

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 89-25

NACHWEIS VON TEKTONISCHEN STÖRUNGEN IN 2 BODENGAS- PROFILIEN IN DER NORDSCHWEIZ

M. AMMANN¹⁾
F. SCHENKER²⁾

DEZEMBER 1989

¹⁾ Geologiebüro Dr. J.F. Schneider + Dr. F. Matousek, Baden

²⁾ GEMAG, AG für geologisch-physikalische Messungen, Alberswil

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Der Autor hat seine eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

Le présent rapport a été préparé sur demande de la Cédra.
Les opinions et conclusions présentées sont celles de l'auteur et ne correspondent pas nécessairement à celles de la Cédra.

This report was prepared as an account of work sponsored by Nagra.
The viewpoints presented and conclusions reached are those of the author(s) and do not necessarily represent those of Nagra.

ZUSAMMENFASSUNG

Nachweis von tektonischen Störungen in 2 Bodengasprofilen in der Nordschweiz

Im Tafeljura östlich von Basel wurde in einer Feldkampagne an zwei Bodengasprofilen von je ca. 1.3 km Länge die Möglichkeit des geochemischen Nachweises von Störungen mittels Bodengasen getestet. Ziel war abzuklären, inwieweit Gas-Mehrkomponentenanalysen entlang von Messprofilen das rasche Auffinden von Störungen im Feld erlauben. Zudem sollten für ähnliche Fragestellungen Erfahrungen gesammelt und das Vorgehen optimiert werden.

Der Bericht gibt einleitend Hinweise über Entstehungsort und Herkunft der wichtigsten Bodengase. Anschliessend werden das Prinzip des Feldversuchs, die Messmethodik und die Messgeräte beschrieben. Breiter Raum wird der Resultatdarstellung, der Diskussion und Quervergleichen zu Literaturdaten eingeräumt.

Die Bodengasprofile sind quer zur Rheinfelder Verwerfung (Bodengasprofil Rheinfelden) und zur Zeiningen Störungszone (Bodengasprofil Zeiningen) angelegt worden, die beide regionalen Charakter haben und Versetzungsbeträge (dip slip) von einigen hundert Metern zeigen. An der Erdoberfläche sind keine geomorphologischen Hinweise für rezente Bewegungen an den beiden Störungen bekannt, obwohl neotektonische Aktivität im Gebiet Rheinfelden-Zeiningen wahrscheinlich ist.

Die Gasproben wurden durch eine einrammbare Sonde gewonnen. In beiden Profilen wurden vorerst in festem Messpunktabstand von 100 Meter Proben entnommen (= unverdichtete Bodengasprofile). In einem weiteren Schritt konnten die festgestellten Gasanomalien durch Bodengasentnahmen an Zwischenpunkten eingeengt werden, was zu den verdichteten Bodengasprofilen führte.

Die Untersuchungen umfassten die Ermittlung der Konzentrationen folgender Gase: Kohlenwasserstoffe von C₁ (Methan) bis C₅ (Pentan), CO₂, He, H₂, N₂, und O₂. Diese Messungen erfolgten mittels zweier Gaschromatographen in einem einfachen Feldlabor. Zusätzlich wurde der Gehalt an H₂S in der Bodenluft in einem Schnellverfahren ermittelt (Drägerröhrchen), ebenso die Aussentemperatur und die Temperatur im Rammloch in ca. 1.2 Meter Tiefe. Der Gehalt an Rn (Radon) wurde entlang beider Profile mittels α -Cups (= Filme, die die auftreffende α -Strahlung über mehrere Wochen aufzeichnen) bestimmt. Um Hinweise über die Herkunft der Kohlenwasserstoffe und des CO₂ zu erhalten, wurden an einem Messpunkt im Bereich der Rheinfelder Verwerfung Proben für Isotopenanalysen entnommen.

Die Untersuchungen zeigten, dass sich mit dem gewählten Vorgehen die wichtigsten bekannten Störungen gut lokalisieren liessen. Zudem konnten einige vermutete Störungen bestätigt und weitere erstmals entdeckt werden. Für den Störungsnachweis erwiesen sich vor allem die Gase CH₄, C₂ bis C₅, H₂ und die Gasverhältnisse CO₂/O₂ und N₂/O₂ als diagnostisch wichtig. Die Konzentrationen der diagnostisch vermutlich ebenfalls wichtigen Gase He und H₂S lagen leider durchgehend unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenzen (10 resp. 1 ppm).

Sofern das vollständige detaillierte Störungsinventar eines Gebietes erfasst werden soll und auch Erkenntnisse über den lateralen Verlauf der Strukturen gewonnen werden sollen, ist die Vernetzung vieler Bodengasprofile nötig. Für derartige Anwendungen scheint das in diesem Bericht gezeigte Verfahren relativ aufwendig. Es könnte aber während umfangreicherer Erkundungsaufträge laufend an die neu gewonnenen Erkenntnisse angepasst werden und damit der Aufwand minimalisiert werden. Obwohl allgemein die besten Resultate bei der Kombination möglichst vieler Gase zu erwarten sind, könnte durch Vorversuche in einem Gebiet unter bestimmten Voraussetzungen (lithologische Homogenität, gleiche Störungstypen, etc.) auch die Anzahl der gemessenen Parameter gezielt verkleinert werden.

RESUME

Nord de la Suisse: identification d'accidents tectoniques le long de deux profils de gaz du sol

Dans le Jura tabulaire à l'est de Bâle, on a testé, sur deux profils de 1,3 kilomètre de long environ chacun, la possibilité d'identifier par la géochimie, au moyen de gaz du sol, des accidents tectoniques. Il s'agissait de déterminer si des analyses de gaz à plusieurs composantes sont adaptées à la mise en évidence rapide d'accidents tectoniques et d'optimiser les méthodes de mesure.

En introduction, le rapport donne des informations sur l'origine des gaz du sol les plus importants. Il décrit ensuite le principe de l'essai sur le terrain, la méthode ainsi que les instruments de mesure. Il réserve enfin une grande place à la présentation des résultats, à la discussion et aux comparaisons des données bibliographiques.

Les profils de gaz du sol ont été placés à travers la faille de Rheinfelden (profil de Rheinfelden) et la zone d'accidents de Zeiningen (profil de Zeiningen). Toutes deux présentent un caractère régional ainsi que des rejets inclinés (dip slip) de quelques centaines de mètres. D'éventuelles indications géomorphologiques de mouvements récents des deux accidents ne sont pas connues, bien qu'une activité néotectonique dans la région de Rheinfelden/Zeiningen soit probable.

Les échantillons de gaz ont été prélevés à l'aide d'une sonde de pénétration. On a d'abord prélevé sur les deux profils des échantillons distants de 100 mètres les uns des autres (= profils non concentrés). Au cours d'une étape ultérieure, on a pu mieux cerner les anomalies de gaz constatées par le biais de prélèvements de gaz sur des points intermédiaires.

Les analyses de gaz ont comportées la recherche des concentrations des composantes suivantes: hydrocarbures de C₁ (méthane) à C₅ (pentane), CO₂, He, H₂, N₂ et O₂. Ces mesures ont été faites à l'aide de deux chromatographes à phase gazeuse, dans un simple laboratoire de terrain. La teneur en H₂S a pu être déterminée par une méthode rapide (Dräger). Parallèlement, aussi bien la température de l'air que celle du fond de trou, à une profondeur de 1.2 mètres, ont été mesurées. La teneur en Rn (radon) a été déterminée le long des deux profils, au moyen de α -cups (= films qui enregistrent, pendant plusieurs semaines, le rayonnement alpha rencontré). Pour avoir des informations sur l'origine des hydrocarbures et du CO₂, on a prélevé des échantillons pour des analyses isotopiques, en un point de mesure situé dans la zone de la faille de Rheinfelden.

Les analyses ont montrées que la méthode choisie permettait de bien localiser les accidents connus les plus importants. De plus, quelques accidents présumés ont pu être confirmés et d'autres découverts pour la première fois. Pour identifier les accidents, ce sont surtout les gaz CH₄, C₂ à C₅, H₂ et les rapports CO₂/O₂ et N₂/O₂

qui se sont avérés avoir une importance diagnostique. Les concentrations de gaz He et H₂S, auxquels on attache aussi une importance diagnostique, sont malheureusement constamment restées inférieures aux limites d'identification (10, respectivement 1 ppm).

Dans la mesure où l'inventaire détaillé complet des accidents d'une région doit être dressé et qu'il faut avoir des résultats sur le tracé latéral des structures, l'interconnexion de nombreux profils de gaz du sol est nécessaire. La méthode dont il est question dans ce rapport semble relativement longue et coûteuse pour ce genre d'application. Mais elle pourrait être sans cesse adaptée aux nouveaux résultats obtenus, ne serait-ce qu'au cours d'autres recherches plus vastes, ce qui minimiserait la dépense. Bien qu'il faille généralement escompter les meilleurs résultats lorsqu'on dispose de la combinaison du plus grand nombre de gaz possible, des essais préliminaires réalisés dans une région dans certaines conditions (homogénéité lithologique, accidents de même type, etc.) pourraient permettre de diminuer, de manière systématique, également le nombre des paramètres mesurés.

ABSTRACT

Identification of tectonic disturbed zones in 2 soil gas profiles from Northern Switzerland

In the Tabular Jura east of Basel, a field campaign using two soil gas profiles each 1.3 km long was carried out to investigate the possibility of geochemical identification of disturbed zones using gases in the soil. The aim was to clarify to what extent multicomponent gas analyses along measurement profiles could be used for rapid identification of disturbed zones in the field. The exercise was also intended to provide relevant experience in approaching similar problems and to allow optimisation of test procedures.

By way of introduction, the report gives information on the origin and place of production of the most important soil gases and then goes on to explain the principle of the field experiment and the measurement techniques and equipment used. The results are then presented, together with a discussion and a cross-comparison with the literature data.

The soil gas profiles are at right angles to the Rheinfelden fault (Rheinfelden soil gas profile) and to the Zeiningen disturbed zone (Zeiningen soil gas profile); both these features have a regional character and a dip slip of several hundred metres. There are no geomorphological indications at the earth's surface of recent movements associated with these two disturbed zones, although there is probably neotectonic activity in the Rheinfelden-Zeiningen area.

The gas samples were taken using a push-in probe. Samples were initially taken for both profiles at fixed points 100 m apart (= low-density gas profiles). In a further stage, the gas anomalies determined could be narrowed down by sampling at points in between, resulting in high-density gas profiles.

The gas investigations involved determining concentrations of the following components: hydrocarbons from C₁ (methane) to C₅ (pentane), CO₂, He, H₂, N₂ and O₂. The measurements were made using two gas chromatographs in a simple field laboratory. The H₂S content of the air in the soil was also determined using a rapid method (Drägergerührchen); the external temperature and the temperature at a depth of around 1.2 m were also measured. The radon (Rn) content was also determined along the two profiles using α -cups consisting of plastic films which register the α -radiation over a period of several weeks. Information on the origin of the hydrocarbons and the CO₂ was obtained by taking samples for isotope analysis from one measurement location in the vicinity of the Rheinfelden fault.

The investigations show that the most important known disturbed zones can be charted well using the selected procedure. In addition to this, the presumed existence of some disturbed zones could be confirmed and others were discovered for the first time. The gases CH₄, C₂ to C₅, H₂ and the gas ratios CO₂/O₂ and N₂/O₂ proved to be particularly important for identifying disturbed zones. The concen-

trations of the gases He and H₂S, which are presumably also important from a diagnostic point of view, were unfortunately always below the detection limits (10 and 1 ppm respectively).

If a complete detailed inventory of disturbed zones in an area is to be drawn up and information on the lateral extent of the structures is to be obtained, it would be necessary to have a network of several gas profiles but the procedure described in this report would seem to be somewhat costly for this type of application. However, it could be continually adapted during extensive reconnaissance exercises to take account of new information, thus minimizing the cost involved. Although the best results are to be expected with a combination of as many different gases as possible, preliminary tests in an area carried out under certain conditions (lithological homogeneity, similar types of disturbance, etc.) could reduce the number of measured parameters.

INHALTSVERZEICHNISSeite

	ZUSAMMENFASSUNG	I
	RESUME	III
	ABSTRACT	V
	INHALTSVERZEICHNIS	VII
	VERZEICHNIS DER BEILAGEN	IX
	VERZEICHNIS DER DATENBLÄTTER IM ANHANG	IX
	VERZEICHNIS DER FIGUREN IM TEXT	X
	VERZEICHNIS DER TABELLEN IM TEXT	XI
1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN FÜR DIE GEOCHEMISCHE KARTIERUNG VON STÖRUNGEN UNTER DECKSCHICHTEN	2
2.1	Allgemeines	2
2.2	Voraussetzungen für den Nachweis von Störungen	2
2.3	Auftretende Bodengase	4
3	PRINZIP DES FELDVERSUCHS	8
3.1	Ziel und Fragestellung	8
3.2	Gebietsauswahl	8
3.3	Vorgehen	9
3.4	Auswahl der Messparameter	10
4	METHODIK	12
4.1	Probeentnahme	12
4.2	Analytik	15
5	RESULTATE UND GEOLOGISCHE INTERPRETATION	18
5.1	Bodengasprofil Rheinfelden (Rheinfelder Verwerfung)	18
5.1.1	Kurzübersicht	18
5.1.2	Geologische Situation	18
5.1.3	Messprofilauslage und Messpunktabstände	20
5.1.4	Messresultate und geologisch-strukturelle Deutung	20
5.1.5	Isotopen	22

5.2	Bodengasprofil Zeiningen (Zeiningen Störungszone)	26
5.2.1	Kurzübersicht	26
5.2.2	Geologische Situation	26
5.2.3	Messprofilauslage und Messpunktabstände	27
5.2.4	Messresultate und geologisch-strukturelle Deutung	28
6	DISKUSSION	32
6.1	Natürliche Schwankungen der Bodengaskonzentrationen an einem Messpunkt	32
6.2	Folgerungen für die Interpretation	34
6.3	Summarische Ergebnisse beider Bodengasprofile und Vergleich mit Literaturdaten	35
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	39
7.1	Beurteilung der Resultate	39
7.2	Ausblick auf weitere Einsatzmöglichkeiten	40
7.2.1	Lokale Kartierung des Verlaufs bekannter oder vermuteter Störungen	40
7.2.2	Suche nach unbekanntem Störungen	40
	LITERATURVERZEICHNIS	42
	ANHANG	47

VERZEICHNIS DER BEILAGEN

1	Unverdichtetes Bodengasprofil Rheinfeldern 1:12'500
2	Verdichtetes Bodengasprofil Rheinfeldern 1:12'500
3	Unverdichtetes Bodengasprofil Zeiningen 1:12'500
4	Verdichtetes Bodengasprofil Zeiningen 1:12'500
5	Daten Standardpunkt Rheinfeldern
6	Daten Standardpunkt Zeiningen

VERZEICHNIS DER DATENBLÄTTER IM ANHANGSeite

1	Daten Bodengasprofil Rheinfeldern	AI
2	Daten Standardpunkt Bodengasprofil Rheinfeldern (Messpunkt Nr. 50)	AI
3	Daten Doppelmesspunkte Bodengasprofil Rheinfeldern	AII
4	Daten Bodengasprofil Zeiningen	AII
5	Daten Standardpunkt Bodengasprofil Zeiningen (Messpunkt Nr. 105)	AIII
6	Daten Doppelmesspunkt Bodengasprofil Zeiningen	AIII
7	Erläuterungsblatt zur Radon-Messung	AIV

<u>VERZEICHNIS DER FIGUREN IM TEXT</u>		<u>Seite</u>
1	Migration von Bodengasen	3
2	Vereinfachtes Schema zur Herkunft der Bodengase	6
3	Geografische Lage der zwei Bodengasprofile	9
4	Geologisch-tektonische Lage der zwei Bodengasprofile Rheinfeldern und Zeiningen	10
5	Bodengas-Entnahme an einem Messpunkt	13
6	Korrelation zwischen der Temperatur T_b im Rammloch und der Aussentemperatur T_a (Bodengasprofil Zeiningen)	14
7	Bestimmung der Gaskonzentrationen im Feldlabor	16
8	Lage der Bodengasprobe Rheinfeldern Punkt Nr. 50 (RHE) im $\delta D/\delta^{13}C$ -Diagramm nach WHITICAR et al. (1986)	23
9	Lage der Bodengasprobe Rheinfeldern Punkt Nr. 50 (RHE) im $\delta^{13}C/(C_1/C_2+C_3)$ -Diagramm nach WHITICAR et al. (1986)	24
10	Korrelation O_2-CO_2 der Messwerte im Bodengasprofil Zeiningen	29
11	Korrelation $CH_4-(\Sigma C_2-C_5)$ der Messwerte im Bodengasprofil Zeiningen	30
12	Korrelation $CH_4-(\Sigma C_2-C_5)$ der Messwerte im Bodengasprofil Zeiningen (ohne Messpunkt Nr. 45)	30

VERZEICHNIS DER TABELLEN IM TEXTSeite

1	Mittlere Zusammensetzung der Atmosphäre und gemessene Bodengaskonzentrationen (Minima/Maxima)	14
2	Chromatographen-Konfiguration für den Gasnachweis und untere Nachweisbarkeitsgrenzen	15

Stichworte:

Bodengas, Gaschromatografie, Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe, Radon, Rheinfelden, Sauerstoff, Schweiz, Stickstoff, Störung, Tafeljura, Tiefengas, Verwerfung, Wasserstoff, Zeiningen

1 EINLEITUNG

Ferner achten wir beim Aufsuchen von Gängen auf den Reif, von dem alle Gräser weiss werden mit Ausnahme der über Gängen wachsenden. Denn die Gänge strömen Wärme und Trockenheit aus, die das Bereifen des feuchten Grases verhindern..

"De Re Metallica"- Georg AGRICOLA, 1556

Konzentration und Zusammensetzung der im Boden befindlichen Gase variieren sehr stark. Die Unterschiede sind durch Entstehung und Herkunft bedingt und stehen in Zusammenhang mit geochemischen und biochemischen Vorgängen im Untergrund. Diese Tatsache machen sich verschiedene Anwendungsmöglichkeiten von Bodengasuntersuchungen zu Nutze, so zum Bsp. zur Auffindung von Kohlenwasserstoff-Vorkommen (bspw. McIVER 1984), für die Erdbebenvorhersage (bspw. LÖSER 1959, ERNST 1970, REIMER 1985, HIRABAYASHI et al. 1986), für die geochemische Kartierung von Strukturelementen unter quartärer Überdeckung (bspw. ERNST 1968, SATO et al. 1986), für das Auffinden von Thermalwässern (bspw. BALL & CLARKE 1988) und für vulkanologische Fragestellungen (bspw. SUGISAKI 1985, THOMAS et. al. 1986). In neuerer Zeit ergaben sich auch Anwendungen im Zusammenhang mit Umweltschutz und Umweltunfällen, da in den Untergrund absichtlich oder unabsichtlich eingebrachte Fremdstoffe die Bodengasverhältnisse wesentlich verändern können.

Das Ziel der Nagra war es abzuklären, ob sich Bodengasmessungen zur Störungsauffindung im Bereich der Nordschweiz eignen. Im Gegensatz zu älteren Arbeiten mit ähnlicher Fragestellung (ERNST 1969b, 1971) sollte in einer Messkampagne aber versucht werden, Mehrkomponentenanalysen vor Ort auszuführen. Ziel war insbesondere, Aussagekraft der Resultate und Flexibilität des Feldbetriebs während der Störungssuche zu testen.

Im Tafeljura bei Rheinfeldern und Zeiningen wurden zwei Messprofile ausgelegt. Da die Untersuchungen als Testlauf zu verstehen sind, wurde für die Feldkampagne absichtlich ein Gebiet ausgewählt, wo der Verlauf der Störungen relativ gut bekannt ist. Die Feldarbeiten wurden durch die Firma GEMAG (Alberswil) in Zusammenarbeit mit Vertretern der Nagra in der Zeit vom 8. bis 18. August 1988 ausgeführt.

Die Nagra dankt den kantonalen und kommunalen Behörden und den Landbesitzern für die freundliche Erlaubnis für die Ausführung dieser Untersuchungen.

2 GRUNDLAGEN FÜR DIE GEOCHEMISCHE KARTIERUNG VON STÖRUNGEN UNTER DECKSCHICHTEN

2.1 Allgemeines

Das Festgestein ist meist von einer Lockergesteinsschicht und der Kulturerde (= Bodenschicht) bedeckt. In jeder dieser 3 Einheiten können Gase gebildet werden (autochthone Gase). Zudem findet zwischen diesen Einheiten und auch mit der Atmosphäre ein kontinuierlicher Gasaustausch gemäss dem Druckgefälle statt, was zu einer Durchmischung der autochthonen mit allochthonen (= zugeführten) Gasen in den Deckschichten führt.

Gase migrieren durch den kommunizierenden Porenraum, Klüfte, Spalten und Risse. In wassergesättigten Bereichen benützen sie dieselben Migrationswege wie das Grundwasser (als freie, gelöste oder chemisch gebundene Gase), können aber zusätzlich Gesteine durchdringen, die für Wasser praktisch undurchlässig sind.

Für die durchgeführten Untersuchungen sind jene allochthonen Gase von Interesse, die aus dem Festgestein entlang Zonen höherer Durchlässigkeit in die Deckschichten aufsteigen. Der Gasaustausch zwischen Festgestein und Lockergestein ist dort wesentlich erhöht, wo das Festgestein durch spröde Beanspruchung permeabler wurde. Über dem Ausbiss solcher Zonen (=Störungen) kann sich im Lockergestein durch die mögliche erhöhte Gasmigration eine Gasanomalie bilden und so eine Störung angezeigt werden. Die störungsverursachten Anomalien können aber verschleiert werden durch die Immigration atmosphärischer Gase in die Deckschichten, durch intensive autochthone Gasproduktion in der Kulturerde oder durch Beeinflussung des natürlichen Gashaushaltes durch Deponien oder Lecks in Gasleitungen.

Die Proben müssen aus über 1 Meter Tiefe entnommen werden, um die aufgezählten Einflüsse (v.a. Austausch mit Atmosphäre und Gasneubildung in der Kulturerde) gering zu halten.

2.2 Voraussetzungen für den Nachweis von Störungen

Damit Störungen im Festgestein mittels Bodengasmessungen eruiert werden können, müssen folgende **Voraussetzungen** erfüllt sein:

- der Idealfall bildet eine Störung (oder Störungszone), in der die Gasdurchlässigkeit höher als im Nebengestein ist (Fig. 1a).

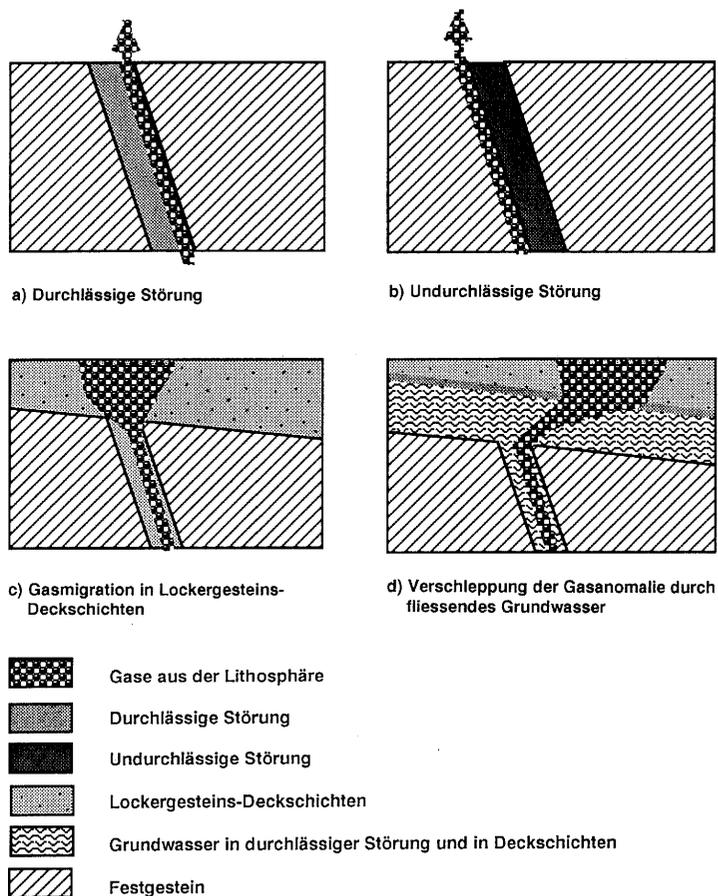


Fig. 1: Migration von Bodengasen

- Störungen können aber aufgrund von schlechtpermeablen Füllungen (z.B. Tonmineralharnische, rekristallisierte Kataklastite) für den Transport flüchtiger Phasen undurchlässig sein. Da tonarmes Nebengestein entlang von Störungen aufgrund von Sekundärbewegungen (bspw. kleinräumliche Schichtschleppungen, Öffnung von Klüften) z.T. permeabler wird, sind hier mögliche Aufstiegswege für Gase gegeben (Fig. 1b). Aufgrund wechselnder Faziesverhältnisse kann es im Nebengestein der Störung aber auch zur Bildung von Gasfallen kommen. In diesem Falle kann die Störung an der Erdoberfläche nicht oder nur aufgrund einer "Restmigration" nachgewiesen werden.
- es muss ein gegen die Erdoberfläche gerichteter Gasflux bestehen. Die Gase können dabei auch durch Grundwasser in freier oder gebundener Form transportiert werden.

- es sollte eine Deckschicht über dem Ausbiss der Störung liegen, in der sich eine Gasanomalie ausbreiten kann und die die sofortige Vermischung mit der Atmosphäre verhindert. Der Aufbau der Deckschicht umfasst im Idealfall eine gut durchlässige Lockergesteinsschicht mit auflagernder toniger Bodenschicht. Störungen im Festgestein bilden meistens flächenhafte permeable Zonen. Mit dem Übergang der Gase aus einer Störungsfläche zum Lockergestein ändern die hydraulischen Eigenschaften und es kommt im Allgemeinen zu einer keilförmigen Migration der Gase in der neuen Umgebung, weil das neue Medium meistens eine höhere Permeabilität in allen Richtungen aufweist. Durch die keilförmige Migration der Gase im Lockergestein wird die räumliche Ausdehnung einer Anomalie an der Erdoberfläche vergrößert und die Konzentrationsspitzenwerte werden verkleinert, wobei diese Effekte mit der Mächtigkeit der Deckschicht zunehmen (Fig. 1c).
- Die Störung muss Gesteine durchschlagen, aus denen Gase ausströmen können, die in ihrem Aufbau und/oder in ihrer Konzentration vom Gasgehalt des auflagernden Lockergesteins unterschiedlich sind.
- durch fließende Grundwässer kann die aus der tektonischen Störung austretende Gasfahne transportiert werden. Die Anomalie in der Bodenluft entspricht dann nicht mehr der Lage des Ausbisses der tektonischen Störung (Fig. 1d). Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit des Grundwasserstromes sollten für eine detaillierte Interpretation also bekannt sein.
- eine weitere Voraussetzung ist, dass der Probeentnahmeort über eine minimale Permeabilität verfügt. Aus Erfahrung kann bei sehr tonreichen Böden die Probeentnahme oft langwierig sein, und das optimale Probenvolumen von ca. 250 ml kann in Tonen häufig nicht erhalten werden.

2.3 Auftretende Bodengase

Eine Luftprobe aus dem wasserungesättigten Porenraum des Bodens (Humus, Kies, Sand, etc.) ist ein Gasgemisch, dessen einzelne Komponenten sich im Ablauf von sehr unterschiedlichen Prozessen gebildet haben können. Es treten vor allem Kohlenwasserstoffe, H_2 , He, Ar, O_2 , N_2 , CO_2 und $H_2O_{\text{gasförmig}}$ auf. Die Gaszusammensetzung im Boden kann aber wesentlich durch den Menschen verändert sein (Verunreinigung mit leichtflüchtigen Stoffen, gasförmige Zerfallsprodukte aus Deponien, etc.).

Hinweise auf die Herkunft der Gase ergeben sich aus dem Aufbau und der Isotopenzusammensetzung des Gasgemisches.

Im folgenden (vgl. Schema Fig. 2) wird kurz auf die wichtigsten Entstehungsvorgänge und Entstehungsorte der für die Messungen ausgewählten einzelnen Bodengase eingegangen.

Der wichtigste Prozess zur Bildung von **Kohlenwasserstoffen** (CH_4 , C_2 - C_5) in der Lithosphäre ist die thermokatalytische Reifung von organischem Material in sedimentären Gesteinen. Thermische Gase können sowohl aus rezent aktiven Muttergesteinen wie auch aus undichten Kohlenwasserstoff-Lagerstätten an die Oberfläche migrieren. In Abhängigkeit von der Reife der Lagerstätte treten neben Methan auch höhere Alkane (bis 8 Vol.%) und mit stark unterschiedlichen Anteilen auch Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserstoff, Helium und auch Schwefelwasserstoff auf. Häufig oxidieren solche Gase im Verlauf ihrer Migration an die Erdoberfläche oder werden durch biologische Prozesse verändert.

Kohlenwasserstoffgase können auch durch Fermentation von organischem Material oder bakterielle Reduktion von Kohlenoxiden entstehen. Aus beiden Prozessen ist die Produktion von höheren Kohlenwasserstoffgasen gering.

Bei der Reduktion nutzen einige Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen CO_2 und andere Oxidanten (SO_4^{--} , NO_2 , etc.) zur Deckung ihres Energiebedarfs. Dabei entstehen reduzierte Substanzen wie Methan oder Sauer gas (H_2S). Höhere Kohlenwasserstoffe werden dabei nicht oder nur in sehr geringen Mengen produziert. Hinweise auf Reduktionsgase in der Bodenluft ergeben sich bei fehlendem oder sehr geringem Sauerstoffgehalt und dem Vorhandensein von H_2S .

