Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie

Band: 1 (1996)

Heft: 2

Artikel: Reflexionsseismik zur Erkundung des Opalinustons in der Nordschweiz

Autor: Naef, Heinrich / Birkhäuser, Philip

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-219184

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol.	Vol. 1	Nr. 2	113 - 134	Dezember 1996

Reflexionsseismik zur Erkundung des Opalinustons in der Nordschweiz

mit 9 Figuren, 2 Tabellen und 2 Faltbeilagen.

HEINRICH NAEF[1] und PHILIP BIRKHÄUSER[2]

Zusammenfassung 113
Résumé 114
Abstract 114

1 Einleitung 114
1.1 Absicht 114
1.2 Regionale Geologie 115

2 Reflexionsseismik 1991/92 117
2.1 Feldaufnahmen und Datenverarbeitung 117
2.2 Stratigraphie und Markerhorizonte 117
2.3 Seismische Modellierung 123

3 Interpretation 125
3.1 Isohypsenkarte und geologische Profile 125
3.2 Strukturkarte Basis Opalinuston 126
3.3 Schlussfolgerungen 129

4. Geplante weitere seismische Messungen 129
4.1 Vorgehen 129
4.2 Zielsetzungen der geplanten 3D-Seismik 131
4.3 Umfang der Feldmessungen und Zeitplan 131

Literaturverzeichnis 133

Zusammenfassung

Im Rahmen der Suche nach Standortregionen für die Lagerung hochradioaktiver Abfälle evaluiert die Nagra neben dem kristallinen Grundgebirge auch den Opalinuston des östlichen Tafeljuras. Für die Abklärung der regionalgeologischen Verhältnisse wurden 1991/92 im Gebiet Nördlich Lägeren - Zürcher Weinland, wo der Opalinuston in der geeigneten Tiefe von 400 - 1000 m unter Terrain liegt, ca. 220 km hochauflösende reflexionsseismische Profile aufgenommen und zusammen mit älteren Seismiklinien ausgewertet. Dank relativ grossem Aufwand bei der Feldarbeit und der Datenverarbeitung wurde eine sehr gute Qualität der neuen Seismik erreicht, was eine präzise Kartierung der Markerhorizonte ermöglichte. Mit Hilfe der Bohrlochdaten von Weiach und Herdern konnte der regionale Charakter des mittleren Mesozoikums modelliert und so entlang der neuen Seismiklinien die Mächtigkeitsverteilung des Opalinustons im Untersuchungsgebiet kartiert werden; die resultierende Isopachenkarte zeigt eine ziemlich konstante Mächtigkeit von ca. 95 - 120 m. Mit Hilfe einer interaktiven Interpretation aller Seismiklinien, Bohrungen und Oberflächendaten wurden Isohypsenkarten der Markerhorizonte erstellt, geologische Profile entlang der neuen Seismiklinien konstruiert und letztlich ein geologisches Modell des Gebietes zwischen der Aare im Westen und dem Untersee im Osten entworfen. Am Beispiel der Isohypsenkarte «Basis Opalinuston» werden die vier tektonischen Einheiten Kettenjura, Vorfaltenzo-

[1] Büro für angewandte Geologie, 9042 Speicher
[2] Nagra, 5430 Wettingen

ne, Tafeljura und Bodensee-Graben dargestellt und im Hinblick auf den strukturellen Zustand des potentiellen Wirtgesteins kurz charakterisiert. Die aus heutiger Sicht im Vordergrund stehende Region beschränkt sich auf des Gebiet zwischen Rhein, Thur und Cholfirst im Zürcher Weinland, welches nun mit 3D-Seismik und einer Tiefbohrung weiter untersucht werden soll.

Résumé

Dans le cadre de la recherche de régions pouvant convenir au stockage de déchets hautement radioactifs, la Cédra examine, en plus du socle cristallin, l'Argile à opalinum (Aalénien) du Jura tabulaire oriental. Les conditions géologiques régionales de la région au nord des Lägeren - Zürcher Weinland, où l'Argile à opalinum se trouve à une profondeur adéquate de 400 à 1000 m, ont été étudiées par 220 km de profils de sismique réflection à haute résolution, interprétés conjointement à d'anciennes lignes sismiques. L'éffort important consenti pour l'acquisition des données et leur interprétation a permis d'obtenir une très bonne qualité des nouvelles lignes sismiques, c'est-à-dire une cartographie précise des horizons marqueurs. Avec l'aide des données des forages de Weiach et de Herdern, on a pu modéliser les caractéristiques sismiques du Mésozoïque moyen dans la région, et ainsi cartographier la puissance de l'Argile à opalinum le long des nouvelles lignes sismiques; la carte qui en résulte montre une distribution spatiale assez constante de cette puissance, avec des valeurs entre 95 et 120 m. L'interprétation combinée de toutes les lignes sismiques disponibles, des profils de forage et des données de surface a permis l'élaboration de cartes des isohypses des horizons marqueurs, ainsi que de profils géologiques le long des nouvelles lignes sismiques. Finalement on a proposé une modèle géologique pour la region entre l'Aar à l'ouest et le lac de Constance à l'est. Par l'exemple de la carte des Isohypses «Base de l'Argile à opalinum» on caractérise les quatre unités tectoniques Jura plissé, Zone de pré-plissement, Jura tabulaire / Plateau molassique et fossé du lac de Constance. La région préférée est limitée par le Rhin, la Thur et le Cholfirst au Zürcher Weinland; son exploration est prévue au moyen de sismique 3D et d'un forage profond.

Abstract

The investigations of potential siting areas for a repository for high-level radioactive waste which are concentrated in the crystalline basement of Northern Switzland have been expanded since the late 1980s to include suitable sedimentary units. After extensive desk study evaluation, the Opalinus Clay of the Tabular Jura east of the Aare river was chosen as the most promising sedimentary option. In the area North of Lägeren - Zurich Weinland, where the Opalinus Clay is situated in the optimum depth range of 400 to 1000m below surface, approximately 220 km of new high-resolution seismic profiles were recorded and interpreted together with existing seismic lines. Due to thorough field work and data processing, a very good quality of seismic lines was obtained, allowing precise mapping of the marker horizons. The regional seismic character of the Middle Mesozoic units was modelled using borehole data from Weiach and Herdern. From this model the thickness of the Opalinus Clay along the new seismic lines was determined. The results indicate a relatively constant thickness of 95 to 120 metres in the investigation area. By way of interactive interpretation of all available seismic lines, borehole data and surface data from the investigation area, depth maps of the marker horizons have been calculated and geological cross sections constructed along the new seismic lines. Finally a geological model for the region between the Aar river in the west and Lake Constance in the East was designed. Taking the depth map «Base of Opalinus Clay» as an example the four tectonic units of the area and their structural character are explained. Relying on these results, the most promising area lies between the rivers Rhine and Thur and the Cholfirst hill in the Zurich Weinland, which will be examined by a 3D seismic survey and a deep well.

