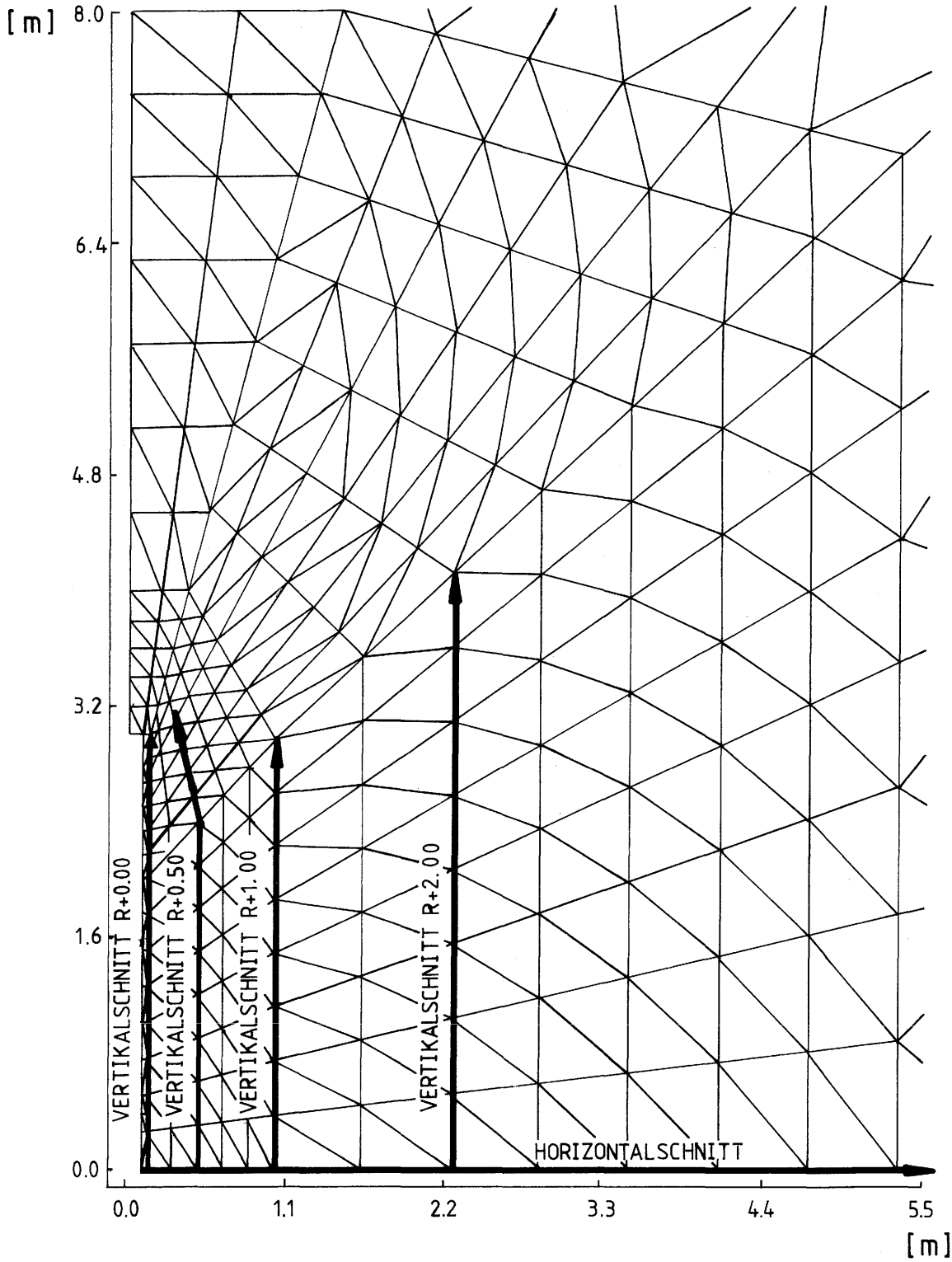
Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 5.16