In vulkanischen und plutonischen Prozessen bildet **Kohlendioxid** (CO_2) nach Wasserdampf die häufigste flüchtige Phase (WYLLIE 1979). In Gebieten mit aktivem Magmatismus, aber auch in rezent nicht mehr aktiven Gebieten mit hohem Wärmefluss kann magmatisches Kohlendioxid entlang von Bruchsystemen an die Oberfläche migrieren (Auvergne, Eifel, Rheingraben). So hat das zusammen mit Thermalwasser in den Störungszonen am Ostrand des Oberrheingrabens auftretende CO_2 nach SCHMASSMANN et al. (1984) magmatischen Ursprung.

CO_2 entsteht auch bei der thermischen Zersetzung von organischem Material in Sedimenten. Bei der Kohlereifung wird neben Methan auch CO_2 produziert. Auch die Metamorphose von karbonatischen Gesteinen führt zu grossen Mengen von CO_2 . Ein Teil dieses CO_2 (und anderer Gase) kann in fluiden Mineraleinschlüssen gespeichert werden. Bei tektonischer Aktivität können diese Einschlüsse, welche meist unter hohen Drucken stehen, geöffnet werden und zu Gasanomalien über Störungen führen (SCHENKER & VUICHARD 1988).

Helium (He) in der Erdkruste ist zum überwiegenden Anteil ein Produkt der Uran- und Thorium-Zerfallsreihe. Als leichtestes Edelgas ist Helium geochemisch sehr mobil. Im Gegensatz zu Gasen wie Methan oder Kohlendioxid wird das inerte Helium nicht in biologische Prozesse miteinbezogen. Die erhöhte Migration von Helium entlang Störungszonen wird häufig zur Bestimmung der tektonischen Aktivität von Bruchzonen verwendet (SUGISAKI 1985).

Erhöhte **Wasserstoffkonzentrationen** (H_2) in der Bodenluft über tektonischen Störungen haben unter anderen WAKITA et al. (1980) und SATO et al. (1986) nachgewiesen. Die Herkunft des Wasserstoffs in vulkanischen Gebieten und in Riftzonen ist nicht eindeutig geklärt.

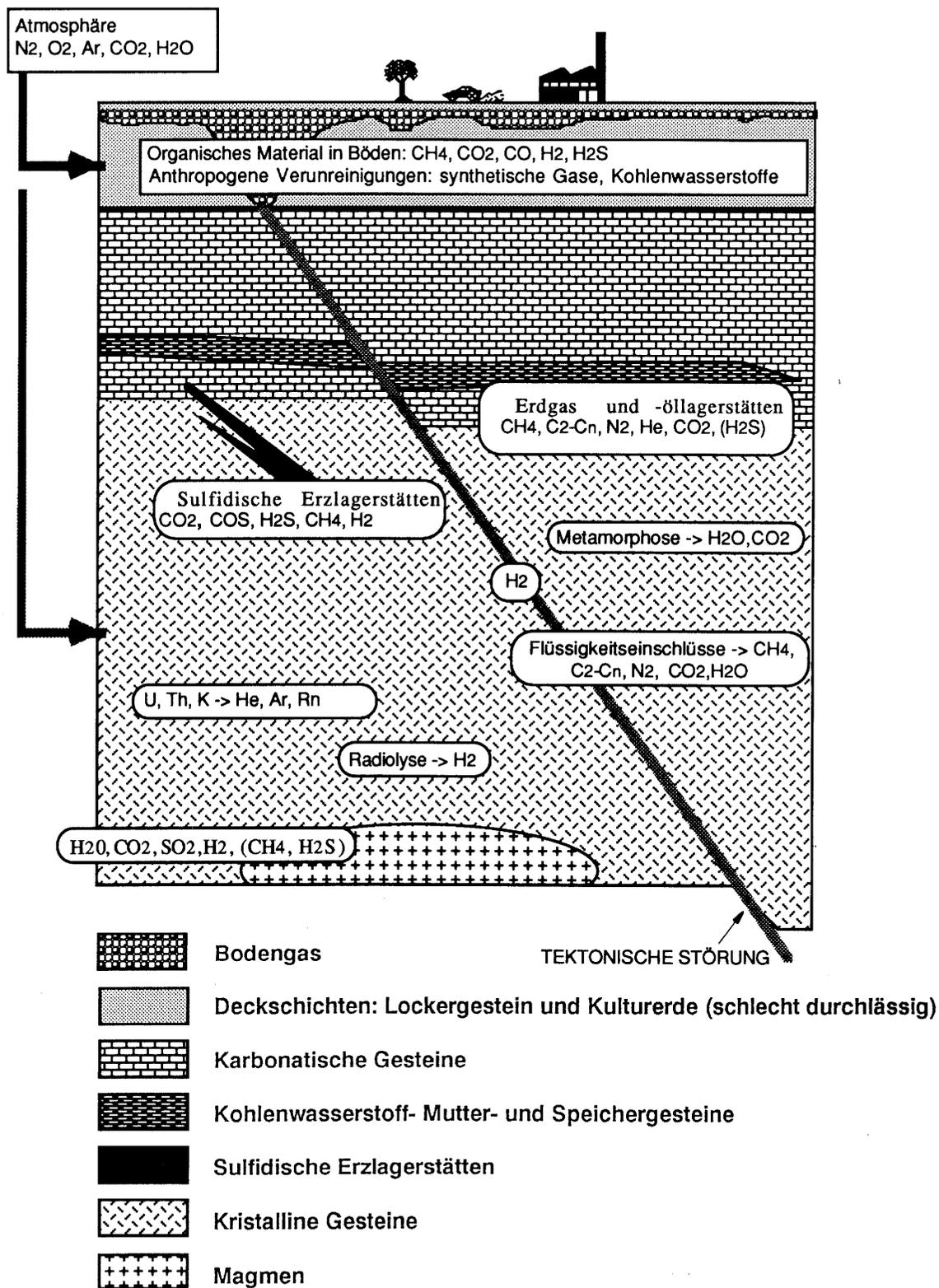


Fig. 2: Vereinfachtes Schema zur Herkunft der Bodengase

H₂ kann sowohl auf Mantelentgasung (SCHENKER & DIETRICH 1986) wie auch auf Freisetzung beim Zerreiben von Gestein entlang aktiver tektonischer Störungen zurückgeführt werden (WAKITA et al. 1980). H₂ kann in der Lithospäre auch durch Radiolyse von Wasser (VOVK 1987) und durch Oxydation von nieder- zu höherwertigen Metallionen in gesteinsbildenden Mineralen entstehen.

Radon (Rn) entsteht in der Erdkruste durch Zerfall von Uran und Thorium. Anomal hohe Radonkonzentrationen in Bodengasproben sind über Uranlagerstätten und über tektonischen Störungen gemessen worden (KING 1986 und darin zitierte Literatur).

Während der thermischen Reifung von organischem Material wird neben Kohlenwasserstoffen und CO₂ auch **Stickstoff** (N₂) produziert. In Erdgasen beträgt die durchschnittliche N₂-Konzentration ca. 3 Volumenprozent, kann aber bis 78 Volumenprozent erreichen (JENDEN et al. 1988). Stickstoff hat in der Atmosphäre eine Konzentration von 78,09 Vol.-%.

In der Erdölprospektion wird versucht, aus dem Anteil des N₂-Gehalts auf die Länge des Migrationsweges zwischen Mutter- und Speichergesteins zu schliessen, da N₂ wegen der im Vergleich kleinen Molekülgrösse während der Migration gegenüber den Kohlenwasserstoffen angereichert wird (HUNT 1979).

Molekularer **Sauerstoff** (O₂) entsteht geochemisch nur durch Photosynthese oder Photodissoziation. Daher dürfte O₂ in der Bodenluft ausschliesslich auf Austausch mit der Atmosphäre zurückzuführen sein.

Schwefelwasserstoff (H₂S) tritt in Oberflächennähe zusammen mit Methan und Kohlendioxid in Sumpfgasen auf, und auch in Gewässern mit Sauerstoffdefizit kann H₂S durch Reduktion von Sulfat entstehen. In grösserer* Tiefe entsteht Schwefelwasserstoff durch die Reaktion von Kohlenwasserstoffen mit Sulfaten, wobei auch grosse Mengen von Kohlendioxid freigesetzt werden, und bei der Oxydation von sulfidischen Erzen (vgl. Fig.3.1). In der Bodenluft kann erfahrungsgemäss nur in seltenen Fällen Schwefelwasserstoff gemessen werden, da in den obersten Bereichen des Bodens durch den Gasaustausch mit der Atmosphäre meist oxidierende Bedingungen herrschen, unter denen der Schwefelwasserstoff zu Schwefeloxiden umgewandelt wird.

3 PRINZIP DES FELDVERSUCHS

3.1 Ziel und Fragestellung

Bei der Suche nach Endlagermöglichkeiten für radioaktive Abfälle ist man auf möglichst umfassende Kenntnisse über den strukturellen Aufbau der Untergrundes angewiesen. Die Erfassung des Störungsmusters in einem Gebiete ist deshalb ein wichtiges Ziel. Aus geologischen Kartierungen lassen sich in gut aufgeschlossenen Gebieten erste Kenntnisse über den strukturellen Aufbau ableiten. Diese müssen aber je nach Problemstellung ergänzt werden durch:

a) Generelle Erkundung des geologischen Untergrundes, insbesondere Auffindung bisher unbekannter Störungen unter Quartärbedeckung. Dieses Ziel wird primär erreicht durch den Einsatz geophysikalischer Methoden. Prinzipiell ist auch eine geochemische Kartierung anhand von Bodengasuntersuchungen denkbar. Diese muss aber flächendeckend oder entlang eines Profilnetzes erfolgen.

b) Eingabelung des genauen Verlaufs bekannter Störungen oder Nachweis vermuteter Störungen unter Quartärbedeckung. Nebst geophysikalischer Erkundungsmethoden bieten sich hier die Bodengasuntersuchungen an. **Es ist das Ziel des Feldversuchs, diese Einsatzmöglichkeit der Bodengasuntersuchungen anhand zweier Beispiele zu testen.**

Das Ziel und die Fragestellung des Feldversuchs lassen sich wie folgt umreißen:

- ist die Erfassung wichtiger Störungen möglich ?
- können Begleitstörungen aufgefunden werden ?
- wie lässt sich das Verfahren im Feld optimieren ?
- welche Einschränkungen müssen bei der Anwendung der Methode in Kauf genommen werden ?
- günstiger Abstand der Messpunkte ?
- Einfluss von Quartär, Grundwasser, etc. ?
- Welche Messparameter fehlen, auf welche kann evtl. verzichtet werden ?

3.2 Gebietsauswahl

Es wurde als sinnvoll erachtet, diesen Feldversuch in einem Gebiet auszuführen, über dessen Aufbau bereits detaillierte Kenntnisse vorhanden sind. Im Tafeljura südlich des Rheins (Fig. 3 und 4) konnten zwei für die Fragestellung günstige Messgebiete gefunden werden. Diese Messgebiete enthalten Störungen mit extensivem Charakter, nämlich die **Rheinfelder Verwerfung** und die **Zeinger Störungszone**. Begleitende Verwerfungen sind wahrscheinlich, allerdings bestehen nur unsichere Angaben über ihre Lage. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Profilen (Charakterisierung in Ka-

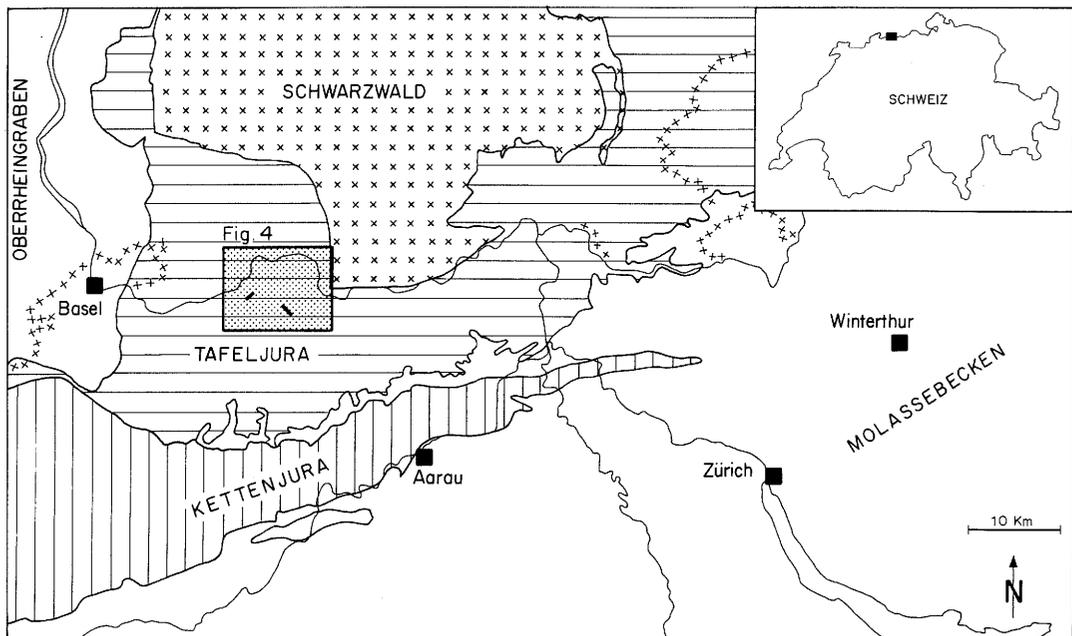


Fig. 3: Geografische Lage der zwei Bodengasprofile

pitel 4) besteht in der Quartärmächtigkeit, der Grundwassermächtigkeit, der topografischen Verhältnisse und der anstehenden oder unter Quartär liegenden Festgesteine.

3.3 Vorgehen

In jedem der beiden Messgebiete wurde je ein vertikal zu der Hauptstruktur verlaufendes Bodengasprofil ausgelegt.

Der Störungserkundung in den zwei Bodengasprofilen ist ein iteratives Verfahren zugrunde gelegt. Der Messpunktastand wurde dabei in einem ersten Schritt generell auf 100 Meter festgesetzt. Dieses erste Profil wird als **unverdichtetes Bodengasprofil** bezeichnet. Anhand der im Feld gewonnenen Resultate sollten gezielt weitere Messpunkte eingeführt werden und die Ausbisslinien der Strukturen dermassen eingengt werden. Dabei entsteht das **verdichtete Bodengasprofil**.

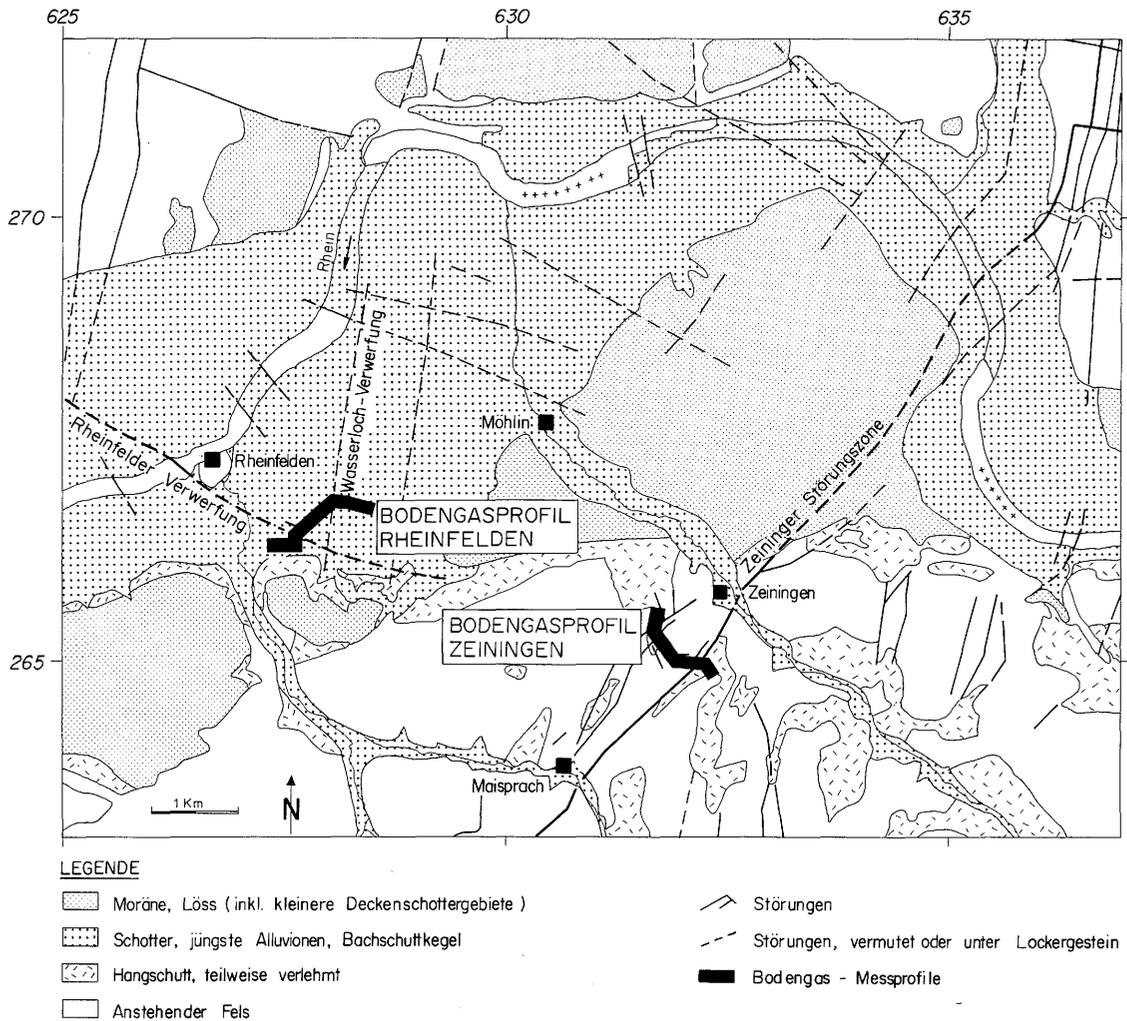


Fig. 4: Geologisch-tektonische Lage der zwei Bodengasprofile Rheinfelden und Zeiningen. Sie queren die Rheinfelder Verwerfung resp. die Zeinger Störungszone. Geologie und Tektonik nach HAUBER (1980), JÄCKLI & WYSSLING (1972), MÜLLER et al. (1984) und SUTER (1915)

3.4 Auswahl der Messparameter

In der Erdbebenvorhersage mittels Bodengasen versucht man die Gesetzmässigkeiten zwischen dem Auftreten von Erdbeben und Änderungen der Bodengaskonzentrationen zu ergründen (KING 1986). Im Umfeld von Störungsausschüssen wurden dabei Gasanomalien aufgefunden. Es schien deshalb angebracht, die in der Erdbebenvorhersage am häufigsten benutzten Komponenten H_2 , He und Rn für den Feldversuch einzu-

setzen. Weiter wurden die Komponenten CH_4 (Methan) und CO_2 ausgewählt, mit denen schon in anderen Anwendungen Störungen nachgewiesen werden konnten (z.B. ERNST 1970). Diese 5 Komponenten wurden ergänzt durch N_2 , O_2 , die höheren Kohlenwasserstoffe C_2 (Äthan) bis C_5 (Pentan) und H_2S . Da damit alle Hauptgasbestandteile ausser Ar, $\text{H}_2\text{O}_{\text{gasf.}}$ und NO_x erfasst sind, ist die Summe dieser drei Bestandteile ebenfalls indirekt als Komponente **Rest** ($\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}_{\text{gasf.}} + \text{NO}_x$) gegeben.

Um zusätzlich Aussagen über die Herkunft der Bodengase machen zu können, wurden zudem **Isotopenmessungen** an den Kohlenwasserstoffen CH_4 bis C_3H_8 ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^2\text{H}$) und an Kohlendioxid ($\delta^{13}\text{C}$) vorgenommen.

4 METHODIK

4.1 Probeentnahme

Es ist bekannt, dass die Konzentration und die Zusammensetzung der Bodengase durch verschiedene Einflüsse bestimmt werden. Einerseits besteht eine natürliche Austauschzone, in der sich aus der Tiefe aufsteigende Gase mit eindringenden atmosphärischen Gasen mischen. Während in den obersten 30 cm des Bodens nach Sokolow & Grigorjew 1966 (zitiert in ERNST 1970) ein intensiver Austausch zwischen Bodengasen und atmosphärischen Gasen erwartet werden muss, nimmt die Zumischung von atmosphärischer Luft gegen die Tiefe hin sehr schnell ab. Aufgrund von Untersuchungen findet GREGORY (1988b), dass Bodengasproben in Grossbritannien frühestens in einer Tiefe von 0.4 m unbeeinflusst sind von mikrobiell in der obersten Bodenschicht erzeugten Gasen und von Austausch mit der Atmosphäre. Zudem findet vor allem in den obersten Dezimetern der Bodenschicht rege biologische Aktivität statt, die zur Neubildung von Gasen führt (vor allem CO₂). Die Wahl der Entnahmetiefe ist deshalb ein Optimierungsproblem. Dabei steht dem gewünschten niedrigen Atmosphären-einfluss (und damit einer eindeutigeren Detektion der Gasaustrittsstellen) der je nach Untergrundbeschaffenheit grosse zeitliche Aufwand für die Niederbringung der Rammspitze in grössere Tiefe entgegen. In der ausgeführten Feldkampagne wurde die Rammspitze konstant bis in eine **Rammtiefe von 1.2 Meter** gerammt. In dieser Tiefe kann zwar die Zumischung atmosphärischer Gase nicht ausgeschlossen werden. Die bisherigen Resultate und Erfahrungen zeigten in dieser Tiefe aber Gaskonzentrationen, die grundsätzlich von den Konzentrationen in der Atmosphäre abweichen (vgl. Tab. 1).

Bei der Probeentnahme wird mit einem benzinbetriebenen Schlaghammer eine Stahlsonde (Durchmesser 2.54 cm) in den Boden getrieben. Durch eine spezielle Konstruktion ist es möglich, nach dem Erreichen der Probeentnahmetiefe durch Zurückziehen der Sonde um 3 cm einen Schlitz hinter der Rammspitze zu öffnen und damit eine Verbindung zwischen Bodenporenraum und Entnahmesystem zu schaffen. Das **Entnahmesystem** besteht aus einem durch die Sonde geführten Silikon-schlauch, an dem ein mit Ein- und Ausgangshahn versehener Glaszylinder (Gasmaus) befestigt wird. Das System wird mit Wasser gefüllt, bevor die Sonde eingeschlagen wird. Bei der Probeentnahme wird zunächst diese Wasservorlage durch Vakuum entfernt und Bodengas nachgesaugt (Fig. 5). Damit wird verhindert, dass bei der Probeentnahme Atmosphärenluft in die Probe gelangt. Die im Glaszylinder gespeicherte Bodenluft wird unmittelbar nach der Probeentnahme ins Feldlabor gebracht.



Fig. 5: Bodengas-Entnahme an einem Messpunkt.
Ein mit Wasser gefüllter Schlauch führt von der Rammspitze durch das Gestänge zu einer Gasmaus. Diese ist ihrerseits mit einer Pumpe verbunden. In der Pumpe wird ein Unterdruck erzeugt, wodurch das Bodengas durch den Schlauch in die Gasmaus einströmt.

Bei der Bodengasentnahme wird angestrebt, eine Probe aus einem bestimmten Niveau zu entnehmen, ohne die in dieser Tiefe vorhandene Gas-Konzentration zu verändern. Beim Einrammen der Rammspitze können kleinere Gerölle zerschlagen oder Gesteinsmaterial zerrieben werden. Aber auch wenn der Geröllporenraum ein im Boden nur in sehr geringer Konzentration vorhandenes Gas enthält (Bsp. CH_4), vermag die Zerschlagung mehrerer derartiger Gerölle das Messresultat nur bis höchstens 1 ppm zu verfälschen.

Das Absaugen der Bodengasluft erzeugt im Bodenraum einen lokalen Unterdruck. Dies hat Nachströmung von Gas zur Folge. Dabei spielt die Gaswegsamkeit des Umgebungsgesteins für den Gaszutritt eine wesentliche Rolle. Neue Zutrittswege könnten sich auch entlang der Grenzfläche zwischen Rammgestänge und Boden öffnen. Dass die entnommenen Bodengasproben im vorliegenden Fall nicht wesentlich durch Atmosphärenluft verunreinigt sind, zeigt eine Gegenüberstellung auf Tab. 1. Die entnommenen Gasproben weisen nämlich eine wesentlich von der Atmosphärenluft abweichende Zusammensetzung auf. Dies ist vor allem bei O_2 , CO_2 und H_2 zu beobachten. Alle Bodengasproben zeigen zudem eine um einige Grade tiefere Temperatur als die Aus-

	Untere Nachweisbarkeitsgrenze	Mittlere Atmosphären-Zusammensetzung	Minimum - Maximum		Standardpunkte Minimum/Maximum	
			Profil Rheinfelden	Profil Zeiningen	Profil Rheinf.	Profil Zeiningen
N ₂		78,09 %	76.55-80.13 %	73.38-78.78 %	76.55-78.43 %	75.82-78.78 %
O ₂		20.95 %	7.94-20.93 %	8.09-21.40 %	16.88-17.91 %	8.09-21.40 %
Ar*		0.93 %				
CO ₂	< 0.01 %	0.03 %	0.02-9.08 %	0.05-15.17 %	3.08-4.12 %	0.25-15.17 %
He	10 ppm	5.2 ppm	nn	nn	nn	nn
H ₂	1 ppm	0.5 ppm	nn-671 ppm	nn-122 ppm	34-289 ppm	nn-29 ppm
CH ₄	1 ppm	1.5 ppm	3-206 ppm	nn-126 ppm	71-206 ppm	2-10 ppm
C ₂ -C ₅	0.1 ppm		nn-21 ppm	nn-36 ppm	7-15 ppm	1-7 ppm
R _n			77.8-472.7 pCi/l	2.8-472.7 pCi/l	nur 1 Wert	nur 1 Wert

* nicht bestimmt (als Trägergas bei den Analysen benutzt)

nn Konzentration unterhalb der unteren Nachweisbarkeitsgrenze

Tab. 1: Mittlere Zusammensetzung der Atmosphäre (nach MASON 1976) und gemessene Bodengaskonzentrationen (Minima/Maxima)

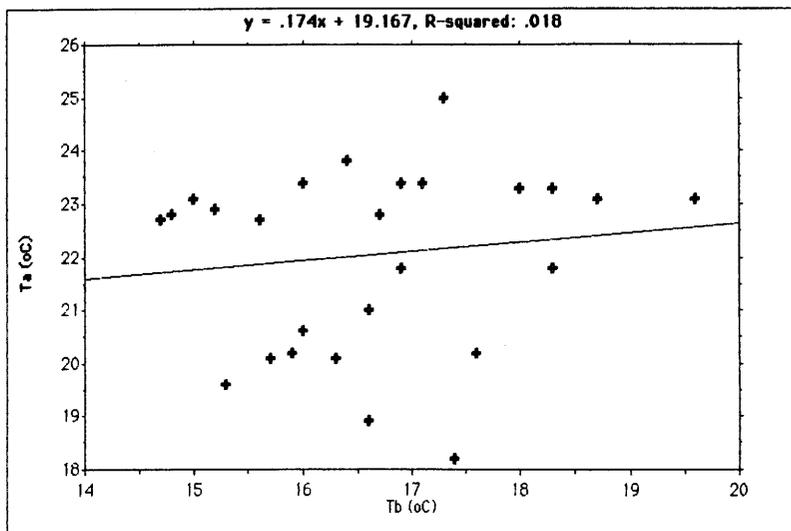


Fig. 6: Korrelation zwischen der Temperatur T_B im Rammloch (in ca. 1.2 m Tiefe, nach Rückzug des Rammgestänges) und der Ausstemperatur T_A (Bodengasprofil Zeiningen)

senluft auf (Fig. 6). Dies ist ein weiterer Hinweis, dass bei der Probeentnahme keine oder nur sehr wenig Aussenluft angesaugt wurde.

Eine Konzentrationsänderung durch die Entnahmegeräte oder durch den Transport der Gasmäuse bis zum Feldlabor kann ausgeschlossen werden.

Die Probeentnahme erforderte den Einsatz von zwei Arbeitskräften.

4.2 Analytik

Die Firma GEMAG führte die Messung der meisten erwähnten Komponenten im Felde mittels **Gaschromatographie** (vgl. LORBER et al. 1986) durch. Ausnahmen bilden die Komponenten Radon und Schwefelwasserstoff. Radon wurde indirekt durch Erfassung der **α -Strahlendosis** beim radioaktiven Zerfall gemessen. Spezialfilme (α -Cups) blieben während 73-79 Tagen in 30 cm Tiefe im Erdreich vergraben und wurden anschliessend nach einem Standardverfahren ausgewertet (vgl. Kommentar auf Datenblatt 7). Für den H_2S -Nachweis kamen Dräger-Röhrchen zum Einsatz. Das Dräger-Röhrchen wurde direkt nach der Abfüllung der Gasmäuse an das Entnahmesystem angeschlossen und mit einer Handpumpe Bodengas via Dräger-Röhrchen abgesaugt.

Die Messung der Aussentemperatur und des Luftdrucks wurden unmittelbar nach der Probeentnahme beim Entnahmeort durchgeführt. Die Bodenlufttemperatur wurde im leeren Rammloch nach Rückzug des Gestänges in ca. 1.2 m Tiefe gemessen.