1. Einleitung

1.1 Absicht

Im Rahmen der regionalen geologischen Abklärungen von Endlagermöglichkeiten für hoch- und mittelaktive Abfälle in der Schweiz wurden seit Beginn der 80er Jahre neben dem kristallinen Grundgebirge auch die darüber liegenden Sedimentgesteine erkundet (Nagra 1988, 1991). Diese Untersuchungen bestätigten die potentielle Eignung des Opalinustons als eine sedimentäre Wirtgesteins-Formation, insbesondere in tektonisch ruhiger Lage (Tafeljura).

Seit Anfang der 90er Jahre wird deshalb die Option Opalinuston im Gebiet Nördlich Lägeren - Zürcher Weinland intensiv weiterverfolgt, wo dieses Gestein auch in der erwünschten Tiefenlage von 400 bis ca. 1000 Metern unter der Erdoberfläche liegt. 1991/92 wurde eine ausgedehnte Reflexionsseismik-Kampagne durchgeführt und deren Resultate im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Nordschweizer Untersuchungen (Diebold et al. 1991) sowie den verfügbaren Daten der Erdölindustrie (Reflexionsseismik und Tiefbohrungen) ausgewertet (Naef et al. 1995).
Angestrebt wurde die Erstellung eines regionalgeologischen Modells und davon ausgehend die Abklärung der strukturellen Situation und der möglichst genauen Tiefenlage des Opalinustons sowie seiner unmittelbar liegenden und hangenden Formationen. Hauptziel der Untersuchungen war letztlich die Abgrenzung von Gebieten mit ruhiger tektonischer Lage und genügender Mächtigkeit des Opalinustons. Soweit dies die Qualität der Seismik erlauben würde, waren – ausgehend von den Tiefbohrungen Weiach, Herdern und Lindau – auch lithofazielle Interpretationen, insbesondere anhand lateraler Änderungen der Mächtigkeit und der Seismofazies, vorgesehen.
Im Gebiet Zürcher Weinland wurden anhand dieser regionalen Untersuchungen gute geologische Voraussetzungen angetroffen, weshalb der Opalinuston dort lokal weiter untersucht werden soll. Für die nächsten Jahre ist geplant, die Opalinuston-Option - parallel zum kristallinen Grundgebirge - hinsichtlich eines Entsorgungsnachweises eingehend abzuklären. Ergänzend zu einer Bohrung soll die räumliche Ausdehnung der Opalinustonschicht mit einem flächendeckenden seismischen Messverfahren im Detail erkundet werden.

1.2 Regionale Geologie

Das Untersuchungsgebiet Lägeren-Weinland liegt im Interferenzbereich der bestimmenden tektonischen Einheiten der Nordschweiz (siehe Fig. 1A). Es erstreckt sich über den Südrand des östlichen Tafeljuras und v.a. den Nordrand des angrenzenden Molassebeckens und liegt grösstenteils über dem in der Tiefe anstehenden Nordschweizer Permokarbontrog (NPT). Tafeljura, NPT und Molassebecken streichen ungefähr parallel weiter nach NE in den süddeutschen Raum hinein. Sie werden aber im Hegau-Bodensee-Gebiet von einer NW-SE, das heisst herzynisch streichenden Grabenstruktur durchquert, welche sich nach NW über den Schwarzwald bis in den Oberrheingraben hinein verfolgen lässt und deshalb als Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Graben bezeichnet wird.
Etwa südlich einer Linie Thurtal-Hochrhein bewirkte der epialpine Zusammenschub während des Jungtertiärs eine Abscherung des Deckgebirges im mittleren Muschelkalk, und es kam vor allem im Bereich des tieferen Mesozoikums zur Bildung von Falten, Auf- und Überschiebungen. Sie sind heute im Kettenjura an der Oberfläche aufgeschlossen oder zeichnen sich in Form von sanften Syn- und Antiklinalen in den hangenden Molasseformationen ab (Vorfaltenzone Fig 1B). Im NW schliesslich bewirkte die jungtertiäre Aufwölbung des Schwarzwaldes eine grossflächige Freilegung des kristallinen Grundgebirges und damit verbunden eine kleinräumige Zergliederung durch Zerrungsstrukturen, welche besonders im Grenzbereich zwischen dem aufgeschlossenen Grundgebirge und dem Tafeljura als vielfältiges Bruchmuster kartiert werden können.
Durch die Heraushebung des Schwarzwalds im NW und die Absenkung des Molassebeckens während der alpinen Gebirgsbildung wurden die mesozoischen