635 ELEMENTE 355 KNOTEN | BEREICH 4

WAERMEBERECHNUNG ERHITZER IM GRANIT GSF

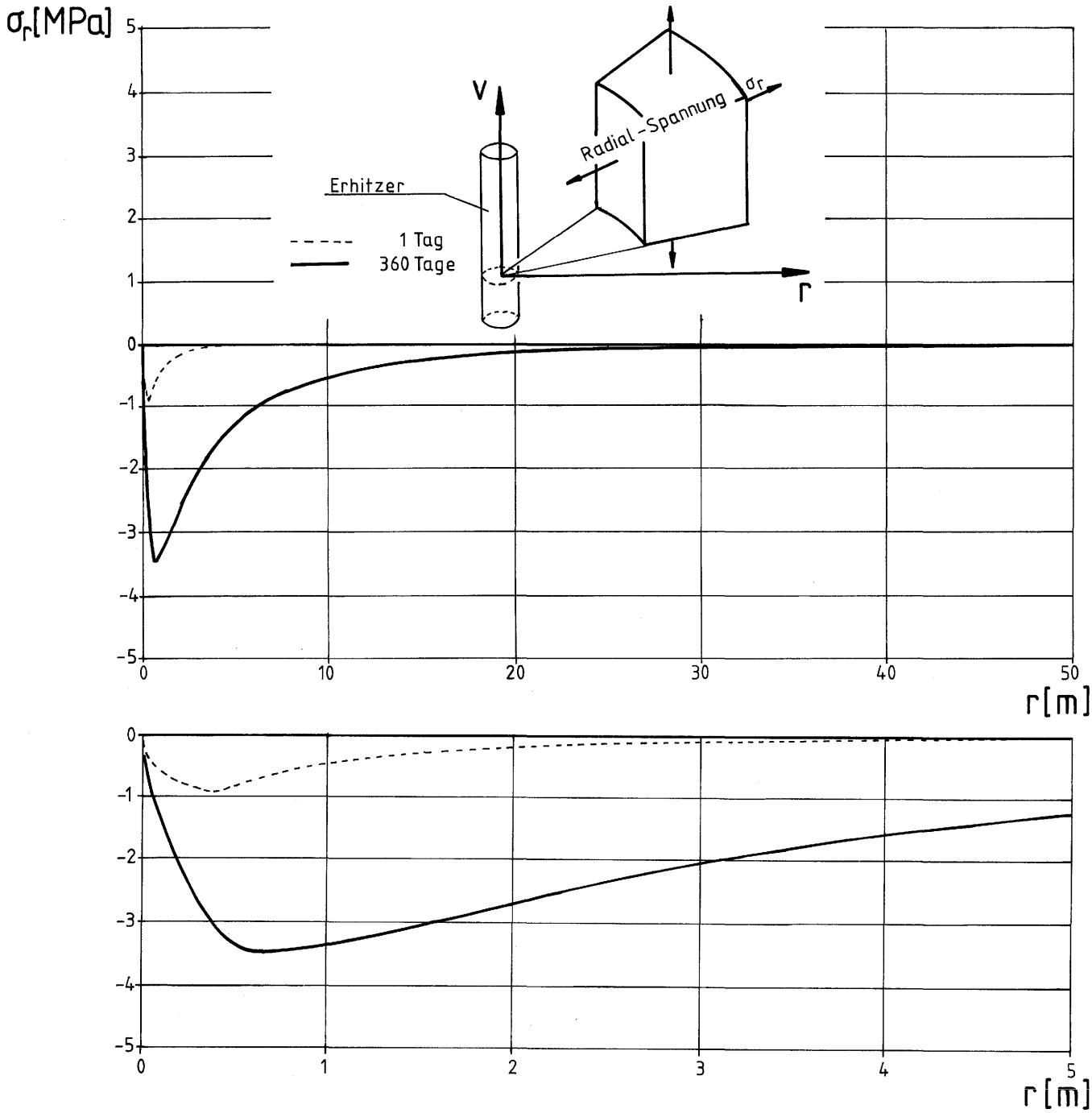


Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

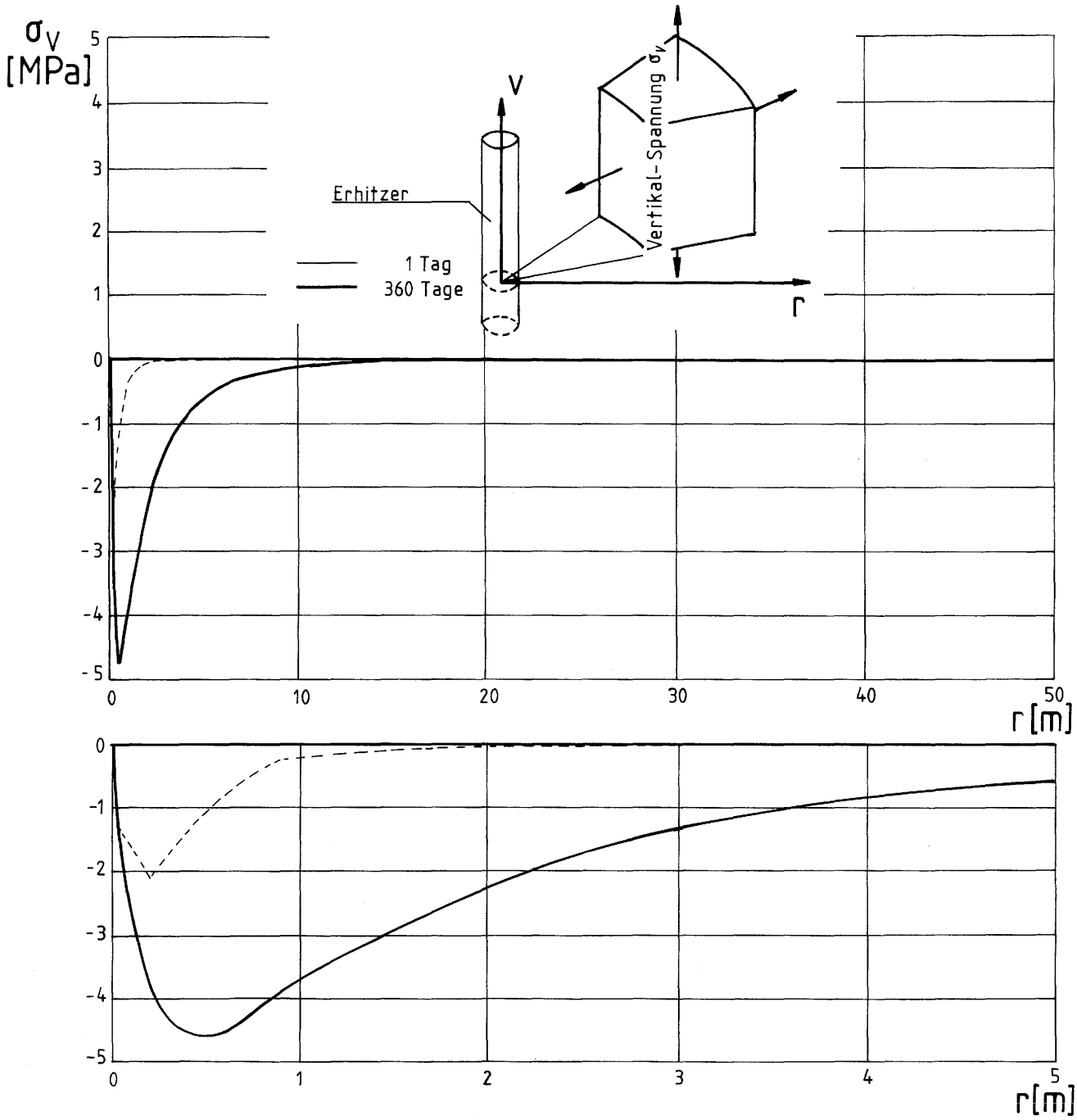
GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG – FEM-NETZ

Felslabor Grimsel | DAT.: | **BEILAGE** 5.17



gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA	**TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**
GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG – GEBIRGSSPANNUNGEN	
Felslabor Grimsel	DAT.: **BEILAGE 5.18**