Gas	Detektor	Trägergas	Säulentyp	Untere Nachweisbarkeitsgrenze
CH ₄	FID	N ₂	gepackt	1 ppm
C ₂ -C ₅	FID	N ₂	gepackt	0.1 ppm
O ₂	WLD	Ar	gepackt	0.5 Vol. %
N ₂	WLD	Ar	gepackt	2 Vol. %
CO ₂	WLD	He	gepackt	200 ppm
H ₂	WLD	Ar	gepackt	1 ppm
He	WLD	Ar	gepackt	10 ppm

Tab. 2: Chromatographen-Konfiguration für den Gasnachweis und untere Nachweisbarkeitsgrenzen

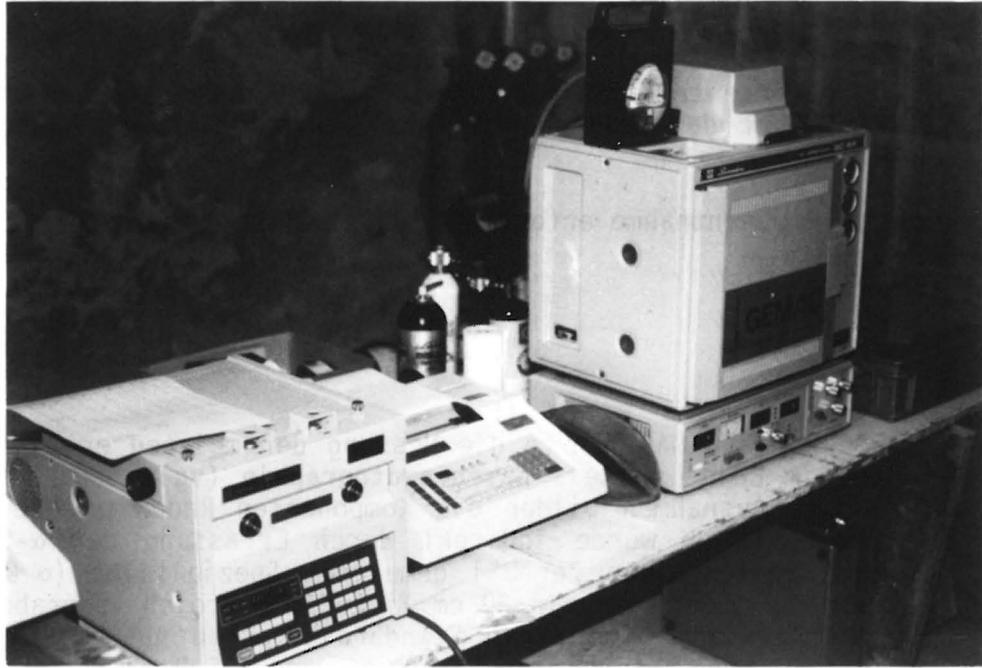


Fig. 7: Bestimmung der Gaskonzentrationen im Feldlabor (von links nach rechts: GC-WLD, Integrator, GC-FID)

Die chromatographische Analyse der Gase wurden in einem Einstellraum des Thermalbades Rheinfelden durchgeführt. Die Schwankungen der Raumtemperatur waren geringer als 5°C. Zum Einsatz kamen zwei Gaschromatographen (Fig. 7, Tab. 2) mit FID (Flammen-Ionisations-Detektor) resp. WLD (Wärme-Leit-Detektor). Die Trennung der Gasgemische erfolgte mittels gepackter Säulen (Molekularsieben) bei einer konstanten Temperatur von 70°C für Kohlenwasserstoffgase und von 40°C für die anderen Gase. Als Trägergas wurde für den FID Stickstoff verwendet, für den WLD Argon und Helium. Die Eichung der Geräte erfolgte mittels synthetischer Gasgemische mit bekannten Volumenanteilen.

Die **Messungenauigkeiten bei der Chromatographie** sind vor allem abhängig von der Konzentrationsspanne der zur Eichung verwendeten Gasgemische, der Linearität der Messgeräte und der Menge von beigemischten Gasen, welche gleiche Retentionszeiten wie die zu analysierenden Gase haben.

Die folgenden Angaben beruhen nicht auf einer systematischen Abklärung der Fehlergrenzen, sondern sind Ergebnisse von Mehrfachbestimmungen gleicher Proben- und Eichgasmischungen.

Mit der kleinsten Messungenauigkeit sind die **Kohlenwasserstoffe** behaftet, da die chromatographische Trennung sehr gut ist, die Eichung mit geringen Konzentrationen vorgenommen werden kann und die Detektion sehr empfindlich ist. Die Analysewerte haben eine relative Messungenauigkeit von $\pm 10\%$ des Messwertes. Mit einer hohen Messungenauigkeit ist hingegen die **Wasserstoffanalyse** behaftet, weil die Signale des WLD bei niederen Konzentrationen klein sind und der Detektor stark auf Temperaturschwankungen und vorhandenen Wasserdampf in der Probe reagiert. Bei Konzentrationen um 100 ppm dürfte die Messungenauigkeit bis zu ± 30 ppm betragen. Die Wasserstoffkonzentrationen im Bereich < 30 ppm sind als qualitative Analysen zu betrachten. Bei der Analyse von **Stickstoff** ergab sich bei Mehrfachbestimmungen im Bereich von 70 bis 80 Volumenprozenten eine Messungenauigkeit von ± 2 Prozent. Bei **Sauerstoff** im Messbereich von 10 bis 22 Volumenprozenten muss mit einer Messungenauigkeit von ± 1 Prozent gerechnet werden. Für **CO₂** dürfte die Messungenauigkeit im unteren Messbereich (0.1 bis 2 Volumenprozent) um ± 0.1 Prozent, im oberen Messbereich (5 bis 15 Volumenprozent) um ± 0.5 Prozent betragen. Die untere Nachweisbarkeitsgrenze für **Helium** liegt bei der angewendeten Methode (Gaschromatographie) bei 10 ppm. Helium konnte in keiner der Bodengasproben nachgewiesen werden, da die Konzentration in allen Proben unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze lag.

Ein Hinweis auf die maximale Größenordnung der Messungenauigkeit einer Bodengasanalyse ergibt sich aus der Differenz der Summe aller Gaskonzentrationen zu Hundert Prozent (= "Rest" in den Datenblättern im Anhang). Diese Differenz beträgt über alle Analysen gerechnet 1.44 Volumenprozent, mit einem maximalen Wert von 5.35 Volumenprozent). Die Summe der gemessenen Komponenten ist immer $< 100\%$. Der "Rest"-Wert gibt Hinweise auf die maximale Messungenauigkeit, da im "Rest"-Wert noch weitere, nicht gemessene Gase enthalten sind (Wasserdampf, Argon, Stickoxid).

5 RESULTATE UND GEOLOGISCHE INTERPRETATION

5.1 Bodengasprofil Rheinfeldern (Rheinfelder Verwerfung)

5.1.1 Kurzübersicht

- **Terrain:** Profillinie 1350 Meter, flach, im mittleren Abschnitt Wald.
- **Deckschichten (Quartär):** 10 bis 20 Meter, v.a. fluvioglaziale Schotter (sandige Kiese).
- **Fels:**
Nördlich der Rheinfelder Verwerfung: Oberer Muschelkalk (Kalke und Dolomite, verkarstet).
Südlich der Rheinfelder Verwerfung: Unterer/Mittlerer Muschelkalk (Mergel, Anhydrit/Gips/Salz)
Schichtlagerung flach.
- **Störungstyp:** Abschiebungen (Rheinfelder Verwerfung und Wasserloch-Verwerfung), begleitende Störungen wahrscheinlich.
- **Grundwasser:** nach Grundwasserkarte sehr geringe Grundwassermächtigkeit (geringer als 2 Meter), im Oberen Muschelkalk Karstwasser.

5.1.2 Geologische Situation

Das Bodengasprofil Rheinfeldern liegt im Tafeljura auf der Schotterebene zwischen Rheinfeldern und Möhlin (vgl. Fig. 3 und 4 und geografische Situation Beil. 2). Es verläuft von SW gegen NE, ungefähr senkrecht zur Rheinfelder Verwerfung. Das auf flachem Terrain verlaufende Profil hat eine Länge von ca. 1350 Meter. Im zentralen Teil wird ein lichter Laubwald durchquert, der Rest des Profils liegt am Waldrand und z.T. auf ackerbaulich genutzter Fläche.

Über das gesamte Profil liegt der Fels unter einer **Schotterdecke** von bis zu ca. 20 Meter Mächtigkeit. Die Grundwassermächtigkeit im Schotter ist gering (KEMPF 1983), es sind aber Karstwasservorkommen im tiefer liegenden Oberen Muschelkalk zu erwarten. Versumpfte Stellen im Gebiet des Wasserlochs deuten südöstlich der Profillinie auf das lokale Vorkommen toniger Deckschichten hin. Die nahe der Profillinie liegende **Thermalwasserbohrung Engerfeld** (RYF 1984) zeigte unter geringmächtigen lehmigen Oberflächenschichten (1.5 Meter) bis in eine Tiefe von 12 Meter Kies.

Die **Rheinfelder Verwerfung** ist bei Rheinfeldern am Rhein abgeschlossen (BLÖSCH 1910, DISLER 1912, DISLER 1914, DISLER 1931, SCHMIDT 1984) und durch Seismik und die Bohrung Engerfeld im Gebiet des Messprofils nachgewiesen (RYF 1984). Die Hauptverwerfungsfläche fällt flach mit nur etwa 45° gegen Nordosten ein, sodass der Block

nordöstlich der NW-SE verlaufenden Störung tiefergesetzt ist. Am Rhein (BLÖSCH 1910) wurden auf der Hochscholle gleichsinnige Begleitstörungen mit Versatz im Meterbereich festgestellt. Im Bereich der Bohrung Engerfeld wurden auf der Tiefscholle Begleitstörungen nachgewiesen, an denen der nordöstliche Teil um ca. 50 Meter abgesetzt ist. Der Verwerfungsbetrag der Rheinfelder Verwerfung (inklusive Begleitstörungen) beträgt im Bereich des Messprofils um 150 Meter. Es handelt sich um eine Störung, die vermutlich schon im Paläozoikum angelegt wurde. Sie reicht bis ins Kristallin und versetzt im Hangenden die Sedimentgesteinsabfolge vom Rotliegenden bis zum Oberen Muschelkalk. Es kommen also verschiedene lithologische Abfolgen als Gaslieferanten in Frage. Die Störung hat extensiven Charakter (Abschiebung) und deshalb vermutlich hohe Permeabilität. In der Bohrung Engerfeld liefen aus der Hauptverwerfung mehr als 1000 l/min Thermalwasser aus (RYF 1984). Es kann deshalb auch eine hohe Gaswegsamkeit entlang der Hauptstörungsfläche erwartet werden. Das stark kohlenensäurehaltige Wasser (Säuerling) wurde auch auf die Anteile an gelösten und freien Gasen untersucht (ENEZIAN 1984). Die Analyse der freien Gase (Institut Fresenius, Taunusstein BRD) ergab 51.5 Vol.% CO₂, 47.5 Vol.% N₂, 0.6 Vol.% Helium und 0.4 Vol.% Argon. Die Anteile an O₂ und Äthan waren kleiner als 0.02 Vol.%, die Anteile von H₂ und Methan kleiner als 0.03 Vol.%. Ähnliche Werte ergab das tiefere Wasser aus dem Kristallin.

Das Messprofil quert im Nordosten als weitere Störungslinie die **Wasserloch-Verwerfung**, die ebenfalls als Abschiebung ausgebildet ist. Sie verläuft N-S, in der Richtung der tertiären Bruchstörungen im Tafeljura. Der Verwerfungsbetrag beträgt lediglich etwa 20 Meter (bezüglich der Basis des Salzhorizontes des Mittleren Muschelkalks, vgl. HAUBER 1980).

Im Bereich des Messprofils ist die **Schichtlagerung** horizontal. Schichtwellungen im Bereich weniger Grade sind möglich, vor allem im Bereich des Salzfeldes Rheinfelden-Riburg (d.h. im Nordosten). Es ist wahrscheinlich, dass die tiefergesetzten Gesteinsschichten an der Rheinfelder Verwerfung geschleppt sind. Dies konnte auch am Rhein beobachtet werden, wo im Bereich der Verwerfung steilgestellter Trochitenkalk aufgeschlossen ist (DISLER 1912).

Über die **Felsoberfläche** unter der Quartärdecke sind in der Literatur widersprüchliche Angaben zu finden. Im Südwesten des Messprofils bis zur Rheinfelder Verwerfung liegt unter dem Schotter das Wellengebirge, vermutlich teilweise bedeckt durch die Unteren Sulfatschichten des Mittleren Muschelkalks. Die Felsoberfläche im mittleren Teil des Messprofils, d.h. zwischen der Rheinfelder Verwerfung und der Wasserloch-Verwerfung, besteht vermutlich aus Gesteinen des Oberen Muschelkalks. Nach JÄCKLI & WYSSLING (1972) und SCHMIDT (1984) müsste hier unter dem Quartär der Keuper liegen. In der in diesem Abschnitt liegenden Bohrung Engerfeld (RYF 1984) wurde aber unter dem Quartär direkt der Hauptmuschelkalk erbohrt, es fehlt also auch der oberste Teil des Muschelkalks (Trigonodus-Dolomit). Die Gesteine des Keupers bilden deshalb vermutlich nur sehr lokal oder erst östlich der Wasserloch-Verwerfung die Felsoberfläche.

Die Lage des **Grundwasserspiegels** ist dank vieler Bohrungen und insbesondere der Bohrung Engerfeld einigermaßen gut bekannt. Im Bereich des Bodengasmessprofils beträgt die Grundwassermächtigkeit weniger als 2 Meter (KEMPF 1983). In der Bohrung Engerfeld wurde sowohl in der Hauptabschiebung der Rheinfelder Verwerfung (im Rotliegenden) als auch im Kristallin Thermalwasser angetroffen. Das piezometrische Niveau dieser beiden Vorkommen liegt auf 380 Meter ü.M., d.h. 80 Meter über Terrain (RYF 1984). Da in dieser Bohrung im mittleren Muschelkalk knapp 20 Meter Salz erbohrt wurden, muss man folgern, dass die darunter liegenden mergelig-tonigen Gesteine des Rotliegenden und des Wellengebirges gut gegen oben abdichten und ein Wasseraufstieg nur entlang von diskreten Störungen möglich ist. Diese werden auch von den Tiefengasen benützt.

5.1.3 Messprofilauflage und Messpunktabstände

Das Bodengasprofil liegt senkrecht zu den bekannten Störungen. Auf die ursprünglich geplante geradlinige Führung musste verzichtet werden, da die Bewirtschaftung der Acker- und Wiesenpartien dies nicht zuließ. Dies führte zur abgewinkelten Form des Bodengasprofils.

Als Messpunktabstände wurden im unverdichteten Profil vorerst 100 Meter angesetzt, was zu 14 Profilpunkten führte. Anschliessend wurden in Bereichen mit erhöhten Bodengaskonzentrationen die Messpunktabstände verdichtet, um genauere Aussagen über die Lage der Spitzenwerte zu erhalten. Die ursprünglichen 14 Profilpunkte wurden dabei durch 13 weitere dazwischenliegende Messpunkte (vgl. Beil. 2, geografische Situation) ergänzt. Dabei wurden 5 Repetitionsmessungen an bereits vermessenen Punkten durchgeführt. Zusätzlich wurden am Standardpunkt (Nr. 50) 6 Repetitionsmessungen ausgeführt. Dies führte total zu 38 Gasentnahmen (vgl. Datenblätter 1-3 im Anhang).

Erst nach der Verdichtung des Bodengasprofils wurde auch die α -Strahlung (Radon-Werte) gemessen. Die Filme verblieben während 73-79 Tagen im Erdreich. Für Entscheidungen während der Verdichtung der Messpunktabstände und für die erste Interpretation konnten die Radon-Werte also noch nicht benutzt werden.

5.1.4 Messresultate und geologisch-strukturelle Deutung

Die He-Konzentration lag in allen Proben unter der Nachweisbarkeitsgrenze von 10 ppm.

Im **unverdichteten Bodengasprofil** zeigte es sich, dass vor allem die Konzentrationen von ΣC_2-C_5 , CH_4 und H_2 Aussagen über den strukturellen Aufbau des Untergrundes erlauben würden. Das Profil liess sich in drei Abschnitte aufteilen (Beil. 1). Ein westlicher Bereich (Messpunkte Nr. 10 bis Nr. 50) und ein östlicher Bereich (Mess-

punkte Nr. 120 bis Nr. 140) mit hohen Gaskonzentrationen sind durch einen Gürtel von Messpunkten mit niedrigen Konzentrationen abgetrennt. Dieser Befund entsprach prinzipiell den geologischen Erwartungen (Beil. 1, geologisch-tektonische Skizze). Der Gürtel mit den niedrigen Konzentrationen liegt in der Scholle mit der Bohrung Engerfeld, wo Salzlager nachgewiesen sind (HAUBER 1980).

Bei der Beurteilung der vollständigen Resultate des **verdichteten Bodengasprofils** zeigt sich ein akzentuiertes Bild (Beil. 2). Auf der **Hochscholle der Rheinfelder Verwerfung** (Messpunkte Nr.10 bis ca. Nr. 35) finden sich deutlich höhere Konzentrationen von ΣC_2-C_5 , CH_4 und H_2 als im erwähnten Gürtel mit den niedrigen Konzentrationen, der die Gesteinsabfolgen bis zum oberen Muschelkalk enthält und Steinsalz von bedeutender Mächtigkeit umfasst. Ebenso zeigen auch die gebildeten **Verhältniszahlen für $(N_2 \text{ Boden}/O_2 \text{ Boden})/(N_2 \text{ Atmosphäre}/O_2 \text{ Atmosphäre})$ und $(CO_2 \text{ Boden}/O_2 \text{ Boden})/(CO_2 \text{ Atmosphäre}/O_2 \text{ Atmosphäre})$** (vgl. Beil. 2) ein analoges Bild. Da molekularer Sauerstoff (O_2) geochemisch nur durch Photosynthese oder Photodissoziation entsteht, stammt der Sauerstoff in der Bodenluft letztendlich aus der Atmosphäre. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, aus dem Verhältnis zwischen O_2 in der Bodenluft und O_2 in der Atmosphäre auf die Anreicherung von anderen Gasen zu schliessen. Dieses Verfahren eignet sich vor allem für die Gase N_2 , Argon und CO_2 .

Da die unter den Schottern liegenden Festgesteine der Hochscholle (evtl. wenige Meter Mittlerer Muschelkalk und Wellengebirge) vermutlich keine gute Kluftpermeabilität aufweisen, muss angenommen werden, dass hier mehrere kleinere Begleitstörungen der Rheinfelder Verwerfung liegen könnten. In Messpunkt Nr. 20 ist denn auch ein klarer Spitzenwert erkennbar. Auf Begleitstörungen in der Hochscholle mit Versatz im Meterbereich weist auch BLÖSCH (1910) aufgrund von Beobachtungen am Rhein hin. Der Radonwert von Messpunkt Nr. 30 zeigt einen sehr hohen Wert. Da ΣC_2-C_5 , CH_4 und H_2 in diesem Punkt aber sehr tiefe Konzentrationen aufweisen, muss vermutet werden, dass der Radongehalt aus den Kristallingeröllen des Schotters produziert wird. Leider konnten einzelne in diesem Profilabschnitt in der Wiese vergrabene α -Cups nach der Messperiode nicht mehr aufgefunden werden, weil die Felder gepflügt worden waren.

Die eigentliche **Rheinfelder Verwerfung** bildet sich in einem breiten Band ab, das die Messpunkte von Nr. 40 bis Nr. 57 umfasst und damit also ca. 200 Meter breit ist. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist die Hauptstörung hier von mehreren Nebenstörungen begleitet. So wurde ja auch in der Bohrung Engerfeld eine Begleitstörung durchteuft. Zudem muss angenommen werden, dass die Schichten der Hochscholle an der Rheinfelder Verwerfung geschleppt und dabei schräg gestellt sind (DISLER 1912), was auch zu erhöhter Klüftigkeit geführt hätte. Interessant, aber schwierig zu erklären, ist die Verschiebung der Spitzenwerte von H_2 gegenüber der Spitzenwerte von ΣC_2-C_5 und CH_4 . Im Radon zeichnet sich die Rheinfelder Verwerfung nicht so deutlich wie bei den erwähnten Komponenten ab. Auch die Profil-Darstellung der Komponente "Rest" zeigt Ähnlichkeit zu den Profilen von ΣC_2-C_5 , CH_4 und H_2 . Der Extremwert in Punkt Nr. 42 muss einen hohen Wert an

Ar oder Wasserdampf enthalten. Es ist aber auffällig, dass auch das Verhältnis zwischen CH_4 und den höheren Kohlenwasserstoffen ($\Sigma\text{C}_2\text{-C}_5$) in diesem Punkt untypisch ist. Die in den Bodengasprofilen gemessenen Gaskonzentrationen weichen stark ab von den Konzentrationen an freien Gasen des Thermalwassers aus der Rheinfelder Verwerfung (ENEZIAN 1984). Vermutlich ist dies vor allem durch die völlig unterschiedliche Probeentnahme, durch Vermischung der Bodengase während der Migration an die Erdoberfläche und durch die unterschiedlichen Analysemethoden zu erklären.

Gegen **Nordosten** schliesst an die Rheinfelder Verwerfung ein Profilabschnitt mit äusserst geringen Gaskonzentrationen an (Messpunkte Nr. 60 bis 110). Eine lokale Erhöhung zeigt sich lediglich in Messpunkt Nr. 70. Vermutlich fehlen in dieser Scholle Störungen und die Entgasung der tieferen Gesteinsformationen über die Klüftung ist durch die Sulfatgesteine des mittleren Muschelkalks (mit Steinsalz in grosser Mächtigkeit!) unterbunden. Die Radonwerte zeigen aber auch in diesem Abschnitt relativ hohe Werte (um 200 pCi/l) gegenüber den minimalen Radonwerten im Profil Zeiningen (um 50 pCi/l). Möglicherweise ist das Radon auch hier direkt aus den Schottergeröllern abzuleiten.

Der Profilbereich von Messpunkt Nr. 115 bis Nr. 145 liegt im Bereich junger (oligozän-miozäner) NS-Störungen. In der Literatur erwähnt ist die **Wasserloch-Verwerfung** (HAUBER 1980). Nach dem Befund der Komponenten $\Sigma\text{C}_2\text{-C}_5$, CH_4 und H_2 liegt aber auch hier, ähnlich wie bei der Rheinfelder Verwerfung, eine breitere Störungzone mit vermutlich mehreren Störungsaussbissen vor.

5.1.5 Isotopen

Isotopenuntersuchungen können Auskunft geben über die Herkunft der Gase in der Bodenluft (Kohlenwasserstoffe, CO_2 , He). Die ausgeführten Isotopenmessungen beschränkten sich auf die kohlenstoffhaltigen Gase. Bei diesen basiert die Isotopenanalyse auf der Anreicherung von leichten Nukliden in organischem Material. Die schweren verbleiben häufiger in den anorganischen Zyklen. Aus Datengegenüberstellungen abgeleitete empirische Zusammenhänge für kohlenstoffhaltige Gase (vgl. bspw. FABER 1987) erlauben Schlüsse bezüglich Herkunft, Ausgangsmaterial, Reifegrad des Ausgangsmaterials, Entstehungsweise (thermisch, bakteriell), Mischung von Gasen verschiedener Herkunft, bakterieller Oxidation, etc.

Für die Isotopenanalyse wurde zunächst sowohl im Bodengasprofil Rheinfeldern wie auch im Bodengasprofil Zeiningen je eine Probe entnommen, wobei sich aber herausstellte, dass die Konzentrationen der Kohlenwasserstoffe in den entnommenen Proben für die massenspektrometrischen Untersuchungen zu gering waren. Deshalb wurde im Bodengasprofil Rheinfeldern beim Messpunkt Nr. 50, der direkt über der Rheinfelder Verwerfung liegt (vgl. Beil. 5) und als Standardpunkt diente, nochmals eine Probe entnommen. Im Bodengasprofil Zeiningen

wurde auf eine erneute Probeentnahme verzichtet, da die Konzentrationen der Kohlenwasserstoffgase im Vergleich zum Profil Rheinfelden durchwegs geringer waren.

Auch in der zweiten Rheinfelder-Probe war die Kohlenwasserstoffkonzentration nahe der unteren Grenze der Isotopen-Messmethode. Da die Messgenauigkeit mit abnehmender Gaskonzentration abnimmt, sind die Resultate vorsichtig zu interpretieren.

Die Isotopenanalysen wurden an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover durch das Team um Dr. E. Faber durchgeführt.

Resultate:

Die Analyse der stabilen Kohlenstoff- und Wasserstoff-Isotopen ergab für $\delta^{13}\text{C}_{\text{Methan}}$ -29.4 ‰, für $\delta^{13}\text{C}_{\text{Äthan}}$ -25.0 ‰, für $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -20.0 ‰ (alle PDB- Standard) und für $\delta\text{D}_{\text{Methan}}$ -184 ‰ (SMOW). Die Hauptkomponenten des Gasmisches waren Stickstoff (79.9 Vol.%), Sauerstoff (19.1 Vol.%) und CO_2 (1.8 Vol.%). Die Konzentrationen der einzelnen Kohlenwasserstoffkomponenten waren kleiner als 0.1 Vol.%. Da die BGR die Komponenten nur für die Voruntersuchung verwendet, werden die Kohlenwasserstoffgehalte nicht im ppm- Bereich analysiert. Für die Interpretation werden deshalb im folgenden die Mittelwerte der sieben Messungen am Standardpunkt Nr. 50 verwendet (Methan 125 ppm, Äthan 7 ppm, Propan 3 ppm).

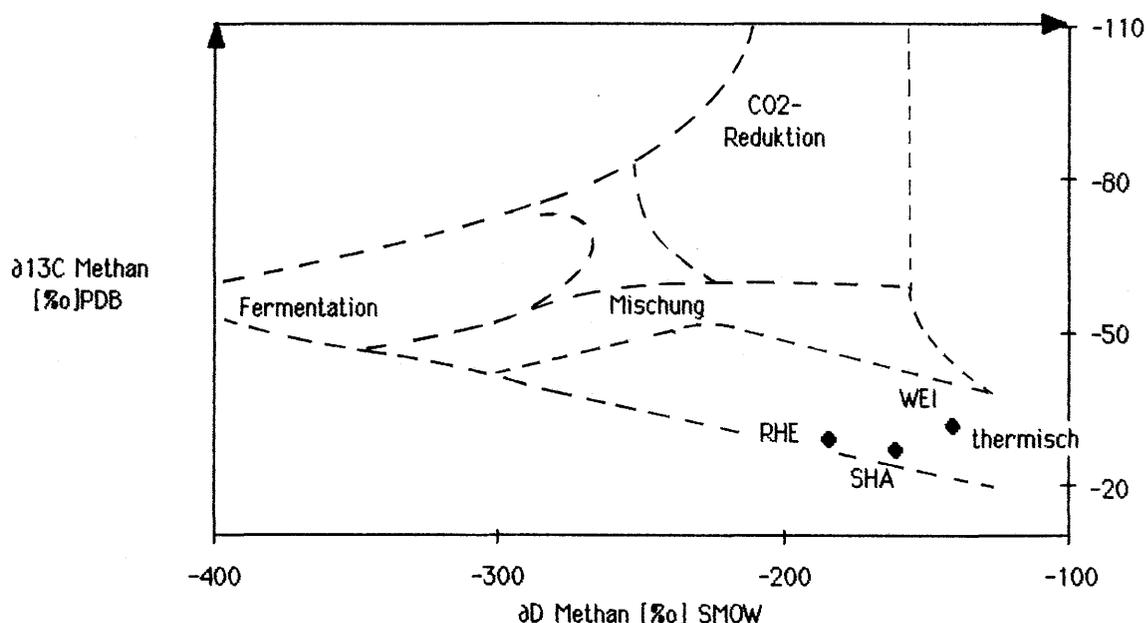


Fig. 8: Lage der Bodengasprobe Rheinfelden Punkt Nr. 50 (RHE) im $\delta\text{D}/\delta^{13}\text{C}$ -Diagramm nach WHITICAR et al. (1986). Zum Vergleich sind die Methan-Isotopenwerte aus dem Stephanien der Bohrung Weiach (WEI) und aus dem Kristallin der Bohrung Schafisheim (SHA) eingetragen.

Interpretation:

Der $\delta^{13}\text{C}_{\text{Methan}}$ -Wert von -29.4 ‰ zeigt im Vergleich zu jenem von bakteriell entstandenem Methan (SCHÖLL 1980) eine signifikante Anreicherung von schwerem Kohlenstoff. Das Methan in der Bodenluft von Messpunkt Nr. 50 ist deshalb nicht auf bakterielle Entstehung (Fermentation oder CO_2 -Reduktion) zurückzuführen. Auch der niedrige $\delta\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Wert von -20.0 ‰ unterstützt diese Interpretation. Die Kohlenwasserstoffgase müssen demnach durch thermokatalytische Reifung von organischem Material in sedimentären Gesteinen entstanden sein. Durch den Vergleich des Kohlenstoff- und des Wasserstoffisotopenwertes von Methan wird diese Interpretation gestützt (vgl. Fig. 8).

Bei der Gegenüberstellung des Kohlenstoff-Isotopenwertes von Methan mit der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffgase geht hervor, dass das Gas dem Kerogentyp III zugeordnet werden kann und somit das Muttergestein terrestrischen Ursprungs sein dürfte (Fig 9).

Unter der Voraussetzung eines terrestrischen Muttergesteins lässt sich die von FABER (1987) beschriebene Beziehung zwischen Gasen des Kerogentyps III und dem Vitrinitreflexionswert R_o anwenden, was einen R_o -Wert von $0.75 \text{ ‰} (\pm 0.2\%)$ ergibt.