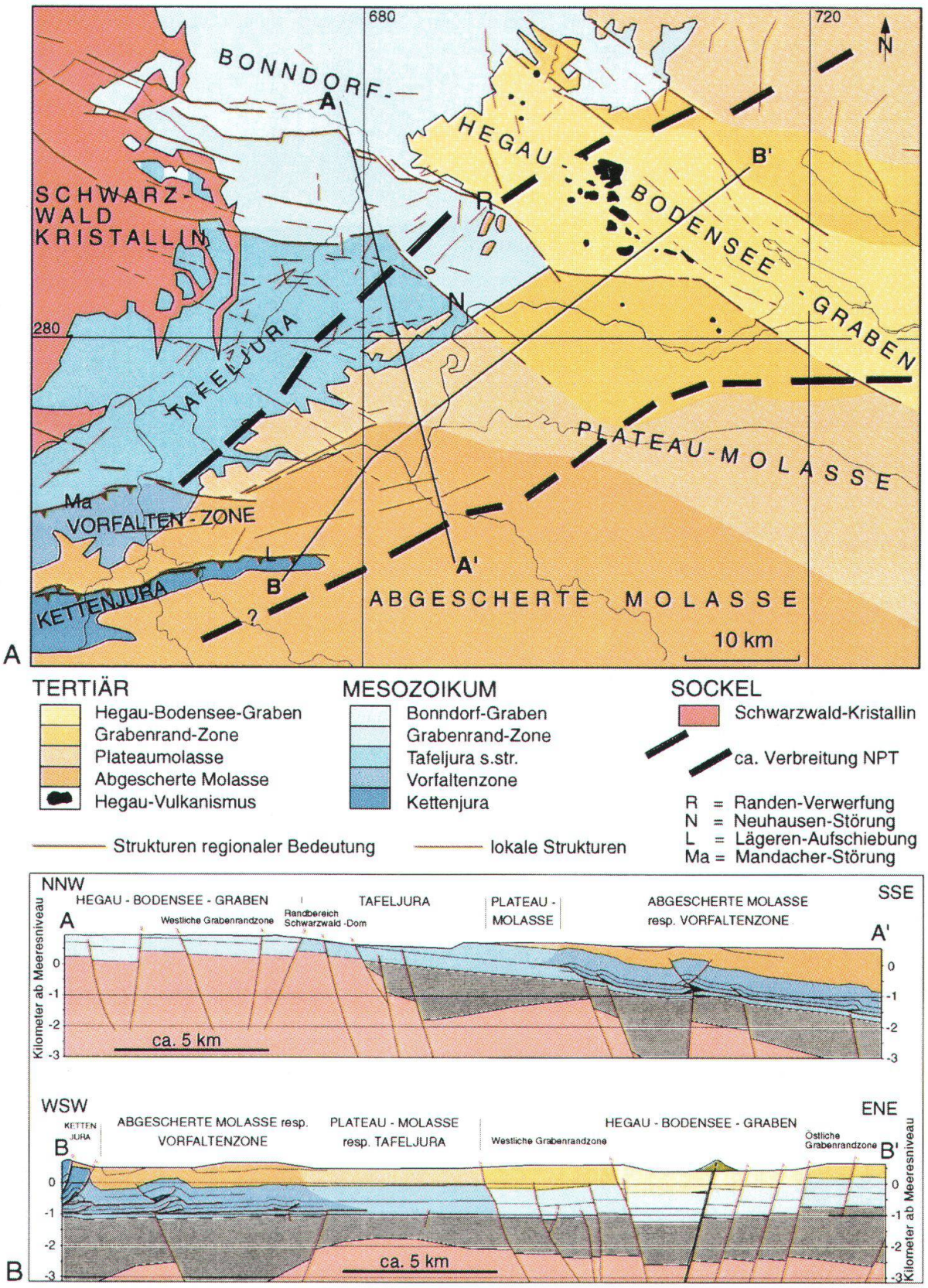


Fig. 1: A: Geologische Übersicht der weiteren Untersuchungsregion mit Abgrenzung der wichtigen, durch ihr mesozoisches Strukturinventar bestimmten tektonischen Einheiten (vergl. Fig. 6).
B: Schematische geologische Profile im Fallen (A) und im Streichen (B) des Deckgebirges (nicht massstäblich!). Da die tektonischen Einheiten durch die Strukturen im Mesozoikum definiert sind, kommen sie mit zunehmender Überdeckung durch die jüngeren Molasseschichten an der Oberfläche, d.h. im Kartenbild immer weniger zur Geltung.

Schichten im ganzen Gebiet schräggestellt, sodass sie heute generell mit ca. 5 Grad nach SE einfallen. Die Schichten der Molasseablagerungen, insbesondere der älteren Unteren Süsswassermolasse (USM), welche leicht diskordant über dem Mesozoikum liegen, fallen in ähnlicher Weise nach SE ein; ihre Neigung nimmt aber nach oben zusehends ab, sodass die höheren Bereiche der hangenden OMM und besonders der OSM im ganzen Gebiet, abgesehen von lokalen, tektonisch bedingten Verkippungen, praktisch horizontal lagern. Während die Mächtigkeit des Mesozoikums überall zwischen 700 und 800 m beträgt (vergl. Fig. 1B), nehmen die Molassesedimente von Null an der Ausbisslinie im NW auf ca. 3 km Mächtigkeit in der SE-Ecke des abgebildeten Gebietes zu.

2. Reflexionsseismik 1991/92

2.1 Feldaufnahmen und Datenverarbeitung

Bei der Planung der 1991/92 durchgeführten geophysikalischen Feldmessungen zur regionalen Abklärung der Opalinustonschichten konnte auf Erfahrungen früherer Seismikkampagnen in diesem Gebiet zurückgegriffen werden. Die Messlinien wurden darauf ausgelegt, das bestehende Liniennetz zu ergänzen, sodass einerseits möglichst keine grösseren Lücken mehr bestehen würden, und andererseits die existierenden Informationen aus den Tiefbohrungen Weiach, Siblingen und Herdern optimal zur Kalibration genutzt werden konnten (siehe Liniennetz Fig. 5 und Beilagen). Zudem wurde darauf geachtet, die neuen Linien möglichst senkrecht oder parallel zum regionalen Schichtstreichen auszurichten, um so «echte» Streich- und Diplinien zu produzieren und damit eine bessere strukturgeologische Auswertung zu ermöglichen.
Nach eingehender Analyse des bestehenden Datensatzes und einer von Grund auf durchgeführten Neuberechnung der notwendigen Feldparameter wurde deutlich, dass die angestrebten Ziele nur mit einem höheren Feldaufwand als bei den bisherigen Messungen in diesem Gebiet erreicht werden konnten. Zur Sicherstellung einer seismisch hochqualitativen Abbildung der geologischen Verhältnisse entlang der Messprofile waren die in Tabelle 1 zusammengestellten technischen Parameter für die Feldaufnahmen und die Datenverarbeitung notwendig.
Die im Vergleich zur bestehenden Seismik erreichte bessere Auflösung der neuen Daten wird in Figur 2 anhand einer direkten Gegenüberstellung deutlich. Damit kleine Strukturen innerhalb des Opalinustons auch in Tiefen von ca. 1000 m unter Terrain noch möglichst genau wiedergegeben werden konnten, wurde in der Datenverarbeitung ein Verfahren zur Hervorhebung der hohen Frequenzen, die sog. «spike deconvolution», vor und nach der Stapelung angewendet.
Anhand der dominanten Wellenlänge innerhalb der Opalinustonschicht lässt sich die erreichte Auflösung auch quantitativ abschätzen. Daraus ergibt sich, dass Gesteinsschichtgrenzen und tektonische Strukturen mit genügendem Impedanzkontrast, die eine vertikale Separation von mindestens ca. 15 m aufweisen, direkt zu erkennen sind. Damit konnte die Auflösung der früheren Seismik-Daten (höchstens ca. 25 m) doch wesentlich verbessert werden.