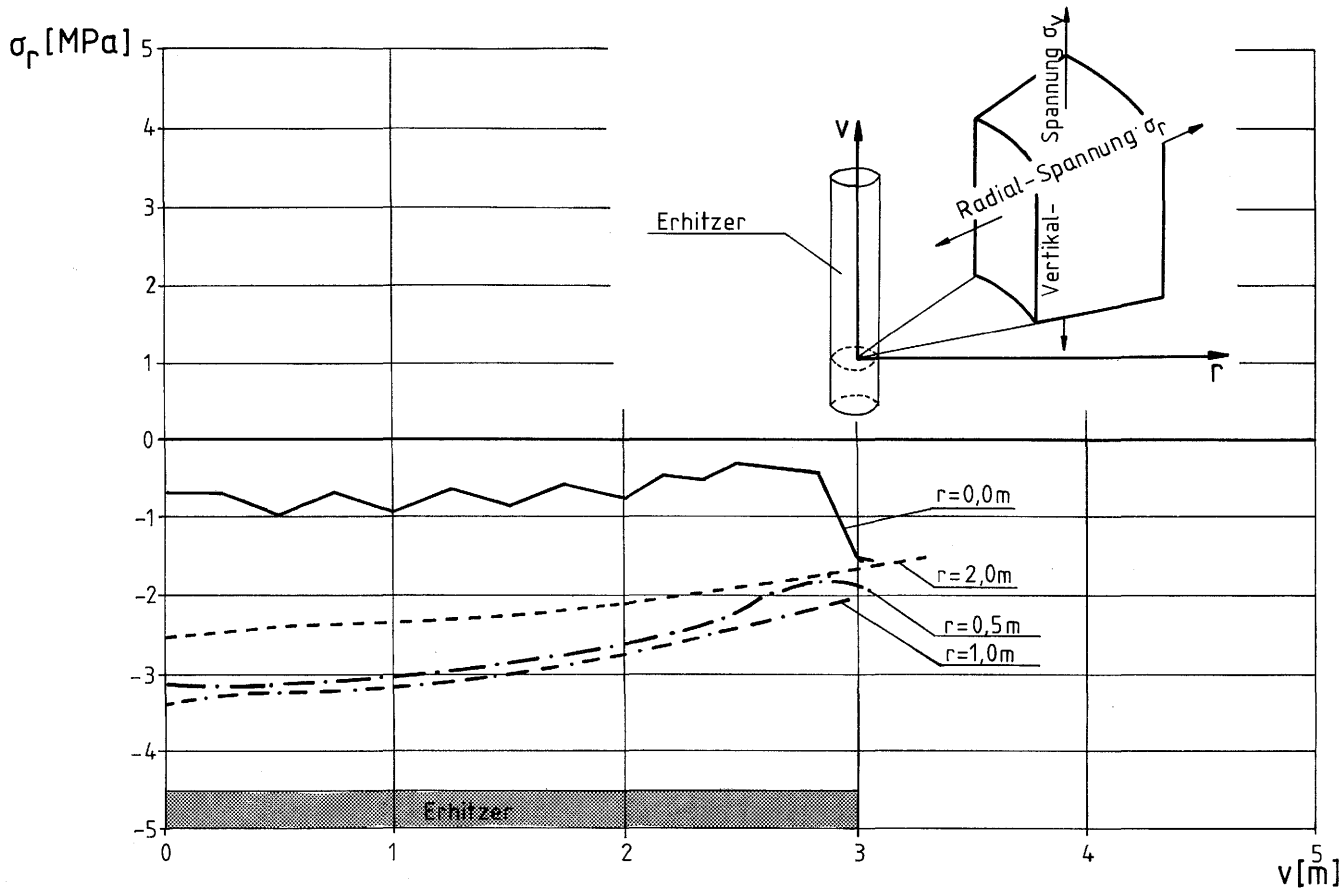


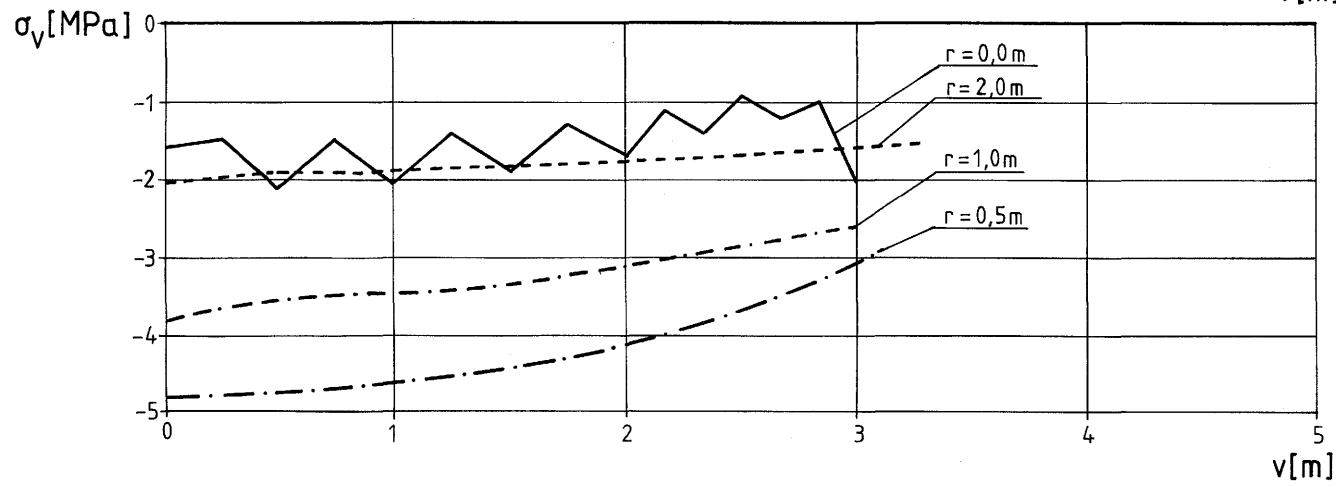
gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG –
GEBIRGSSPANNUNGEN