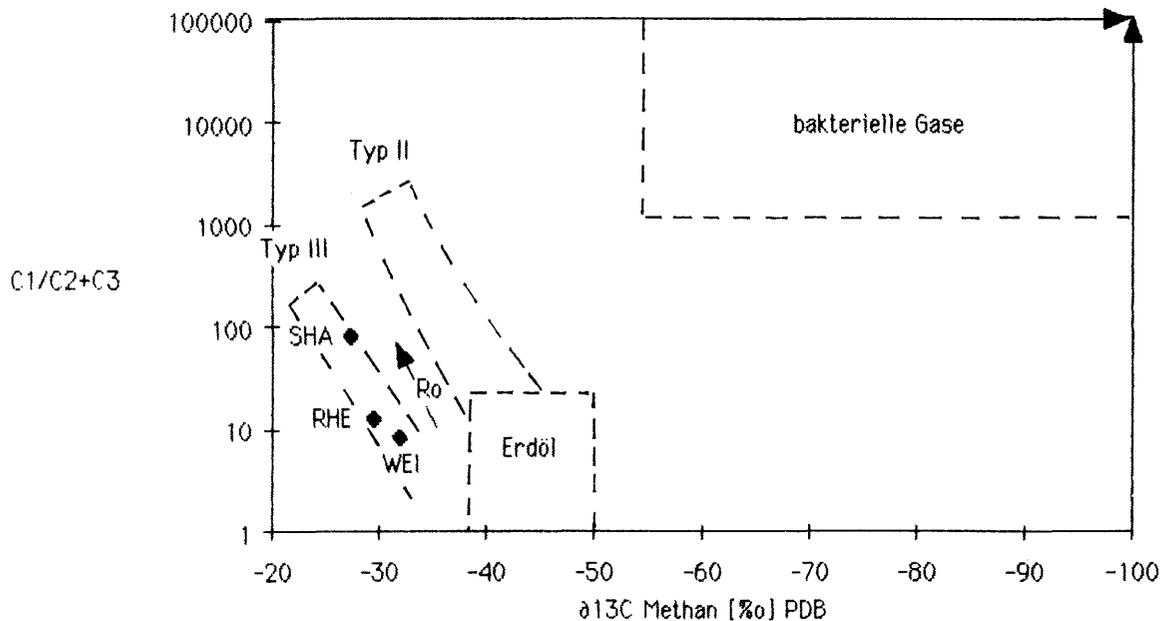


Fig. 9: Lage der Bodengasprobe Rheinfelden Punkt Nr. 50 (RHE) im $\delta^{13}\text{C}/(\text{C}_1/\text{C}_2+\text{C}_3)$ -Diagramm nach WHITICAR et al. (1986). Die Gaszusammensetzung lässt auf den Kerogentyp III schliessen und damit auf terrestrisches Muttergestein. Als Vergleich sind Gase aus der Bohrung Weiach (WEI) und Schafisheim (SHA) eingetragen. R_o =Vitrinitreflexionsvermögen.

Diskussion:

Das Vorhandensein von thermischen Kohlenwasserstoffgasen in der Bodenluft kann entweder auf eine anthropogene Verunreinigung des Untersuchungsgebietes durch fossile Energieträger (Heizöl, Benzin) oder aber auf die Migration von thermischen Kohlenwasserstoffgasen aus der Erdkruste zurückgeführt werden. Eine anthropogene Verunreinigung kann ausgeschlossen werden, da weder durch die Bodengasmes-sungen noch durch andere Zeugnisse Hinweise auf solche Verunreinigungen existieren. Es fehlen auch die für Öl- und Benzinunfälle charakteristischen hohen Konzentrationen an höheren Kohlenwasserstoffen in den Bodengasen (Butan, Pentan).

Vergleicht man die Kohlenstoff-Isotopendaten der Rheinfelder-Probe Nr. 50 mit publizierten Daten, so zeigt sich eine Ähnlichkeit mit Erdgasen des norddeutschen Rotliegenden und Karbons. Diese haben $\delta^{13}\text{C}_{\text{Methan}}$ -Werte von ca. -20 bis ca. -32 ‰, weisen jedoch höhere $\delta\text{D}_{\text{Methan}}$ -Werte von -133 bis -155 ‰ auf (Daten aus FABER 1987 und SCHÖLL 1980). Auch die Gase aus den Nagra-Tiefbohrungen Weiach und Schafisheim haben ähnliche Kohlenstoff-Isotopendaten ($\delta^{13}\text{C}_{\text{Methan}}$: -31.9‰ resp. -27.2‰), wobei auch hier die $\delta\text{D}_{\text{Methan}}$ -Werte höher sind (-141 ‰ resp. -161‰). Die Weiachprobe stammt aus dem Stefanien, die Schafisheimprobe aus dem syenitischen Kristallin, wobei hier eine Migration des Methans aus dem Permokarbon postuliert wird (HINZE et. al 1988). Es ist nicht auszuschliessen, dass die Differenz der $\delta\text{D}_{\text{Methan}}$ -Werte auf die Ungenauigkeit der Isotopenbestimmung bei den geringen Gasmengen der Probe Nr. 50 zurückzuführen ist.

Das berechnete Vitrinitreflexionsvermögen R_o von 0.75 stimmt gut mit den gemessenen R_o -Werten an authigenen Vitriniten im oberen Stefanien der Bohrung Weiach überein (MATTER et. al. 1988).

5.2 Bodengasprofil Zeiningen (Zeininger Störungszone)

5.2.1 Kurzübersicht

- **Terrain:** Profillinie im Wald, vorwiegend entlang Waldwegen. Länge ca. 1250 Meter, Höhendifferenz 90 Meter.
- **Deckschichten (Quartär):** Gehängeschutt (v.a. im südlichen Profilabschnitt), sonst meist Anstehendes direkt unter Vegetationsdecke und Verwitterungsdeckschicht.
- **Fels:** Keuper, Lias und Dogger nördlich der Hauptstörung, Muschelkalk im Süden.
Schichtfallen ausserhalb der Störungszone flach, innerhalb der Störungszone (= mittlerer Teil des Profils) flach bis steil.
- **Störungstyp:** Störungszone mit mehreren Abschiebungen, Hauptstörung im Süden.
- **Grundwasser:** im Quartär nur unbedeutende Vorkommen (Gehängeschutt), aber verschiedene Festgesteinsaquifere.

5.2.2 Geologische Situation

Das Bodengasprofil Zeiningen wurde im Tafeljura auf den Hügelzügen südwestlich von Zeiningen ausgelegt (vgl. Fig. 3 und 4 und geographische Situation auf Beil. 3 und 4). Es quert die Zeininger Störungszone, die den südlichen Ausläufer der regional bedeutenden Bruchzone von Zeiningen-Wehr darstellt. Die Länge des Messprofils beträgt 1250 Meter, der Höhenunterschied entlang der Profilspur 90 Meter. Das gesamte Profil verläuft im Wald, fast ausschliesslich entlang von Waldwegen.

Die Lockergesteinsbedeckung ist geringmächtig. Es handelt sich vorwiegend um Hangschutt der anstehenden Kalke und um teilweise leicht verrutschte Hanglehme im Bereich der tonigeren Festgesteine.

Die **Zeininger Störungszone** ist im Bereich des Bodengasprofils detailliert kartiert worden (SUTER 1915). Die einzelnen Störungen sind im schlecht aufgeschlossenen Gebiet nirgends direkt sichtbar, sondern nur indirekt durch lithostratigrafische Beobachtungen nachweisbar. Die Hauptabschiebung fällt vermutlich steil ein und hat im Bodengasprofil einen Abschiebungsbetrag von 250 - 300 Meter (vgl. Profil Beil. 3). Sie reicht mit Sicherheit bis ins Kristallin (GURLER et al. 1987). Der nordwestlich angrenzende breite Gürtel der Störungszone zeigt einen synklinalartigen Aufbau mit verkippten und abgesenkten Teilschollen. Die Störungen, die die einzelnen Schollen begrenzen, haben Verwerfungsbeträge von wenigen Dekametern. Obwohl der generelle Aufbau der Zeininger Störungszone bekannt und im Detail diskutiert wurde (SUTER 1915, BLÖSCH 1910), ist der genaue Verlauf (geologisch-tektonische Skizze Beil. 3 und 4) und eventuell die Anzahl der übernommenen Störungen wohl als nicht definitiv gesichert anzunehmen. Die Zeininger Störungszone entstand im Zusam-

menhang mit dem Einbruch der Dinkelberg-Scholle. Jüngste Bewegungen sind deshalb vermutlich ins Tertiär zu setzen. Einen genaueren Einblick in den Charakter der Hauptabschiebung geben Beobachtungen von BLÖSCH (1910) an einem heute grösstenteils verfüllten Steinbruch am Zeiningerberg, etwas über 1 km nordöstlich des Bodengasprofils. Er beobachtete auf der Hochscholle stark geschleppte Schichten des Muschelkalkes, die steil nach Nordwesten einfielen. Eine ähnliche Situation besteht offenbar auch westlich des Bodengasmessprofils. An der Fahrstrasse zum Erlihof (ca. 1 km südwestlich des Bodengasprofils) ist Dolomit der Anhydritgruppe und Oberer Muschelkalk der Hochscholle anstehend. Das Einfallen dieser Schichten beträgt etwa 40° gegen Nordwesten.

In der Umgebung des Messprofils wurden im letzten Jahrhundert Stollen gegraben und Schächte und **Bohrungen** abgeteuft, um Steinkohlenvorkommen aufzufinden. Über diese Kampagnen sind aber keine verlässlichen Angaben überliefert (MÜHLBERG 1882, SUTER 1915), die Einblick in den strukturellen Aufbau des Gebietes gestatten würden.

Das Bodengasprofil Zeiningen überstreicht an der Oberfläche Gesteine des Unteren Muschelkalkes bis zum obersten Dogger (vgl. Profil Beil. 3 und 4). Der anstehende Fels liegt aber unter einer dichten Vegetationsdecke und ist nur lokal aufgeschlossen. Auf der Hochscholle im Südosten sind teilweise Hangschuttvorkommen von geringer Mächtigkeit vorhanden. Ebenso sind Hanglehme über dem Opalinus-Ton und Gipskeuper im zentralen Abschnitt des Profils zu erwarten.

Die hydrogeologischen Verhältnisse sind einfach. Insbesondere sind keine schnellfliessenden Schottergrundwässer zu erwarten, die den Bodengasaustritt stark beeinflussen würden.

5.2.3 Messprofilauslage und Messpunktabstände

Das Bodengasprofil Zeiningen ist senkrecht zu der Zeininger Störungzone angelegt worden. Es verläuft fast ausschliesslich entlang von Waldwegen.

Wie im Profil Rheinfeldern wurden auch hier im unverdichteten Bodengasprofil Messpunktabstände von 100 Meter angesetzt. Da Punkt Nr. 10 aus Zeitmangel nicht mehr gerammt wurde, ergab dies 13 Messpunkte. Bei der Bodengasentnahme traten zum Teil Schwierigkeiten auf. An 5 Messstellen wurden nur Rammtiefen von 1.0 bis 1.2 m erreicht. Der anstehende Fels oder grober Hangschutt war teilweise nur durch eine Kulturerdeschicht bedeckt, die weniger als die geforderte Rammtiefe betrug. Dieses Problem konnte nur gelöst werden, indem die Rammung am Rand der Strassenkofferung ausgeführt wurde. Probleme ergaben sich auch in den tonig-mergeligen Gesteinen (Gipskeuper und Opalinus-Ton). Hier traten zwar bei der Einrammung der Sondenspitze keine Schwierigkeiten auf, die Gasentnahme dauerte aber wegen der sehr schlechten Gasdurchlässigkeit dieser Gesteine sehr lange (bis ca. 20 Minuten). Die entnommenen Gasproben zeigen aber auch hier

eine Zusammensetzung, die klar von der Zusammensetzung der Atmosphäre abweicht (Tab. 1). Das Rammgestänge schloss somit dicht gegen das durchrammte lehmige Lockergestein ab. Bei der Messpunktverdichtung wurden generell Zwischenpunkte entlang des gesamten Messprofils gelegt, sodass das Bodengasprofil letztendlich einen Messpunktabstand von maximal 50 Metern aufweist. Dies erschien angebracht, da die Störungsausbisse sonst kaum erfasst werden konnten, da sie ja nur von einer geringmächtigen Lockergesteins- und Vegetationsschicht überdeckt waren. Nach dem Einsetzen von 4 weiteren Zwischenpunkten, dem Punkt Nr. 145, einer Repetitionsmessung und den 6 Messungen am Standardpunkt ergaben sich total 36 Gasentnahmen (vgl. Datenblätter 4-6 im Anhang).

Auch im Bodengasprofil Zeiningen wurde die α -Strahlung (Radon) erst nachträglich über eine Zeitdauer von 10-11 Wochen gemessen.

5.2.4 Messresultate und geologisch-strukturelle Deutung

In allen Proben des Bodengasprofils Zeiningen lagen die He-Werte unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze von 10 ppm.

Das **unverdichtete Bodengasprofil** zeigt ein monotones Bild, insbesondere wenn man sich den nicht einfachen strukturellen Aufbau des Untergrundes vor Augen hält (Profil auf Beil. 3). Dies musste wegen der sehr oberflächennah liegenden Ausbisslinien der Störungen vermutet werden. Diese Störungen können nur erfasst werden, wenn in unmittelbarer Nähe ein Messpunkt liegt. Auf autochthone Gasbildung an vielen Messpunkten weist auch die gute Korrelation zwischen O_2 und CO_2 in Figur 10 hin. In Analogie zum Bodengasprofil Rheinfelden und wegen der auffallend grossen Differenzen zwischen Minimal- und Maximalwerten der Komponenten ΣC_2-C_5 , CH_4 und H_2 wurden diese auch im Profil Zeiningen als die aussagekräftigen Komponenten betrachtet. Insbesondere im Südosten des Profils sind erhöhte Konzentrationen erkennbar (Messpunkte Nr. 120 und 140). Hier zieht auch die Hauptabschiebung der Zeininger Störungszone durch (ca. Position Messpunkt Nr. 120). Der restliche Profilabschnitt zeigt im wesentlichen sehr geringe Konzentrationen der Komponenten ΣC_2-C_5 , CH_4 und H_2 mit einzelnen alleinstehenden Spitzenwerten (Messpunkte Nr. 50, 70 und 100).

Das **verdichtete Bodengasprofil** zeigt im Prinzip dasselbe Bild. Die Hauptabschiebung der Zeininger Störungszone bildet sich im CH_4 und in den höheren Kohlenwasserstoffen (ΣC_2-C_5) ab. Die Konzentrationen von CH_4 und (ΣC_2-C_5) sind etwa gleich gross, dies im Unterschied zum Bodengasprofil Rheinfelden, wo die CH_4 -Konzentrationen etwa 1 Grössenordnung höher sind. Eine befriedigende Erklärung dafür ist nicht leicht zu finden. Gemäss dem geologischen Prognoseprofil liegt die Spitzenwerte der Hauptabschiebung auf der Hochscholle. Dies steht der Beobachtung im Profil Rheinfelden gegenüber, wo die Spitzenwerte der Rheinfelder Verwerfung klar über der Tiefscholle lagen (ähnliche Beispiele mit den Spitzenwerten auf der Hochscholle in OHSIMAN 1988, ERNST 1970). Es ist allerdings möglich, dass der

Verlauf der Hauptabschiebung im Bodengasprofil Zeiningen der schlechten Aufschlussverhältnisse wegen falsch kartiert ist.

Zusätzliche deutliche Spitzenwerte erscheinen auf der Hochscholle im Bereich des Messpunktes Nr. 140. Hier ist bisher keine Störung kartiert. Auffallend ist weiter der erhöhte CO₂-Gehalt auf der Hochscholle.

Der nordwestlich der Hauptabschiebung liegende Profilabschnitt zeigt sehr geringe Konzentrationen an ΣC_2-C_5 , CH₄ und H₂, häufig sind die Komponenten sogar nicht nachweisbar. Ebenso sind hier die Verhältniszahlen für $(N_2 \text{ Boden}/O_2 \text{ Boden})/(N_2 \text{ Atmosphäre}/O_2 \text{ Atmosphäre})$ und $(CO_2 \text{ Boden}/O_2 \text{ Boden})/(CO_2 \text{ Atmosphäre}/O_2 \text{ Atmosphäre})$ bedeutend niedriger als im südlichen Teil des Profils. Die Spitzenwerte an den Messpunkten Nr. 50, 70 und evtl. 95+100 scheinen im Bereich einzelner Störungen zu liegen. Die Messpunkt Nr. 50 und Nr. 70 liegen bei oder in der Nähe kartierter Störungen (vgl. Profil Beil. 3).

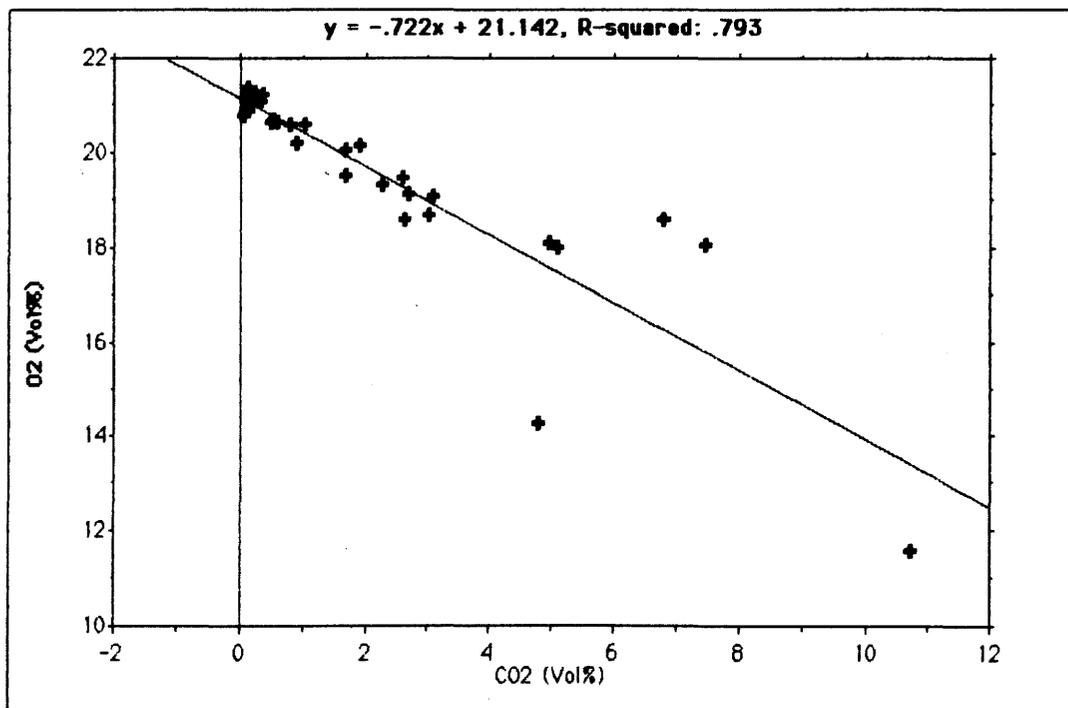


Fig. 10: Korrelation O₂-CO₂ der Messwerte im Bodengasprofil Zeiningen

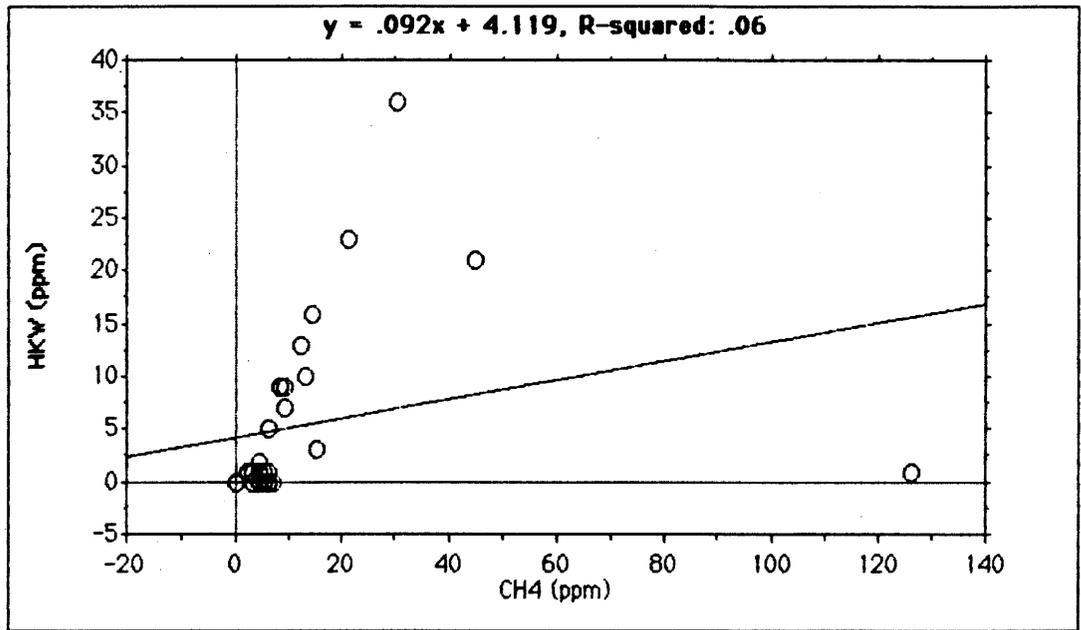


Fig. 11: Korrelation $CH_4-(\Sigma C_2-C_5)$ der Messwerte im Bodengasprofil Zeiningen

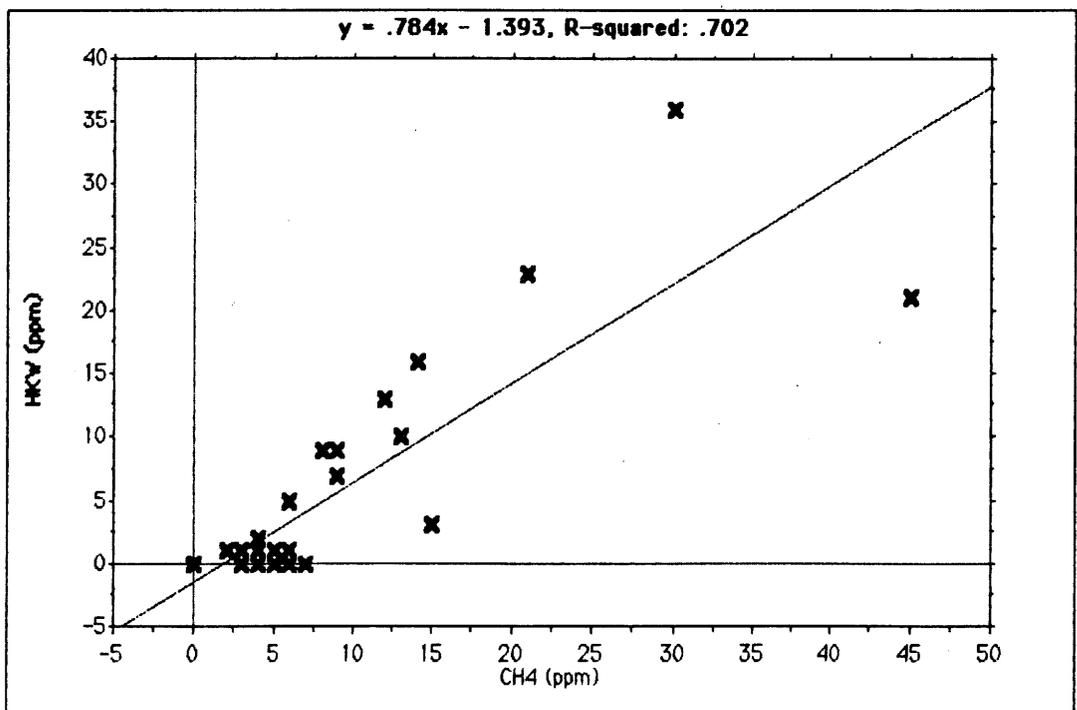


Fig. 12: Korrelation $CH_4-(\Sigma C_2-C_5)$ der Messwerte im Bodengasprofil Zeiningen (ohne Messpunkt Nr. 45)

Die Resultate der Punkte Nr. 45 und 90 verdienen spezielle Erwähnung. In Punkt Nr. 45 ist das Verhältnis von CH_4 zu ΣC_2-C_5 aussergewöhnlich hoch. Die Darstellung der Messwerte aller Punkte (Fig.

11) zeigt, dass das Verhältnis zwischen den beiden Komponenten in diesem Punkt offenbar uncharakteristisch ist. Er ist verantwortlich, dass der Korrelationskoeffizient des Korrelationsdiagramms auf Fig. 11 lediglich 0.24 beträgt. Wenn Punkt Nr. 45 aus dem Korrelationsdiagramm eliminiert wird, ergibt sich ein Korrelationskoeffizient 0.84 (Fig. 12). Punkt Nr. 90 liegt im Opalinus-Ton. Die Probeentnahme war wegen der schlechten Durchlässigkeit in der Entnahmetiefe schwierig, was sich auch im hohen Rest-Wert (gasförmiges H_2O ?) ausdrückt.

Die Radon-Messwerte vermitteln auch im Bodengasprofil Zeiningen ein von den andern Komponenten abweichendes Bild. Der Unterschied zwischen den tiefsten und den höchsten Werten ist bedeutend grösser als im Bodengasprofil Rheinfelden. Ein sehr breites Band erscheint über der Hauptabschiebung der Zeiningen Störungszone, stark nach Nordwesten verschoben. Wie bei der Interpretation des Profils Rheinfelden muss auch für das Bodengasprofil Zeiningen vermutet werden, dass Radon nicht ausschliesslich aus tieferen Gesteinschichten an die Oberfläche migriert ist, sondern teilweise auch in den oberflächennahen Sedimentgesteinen entstanden ist. Die in den Nagra-Tiefbohrungen Böttstein, Weiach und Kaisten gemessenen Uran-Thorium- und Kalium-Anteile zeigten z.T. auch bedeutende Werte in den Sedimentgesteinen (MATTER et al. 1988, NAGRA 1985, PETERS et al. 1988).

Wie im Profil Rheinfelden, zeigt sich bei Betrachtung aller gemessenen Gase auch im Bodengasprofil Zeiningen, dass sich dominierende Abschiebungen mit einem Versatz von mehreren hundert Metern in einem breiten Spitzenwertband (ca. 100 Meter) äussern. Diese wichtigen Störungen scheinen von einer Zerrüttungszone mit lokalen Schichtabschleppungen und Sekundärstörungen begleitet zu sein. Sie lassen sich mit einem Messprofil mit 100 Meter Messpunktabstand erfassen. Alleinstehende Abschiebungen mit geringem Versatz, die sich an der Erdoberfläche offenbar nur mit einer diskreten Ausbisslinie äussern, lassen sich aber nur zufälligerweise erkennen.

6 DISKUSSION

6.1 Natürliche Schwankungen der Bodengaskonzentrationen an einem Messpunkt

Die Bodengas-Entnahme entlang der zwei Profile Rheinfelden und Zeiningen erfolgte innerhalb von 11 Tagen. Um abklären zu können, ob die äusseren Bedingungen (insbesondere Einwirkungen von Luftdruck und Gezeiten) auf die Konzentrationsschwankungen der Einzelgase einen nachweisbaren Einfluss ausüben und die Interpretation der Resultate beeinträchtigen könnten, wurden an je einem **Standardpunkt** im Profil Rheinfelden (Punkt Nr. 50) und im Profil Zeiningen (Punkt Nr. 105) **tägliche Vergleichsmessungen** durchgeführt (Rammung jeweils wiederholt). Die Ergebnisse sind mit Zeitangabe der Gasentnahme auf den Datenblättern 2 und 5 aufgelistet. Mit diesen Repetitionsmessungen sollten lediglich die Schwankungsbreiten der Gaskonzentrationen ermittelt werden, die für die Interpretation der Bodengasprofile bekannt sein müssen. Auf die Aufnahme langer Messreihen an einem Punkt musste aus Kostengründen verzichtet werden. **Zusätzliche Repetitionsmessungen** ergaben sich bei der Ergänzung der unverdichteten Bodengasprofile zu den verdichteten Bodengasprofilen. Bei diesem Schritt wurden beidseitig um ausgewählte schon beprobte Punkte weitere Messpunkte gesetzt. Dabei wurden die jeweils schon gemessenen Zentralpunkte ebenfalls nochmals beprobt.

In Beil. 5 und 6 sind die Messungen an den Standardpunkten zusammengestellt, die in den Bodengasprofilen Rheinfelden und Zeiningen ausgeführt wurden. Auf der Beilage ist jeweils in Bild a der zeitliche Gang der ϵ_{NN} -Gezeiten-Strain-Komponente für die Region Rheinfelden/Zeiningen dargestellt. Die ϵ_{NN} -Gezeiten-Strain-Komponente ist eine der Normalkomponenten des Straintensors, der die differentielle Deformation in Nord-Süd-Richtung beschreibt. Auf einer West-Ost verlaufenden Störung wären gemäss der dargestellten Kurven Kompression und Dilatation in Nord-Süd-Richtung zu erwarten. Die Daten wurden vom Zentralobservatorium in Schiltach BRD (Dr. Zürn) theoretisch berechnet und uns zur Verfügung gestellt. Zwei weitere Teilbilder (b und c) enthalten die Gaskonzentrationen der gemessenen Gase an den Standardpunkten in den beiden Bodengasprofilen. Meteorologische Angaben (Windgeschwindigkeiten, Niederschlag und Luftdruck) der etwas über 20 km westlich gelegenen Messstation Basel-Binningen geben die Teilbilder d und e. Diese Daten stammen von der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich, Sektion Daten. Die Darstellung f enthält die Bodenlufttemperatur, gemessen nach der Bodengasentnahme im Rammloch.