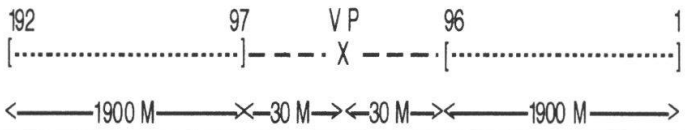
2.2 Stratigraphie und Markerhorizonte

Wie Profil A - A' in Fig. 1B zeigt, treten von SE nach NW fortschreitend zunehmend ältere Schichten an die Erdoberfläche; deren Lithologie und Fazies können

Feldparameter der reflexionsseismischen Profile OPA'91/92

FIRMA	GECO-PRAKLA
MESSTRUPPLEITER	F. SCHÄFFER
SUPERVISOR	H. WERNER
MESSAUFTRAG	911 316
AUFNAHMEDATUM	21.11.91 - 12.03.92 UND 02.11.92 - 11.11.92
INSTRUMENT	SERCEL SN 368, CS 260
MAGNETBANDFORMAT	SEG-D, 9-SPUR, 6250 BPI
AUFNAHMELÄNGE	4 S (NACH KORRELATION)
ABTASTRATE	2 MS
VERSTÄRKUNG	I.F.P. GAIN CONSTANT 42 DB
FILTER	TIEFSCHNITT : AUS
	HOCHSCHNITT : 178 HZ, 70 DB/OKT
POLARITÄT	SEG NORM:
	POSITIVE ZAHLEN = KORRELATIONSMAXIMUM
	= IMPEDANZZUNAHME
NOMINALER ÜBERDECKUNGSGRAD	96 FACH
EMPFÄNGER	SM 4 (10 HZ) GEOPHONE
ANZAHL DER GEOPHONGRUPPEN	192
GEPHONE PRO GRUPPE	12
GRUPPENABSTAND	20 M
ANORDNUNG	REGELMÄSSIG ENTLANG DER LINIE
GRUPPENLÄNGE	18.33 M
SENDER	VIBRATOREN / SPRENGSTOFF
VIBRATOREN:	VVCA/E
ANZAHL DER VIBRATOREN	3 (STELLENWEISE 4)
FAHRZEUGABSTÄNDE	10.84 M (8.0 M)
GRUPPENLÄNGE	36.68 M (39.0 M)
VERTIKALSTAPELUNG	4 / 8 FACH
VERSCHIEBUNGSDISTANZ	3 X 5 M
STEUERSIGNAL (SWEEP)	8 - 120 HZ, 12 S, NICHT LINEAR 3 DB/OKT
VIBRATORSTEUERUNG	PELTON ADVANCE II
SPRENGSTOFF:	DYNAMIT
ANZAHL PRO SCHUSSPUNKT	5 / 7 ODER EINZELLÖCHER
SCHUSSLÖCHERABSTÄNDE	4 M / 2.86 M
GRUPPENLÄNGE	16 M / 17.16 M
TIEFE DER SCHUSSLÖCHER	2 M ODER 8 M
LADUNG/LOCH	0.128 KG ODER 1 KG

AUFNAHMEGEOMETRIE:



Tab. 1a: Feldparameter der reflexionsseismischen Profile 1991/92.

Parameter der reflexionsseismischen Datenverarbeitung OPA'91/92

FIRMA GECO-PRAKLA		
BEARBEITER		B. DRAUSCHKE
ABTEILUNGSLEITER		H. BRAKENSIEK
DATENZENTRUM-AUFTRAG		915 057 50
DATUM		25.3.92 - 24.03.93
FORMATIERUNG		SEG-D NACH SEG-Y, DEMULTIPLEXEN
MINIMUM-PHASE TRANSFORMATION		
SPRENGSEISMIK		APPARATURFILTER
VIBROSEISMIK		AUTOKORRELATION DES SWEEPS
UMPOLUNG DER VIBROSEISDATEN		NEGATIVE ZAHLEN = IMPEDANZZUNAHME
AUSGLEICH SPHÄRISCHER DIVERGENZ		
FILTER		8 HZ / 24 DB - 100 HZ / 60 DB
STATISCHE KORREKTUREN		GRUNDKORREKTUREN AUF 500 M ÜBER NN
		KORREKTURGESCHWINDIGKEIT: 3000 M/S
		UMRECHNUNG AUF VAR. BEZUGSNIVEAU (ITL)
FK-FILTER		+/- 17 MS/SPUR, DÄMPFUNG AB 2.5 MS/SPUR
1. DEKONVOLUTION		SPIKE, PRE.WHITENING 1%
		OPERATORLÄNGE: 120 MS
		3 BESTIMMUNGSFENSTER
MEANDER-SORTIERUNG		
RESIDUAL STATIK		OBERFLÄCHENKONSISTENT: 4 ITERATIONEN
		BESTIMMUNGSFENSTER: 100 - 1100 MS
DMO-KORREKTUREN		
GESCHWINDIGKEITSANALYSEN		IM ABSTAND VON JEWEILS 1 KM
NMO-KORREKTUREN		SKALIERUNG (FENSTERLÄNGE 1000 MS), MUTE
STAPELUNG		96FACH (NOMINAL)
2. DEKONVOLUTION		SPIKE, PRE.WHITENING 1%
		OPERATORLÄNGE: 200 MS
		3 BESTIMMUNGSFENSTER
KORREKTUR ZUM BEZUGSNIVEAU		500 M ÜBER NN
		KORREKTURGESCHWINDIGKEIT: 3000 M/S
		BLOCKKORREKTUR: +200 MS
FREQUENZFILTER		100% ANWENDUNG:0-1000; 2000; 3000-4000 MS
		TIEFSCHNITT: 8 HZ 24 DB/OKT
		HOCHSCHNITT: 100; 80; 70 HZ 48 DB/OKT
MIGRATION		FINITE DIFFERENZ (45 GRAD)
PHASEN-TRANSFORMATION		0-PHASE
FREQUENZFILTER		100% ANWENDUNG:
		0-600; 800; 1100; 2500-4000 MS
		TIEFSCHNITT: 8; 8; 8; 20 HZ 24 DB/OKT
		HOCHSCHNITT: 100; 90; 70; 60 HZ 48 DB/OKT
NORMIERUNG		6 FENSTER
DARSTELLUNG	MASSSTAB	1:25'000
	SPURABSTAND	0,4 MM
	VERTIKALMASSSTAB	1 S = 10 CM
	POLARITÄT	SEG NORM
		IMPEDANZZUNAHME = SCHWARZ

Tab. 1b: Parameter der Datenverarbeitung Reflexionsseismik 1991/92.