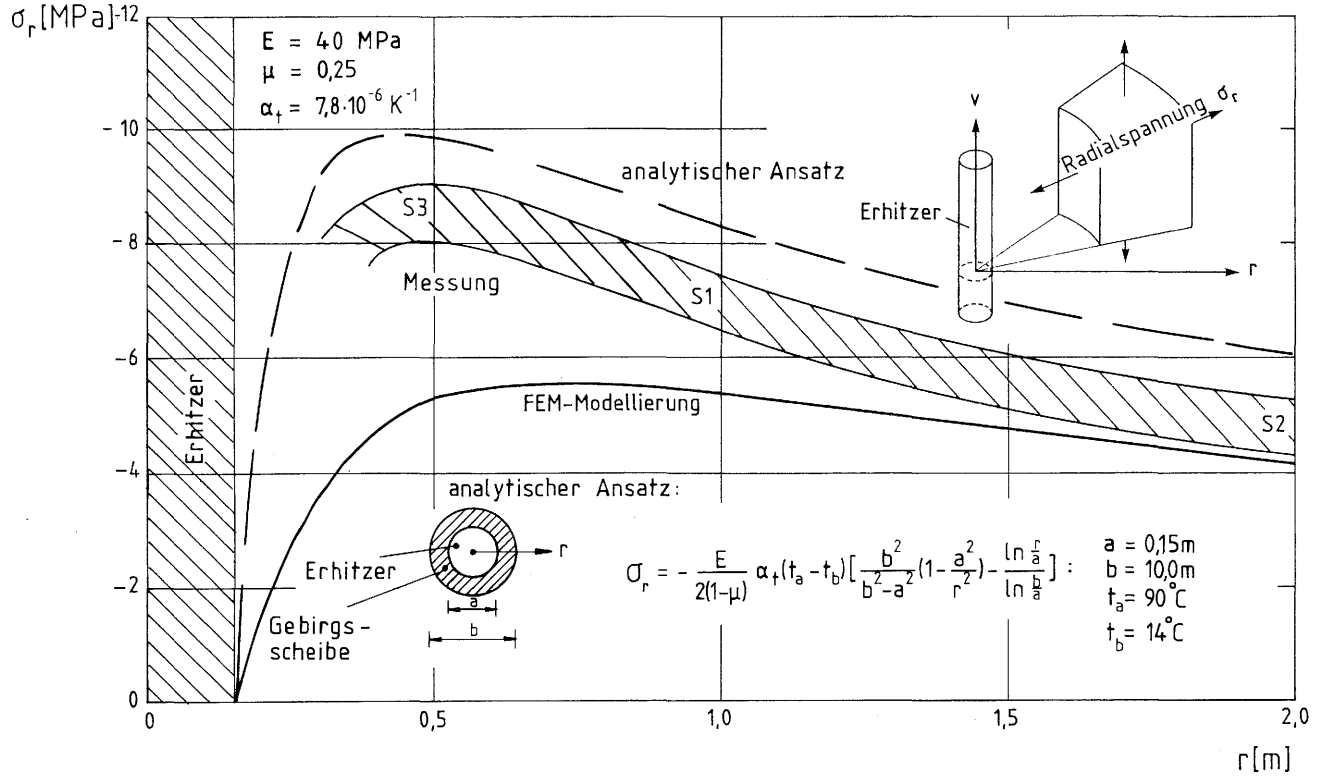
Felslabor Grimsel | DAT.: | **BEILAGE** 5.19





gsf **Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung**
Institut für Tieflagerung