Im **Bodengasprofil Rheinfelden** liegt der Standardpunkt (Nr. 50) nahe der ca. West-Ost verlaufenden Rheinfelder Verwerfung. Es ergeben sich nur für die Komponenten CH_4 und H_2 wesentliche zeitabhängige Konzentrationsänderungen. Visuell verglichen zeigt sich kein Zusammenhang mit der Bodenlufttemperatur, den Luftdruckwerten oder den Windgeschwindigkeiten. Dabei ist allerdings zu bemerken, dass die

Feldkampagne während einer ausgesprochenen Schönwetterperiode stattfand, während der die meteorologischen Verhältnisse stabil waren. Die Werte für CH_4 , H_2 und die höheren Kohlenwasserstoffe (C_2 - C_5) scheinen aber visuell einen ähnlichen Verlauf wie die ϵ_{NN} -Gezeiten-Strain-Komponente der Region Rheinfelden/Zeiningen aufzuweisen. Diese vermuteten Abhängigkeiten wurden nach KENDALL getestet. Wegen der geringen Punktezahll hat dieser statistische Test aber nur geringe Aussagekraft. Das Zusammenhängigkeitsmass r_K nimmt wie der Korrelationskoeffizient bei der Regressionsrechnung Werte zwischen -1 und +1 an. Die Werte für r_K , das den Zusammenhang zwischen der ϵ_{NN} -Gezeiten-Strain-Komponente und den jeweiligen Gasen zeigt, nimmt folgende Werte an: 0.62 für H_2 , 0.43 für CH_4 , 0.33 für $\Sigma(\text{C}_2$ - C_5), 0.33 für CO_2 , -0.33 für N_2 , -0.05 für O_2 und 0.23 für den Rest. N_2 ist negativ korreliert, O_2 ist praktisch unkorreliert. Dies bedeutet, dass mit grösserer Öffnung der Verwerfung die Konzentrationen an H_2 , CH_4 , $\Sigma(\text{C}_2$ - C_5) und CO_2 anstiegen, die Konzentration an N_2 (d.h. dem Hauptbestandteil der Atmosphäre) hingegen sank. Diese Abhängigkeit ist aber nur signifikant erwiesen für H_2 (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%). Für die andern Gase betragen die ungefähren Irrtumswahrscheinlichkeiten: CH_4 20%, ΣC_2 - C_5 , CO_2 und N_2 30%, Rest 55% und O_2 90%.

Im **Bodengasprofil Zeiningen** lag der Standardpunkt Nr. 105 etwas nördlich der Hauptabschiebung der Zeininger Störungszone. Es ergaben sich zusätzlich zu den Komponenten CH_4 und H_2 auch für die Komponenten höhere Kohlenwasserstoffe (ΣC_2 - C_5), CO_2 und O_2 deutliche zeitabhängige Konzentrationsschwankungen (Beil. 6). Während die gegenläufigen Konzentrationsschwankungen von CO_2 und O_2 mit grosser Wahrscheinlichkeit mit der Aktivität von Mikroorganismen zusammenhängen, lässt sich für die restlichen erwähnten Komponenten ebenfalls wie im Bodengasprofil Rheinfelden am ehesten ein Zusammenhang mit dem zeitlichen Verlauf der ϵ_{NN} -Gezeiten-Strain-Komponente von Rheinfelden/Zeiningen vermuten. Da der Standardpunkt offenbar nicht im Bereich einer wichtigen Störung liegt (vgl. Gaskonzentrationen Beil. 4) und die grossen Abschiebungen der Zeininger Bruchzone wesentlich vom West-Ost-Verlauf abweichen (die dargestellten ϵ_{NN} -Werte gelten nur für ungefähr West-Ost verlaufende Störungen), ist hier die statistische Kontrolle der Abhängigkeiten nicht sinnvoll.

In der Literatur ist schon verschiedentlich auf eine Abhängigkeit zwischen der **Gezeitenwirkung** und Konzentrationsschwankungen der austretenden Tiefengase hingewiesen worden (ERNST 1969a, TUGARINOV & SARDAROV 1977, SUGISAKI 1981, WOLLENBERG et al. 1977).

Auch **periodische Schwankungen** des Bodengasaustrittes **im Tagesrhythmus** wurden schon verschiedentlich festgestellt (Quellenhinweise in KING 1986), so für O_2 , CO_2 , N_2 , H_2 , He, Rn, Hg und CH_4 . Dies wird mit der täglich periodischen Sonneneinstrahlung begründet. Die Temperaturschwankungen wirken sich zwar direkt nur bis in eine Tiefe von wenigen Dezimetern aus, können aber als Nebenwirkung Spannungsänderungen erzeugen, die sich bis in den tieferen Untergrund auswirken können. Die täglich periodischen Temperaturschwankungen sind zudem für täglich auftretende Winde (SATO et al. 1986) verantwortlich, die sich ebenfalls auf die Entgasung auswirken könnten. Diese Erscheinungen sind vermutlich vor allem in ariden oder halbariden

Gebieten von primärer Wichtigkeit. In unserem Klimabereich mit der dichten Vegetationsdecke ist aber der Einfluss der Erwärmung auf die Aktivierung der Tätigkeit der Bodenorganismen zu beachten, die das Verhältnis O_2 - CO_2 beeinflussen.

Jährliche Schwankungen der Bodengasgehalte, insbesondere des Verhältnisses CO_2/O_2 sind schon von verschiedenen Autoren beschrieben worden (SUGISAKI et al. 1983, ERNST 1969a). Die Konzentrationen von O_2 und CO_2 verhalten sich dabei gegenläufig, was auf erhöhte (im Sommer) und erniedrigte (im Winter) Aktivität der Bodenorganismen zurückgeführt wird. Diese jährlichen Schwankungen sind für die Auswertung der Bodengasprofile Rheinfelden und Zeiningen nicht von Belang. Es ist aber zu erwarten, dass das Verhältnis O_2 - CO_2 auch tägliche Schwankungen und eine Abhängigkeit von der Vegetation (Wald, Wiese) oder der Bewirtschaftung zeigt (ERNST 1968, GREGORY 1988 a,b).

Ebenso ist schon festgestellt worden (Quellenhinweise in KING 1986), dass die Konzentration von Rn vom **Luftdruck** abhängig ist (steigende Konzentration bei fallendem Luftdruck), ebenso wurde eine Konzentrationserhöhung bei starkem Wind beobachtet. In Giswil (Kanton Obwalden) wurde an einem Gaustritt aus Geröllschutt beobachtet, dass die Gasaustritte auf den Barometerstand reagieren (BÜCHI & AMBERG 1983).

Beträchtliche Erhöhungen der Gaskonzentrationen vor **Erdbeben** sind schon bis zu einer Distanz von mehreren hundert Kilometern vom Epizentrum und bis mehrere Monate vor dem Erdbeben beobachtet worden (KING 1986, FRIEDMANN 1985). Ebenso Veränderung der Gaskonzentrationen nach Sprengungen. Diese Effekte dürften im Gebiet von Rheinfelden/Zeiningen nicht von Bedeutung sein. In der weiteren Region Rheinfelden (Tafeljura und Dinkelberg) wurden in den letzten Jahrzehnten bis heute lediglich Erdbeben der Magnitude 2 bis 4 in einer Tiefe von 6 bis 25 km festgestellt (DEICHMANN 1987, MAYER-ROSA et al. 1983). Zudem handelt es sich bei den durch die Erdbeben verursachten Erhöhungen um langfristige Konzentrationsschwankungen.

Die Feldmessungen in den beiden Profilen Rheinfelden und Zeiningen fanden in einer Schönwetterperiode statt ohne nennenswerte **Niederschläge**. Die Resultate sind deshalb nicht durch Niederschlagseinschlagwirkung verfälscht (vgl. Beil. 5 und 6).

6.2 Folgerungen für die Interpretation

Ziel dieser Feldkampagne war, Zonen erhöhter Gaswegsamkeit zu lokalisieren. Erwünscht wäre deshalb eine zeitlich konstante Entgasung aus dem tieferen Untergrund mit deutlich höheren Konzentrationen über Störungen. Die oben diskutierten Schwankungen sind also unerwünschte Effekte. Sie erschweren die Interpretation, da aus Kostengründen die einzelnen Bodengasprofile nicht mehrfach vermessen werden können. Die natürlichen Schwankungen wirken sich für die umrissene Zielsetzung vor allem dann störend aus, wenn sie durch biolo-

gische Aktivität im Boden verursacht wird, die in keiner Relation zu den Störungsausbrüchen steht. Die zeitlichen Konzentrationschwankungen über Störungsausbrüchen dürfen ihrerseits nicht zu extrem sein und insbesondere müssen sie stets die Minimalwerte der Messpunkte über nicht gestörten Gebieten übertreffen.

Für die Auswertbarkeit der Bodengasprofile lässt sich sagen, dass bei den Gasen CH_4 , $\Sigma\text{C}_2\text{-C}_5$, H_2 und z.T. bei CO_2 die niedrigsten Konzentrationen in den Bodengasprofilen eine bis mehrere Grössenordnungen tiefer als die höchsten Konzentrationen sind. Die Störungen lassen sich dadurch gut erkennen. Die Konzentrationschwankungen an den Standardpunkten und bei den Doppelmessungen zeigen das Ausmass der zu erwartenden Schwankungen an. Bei der Interpretation von Details in den Bodengasprofilen muss die Grösse der natürlichen Schwankungen der Messwerte der wichtigsten Komponenten im Auge behalten werden. Die **Abweichungen** betragen etwa 55% bei H_2 und ca. 35% bei CH_4 und bei $\Sigma\text{C}_2\text{-C}_5$ (ermittelt aus Standardmesspunkten und Doppelmessungen in den beiden Bodengasprofilen).

6.3 Summarische Ergebnisse beider Bodengasprofile und Vergleich mit

Literaturdaten

In beiden Bodengasprofilen zeigen die Komponenten O_2 , CO_2 , H_2 , CH_4 und die höheren Kohlenwasserstoffe ($\Sigma\text{C}_2\text{-C}_5$) eine stark von der Zusammensetzung der Atmosphäre abweichende Konzentration (vgl. Tab. 1). Dies bedeutet, dass die Bodengasproben im wesentlichen durch aus der Tiefe zuströmende Gase oder im Boden entstandene Gase dominiert sind.

Der Vergleich mit Literaturdaten ist bei den meisten Komponenten recht schwierig, ergibt aber interessante Quervergleiche. Meist handelt es sich bei den publizierten Daten um Bodengasproben, häufig aber auch um Analysen der Gase aus Gasblasen in Mineralwässern. Weiter sind verschiedene Entnahmemethoden (Standrohre, Bohrungen, Gassonden) angewendet worden und die Gasproben wurden insbesondere auch aus unterschiedlichen Tiefen entnommen.

Im Bodengasprofil Rheinfelden sind die gemessenen **CH_4 -Werte** etwa eine Grössenordnung höher als im Bodengasprofil Zeiningen. Zudem zeigt sich ein Unterschied im Verhältnis $\text{CH}_4/(\Sigma\text{C}_2\text{-C}_5)$ in den beiden Profilen. Während das Verhältnis im Bodengasprofil Rheinfelden etwa 10/1 beträgt, ist es im Profil Zeiningen ca. 1/1. Weiter bestehen Unterschiede in der Zusammensetzung der höheren Kohlenwasserstoffe (vgl. Datenblätter 1-6). Da die Spitzenwerte deutlich störungsbezogen liegen, muss das emporsteigende Tiefengas offenbar schon diese unterschiedliche Zusammensetzung zeigen. ERNST (1971) stellte im Bereich des Untersees (Bodensee) über Störungen etwa um 2 Grössenordnungen höhere Konzentrationen von CH_4 fest als die Untersuchungen der Nagra in den beiden besprochenen Bodengasprofilen. Diese Profile liegen allerdings in einem anderen geologischen Umfeld, nämlich im Molassegebiet. In nahegelegenen Tiefbohrungen (Umfeld

Untersee) wurden aber keine bedeutenden Kohlenwasserstoffvorkommen festgestellt.

Der **Wasserstoffgehalt** erreicht im Profil Rheinfeldern im Bereich des Ausbisses der Rheinfelder Verwerfung (Kristallin unter 400 Meter Überdeckung) Konzentrationen bis maximal 671 ppm H₂. Die Konzentrationen im Profil Rheinfeldern sind bedeutend höher als im Profil Zeiningen, wo erstaunlicherweise am Ausbiss der Hauptabschiebung der Zeininger Störungszone kein H₂ gemessen wurde. Die Komponente Wasserstoff scheint aber generell grosse zeitabhängige Konzentrationsschwankungen zu zeigen, wie aus dem zeitlichen Gang an den Standardpunkten (Beil. 5 und 6) ersichtlich ist. Auch Daten in SUGISAKI et al. (1983) zeigen an Messstationen grosse Schwankungen des H₂-Gehaltes. WAKITA et al. (1980) beschreiben von der aktiven Yamasaki Fault (strike-slip fault mit seismischer Aktivität, Beben bis Magnitude 5, mittlerer horizontaler Verschiebungsbetrag bis 1 mm/a) in Japan, wo das Kristallin von einer nur wenigen Meter mächtigen Sedimentdecke überlagert ist, H₂-Konzentrationen bis über 30000 ppm. Ähnliche Beispiele finden sich bei SATO et al. (1986) und SUGISAKI et al. (1983). Die He-Konzentrationen waren nicht erhöht. Die hohen H₂-Gehalte führen WAKITA et al. auf chemische Reaktionen in neu entstandenen Bruchflächen zurück.

H₂ kann zwar auch in situ durch biologische Aktivität von Mikroorganismen entstehen. Dabei entstehen aber einerseits auch erhöhte Gehalte an CH₄ und CO₂ und andererseits reduziert sich der Sauerstoff-Gehalt (ALEXANDER 1961).

Die **Radon**-Werte erreichen im Mittel etwa 150 pCi/l, im Extremfall bis über 400 pCi/l. Die Radon-Profile geben nur z.T. ein kohärentes Bild zu den anderen Bodengaskomponenten ab. Insbesondere das mächtige, breite Spitzenwertband im Profil Zeiningen scheint nicht nur störungsbedingt zu sein. Das Zentrum ist offenbar gegen Norden versetzt und liegt über vorwiegend tonig-mergeligen und sulfathaltigen Gesteinen (Keuper, Lias, Opalinus-Ton). Dies lässt vermuten, dass Radon z.T. in situ in diesen Gesteinen entsteht. Auch bei GREGORY (1988b) zeigt die Kartierung der Konzentrationen von He, CO₂ und O₂ eine abweichendes Bild von der Kartierung der Rn-Messungen. Möglicherweise wird das entstehende, gut lösliche Radon im Wasser gelöst und nicht mehr freigesetzt (GREGORY 1988a). Dies könnte erklären, weshalb die bis ins Permokarbon/Kristallin reichenden Störungen in den beiden Bodengasprofilen an der Erdoberfläche keine ausgeprägten Radon-Anomalien zeigen. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Kristallin/Perm-Wässer der etwa 10 km weiter östlich liegenden Säckinger Badquelle und Margarethenquelle hohe Uran-Konzentrationen und hohe Radon-222-Aktivitäten aufweisen (SCHMASSMANN et al. 1984).

In den beiden Bodengasprofilen konnte ein gegenläufiger Gang der Konzentrationen von O₂ und CO₂ festgestellt werden. Dies zeigt sich beispielsweise besonders deutlich in den Resultaten des Standardpunktes im Profil Zeiningen (Beil. 6, c). Die Werte aus dem Bodengasprofil Zeiningen sind überdies in einem Graph aufgetragen (Fig. 10). Die Werte haben einen Korrelationskoeffizienten von 0.89. Im Bodengasprofil Zeiningen sind die gemessenen O₂-Werte höher, die

CO₂-Werte aber tiefer als im Bodengasprofil Rheinfelden. Obwohl der gegenläufige Gang von O₂ und CO₂ auch auf jungen biogenen Ursprung des CO₂ hinweisen könnte, ist doch auffällig, dass in den beiden Bodengasprofilen vor allem im Bereich der Störungen höhere Konzentrationen zu finden sind (vgl. auch SUGISAKI et al. 1983, GREGORY 1988b). Das unter Überdruck (piezometrisches Niveau 80 Meter über Terrainhöhe) stehende Thermalwasser der Bohrung Engerfeld, das aus der Rheinfelder Verwerfung austritt, ist ein stark kohlenstoffhaltiges Wasser (RYF 1984). Dies könnte zu den hohen CO₂-Konzentrationen des Bodengases im Bereich der Rheinfelder Störung beitragen.

Die Komponente N₂ zeigt im Bodengasprofil Rheinfelden höhere Werte als im Profil Zeiningen. Mit Extremwerten von 80.1 % im Profil Rheinfelden und 73.4 % im Profil Zeiningen zeigen sich starke Abweichungen von der mittleren Konzentration in der Atmosphäre (78.1 %, vgl. Tab. 1 und Datenblätter 1-6).

Die Komponente **Rest**, die im wesentlichen gasförmiges Wasser und Argon enthält, hat in beiden Bodengasprofilen ähnliche Werte.

Fragen über **Entstehung und Herkunftstiefe** der gemessenen Bodengase lassen sich nur teilweise klären (vgl. Diskussion in Kapitel 2). Es lassen sich drei Entstehungsräume abgrenzen: a) Entstehung oberflächennah durch biologische Aktivität, b) Entstehung durch chemische Reaktionen im anstehenden Gestein und c) Aufstieg aus tieferliegenden geologischen Einheiten entlang von Zonen erhöhter Permeabilität. Für die strukturelle Deutung der Bodengasprofile ist natürlich nur der Aufstieg aus tieferliegenden Einheiten (Tiefengase) interessant. Als Tiefengase in den beiden Bodengasprofilen können die höheren Kohlenwasserstoffe (ΣC_2-C_5), CH₄, H₂ angesprochen werden, sind doch deren Konzentrationen im Bereich der bekannten Störungsausbisse um Grössenordnungen höher als bei den Punkten mit den tiefsten Konzentrationen. Für die restlichen Komponenten muss aber teilweise Entstehung durch biogene Aktivität oder Entstehung im anstehenden Gestein (Radon!) angenommen werden. Die wesentlichen Konzentrationsunterschiede in den beiden Bodengasprofilen (insbesondere im H₂ und im CH₄) sind schwierig erklärbar aber möglicherweise auf lithologische Unterschiede im Untergrund der zwei Profile zurückzuführen. Das Profil Zeiningen verläuft zum grossen Teil über jüngeren Sedimentgesteinen (Keuper bis Dogger), das Profil Rheinfelden liegt stratigraphisch tiefer (Muschelkalk/Keuper). Zudem sind Unterschiede im lithologischen Aufbau im Perm und im Kristallin wahrscheinlich. So verläuft im Bereich des Profils Zeiningen eventuell ein schmaler unterpermischer Sedimentationstrog, der bituminöse Schichten enthält, wie sie in der südlicher gelegenen Bohrung Wintersingen erbohrt wurden, in der Region Rheinfelden aber fehlen (vgl. SCHMASSMANN & BAYRAMGIL 1945, GÜRLER et al. 1987). Der lithologische Aufbau des kristallinen Untergrundes ist uneinheitlich, was aus den Bohrungen Rheinfelden-Weiherfeld, Rheinfelden-Engerfeld, Wintersingen und Zuzgen bekannt ist (vgl. HUBER & HUBER 1984). **Vergleichsdaten** aus anderen Regionen der Schweiz sind nur wenige vorhanden. Bei der Abteufung der **Nagra-Tiefbohrungen** in der Nordschweiz wurden die Gasgehalte der Spülung laufend überwacht (HINZE et al. 1989). Positive Gasanomalien zeigten vor allem das Permokarbon der Bohrung Weiach im Tiefenbereich der Kohlevorkommen

(bis einige % CH₄) und der Muschelkalk in der Bohrung Schafisheim im Tiefenbereich der festgestellten Überschiebung (weniger als 1% CH₄). Auch im Kristallin wurde CH₄ angetroffen. Die Daten der Spülungsüberwachung sind aber wegen des völlig unterschiedlichen Gasentnahmeverfahrens nicht direkt mit den Daten der Bodengasprofile Rheinfeldern und Zeiningen vergleichbar. Zahlreiche Angaben über die Konzentrationen gelöster Gase in Tiefenwässern finden sich in SCHMASSMANN et al. 1984. Eine detaillierte Zusammenstellung von **Gasaustritten** an der Oberfläche, in Stollen, Tunnels und Bohrungen am **Alpennordrand** (BÜCHI & AMBERG 1983) umfasst ausschliesslich Gasaustritte im Quartär, in der Molasse und im Helvetikum (v.a. höheres Helvetikum alpiner Decken) und ist deshalb für Vergleiche für die Verhältnisse in den Bodengasprofilen Rheinfeldern und Zeiningen, wo Kristallin und die Sedimentgesteine von Permokarbon bis Dogger vorhanden sind, nicht geeignet.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

7.1 Beurteilung der Resultate

Das Ziel der Feldkampagne war, in 2 Profilen mittels Untersuchung der Bodengase die Ausbisslinien von Störungen aufzufinden. Gleichzeitig sollte die Methodik getestet und das Vorgehen optimiert werden.

Das vorgegebene Ziel wurde erreicht. Die wichtigsten Störungen konnten schon mit unverdichteten Bodengasprofilen (Messpunktabstand 100 Meter) aufgefunden werden. Dies war möglich, da diese Störungen offenbar während der Bewegungsphasen auch das Nebengestein veränderten und heute nicht nur als eine einzelne Bewegungsfläche, sondern als schmale Störungsbänder vorliegen. Die Bewegungen fanden nicht nur auf einer diskreten Flächen statt, sondern es kam zur Bildung von Begleitstörungen und vermutlich traten auch Schichtschleppungen auf, die die Permeabilität der Zone erhöhten. Nebst dem Auffinden der wichtigsten Störungslinien gelang auch der Nachweis von bisher unbekanntem Störungslinien. Schwierigkeiten ergaben sich aber bei Störungsausbissen, die als scharfe Linie auftreten. Bei solchen Störungen, bei denen das Nachbargestein offenbar kaum spröde verändert wurde und deshalb keine erhöhte Permeabilität aufweist, ist der Nachweis nur bei sehr geringen Messpunktabständen möglich, da die aus der Störung austretende Gasfahne kleiner ist. Dabei spielt zudem die Mächtigkeit der Lockergesteinsdecke eine wichtige Rolle. Während im Profil Rheinfelden eine 10 bis 20 Meter mächtige Schotterbedeckung vorhanden ist, liegt im Profil Zeiningen unter der Vegetationsdecke meist direkt die Verwitterungsschicht des Anstehenden. Es muss deshalb befürchtet werden, dass im Bodengasprofil Zeiningen nicht alle diskreten Störungsausbisse erfasst werden konnten. Auch wegen des Probeentnahmeverfahrens muss eine minimale Mächtigkeit der Lockergesteinsdecke vorausgesetzt werden. Im Profil Zeiningen erwies sich diese Decke teilweise als zu geringmächtig, weshalb die Rammung durch die Kofferung der Waldwege erfolgen musste.

Im Vergleich zu andern Arbeiten mit ähnlicher Zielsetzung in der Schweiz oder im grenznahen Raum (ERNST 1968, 1969b, 1971) sind die ausgeführten Bodengasprofile aufgrund der erhöhten Anzahl der gemessenen Komponenten und der erniedrigten Nachweisbarkeitsgrenzen aussagekräftiger.

Der Aussagewert der einzelnen geprüften Bodengaskomponenten ist unterschiedlich. Die Störungsausbisse konnten insbesondere mit den Komponenten CH_4 , den höheren Kohlenwasserstoffen C_2 bis C_5 , H_2 , CO_2 und Radon nachgewiesen werden. Möglicherweise wäre die Ergänzung der Komponentenzahl durch weitere Gase zu prüfen. In Frage kämen vor allem Quecksilber und Argon. In den ausgeführten Felduntersuchungen wurde He gaschromatographisch gemessen und ergab durchwegs Nullwerte. Es ist zu vermuten, dass aber auch Helium aussagekräftige Daten liefern würde, wenn die untere Nachweisbarkeitsgrenze

wesentlich gesenkt werden könnte (z.B. durch Massenspektrometrie, vgl. GREGORY 1988a,b). Bei genügend hohen Gaskonzentrationen könnten eventuell auch mittels Verhältnisbildung zwischen den Gasen wertvolle Rückschlüsse gezogen werden.

Die Flexibilität im Felde erwies sich als optimal. Ungefähr drei Stunden nach Probeentnahme lagen die Resultate jeweils vor, sodass rasch Schwerpunkte beim Verdichten der Profile gesetzt werden konnten. Auch für künftige Anwendungen empfiehlt sich das Setzen von Standardpunkten, an denen die natürlichen Schwankungen der Messwerte beobachtet werden können. Gasproben sollten dabei nicht unbedingt in fixen Zeitabständen, sondern vor allem bei starken Veränderungen der meteorologischen Verhältnisse und bei Höchst- und Minimalwerten der Gezeiten-Strain-Werte entnommen werden.

7.2 Ausblick auf weitere Einsatzmöglichkeiten

7.2.1 Lokale Kartierung des Verlaufs bekannter oder vermuteter Störungen

Die flächenhafte Gestalt des Ausbissnetzes der Störungen in einem Gebiet lässt sich natürlich erst definitiv erkennen, wenn mehrere parallel geführte Bodengasprofile vermessen werden (vgl. GREGORY 1988b). Dabei kann der Abstand der Profile und der Messpunktabstand innerhalb der Profile laufend den Erfordernissen und gewonnenen Kenntnissen angepasst werden.

Es ist denkbar, dass die Methode interaktiv mit anderen Wissenschaftszweigen verwendet werden könnte. So wenden beispielsweise RICHERS et al. (1986) Bodengasuntersuchungen zur Verifizierung von Luftbildauswertungen an.

Besonders erfolgversprechend und interessant wäre natürlich die Untersuchung von vermutlich neotektonisch aktiven Linien. In der Schweiz bestehen viele Indizien für das Vorhandensein solcher Störungen (HALDIMANN et al. 1984, ISLER 1985). Zum Teil sind neotektonische Krustenbewegungen im Alpenraum entlang diskreter Störungsflächen bekannt und detailliert geologisch untersucht worden (ECKARDT et al. 1983).

7.2.2 Suche nach unbekanntem Störungen

Für strukturelle Untersuchungen eines grösseren Gebietes, über das keine weiteren Angaben vorliegen, ist das in diesem Bericht dargestellte Vorgehen in Form von Bodengas-Suchprofilen im Normalfall zu aufwendig. Denkbar wäre aber ein Vorgehen, bei dem die Komponentenzahl für Voruntersuchungen spezifische reduziert würde.

SANDY & GOURNAY (1988) schlagen ein Radarverfahren zur flächenhaften Prospektion von Propan an der Erdoberfläche vor: Durch elektromagnetische Strahlung wird die Spin-Geschwindigkeit der Propan-Moleküle erhöht. Die beim Rückfallen auf eine tiefere Spin-Geschwindigkeit abgegebene Strahlung kann via Radar registriert werden. Die Untersuchungen sind möglich vom Lastwagen oder vom Helikopter aus. Die Vermessung mit Helikopter erlaubt die Untersuchung von 70 - 100 km²/d. Bei Windgeschwindigkeiten über 25 km/h wird die Qualität der Resultate stark abgeschwächt. RICHERS et al. (1986) weisen auf die Möglichkeit hin, dass der Einsatz von Spektrometern in Satelliten eventuell zum Nachweis von Kohlenwasserstoff-Austritten aus der Erdoberfläche angewendet werden kann. In der dichtbesiedelten Schweiz führen diese Verfahren (Messung der Konzentrationen der Gase in der bodennahen Atmosphäre) aber vermutlich nicht zum Erfolg, da die anthropogen verursachten Gase die Verteilung und Konzentration der natürlich aus der Lithosphäre austretenden Gase zu stark verschleiern.

LITERATURVERZEICHNIS

- AGRICOLA, G. (1556): De re metallica libri XII/Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen. Vollständige Ausgabe nach dem lateinischen Original, übersetzt und bearbeitet von Carl Schiffber. - dtv-bibl. 6086, Dtsch. Taschenb. Verl., München (1977).
- ALEXANDER, M. (1961): Introduction to Soil Microbiology. - Wiley, New York.
- BALL, T.K. & CLARKE, M. (1988): Soil gas geochemistry in the search for geothermal systems. In: GEOCHEMISTRY GROUP OF THE MINERALOGICAL SOCIETY (Ed.): Gas Release, Reaction and Mobility in Crustal Rocks (p. 9). - Programme and Abstracts Symp. 11./12. April 1988 London.
- BLÖSCH, E. (1910): Zur Tektonik des Schweizerischen Tafeljura. - Diss. Univ. Zürich.
- BÜCHI, U.P. & AMBERG, R. (1983): Erdgasindikationen des schweizerischen Alpenrandes. - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 37/92, 37-50.
- DEICHMANN, N. (1987): Seismizität der Nordschweiz, 1983-1986. - Nagra Tech. Ber. NTB 87-05. Nagra, Baden.
- DISLER, C. (1914): Stratigraphie und Tektonik des Rotliegenden und der Trias beiderseits des Rheines zwischen Rheinfeldern und Augst. - Verh. natf. Ges. 25, 1-96.
- DISLER, C. (1931): Geologie des Bezirks Rheinfeldern und der angrenzenden Gebiete. - Sonderh. Z. Vom Jura zum Schwarzwald 6.
- DISLER, K. (1912): Geologische Skizze von Rheinfeldern. - Jber. Mitt. oberrh. geol. Ver. (N.F.) 2/2, 19-34.
- ECKARDT, P., FUNK, H., LABHART, T., FISCHER, W. & GUBLER, E. (1983): Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein-Rhone-Linie. - Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich (N.F.) 239.
- ENEZIAN, G. (1984): Der Weg zur Rheinfelder Thermalquelle. - Rheinfelder Njbl. 1984, 27-41.
- ERNST, W. (1968): Verteilung und Herkunft von Bodengasen in einigen süddeutschen Störungszonen. - Erdöl u. Kohle, Erdgas, Petrochemie 21/10, 605-610 u. 21/11, 692-697.
- ERNST, W. (1969a): Nachweis der Erdzeiten mit Bodengasen. - Meteorol. Rdsch. 22/2, 140-142.
- ERNST, W. (1969b): Störungsabgrenzungen im Umkreis des Überlinger Sees mit Bodengasen. - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol.- u. -Ing. 35/88, 1-11.
- ERNST, W. (1970): Erdbebenvorhersage - Zusammenhang zwischen Gaskonzentration und Erdbeben. - Goldmann, München.