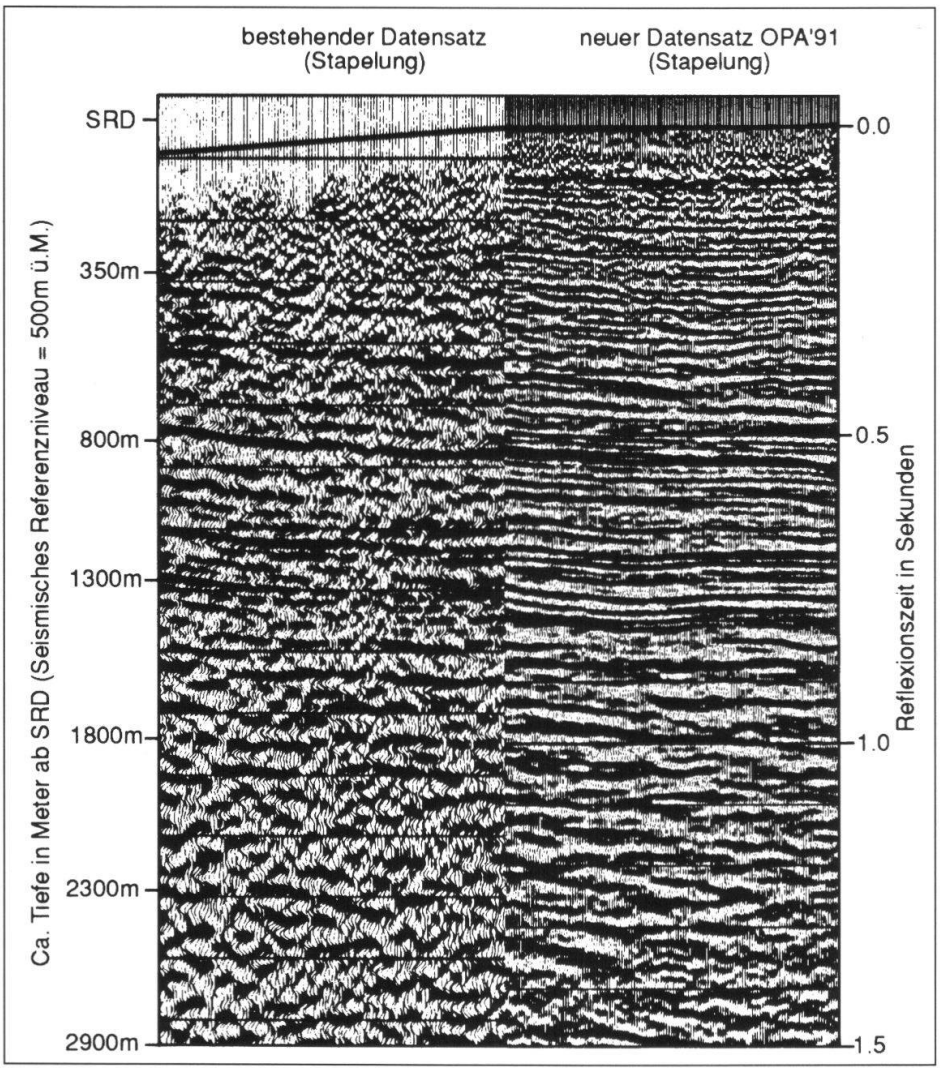


Fig. 2:
Vergleich der neuen Seismik mit einem typischen Profilausschnitt älterer, bestehender Daten im Untersuchungsgebiet.

somit in Aufschlüssen studiert werden (siehe z.B. Hofmann 1981; Schreiner 1992; Müller et al. 1984; Nagra 1988). Zusammen mit den Informationen aus Tiefbohrungen ergibt sich ein detailliertes Bild der lithostratigraphischen und faziellen Verhältnisse im weiteren Untersuchungsgebiet (z.B. Bläsi 1987; Wetzel et al. 1993).
Von W nach E sind die mesozoischen Formationen nicht nur in ihrer Mächtigkeit sondern auch in ihrer lithologischen Ausbildung recht ähnlich. Dennoch sind gewisse systematische Veränderungen oder zumindest Trends festzustellen, deren Kenntnis für die Interpretation der Reflexionsseismik und die tektonische Gliederung von Bedeutung ist:

Malm

Im Westen, d.h. im Raum Baden - Brugg - unteres Aaretal, dominieren die mergelreichen Schichten des tieferen Malm (Oxford, Malm α–β, ca. Effinger Schichten) während die reinen Kalke des Kimmeridge (Massen-, Platten-, Schwammkalke; Malm γ–ζ) geringmächtig sind oder infolge prämolassischer Erosion ganz fehlen. Im Osten ist das Verhältnis praktisch umgekehrt; in den Bohrungen Herdern, Berlingen, Kreuzlingen und dann vor allem in SW-Deutschland ist das Oxford gegenüber den mächtigen Kimmeridge-Kalken stark reduziert. Das Gebiet um die Bohrung Weiach nimmt eine interessante Zwischenstellung ein, indem gerade hier der

tiefere Malm («Argovien») nach Osten über relativ kurze Distanz deutlich geringmächtiger wird (Fig. 3b).
Zwischen Kimmeridge-Massenkalken und höherem Oxford («Sequan») fällt im ganzen Untersuchungsgebiet ein auf dem Sonic-Log (Fig. 3b) deutlich langsamer Abschnitt auf, welcher dank des Geschwindigkeitskontrasts mit den liegenden und hangenden Kalken einen seismisch ausgezeichnet kartierbaren Horizont darstellt («Basis Kimmeridge», Markerhorizont BKi). Er dürfte etwa den tonreichen mittleren Malmmergeln des Randen entsprechen (bei Hofmann 1981 = Malm γ).
Das Dach der Malmkalke resp. die Basis des Tertiärs entspricht ebenfalls einem ausgesprochen kräftigen Impedanzsprung, dessen seismische Abbildung v.a. in geringen Tiefen bis ca. 1 sec. TWT ebenfalls sehr gut ist (Markerhorizont TMa). Die Basis des Malm (Markerhorizont BMa) ist seismisch weitgehend nur mässig definiert: eine gute Kartierbarkeit ist deshalb nur im Umfeld von Tiefbohrungen gegeben.