NAGRA	**TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**
GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG – GEBIRGSSPANNUNGEN	
Felslabor Grimsel	DAT.: **BEILAGE** 5.20



Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

GEBIRGSMECHANISCHE MODELLIERUNG –
VERGLEICH RECHNUNG – MESSUNG

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 5.21**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.	HOEHE (M NN)
———	210 W1 201	W 1	-1.00M	00.80-22.10M	1730
———	211 D1.4 001	W 1	-1.00M	00.80-22.10M	1722.25
- - - -	212 D1.7 002	W 1	-1.00M	08.10-12.20M	1717.8

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.	HOEHE (M NN)
·····	213 D1.9 003	W 1	-1.00M	12.65-15.45M	1714.55
——·——	214 D1.11 004	W 1	-1.00M	15.90-18.70M	1711.3
—— ——	215 D1.13 005	W 1	-1.00M	19.15-22.10M	1707.9

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

SCHÜTTUNGSMESSUNGEN IN W1

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 6.1**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.	HOEHE (M NN)
———	220 W2 202	W 2	-4.00M	00.80-22.05M	1730
———	221 D2.2 001	W 2	-4.00M	00.80-02.10M	1727.9
- - - -	222 D2.4 002	W 2	-4.00M	02.55-05.65M	1724.35
.....	223 D2.7 003	W 2	-4.00M	06.10-10.65M	1719.35

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.	HOEHE (M NN)
——·——	224 D2.10 004	W 2	-4.00M	11.10-15.90M	1714.1
——··——	225 D2.12 005	W 2	-4.00M	16.35-18.95M	1711.05
——●——	226 D2.14 006	W 2	-4.00M	19.40-22.05M	1707.95

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

SCHÜTTUNGSMESSUNGEN IN W2

Felslabor Grimsel DAT.: **BEILAGE 6.2**

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

SCHÜTTUNGSMESSUNGEN IN W3

Felslabor Grimsel | DAT.: | **BEILAGE 6.3**

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.	HOEHE (M NN)
———	230 W3 203	W 3	+1.50M	00.90-22.05M	1730
- - - -	231 D3.5 001	W 3	+1.50M	00.90-09.75M	1720.25
.....	232 D3.7 002	W 3	+1.50M	10.20-15.00M	1715

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.	HOEHE (M NN)
——·—·	233 D3.9 003	W 3	+1.50M	15.45-19.50M	1710.5
——··——	234 D3.11 004	W 3	+1.50M	19.95-22.05M	1707.95

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.
———	529 DA1.1-3 Ø11	W 1	-1.00 M	00.80- 7.65M
– – – –	530 DA1.5 Ø12	W 1	-1.00 M	08.10-12.20M
·····	531 DA1.8 Ø13	W 1	-1.00 M	12.65-15.45M

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.
——·——	532 DA1.10 Ø14	W 1	-1.00 M	15.90-18.65M
——··——	533 DA1.4-1 Ø15	W 1	-1.00 M	19.10-22.10M

gsf Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

DRUCKAUFBAUMESSUNGEN IN W1

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 6.4

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.
———	534 DA2.1-3 Ø21	W 2	-4.00 M	00.80- 2.10M
- - - -	535 DA2.1 Ø22	W 2	-4.00 M	02.55- 5.60M
·····	536 DA2.5 Ø23	W 2	-4.00 M	06.05-10.60M

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.
——·——	537 DA2.8 Ø24	W 2	-4.00 M	11.05-15.85M
——··——	538 DA2.11 Ø25	W 2	-4.00 M	16.30-18.90M
——•——	539 DA2.5-1 Ø26	W 2	-4.00 M	19.35-22.05M

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40

DRUCKAUFBAUMESSUNGEN IN W2

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 6.5

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.
———	540 DA3.1-4 031	W 3	+1.50 M	00.85- 9.70M
– – – –	541 DA3.6 032	W 3	+1.50 M	10.15-15.95M
.....	542 DA3.8 033	W 3	+1.50 M	15.40-19.45M

KURVE	NR. MESSTELLE	MQ	ABSTAND Z H1	TEUFE V.- B.
——·——	543 DA3.3-1 034	W 3	+1.50 M	19.95-22.05

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
Institut für Tieflagerung

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 88-40**

DRUCKAUFBAUMESSUNGEN IN W3

Felslabor Grimsel

DAT.:

BEILAGE 6.6