- ERNST, W. (1971): Tektonische Untersuchungen mit der Gasmethode im westlichen Bodenseegebiet und im Tessin bei Lugano (Schweiz). - Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 37/92, 37-50.
- FABER, E. (1987): Zur Isotopengeochemie gasförmiger Kohlenwasserstoffe. - Erdöl/Erdgas/Kohle 103/5, 210-218.
- FRIEDMANN, H. (1985): Anomalies in the radon content of spring water as earthquake precursor phenomena. - Earthquake Predict. Res. 3, 179-189.
- GÜRLER, B., HAUBER, L. & SCHWANDER, M. (1987): Die Geologie der Umgebung von Basel mit Hinweisen über die Nutzungsmöglichkeiten von Erdwärme. - Beitr. geol. Karte Schweiz (N.F.) 160.
- GREGORY, R.G. (1988a): Fracture Mapping in Clays: The Design and application of a Mobile Gas Geochemistry Laboratory for the Analysis of Soil Gases. - Dept. Environ. Rep. DOE/RW/88.088.
- GREGORY, R.G. (1988b): Fracture Mapping in Clays: Soil Gas Surveys at Down Ampney, Gloucestershire. - Dept. Environ. Rep. DOE/RW/88.081.
- HALDIMANN, P., NAEF, H. & SCHMASSMANN, H. (1984): Fluviale Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. - Nagra Tech. Ber. NTB 84-16. Nagra, Baden.
- HAUBER, L. (1980): Geology of the salt field Rheinfelden-Riburg, Switzerland. In: 5th Symposium on Salt. - North. Ohio geol. Soc., Proc. I, 83-90.
- HINZE, W., JÄGGI, K. & SCHENKER, F. (1989): Gasmessungen beim Abteufen der Sondierbohrungen Böttstein, Weiach, Riniken, Kaisten, Schafisheim und Leuggern. - Nagra Tech. Ber. NTB 86-11. Nagra, Baden.
- HIRABAYASHI, J., OSSAKA, J. & OZAWA, T. (1986): Geochemical Study on Volcanic Gases at Sakurajima Volcano, Japan. - J. geophys. Res. 91/B12, 12167-12176.
- HUBER, M. & HUBER, A. (1984): Das Kristallin des Südschwarzwaldes. - Nagra Tech. Ber. NTB 84-30. Nagra, Baden.
- HUNT, J.H. (1979): Petroleum Geochemistry. - Freeman, San Francisco.
- ISLER, A. (1985): Literaturzusammenstellung zur Neotektonik. - Nagra Tech. Ber. NTB 84-29. Nagra, Baden.
- JÄCKLI, H. & WYSSLING, L. (1972): Die Grundwasserverhältnisse im aargauischen Rheintal zwischen Wallbach und Rheinfelden. - Wasser- u. Energiewirtschaft. 64/6.
- JENDEN, P.D., KAPLAN, T.R., POREDA, R.J. & CRAIG, H. (1988): Origin of nitrogen-rich natural gases in the California Great Valley: Evidence from Helium, carbon and nitrogen isotope ratios. - Geochim. cosmochim. Acta 52, 851-861.

- KEMPF, TH. (1983): Grundwasserkarte Blatt Rheinfelden, 1:25'000. - Baudep. Kt. Aargau, Abt. Gewässerschutz.
- KING, C.-Y. (1986): Gas Geochemistry Applied to Earthquake Prediction: An Overview. - J. Geophys. Res. 91/B12, 12269-12281.
- LÖSER, G. (1959): Radioaktive Bodenluftmessungen als Beitrag zur Klärung tektonischer Probleme am Südwestrand des Thüringer Waldes. - Geophys. u. Geol., Folge 1.
- LORBER, K.-E., STÄDTER, H. & RUTHENBERG, K. (1986): Gaschromatographie. - EntsorgungsPraxis 86/3, 184-186.
- MASON, B. (1966): The Principles of Geochemistry. - 3rd Ed., J. Wiley and Sons, New York.
- MATTER, A., PETERS, T.J., BLAESI, H.-R., MEYER, J., ISCHI, H. & MEYER, CH. (1988): Sondierbohrung Weiach Geologie, Textband und Beilagenband. - Nagra Tech. Ber. NTB 86-01. Nagra, Baden.
- MAYER-ROSA, D., BENZ, H., KRADOLFER, U. & RENGGLI, K. (1983): Inventar der Erdbeben 1910 - 1982 und Karte der Magnitudenschwellenwerte 1928 - 1982. - Nagra Tech. Ber. NTB 83-08. Nagra, Baden.
- McIVER, R.D. (1984): Near-surface hydrocarbon surveys in oil and gas exploration. - Oil and Gas J. 82, 115-117.
- MÜHLBERG, F. (1882): Uebersicht der Steinkohlebohrversuche im Aargau. - Mitt. aargau. natf. Ges. Heft 1, 184-191.
- MÜLLER, W.H., HUBER, M., ISLER, A. & KLEBOTH, P. (1984): Erläuterung zur «Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1 : 100 000». - Nagra Tech. Ber. NTB 84-25. Nagra, Baden.
- NAGRA (1985): Sondierbohrung Böttstein - Untersuchungsbericht. - Nagra Tech. Ber. NTB 85-01. Nagra, Baden.
- OHSHIMAN, N. (1988): 11. Measurement of Radon Concentration in Soil Gas. In: HONKURA, Y. & ISIKARA, A.M.: Multidisciplinary Research on Fault Activity in the Western Part of the North Anatolian Fault Zone (p. 114-117). - Dept. appl. Phys. Tokyo Inst. Technol., Tokyo u. Dep. Geophys. Kandilli Observatory Bogazici Univ., Istanbul.
- PETERS, T.J., MATTER, A., ISENSCHMID, CH., BLAESI, H.-R., MEYER, J. & ZIEGLER, H.-J. (1988): Sondierbohrung Kaisten Geologie, Textband und Beilagenband. - Nagra Tech. Ber. NTB 86-04. Nagra, Baden.
- REIMER, G.M. (1985): Prediction of central California earthquakes from soil gas helium fluctuations. - Pure and appl. Geophys. 122, 369-375.
- RICHERS, D.M., JONES, V.T., MATTHEWS, M.D., MACIOLEK, J., PIRKLE, R.J. & SIDLE, W.C. (1986): The 1983 Landsat Soil-Gas Geochemical Survey of Patrick Draw Area, Sweetwater County, Wyoming. - Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol. 70/7, 869-887.

- RYF, W. (1984): Thermalwasserbohrung 1983 Engerfeld, Rheinfelden. - Rheinfelder Njbl. 1984, 43-52.
- SANDY, J. & GOURNAY, L.S. (1988): Overview of gas-sensing radar surveys theory, instrumentation, surveying, and interpretation. - Oil and Gas J. 1988/Februar, 69-71.
- SATO, M., SUTTON, A.J., MCGEE, K.A. & RUSSELL-ROBINSON, S. (1986): Monitoring of Hydrogen Along the San Andreas and Calaveras Faults in Central California in 1980-1984. - J. geophys. Res. 91/B12, 12315-12326.
- SCHENKER, F. & DIETRICH, V.J. (1986): The Lake Nyos gas catastrophe (Cameroon). A magmatological interpretation. - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 66, 343-384.
- SCHENKER, F. & VUICHARD, D. (1988): Bericht über die Gasmessungen an Gesteins- und Mineralproben des Standortes Oberbauen Stock. - Unpubl. Nagra Interner Ber. Nagra, Baden.
- SCHMASSMANN, H. & BAYRAMGIL, O. (1945): Stratigraphie, Petrographie, Paläogeographie der Perm-Formation im schweizerischen Tafeljura und die Steinkohlenfrage der Nordschweiz. - Tätber. natf. Ges. Basell. 15, 17-117.
- SCHMASSMANN, H., BALDERER, W., KANZ, W. & PEKDEGER, A. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. - Nagra Tech. Ber. NTB 84-21. Nagra, Baden.
- SCHMIDT, K.J. (1984): Zur Geologie von Rheinfelden. - Rheinfelder Njbl. 40, 9-26.
- SCHÖLL, M. (1980): The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins. - Geochim. cosmochim. Acta 4, 649-661.
- SCHÖLL, M., TIETZE, K. & SCHOBERTH, S.M. (1988): Origin of methane in Lake Kivu (East - Central Africa). - Chem. Geol. 71, 257-265.
- SUGISAKI, R. (1981): Deep-Seated Gas Emission Induced by Earth Tide: A Basic Observation for Geochemical Earthquake Prediction. - Science 212, 1264-1266.
- SUGISAKI, R. (1985): Geochemical Indicator of Tectonic Stress Resulting in an Earthquake in Central Japan. - Science 229, 1261-1262.
- SUGISAKI, R., IDO, M., TAKEDA, H., ISOBE, Y., HAYASHI, Y., NAKAMURA, N., SATAKE, H. & MIZUTANI, Y. (1983): Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity. - J. Geol. 91/3, 239-258.
- SUTER, R. (1915): Geologie der Umgebung von Maisprach. - Diss. Univ. Basel.
- THOMAS, D.M., CUFF, K.E. & COX, M.E. (1986): The Association between Ground Gas Radon Variations and Geologic Activity in Hawaii. - J. geophys. Res. 91/B12, 12186-12198.

- TUGARINOV, A.I. & SARDAROV, S.S. (1977): Changes in the flows of radiogenic gases from depth produced by elastic deformation of the earth's crust. - Dokl. Acad. Sci. USSR, Earth Sci. Sect. 223/(1-6), 20-23.
- VOVK, I.F. (1987): Some geochemical and mineralogical peculiarities of deposits of radioactive materials as evidence for radiolysis in nature. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES: Natural analogues in radioactive waste disposal. - Prepr. Symp. Proc. Brussels 28-30th April 1987.
- WAKITA, H., NAKAMURA, Y., KITA, I., FUJII, N. & NOTSU, K. (1980): Hydrogen Release: A new indicator of fault activity. - Science 210, 188-190.
- WHITICAR, M.J., FABER, E. & SCHÖLL, M. (1986): Biogenic methane formation in marine and freshwater environments; CO₂ reduction vs. acetate fermentation - isotope evidence. - Geochim. cosmochim. Acta 50, 693-709.
- WOLLENBERG, H.A., STRAUME, T., SMITH, A.R. & KING, C.-Y. (1977): Variations in radon 222 in soil and ground water at the Nevada Test Site. - Lawrence Berkeley Lab. Rep. LBL-5905.
- WYLLIE, P.J. (1979): Magmas and volatile components. - Amer. Mineralogist 64, 469-500.

ANHANG

Punkt Nr.	CH4 ppm	ΣC2-C5 ppm	H2 ppm	He ppm	Radon pCi/l	CO2 Vol. %	H2S ppm	O2 Vol. %	N2 Vol. %	Rest Vol. %	Tb oC	Ta oC	P mmHg	C2 ppm	C3 ppm	i-C4 ppm	n-C4 ppm	i-C5 ppm	n-C5 ppm
10	6	1,7	73	<10	●	0,02	nn	20,93	77,24	1,80	19,2	17,8	998	<0,1	<0,1	<0,1	0,4	0,8	0,5
15	17	0,9	72	<10	●	5,56	nn	15,81	76,83	1,79	20,3	19,6	997	0,6	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
20	169	15,4	259	<10	●	5,94	nn	15,56	77,69	0,76	19,5	20,3	998	9,6	3,3	0,7	1,2	0,6	<0,1
25	22	1,3	57	<10	●	3,91	nn	17,32	77,98	0,78	20,4	21,5	998	1,0	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
30	3	0,4	85	<10	●	472,7	8,61	nn	9,44	80,13	1,81	17,7	22,0	998	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
35	33	1,9	194	<10	●	5,62	nn	14,37	77,75	2,24	17,6	22,3	998	1,4	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
40	58	3,8	85	<10	●	272,6	9,08	nn	10,44	78,63	1,84	18,1	21,6	998	3,0	0,8	<0,1	<0,1	<0,1
42	138	1,7	109	<10	●	180,3	7,82	nn	7,94	78,87	5,35	18,3	19,6	997	1,0	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
45	175	20,7	46	<10	●	186,4	3,02	nn	18,26	78,42	0,28	16,5	25,6	999	11,6	4,8	1,4	1,9	0,6
47	128	10,0	149	<10	●	261,8	3,25	nn	18,56	77,26	0,90	16,2	18,2	997	6,4	1,8	0,4	0,8	0,6
50	140	11,1	87	<10	●	405,5	3,79	nn	17,32	78,01	0,86	17,4	29,4	998	5,5	5,3	0,3	<0,1	<0,1
52	87	5,5	21	<10	●	5,14	nn	14,06	78,19	2,60	19,0	27,0	998	4,3	1,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
55	97	5,7	671	<10	●	197,3	6,65	nn	13,64	78,30	1,33	15,9	25,6	999	4,6	1,1	<0,1	<0,1	<0,1
57	43	5,8	514	<10	●	1,17	nn	19,05	76,83	2,89	14,8	22,4	997	5,2	0,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
60	7	0,4	44	<10	●	168,5	2,03	nn	18,78	77,71	1,47	14,9	24,9	999	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
70	31	5,4	127	<10	●	175,6	1,02	nn	19,29	78,50	1,17	15,6	19,1	999	5,0	0,4	<0,1	<0,1	<0,1
80	9	0,4	25	<10	●	262,2	3,23	nn	17,83	78,01	0,93	15,8	24,5	998	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
90	5	<0,1	<1	<10	●	202,7	1,26	nn	19,80	77,66	1,38	16,4	19,8	998	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
100	19	0,9	<1	<10	●	160,7	2,12	nn	19,35	77,83	0,69	17,2	19,1	999	0,7	0,2	<0,1	<0,1	<0,1
110	7	0,3	22	<10	●	202,9	3,60	nn	17,86	77,73	0,81	16,7	23,7	●	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
115	37	4,1	118	<10	●	160,7	2,27	nn	18,86	77,39	1,46	16,5	24,5	998	3,8	0,3	<0,1	<0,1	<0,1
120	49	5,8	189	<10	●	136,2	4,68	nn	16,59	77,61	1,10	16,3	26,8	●	4,9	0,9	<0,1	<0,1	<0,1
125	30	3,2	102	<10	●	77,8	3,21	nn	18,37	77,81	0,60	16,9	24,5	998	2,1	1,1	<0,1	<0,1	<0,1
130	51	5,7	97	<10	●	192,2	3,03	nn	17,95	78,21	0,79	15,8	25,3	●	5,1	0,6	<0,1	<0,1	<0,1
135	33	1,5	5	<10	●	153,7	3,98	nn	17,79	76,75	1,48	16,9	25,0	998	1,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1
140	101	5,2	26	<10	●	188,7	4,14	nn	17,52	77,34	0,99	16,5	27,2	●	4,1	1,1	<0,1	<0,1	<0,1
145	7	0,8	166	<10	●	158,4	6,93	nn	11,65	79,85	1,55	22,0	19,8	998	0,6	0,2	<0,1	<0,1	<0,1

Datenblatt 1: Daten Bodengasprofil Rheinfeldern. Beim Standardpunkt (Nr. 50) ist der dritte Messwert, bei den doppelt gemessenen Profilpunkten der erste Messwert angegeben. Ein Punkt bedeutet, dass die Messung aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich war.

Punkt	Datum	Zeit	CH4 ppm	ΣC2-C5 ppm	H2 ppm	CO2 Vol. %	O2 Vol. %	N2 Vol. %	R Vol. %	Tb oC	Ta oC	C2 ppm	C3 ppm	i-C4 ppm	n-C4 ppm	i-C5 ppm	n-C5 ppm	Strain
50,1	8-Aug-88	14:25	94	11,1	99	3,45	17,62	78,06	0,85	18,8	29,4	5,5	5,3	0,3	0,0	0,0	0,0	5,60
50,2	9-Aug-88	8:45	101	13,7	34	3,46	17,63	78,01	0,89	18,6	18,6	6,9	2,5	0,5	1,1	1,5	1,2	3,63
50,3	9-Aug-88	16:45	140	11,4	87	3,79	17,32	78,01	0,86	17,4	●	7,5	2,4	0,6	0,9	0,0	0,0	-8,81
50,4	10-Aug-88	10:20	170	14,8	133	4,12	16,88	77,27	1,70	17,4	20,5	9,3	2,9	0,7	1,4	0,5	0,0	10,44
50,5	10-Aug-88	17:00	92	9,3	89	3,08	17,64	76,84	2,42	18,0	●	6,9	1,7	0,2	0,5	0,0	0,0	-8,19
50,6	11-Aug-88	8:50	71	6,9	111	3,22	17,91	78,43	0,42	17,0	18,2	4,8	1,0	0,0	0,6	0,5	0,0	-7,52
50,7	12-Aug-88	15:25	206	12,3	289	3,51	17,75	76,55	2,14	19,7	20,1	8,1	2,6	0,6	1,0	0,0	0,0	10,75
R: Rest (v.a. H2Og + Ar)																		
Tb: Bodentemperatur in 100 cm Tiefe																		
Ta: Aussentemperatur																		
●: keine Messung																		

Datenblatt 2: Daten Standardpunkt Bodengasprofil Rheinfeldern (Messpunkt Nr. 50)

Punkt	Datum	Zeit	CH4	ΣC2-C5	H2	CO2	O2	N2	R	Tb	Ta	C2	C3	i-C4	n-C4	i-C5	n-C5	Strain	
			ppm	ppm	ppm	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %	oC	oC	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
105,1	12-Aug-88	9:15	2	0,9	0	10,7	11,58	76,72	0,97	15,6	22,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	-9,77	
105,2	15-Aug-88	9:15	4	1,9	9	10,1	10,86	78,59	0,42	16,4	20,1	0,8	0,8	0,3	0,0	0,0	0,0	-18,20	
105,3	15-Aug-88	17:05	10	7,1	29	15,2	8,09	75,82	0,92	16,8	25,0	2,7	2,7	0,6	1,1	0,0	0,0	2,08	
105,4	16-Aug-88	8:45	7	5,5	21	8,02	13,16	76,60	2,22	15,3	18,5	1,7	1,8	0,4	1,0	0,6	0,0	-16,74	
105,5	17-Aug-88	8:50	5	5,7	0	9,85	13,60	75,47	1,08	15,3	18,8	1,8	1,9	0,4	0,8	0,8	0,0	-13,13	
105,6	18-Aug-88	8:50	5	6,2	20	0,25	21,40	77,23	1,12	14,4	17,8	0,2	0,0	0,0	1,4	2,8	1,8	-7,92	
R: Rest (v.a. H2Og + Ar)																			
Tb: Bodentemperatur in 100 cm Tiefe																			
Ta: Aussentemperatur																			

Datenblatt 5: Daten Standardpunkt Bodengasprofil Zeiningen (Messpunkt Nr. 105)

Punkt Nr.	Datum	Zeit	CH4	ΣC2-C5	H2	He	CO2	H2S	O2	N2	Rest	Tb	Ta	C2	C3	i-C4	n-C4	i-C5	n-C5	
			ppm	ppm	ppm	ppm	Vol. %	ppm	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %	oC	oC	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
140	16-Aug-88	9:30	45	21,4	122	<10	2,61	nn	19,47	75,91	2,01	16,6	21,0	9,6	6,9	1,3	2,4	1,2	<0,1	
140b	17-Aug-88	11:05	6	5,1	<1	<10	1,67	nn	19,51	77,09	1,72	16,7	21,2	1,6	1,9	0,5	0,8	0,4	<0,1	
nn: nicht nachgewiesen																				
Rest: v. a. H2Og + Ar																				
Tb: Bodentemperatur in 100 cm Tiefe																				
Ta: Aussentemperatur																				

Datenblatt 6: Daten Doppelmesspunkt Bodengasprofil Zeiningen

Radon Monitoring Report



Terradex
Radon Detection Prod
Tech/Ops Landauer,
2 Science Road
Glenwood, Illinois 6042

Acct. No. 0401541

Detector Number	Detector Type	Starting Date	Ending Date	Field Data / Comments	Exposure pCi/l-days	Avg. Radon Conc. pCi/l	EXPOSURE BQ/M3-DAY	AVG RADON CONC. BQ/M3
786548	DRN	16.08.88	03.11.88		15183.7	192.2	561797	7111
786549	DRN	16.08.88	03.11.88		12141.5	153.7	449237	5687
786550	DRN	16.08.88	03.11.88		12512.2	158.4	462950	5860
786553	DRN	19.08.88	03.11.88		29281.7	385.3	1083423	14256
786554	DRN	19.08.88	03.11.88		29528.0	388.5	1092537	14376
786555	DRN	19.08.88	03.11.88		17948.1	236.2	664115	8738
786557	DRN	16.08.88	03.11.88		6143.9	77.8	227323	2878
786558	DRN	16.08.88	03.11.88		12698.0	160.7	469825	5947
786559	DRN	16.08.88	03.11.88		10757.5	136.2	398026	5038
786564	DRN	19.08.88	03.11.88		22926.1	301.7	848267	11161
786565	DRN	14.08.88	03.11.88		22372.5	276.2	827783	10220
786566	DRN	19.08.88	03.11.88		20991.2	276.2	776676	10219
786567	DRN	19.08.88	03.11.88		4908.3	64.6	181606	2389
786569	DRN	19.08.88	03.11.88		20714.4	272.6	766434	10085
786570	DRN	19.08.88	03.11.88		13704.5	180.3	507067	6672

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
				Q.C. Release ECH	Process No. A02252	Report Date 21-NOV-88	Date Received 16-NOV-88
						PAGE	2 OF 4

DETECTOR TYPES (Column 2)
 DSF — Indoor Air
 DSM — Soil
 DSW — Water
 DF — Outdoor Air
 DRN — Indoor Air (Radtrak)
 DGL — Indoor Air

The United States Environmental Protection Agency offers these guidelines in order to determine the urgency of the need for corrective action.

Indoor Air

Below 4 pCi/l:	Exposures in this range are considered average or slightly above average for residential structures. Although exposures in this range do present some risk of lung cancer, reductions of this level may be difficult.
Between 4 and 20 pCi/l:	Exposures in this range are considered above average for residential structures. You should undertake action to lower levels to about 4 pCi/l or below.
Between 20 and 200 pCi/l:	Exposures in this range are considered greatly above average for residential structures. You should undertake action to reduce levels within a few months.
Above 200 pCi/l:	Exposures in this range are among the highest observed in homes. Residents should undertake action within weeks to reduce these levels.
Remember:	There is increasing urgency for action at higher concentrations of radon. The higher the radon level in your home, the faster you should take action to reduce your exposures.

Radon in normal soil averages about 100 pCi/l. Levels above 500 pCi/l in the soil can begin to contribute significantly to indoor radon levels. Water can be a significant radon source if it contains more than 10,000 pCi/l.

The average radon concentration measured during this monitoring period is reported in column 7 in units of pCi/l (pico curies per liter). If the starting and ending dates were not provided this average concentration cannot be calculated and column 6 indicates the total exposure to radon in terms of pCi/l-days.

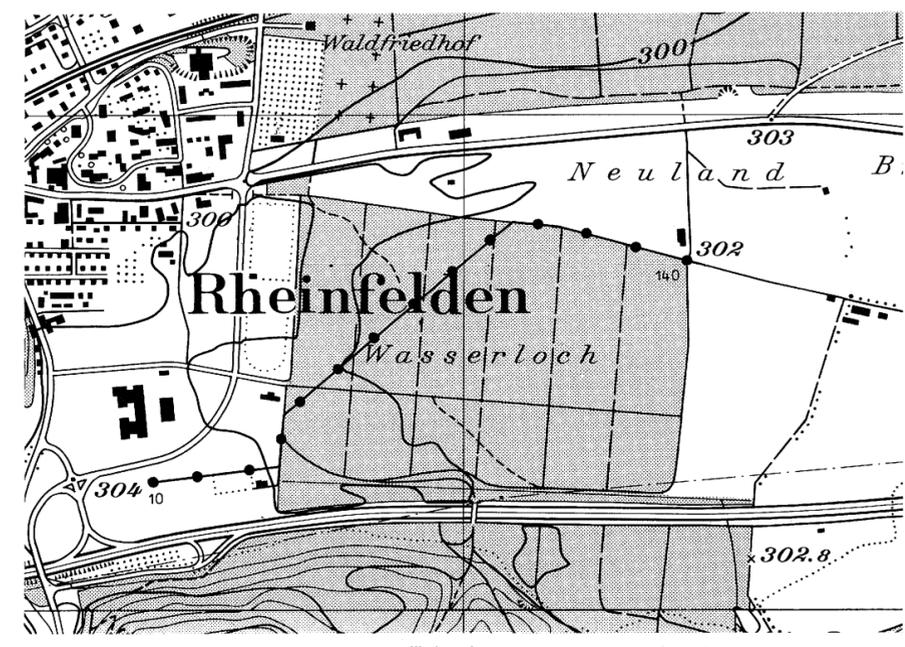
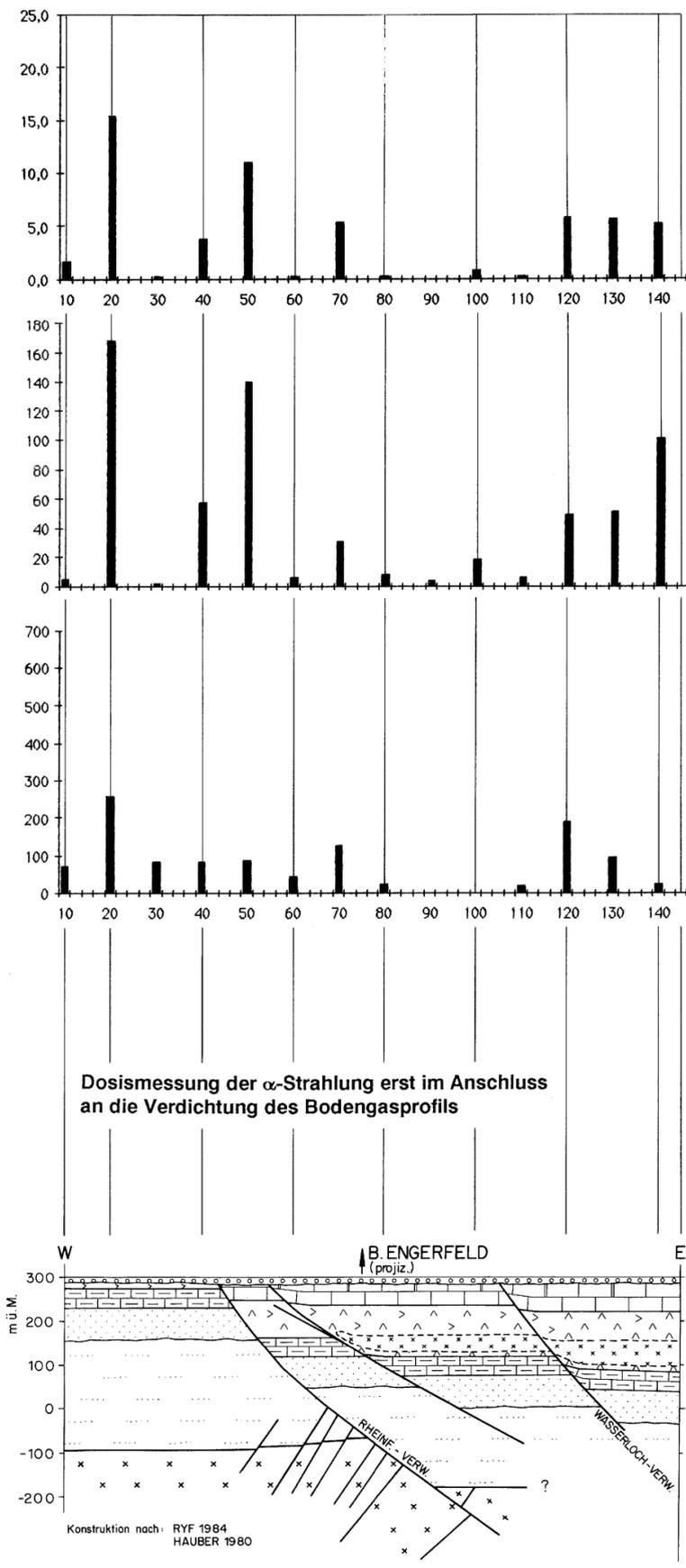
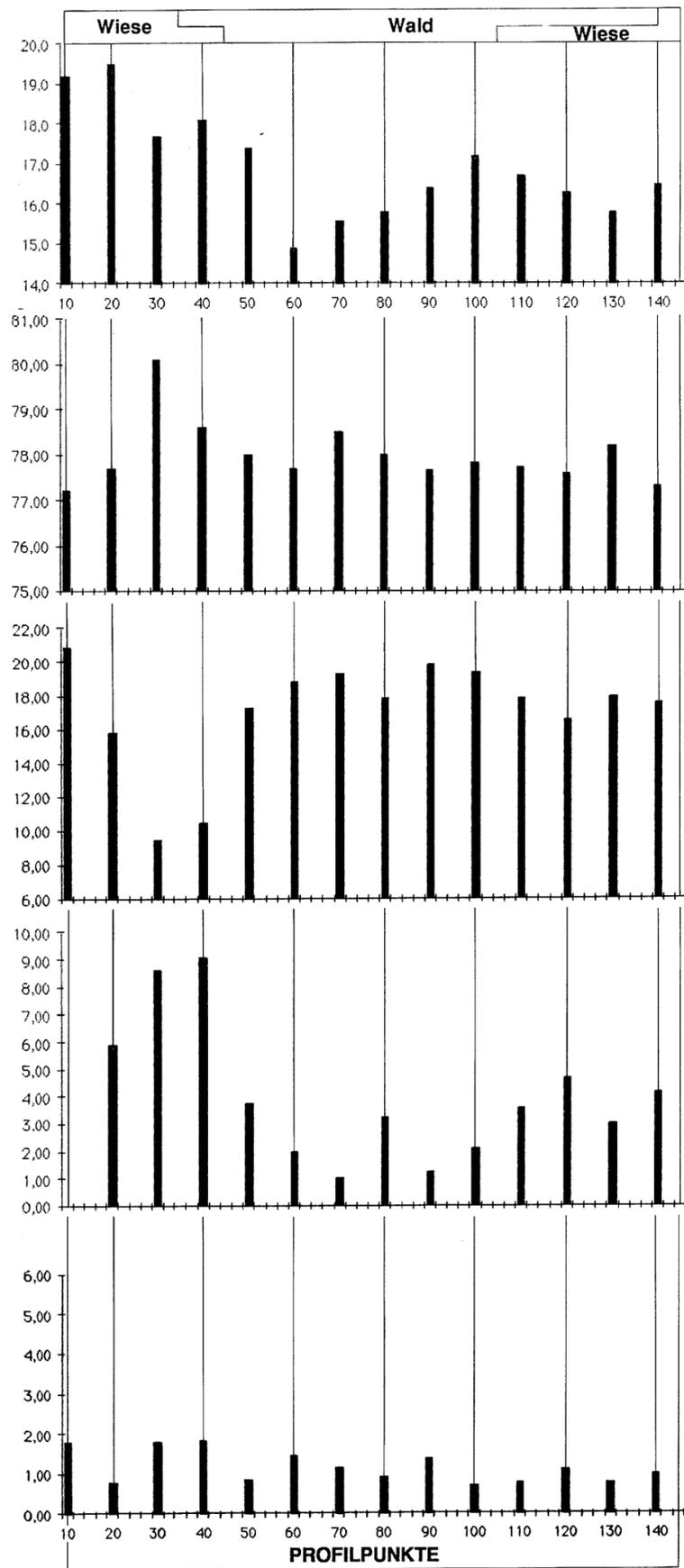
We recommend that the state Department of Public Health or the U.S. Environmental Protection Agency be contacted for further interpretation of results and for guidance concerning corrective measures.