Dogger

Die Kenntnisse über den Opalinuston im weiteren Untersuchungsgebiet beruhen vorwiegend auf Bohrdaten, ergänzt durch die Aufschlüsse in den aktiven Tongruben (Zusammenfassung siehe Bläsi 1987). Ausgehend von der Bohrung Weiach wurden möglichst viele stratigraphische, hydrogeologische und felsmechanische Daten über den Opalinuston und die Lithologien in seinem Liegenden und Hangenden zusammengetragen. Diese Untersuchungen erstreckten sich über die gesamte Nordschweiz sowie den angrenzenden süddeutschen Raum (vergl. auch Kobler 1972, Etter 1990). Daraus ergaben sich keinerlei Hinweise darauf, dass die Ausbildung des Opalinustons im Prospektionsgebiet «Nördlich Lägeren – Zürcher Weinland» von den bekannten Daten deutlich abweichen könnte. Seine Mächtigkeit wird auch hier zwischen 80 und 120 m liegen (vergl. Abschnitt 2.3) und der obere Abschnitt kann bedeutende Einschaltungen sand- oder karbonatreicher Bänke aufweisen (vergl. Bläsi 1987).
Die faziellen respektive lithologischen Verhältnisse im Hangenden des Opalinustons sind in der Bohrung Weiach, im Wutach - Randen - Gebiet oder auch in den Bohrungen Berlingen und Kreuzlingen, vorwiegend tonreich ausgebildet. Sie sind hier weitgehend frei von grundwasserleitenden Schichten.
Liegen aber unmittelbar über dem potentiellen Wirtgestein Schichten mit Aquifercharakter, wie z.B. der Hauptrogenstein westlich der Aare oder sandreiche, geklüftete Lagen, wie sie im südwestdeutschen Molassebecken als produktive Speichergesteine vorkommen («Flasersandsteine» des Dogger β), so wirkt sich dies sehr direkt auf die Beurteilung des Opalinustons als Endlageroption aus und ist entsprechend wichtig. Sandsteine mit erhöhter Porosität treten in der Bohrung Herdern auf (ca. 12 m sandreicher Dogger β); eine sedimentologische Analyse lässt auf Sandkörper mit begrenzter Ausdehnung schliessen, was auch durch die Abwesenheit vergleichbarer Schichten in der nahen Bohrung Berlingen bestätigt wird. Dennoch ist nicht auszuschliessen, dass ähnliche Sandkörper auch im Gebiet Lägeren-Weinland auftreten.
Da die Mächtigkeiten lithologisch einheitlicher Abschnitte besonders im Dogger aber meist unter dem seismisch auflösbaren Minimum von ca. 15 m liegen, können solche Fazieswechsel mit den verfügbaren Daten kaum verfolgt. Modelliert man dagegen ganze Sequenzen unter Annahme realistischer Vorgaben, wie z.B. Mächtigkeit und lithologische Ausbildung, so können dennoch wichtige Aussagen über laterale Variationen gemacht werden (siehe Abschnitt 2.3).