It is important to note that the actual radon concentration in a home will change substantially during the day, week and year. If your home indicates levels above the "action level" we recommend additional monitors to be used to verify the initial results.

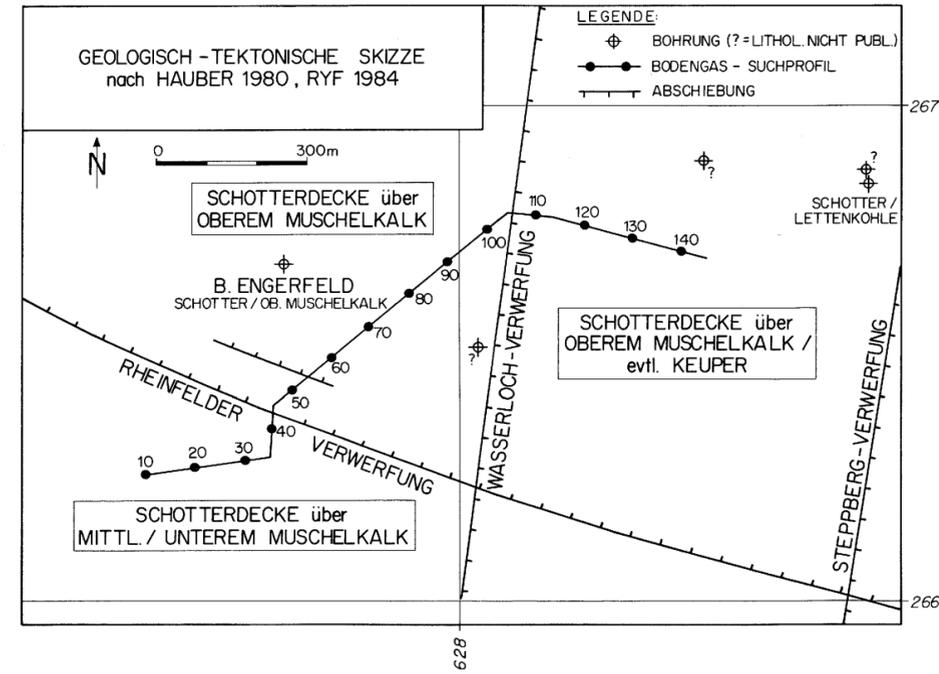
DISCLAIMER

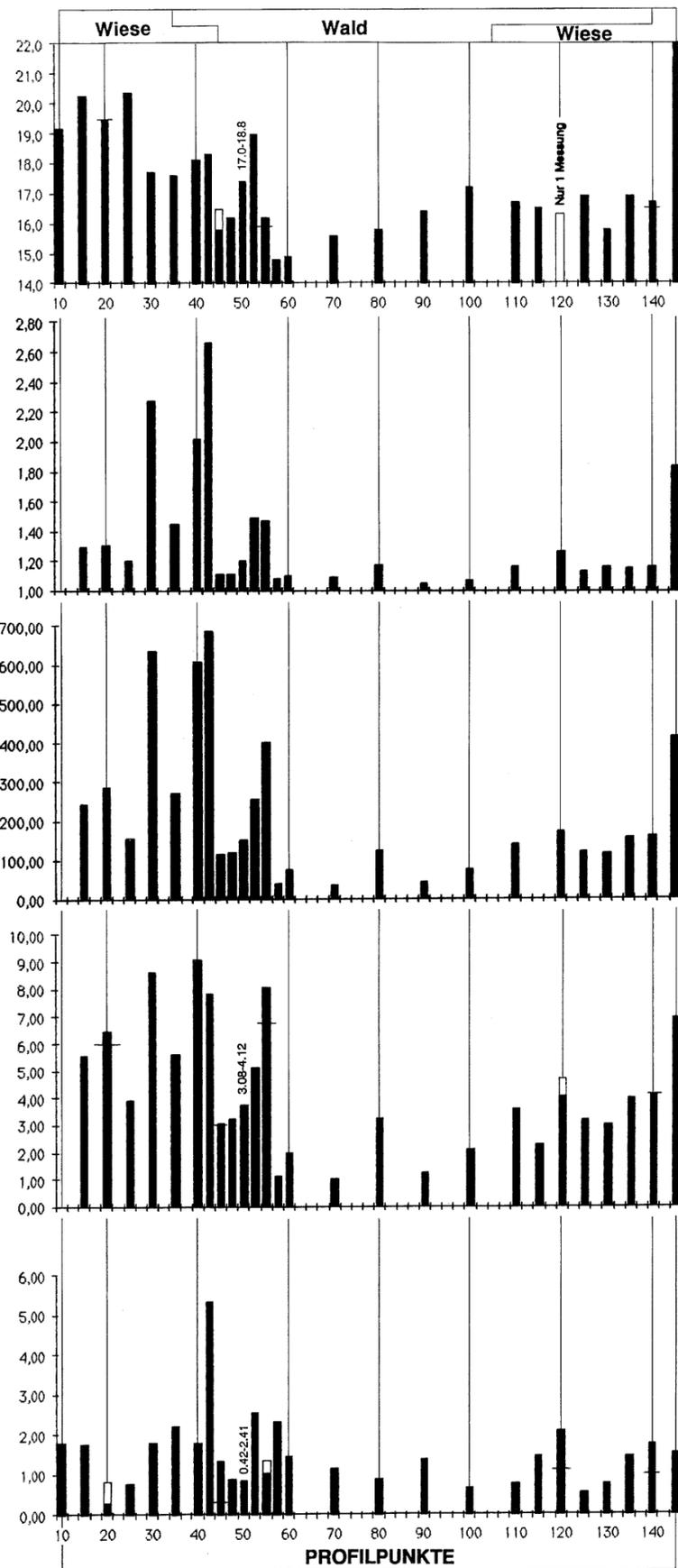
Terradex makes no warranty of any kind, express or implied, as regards the use, operation or analysis of any Terradex monitor. Terradex specifically disclaims implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose. Terradex is not responsible for any damage, including consequential damages, to persons or property resulting from the use of the monitor or the resulting data.

Datenblatt 7: Erläuterungsblatt zur Radon-Messung. Aufgelistet sind verschieden Werte aus den Bodengasprofilen Rheinfeldern und Zeiningen.



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 10.11.1988





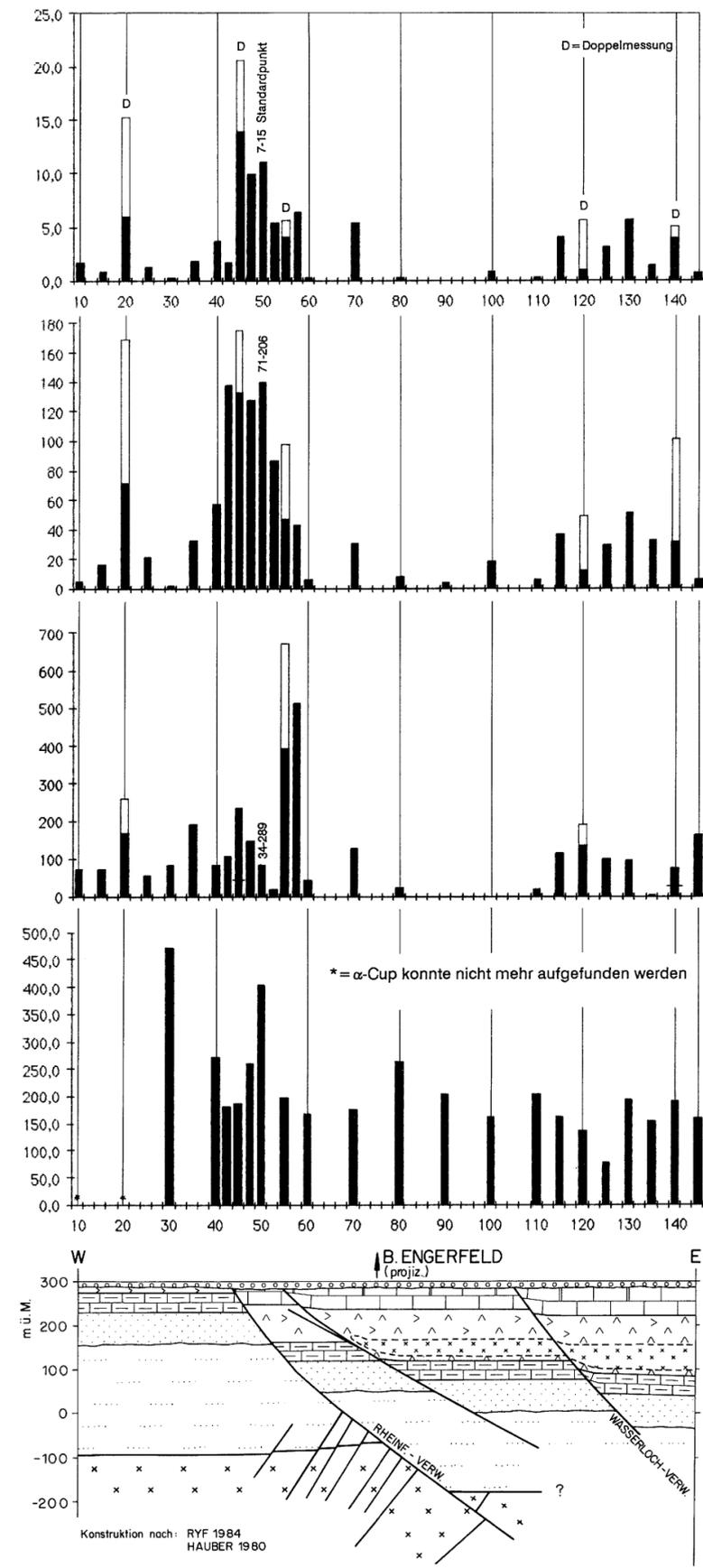
T °C in 1.2 m Tiefe

(N₂ Boden/O₂ Boden) / (N₂ Atmosphäre/O₂ Atmosph.)

(CO₂ Boden/O₂ Boden) / (CO₂ Atmosphäre/O₂ Atmosph.)

CO₂ Vol. %

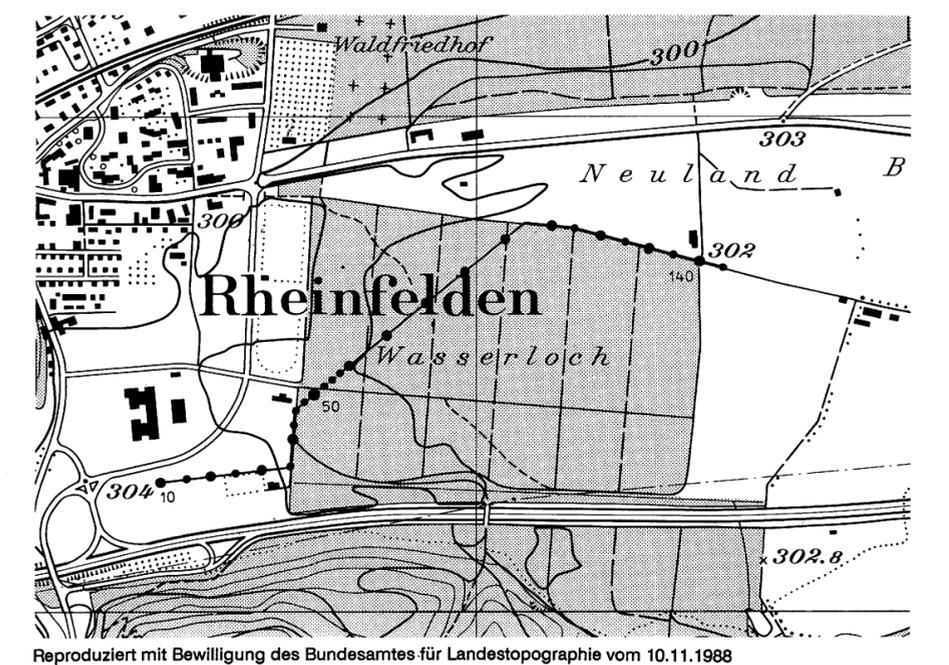
Rest Vol. %
 - H₂O gasförmig
 - Ar
 - NO_x
 - Kohlenwasserstoffe
 - H₂



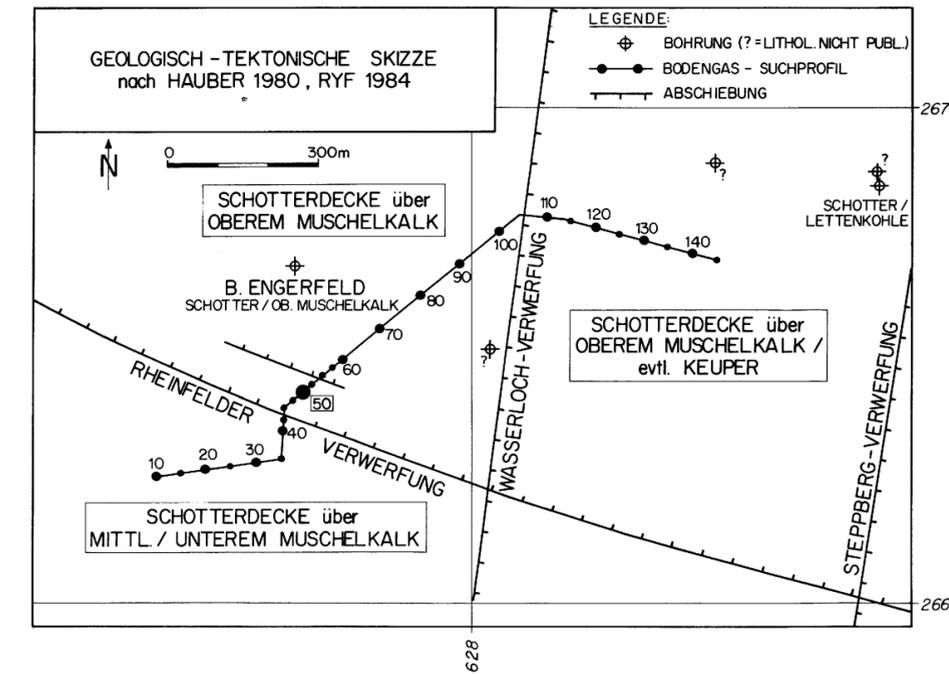
D = Doppelmessung

* = α-Cup konnte nicht mehr aufgefunden werden

- SCHOTTER
- OB. MUSCHELKALK
- > MITTL. MUSCHELKALK
- × Steinsalz
- UNT. MUSCHELKALK
- BUNTSANDSTEIN
- ROTLIEGENDES
- × KRISTALLIN



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 10.11.1988



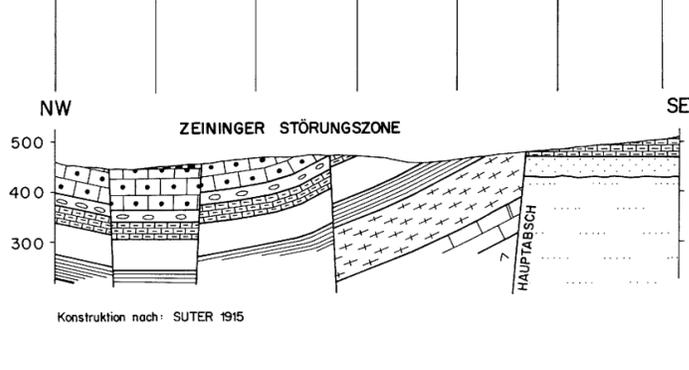
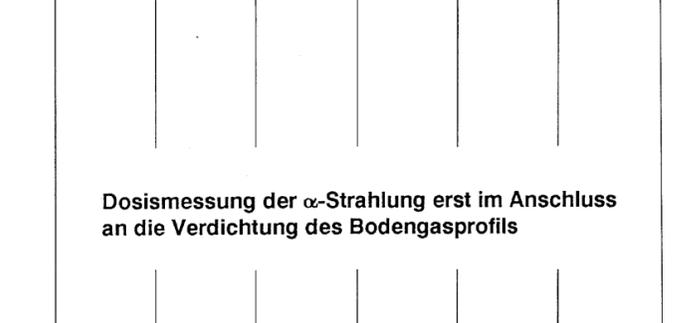
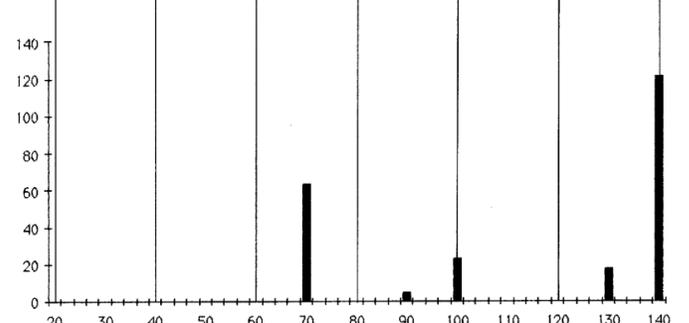
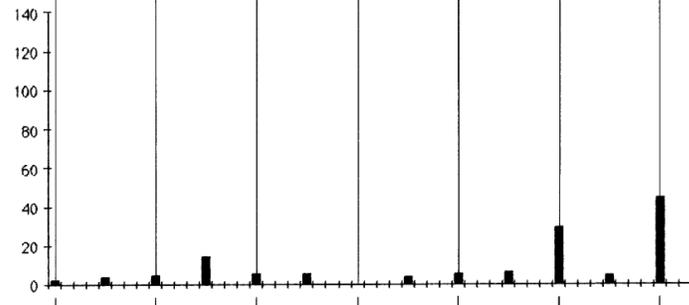
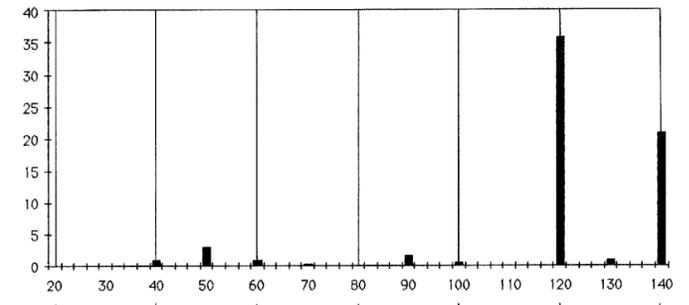
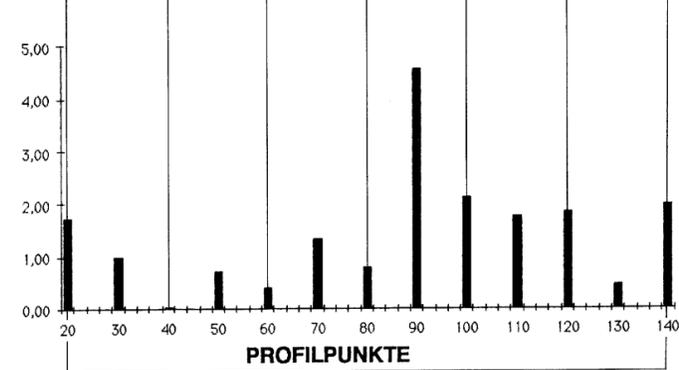
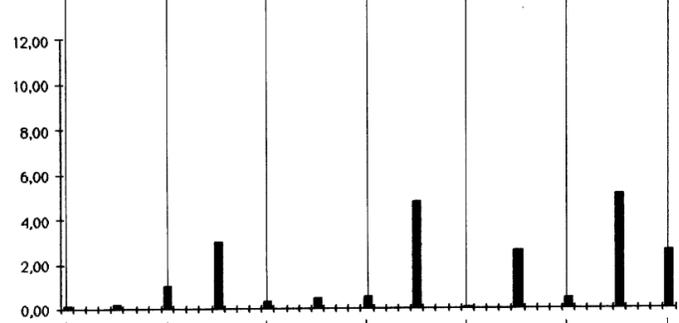
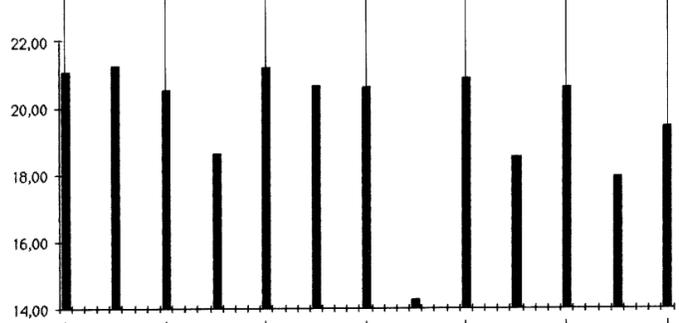
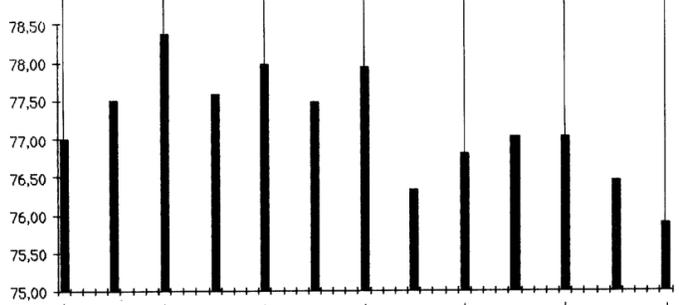
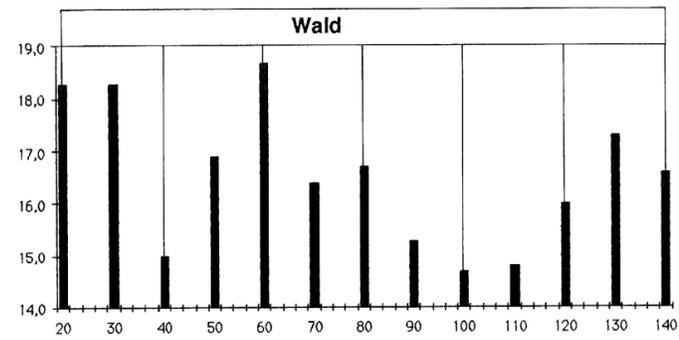
BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
 KLEINERE MITTEILUNGEN
 Nr. 81

Nagra Cédra Cibra
 Technischer Bericht NTB 89-25

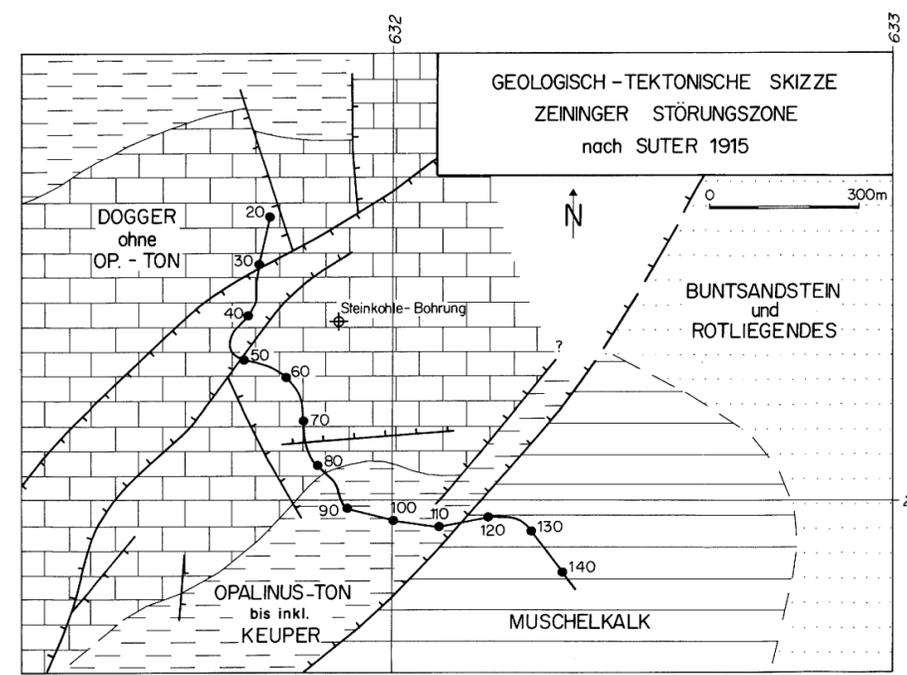
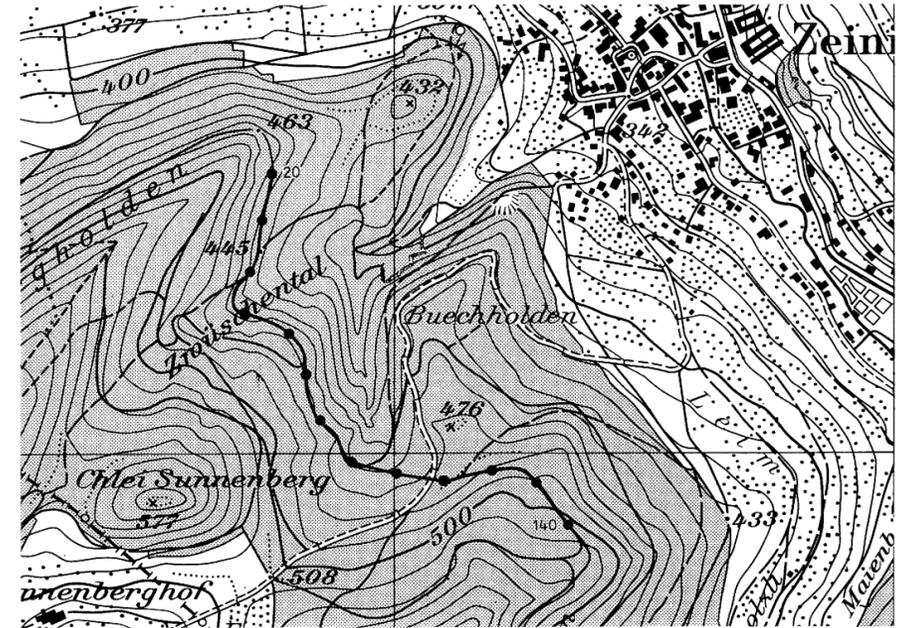
VERDICHTETES BODENGASPROFIL RHEINFELDEN 1:12 500

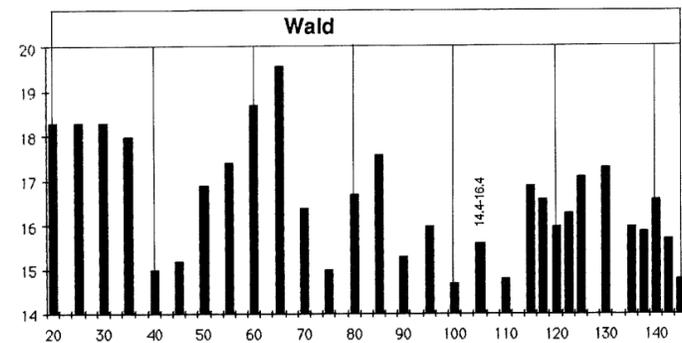
Nachweis von tektonischen Störungen

BEILAGE 2

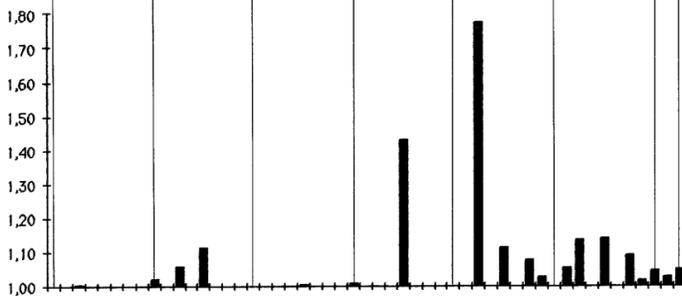


- SPÄTKALK-VARIANS-SCH.
- HAUPTROGENSTEIN
- "UNT. DOGGER"
- OPALINUS-TON
- LIAS
- KEUPER
- OB. MUSCHELKALK
- MITTL. MUSCHELKALK
- UNT. MUSCHELKALK
- BUNTSANDSTEIN
- ROTLEGENDES

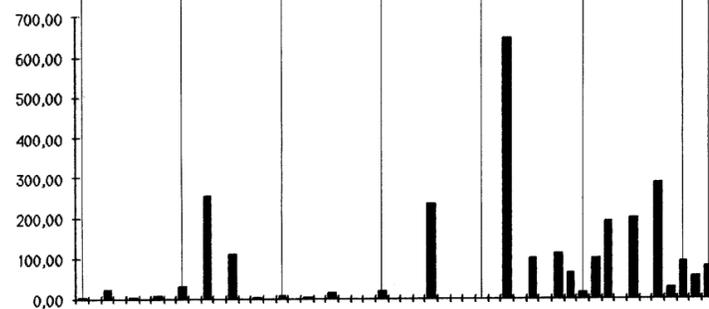




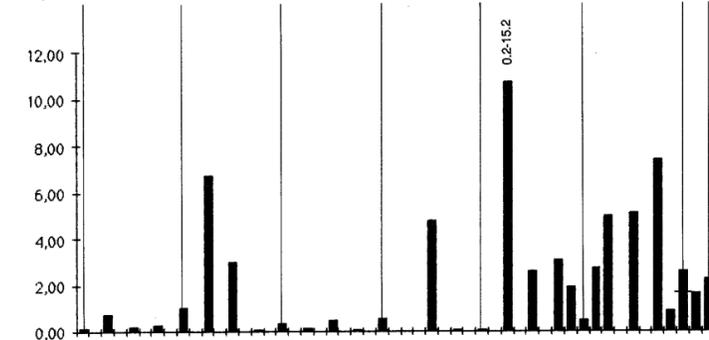
T °C
in 1.2 m Tiefe



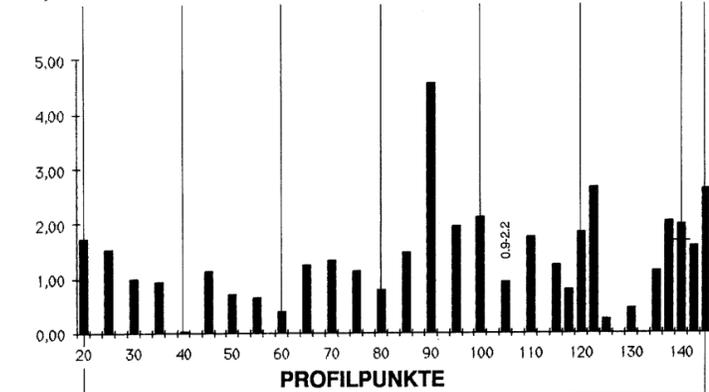
(N₂ Boden/O₂ Boden)/
(N₂ Atmosphäre/O₂ Atmosph.)