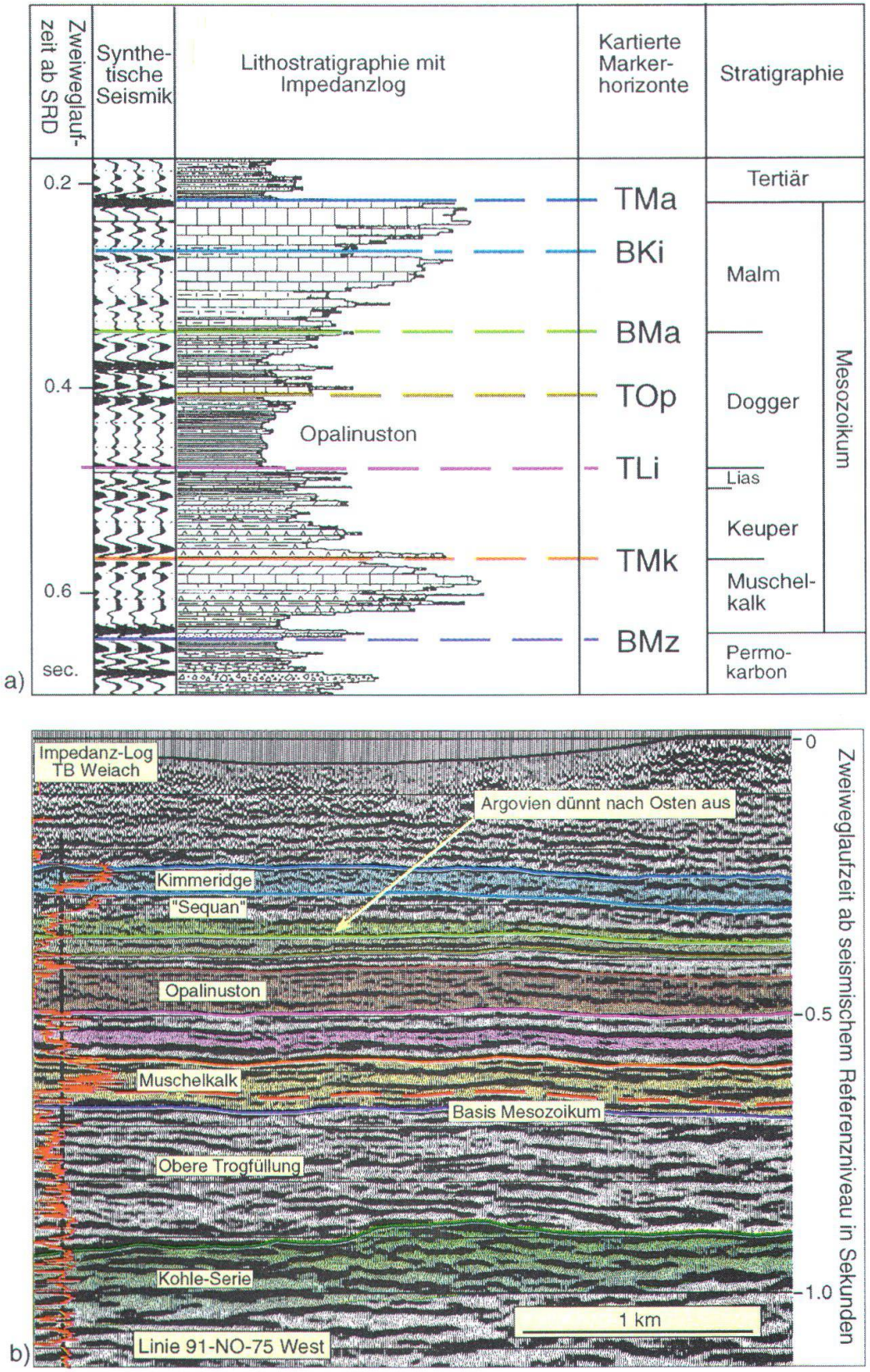


Fig. 3: Oben: Ableitung der Markerhorizonte des Mesozoikums aus den Bohrlochdaten der Tiefbohrung Weiach. Das aus den Originaldaten neu berechnete Impedanzlog und das entsprechende Synthetische Seismogramm (ganz links) sind mit der Markerdefinition aus NTB 90-04 (Diebold et al. 1991) ohne Probleme korrelierbar.
Unten: Auf Linie 91-NO-75 können ausgehend von der Bohrung Weiach auch laterale Änderungen der Mächtigkeit (und Fazies?) insbesondere des Malm beobachtet werden (vergl. Beilage 2).

Der Opalinuston selbst erweist sich über weite Strecken als seismisch sehr undifferenziertes, reflexionsarmes Band etwa in der Mitte des Mesozoikums und bildet so einen idealen Kontrast zur starken Reflektivität des höheren Doggers. Insbesondere die wechselhaften Lithologien des Dogger β – δ (≈ Bajocien, sog. «Unterer Dogger» im Westen) kommen bei guter Seismikqualität als ausgeprägtes, 2- oder 3-faches Reflektorband zur Geltung (siehe ausführlich in Naef et al. 1995).

Lias und Rhät

Diese vorwiegend mergelig-tonige Sequenz mit Einschaltung von Meter-mächtigen Kalkbänken (Arietenkalk) und Sandsteinen (Rhät) ist stets nur einige Dekameter mächtig und mit herkömmlicher Reflexionsseismik nicht weiter gliederbar. Sie erzeugt aber doch eine markante Reflektivität im Liegenden des Opalinustons, deren Oberkante gemeinhin als Top Lias oder Basis Opalinuston kartiert wird (Markerhorizont TLi, Fig. 3a und Beilagen).

Keuper

Der obere Mittelkeuper vom Top Gipskeuper bis zur Basis Rhät resp. Lias ist wiederum lithologisch wechselhaft ausgebildet. Tonreiche Abschnitte (Bunte Mergel, Knollenmergel) wechseln mit Sandsteinen (Schilfsandstein, Kieselsandstein, Stubensandstein) und im Westen mit dem nur wenige Meter mächtigen Gansinger Dolomit. Die Sandsteine und der Dolomit besitzen eine gewisse Bedeutung als lokale Aquifere. Der Schilfsandstein gilt als terrestrisches Rinnen- und Überflutungssediment, welches mit erosiver Basis über dem Gipskeuper liegt; er kann schon über geringe Distanzen von ca. 10 m Mächtigkeit auf 0 m auskeilen.
Die lithologisch uneinheitliche Abfolge Höherer Keuper - (Rhät -) Lias ist in der Regel durch ein 2- bis 4-faches Reflektorband zwischen dem «transparenten» Opalinuston und dem ebenfalls seismisch diffusen Band des liegenden Gipskeupers abgebildet und deshalb regional gut kartierbar (vergl. Fig. 4).
Der Gipskeuper besteht im ganzen Gebiet aus einer mergelreichen Evaporitsequenz mit Anhydritbänken, deren Mächtigkeit von West (ca. 60-90 m) nach Osten (ca.40-60 m) generell abnimmt. Der Basisanhydrit des Gipskeupers, welcher in der zentralen Nordschweiz überall beobachtet wird und dort auch den besten Reflektor des gesamten Mesozoikums bildet (=«Top Muschelkalk», Marker TMk, Fig. 3a und Beilagen: siehe Sprecher & Müller 1986, Diebold et al. 1991), ist auch im Osten deutlich entwickelt. Bei mässiger und tieffrequenter Seismikqualität kann er allerdings seinen Charakter zusehends verlieren. Zudem dürfte die Reflektivität im Osten weniger auf einen (nicht mehr vorhandenen?) Basisanhydrit des Gipskeupers als vielmehr auf den Impedanzsprung beim Übergang vom tonreichen Keuper zu den Karbonaten des Muschelkalkes zurückzuführen sein.

Muschelkalk und Buntsandstein

Auch und besonders die tiefere Trias, welche im Westen noch die typische germanische Gliederung zeigt (z.B. Tiefbohrungen Riniken, Böttstein) und nirgends weniger als 150 m mächtig ist, verliert diesen Charakter im Süden (Lindau) und Osten zusehends und wird dort auch deutlich geringmächtiger (120-140 m). Die Anhydritlagen werden wesentlich spärlicher oder verschwinden ganz, und es tritt eine dolomitreiche Fazies mit siltreichen Lagen an ihre Stelle. Ein eigentlicher Buntsandstein ist nicht mehr entwickelt; die detritische Basis der Trias wird vom sog. «Basissand» gebildet (in Herdern ca. 8 m, in Lindau und Berlingen ca. 5 m).
Die Basis Mesozoikum (Marker BMz, Fig. 3a und Beilagen) wird generell im Lie-

genden des tiefsten durchgehenden Reflektors angenommen. Wie schon in Diebold et al. (1991: Beilage 12) im Detail gezeigt wurde, kann die Reflektivität der Basis Mesozoikum nicht auf ein und denselben lithostratigraphischen Horizont zurückgeführt werden, sondern ist vielmehr Ausdruck lokal unterschiedlicher Lithologien sowie deren Diagenese und Impedanzkontraste. Die Basis Mesozoikum kann deshalb auch bei guter Seismikqulität nur mit einer gewissen Unschärfe ermittelt werden.