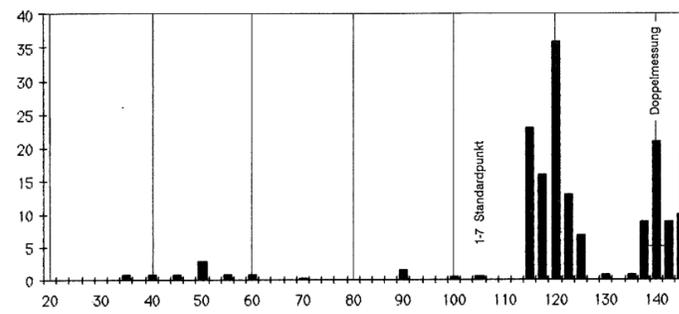
(CO₂ Boden/O₂ Boden)/
(CO₂ Atmosphäre/O₂ Atmosph.)



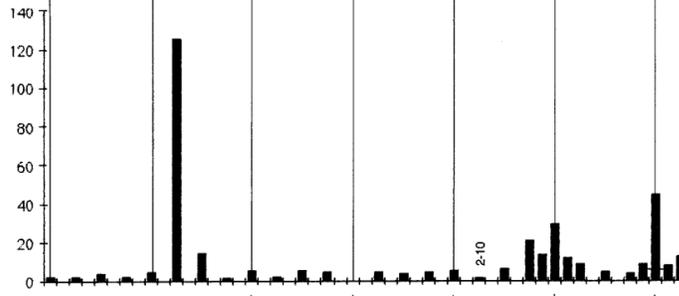
CO₂ Vol. %



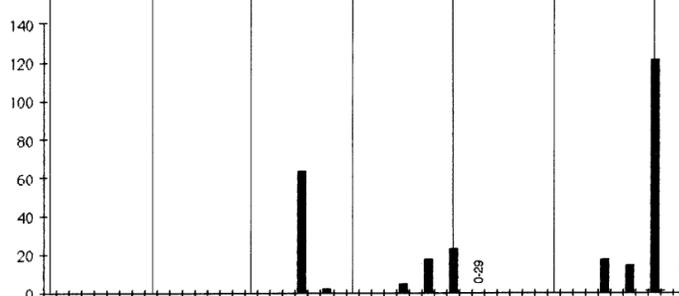
Rest Vol. %
- H₂O_{gasförmig}
- Ar
- NO_x
- Kohlenwasserstoffe
- H₂



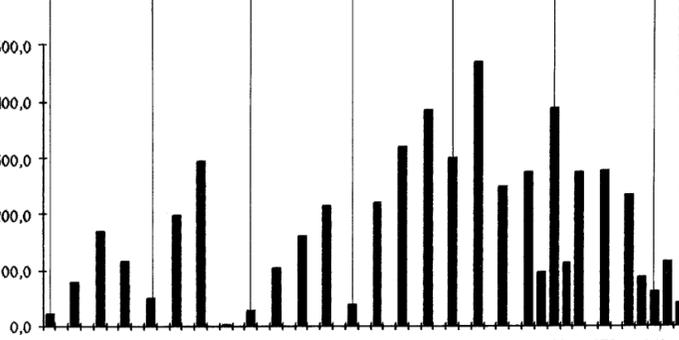
ΣC₂-C₆ ppm



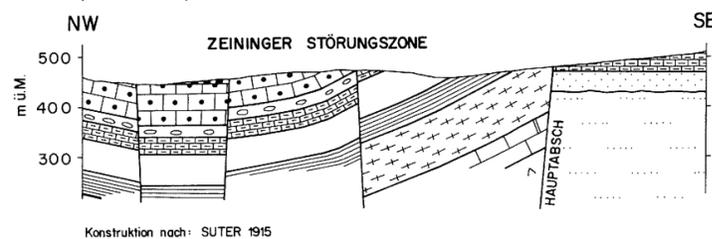
CH₄ ppm



H₂ ppm

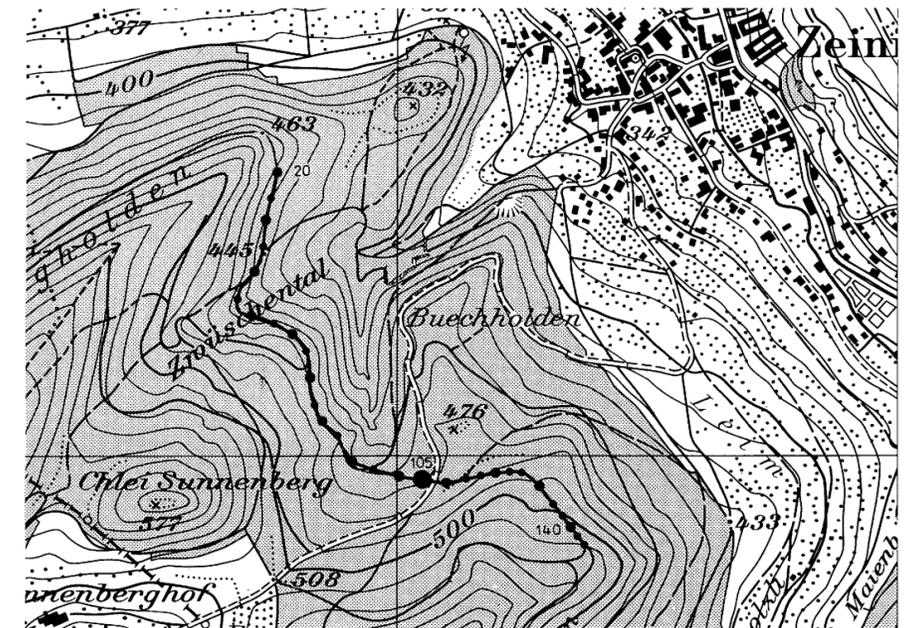


Radon pCi/l

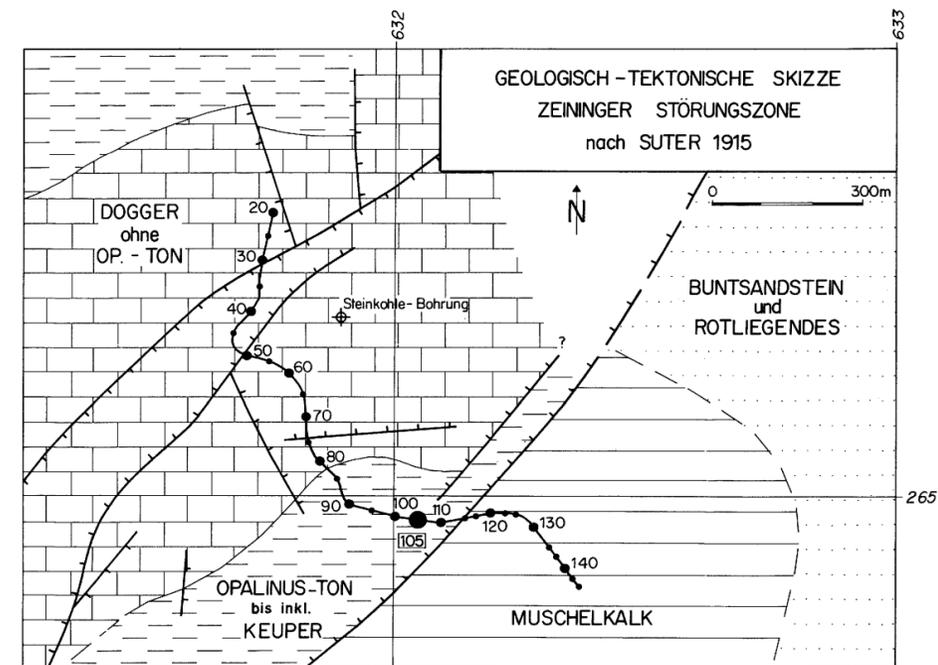


Konstruktion nach: SUTER 1915

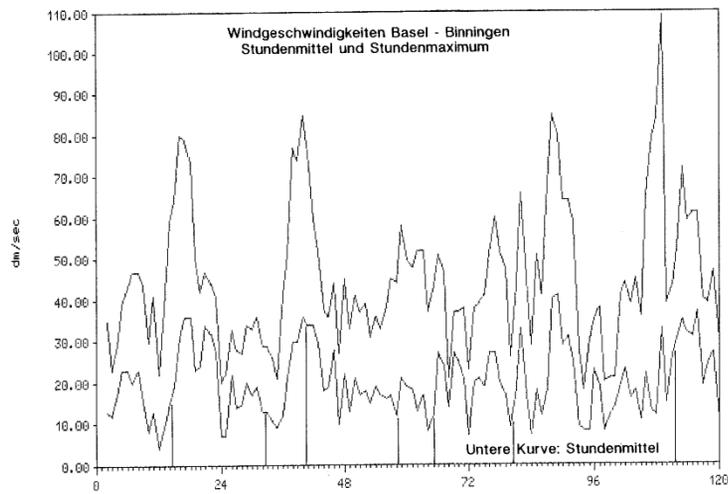
- SPÄTKALK-VARIANS-SCH.
- HAUPTTÖGENSTEIN
- "UNT. DOGGER"
- OPALINUS-TON
- LIAS
- KEUPER
- OB. MUSCHELKALK
- MITTL. MUSCHELKALK
- UNT. MUSCHELKALK
- BUNTSANDSTEIN
- ROTLLIEGENDES



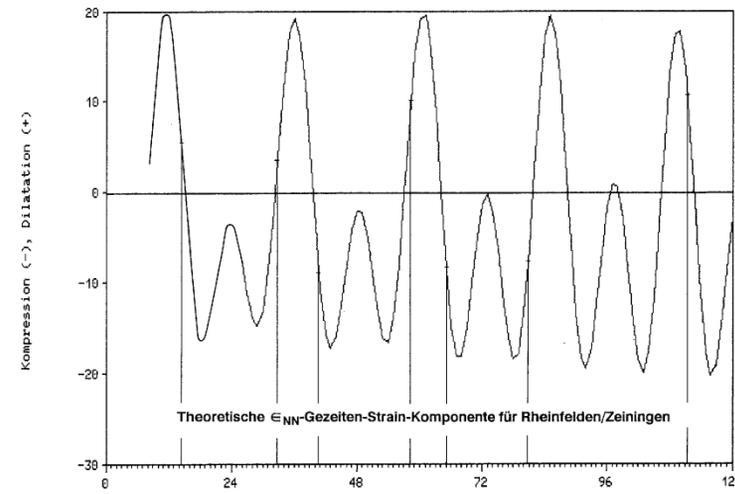
Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 10.11.1988



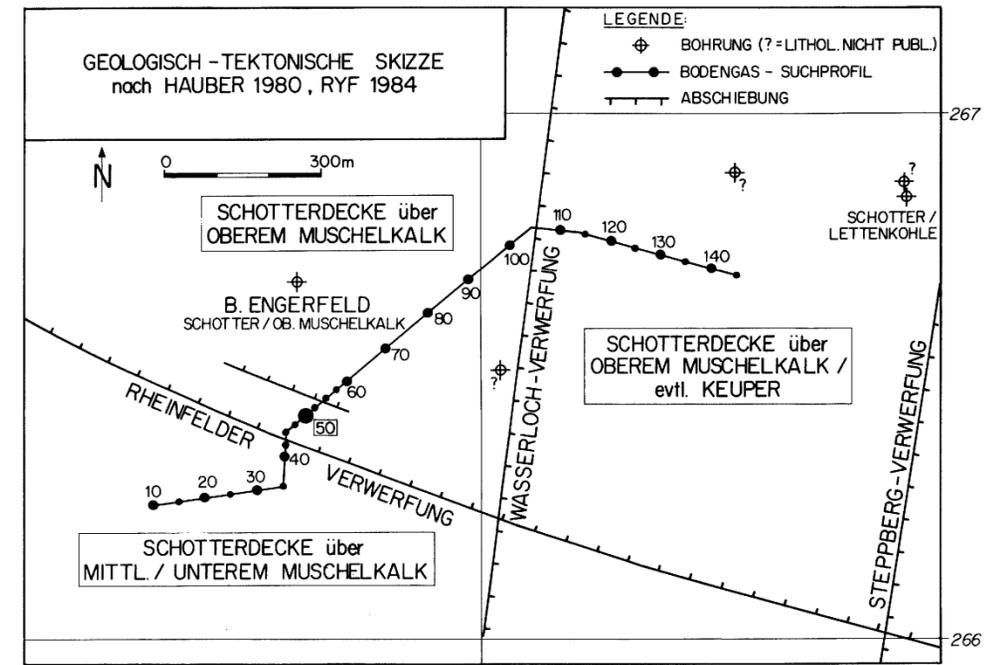
BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ KLEINERE MITTEILUNGEN Nr. 81	Nagra Cédra Cisra Technischer Bericht NTB 89-25
VERDICHTETES BODENGASPROFIL ZEININGEN 1:12 500	
Nachweis von tektonischen Störungen	
BEILAGE 4	



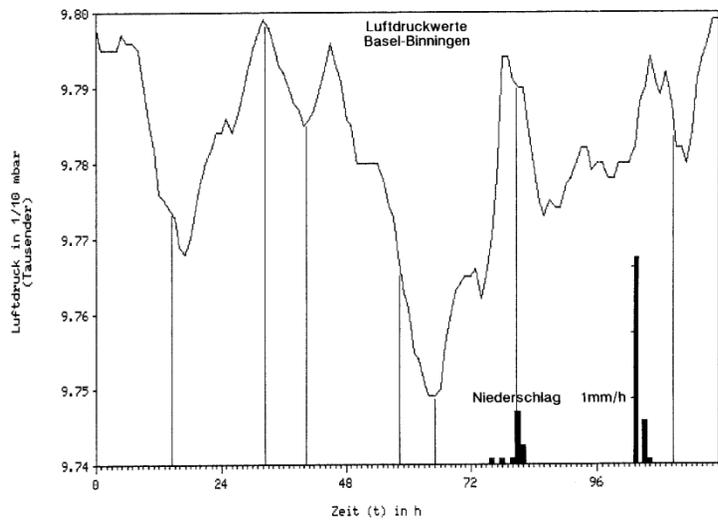
d)



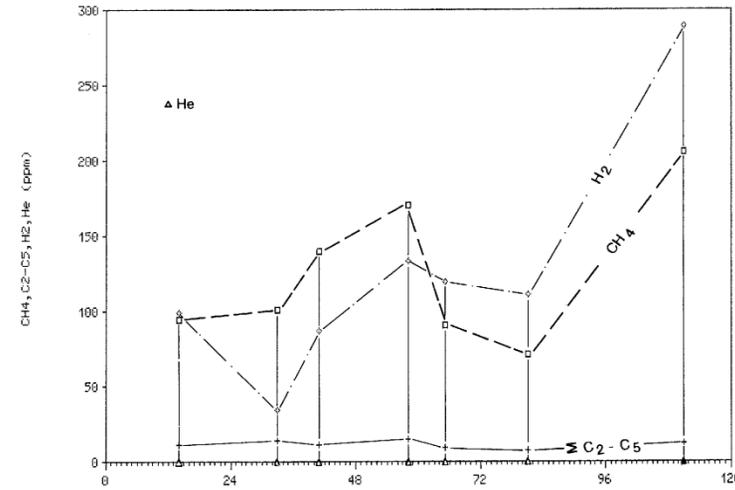
a)



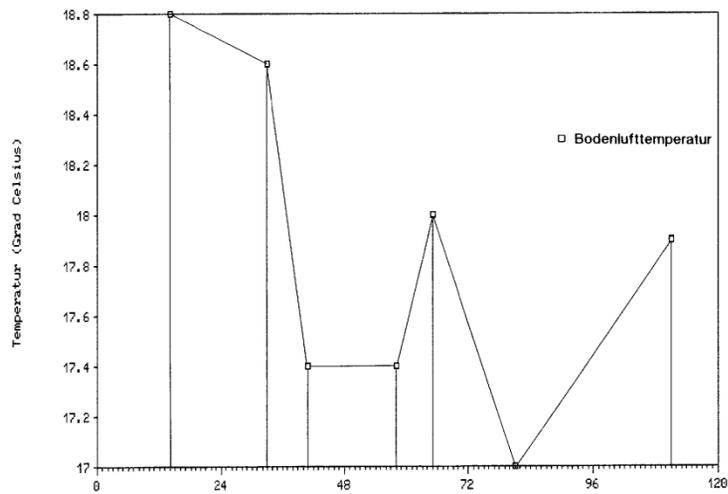
Lage des Standardpunktes (Nr. 50)



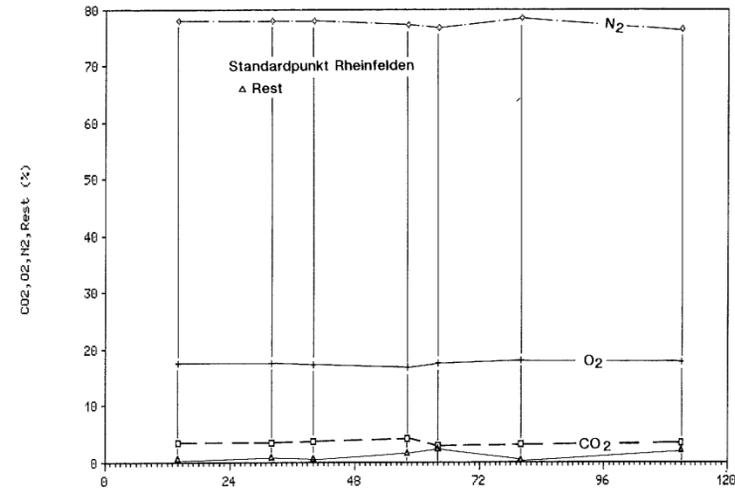
e)



b)



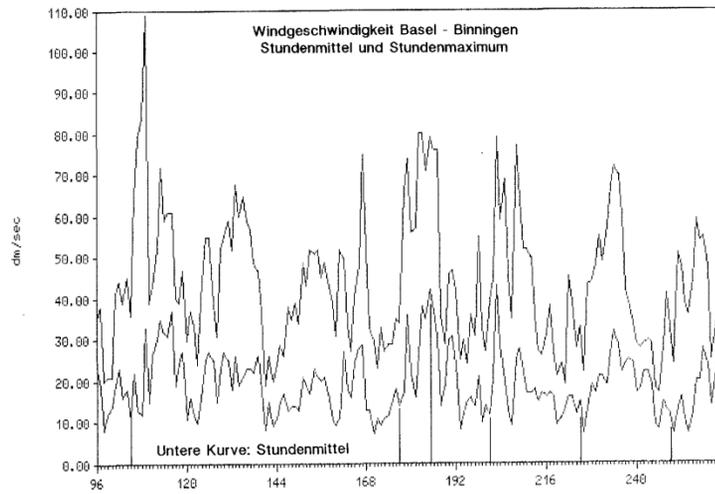
f)



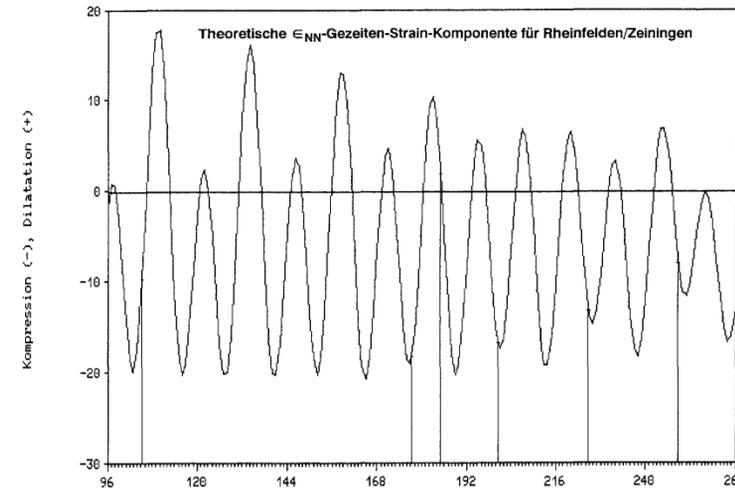
c)

Montag	8. August 88
Dienstag	9. August 88
Mittwoch	10. August 88
Donnerstag	11. August 88
Freitag	12. August 88

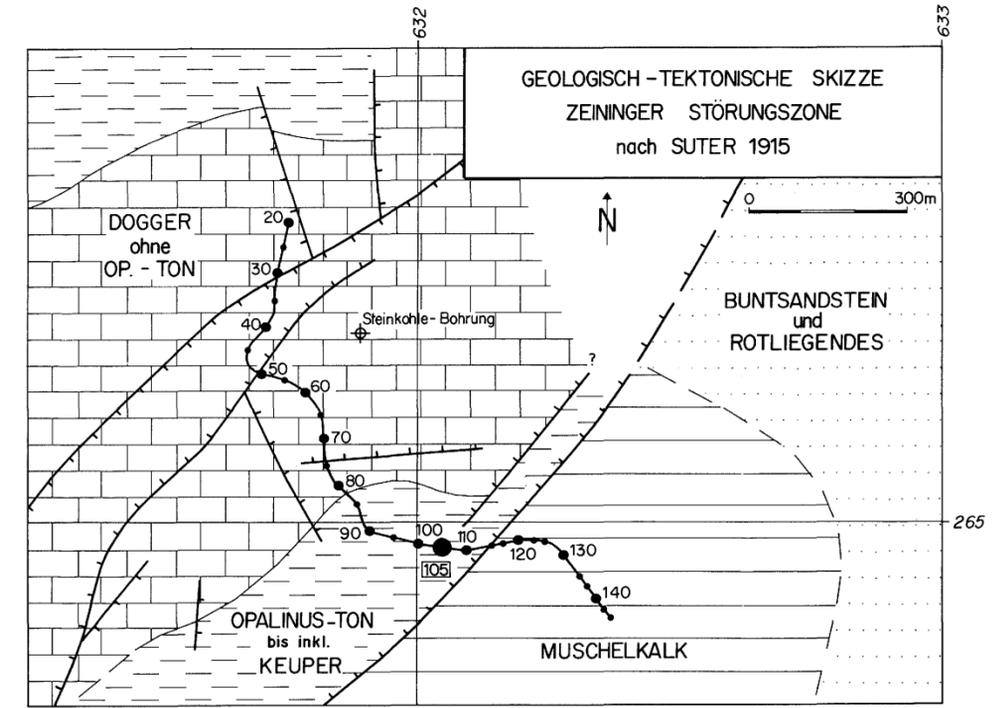
Montag	8. August 88
Dienstag	9. August 88
Mittwoch	10. August 88
Donnerstag	11. August 88
Freitag	12. August 88



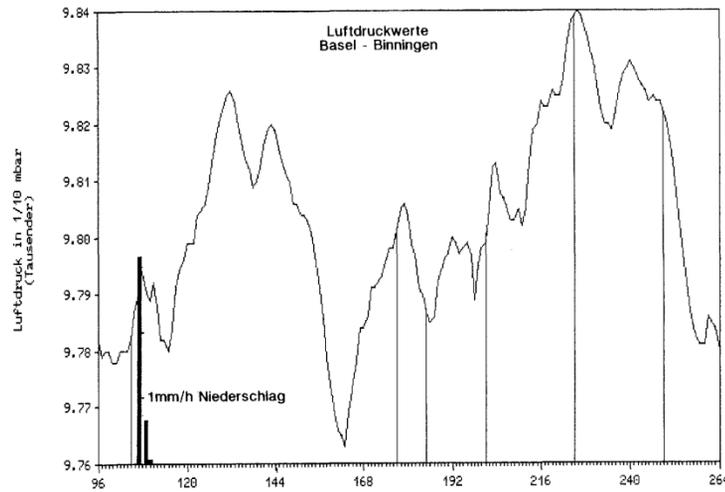
d)



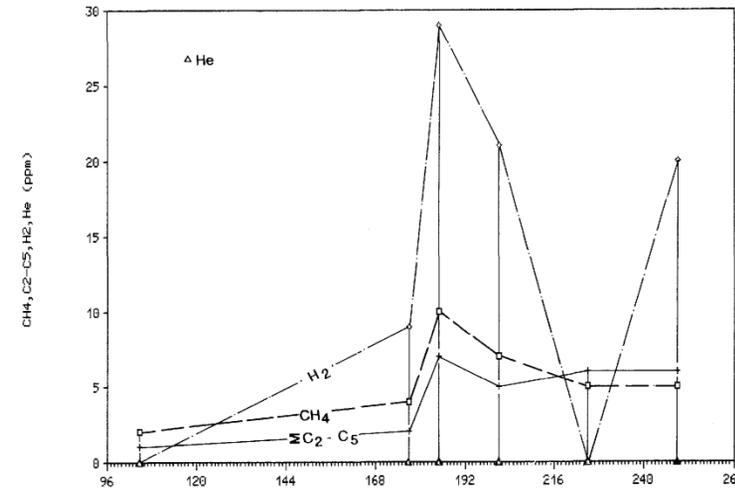
a)



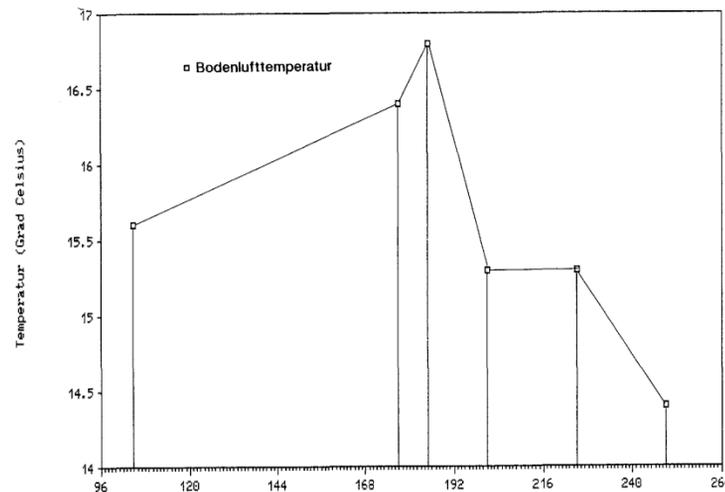
Lage des Standardpunktes (Nr. 105)



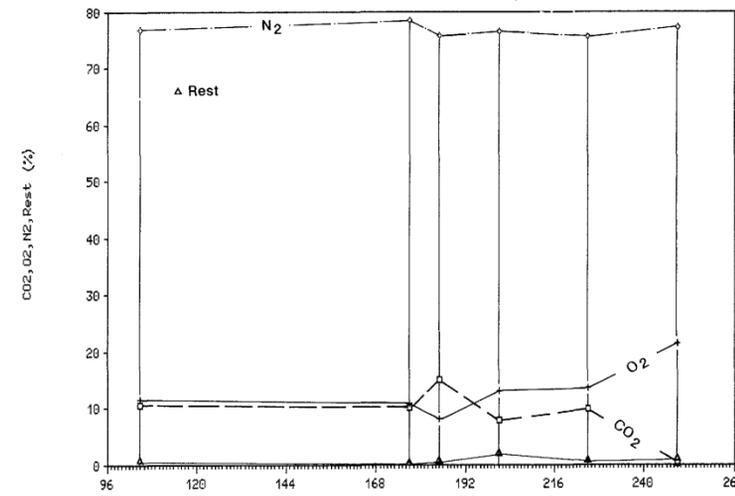
e)



b)



f)



c)

Freitag	12. August 88
Sonntag	13. August 88
Montag	14. August 88
Dienstag	15. August 88
Mittwoch	16. August 88
Donnerstag	17. August 88
Freitag	18. August 88

Freitag	12. August 88
Sonntag	13. August 88
Montag	14. August 88
Dienstag	15. August 88
Mittwoch	16. August 88
Donnerstag	17. August 88
Freitag	18. August 88

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ KLEINERE MITTEILUNGEN Nr. 81	Nagra Cédra Cisra Technischer Bericht NTB 89-25
DATEN STANDARDPUNKT ZEININGEN	
Nachweis von tektonischen Störungen	BEILAGE 6