2.3 Seismische Modellierung

Beim Modellieren wird versucht, ein komplexes System mit Hilfe eines vereinfachten Eingabemodells und theoretischer Annahmen zu simulieren. Die Parameter dieses Modells werden solange geändert, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen dem natürlichen und dem synthetisch berechneten Ergebnis erreicht wird.

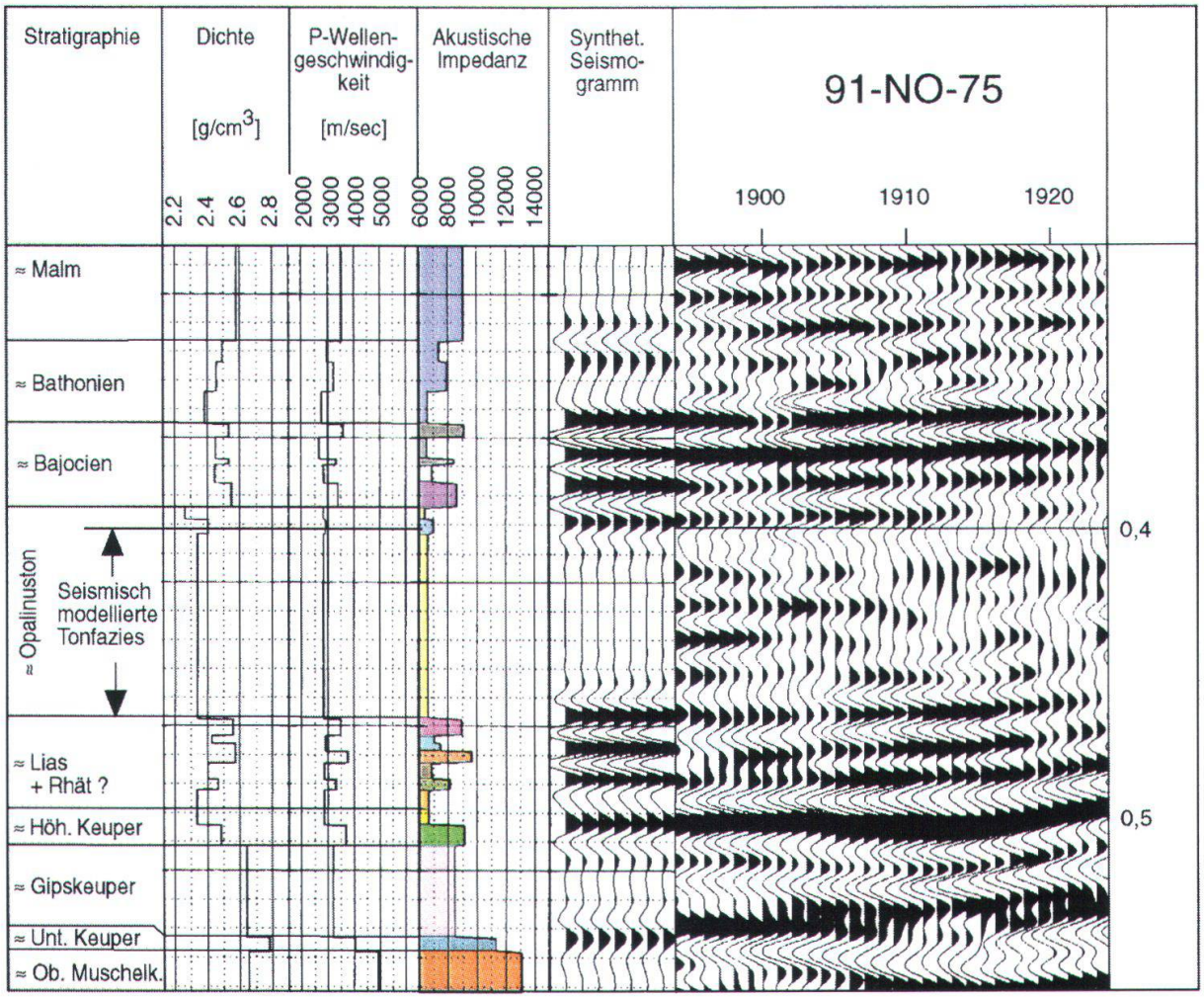


Fig. 4: Seismische Modellierung des Abschnitts Keuper - Dogger. Mit Hilfe einer aus den Daten von Weiach abgeleiteten Impedanz-Kurve werden synthetische Seismogramme berechnet und in regelmässigen Abständen in die Oberflächenseismik eingepasst. Dadurch kann - bei Annahme etwa gleichbleibender lithostratigraphischer und petrophysikalischer Verhältnisse - die jeweilige Mächtigkeit des Opalinustons ermittelt werden.

Bevor die Lithostratigraphie den seismischen Linien entlang modelliert werden kann, müssen die Dichte- und Sonic-Werte, die das akustische Impedanz-Modell bilden, anhand von Daten aus Bohrungen geeicht werden. Mit einem Algorithmus werden die gemessenen, hochauflösenden Sonic-Logs der Bohrungen in Treppenfunktionen mit einer vorgegebenen Anzahl Stufen und mit möglichst geringem Informationsverlust umgewandelt und die Dichte-Logs entsprechend angepasst. Die seismische Antwort des daraus errechneten akustischen Impedanz-Modells wird dann in Form eines synthetischen Seismogrammes berechnet. Ein Vergleich des modellierten synthetischen Seismogramms mit dem aus den Bohrlochmessungen resultierenden echten Seismogramm zeigt praktisch keine Unterschiede (Naef et al. 1995).

Die aus der Bohrung Weiach abgeleitete Stufenabfolge wurde im ganzen Gebiet für die Modellierung benutzt, da sie in gut vergleichbarer Weise auch in den Bohrungen Siblingen und Herdern in Erscheinung tritt. Abgesehen von den Filterparametern der seismischen Profile wurden nur noch die Mächtigkeiten und Impedanzen der Intervalle zwischen Top Bajocien (ca. Basis Parkinsoni-Schichten) und Top

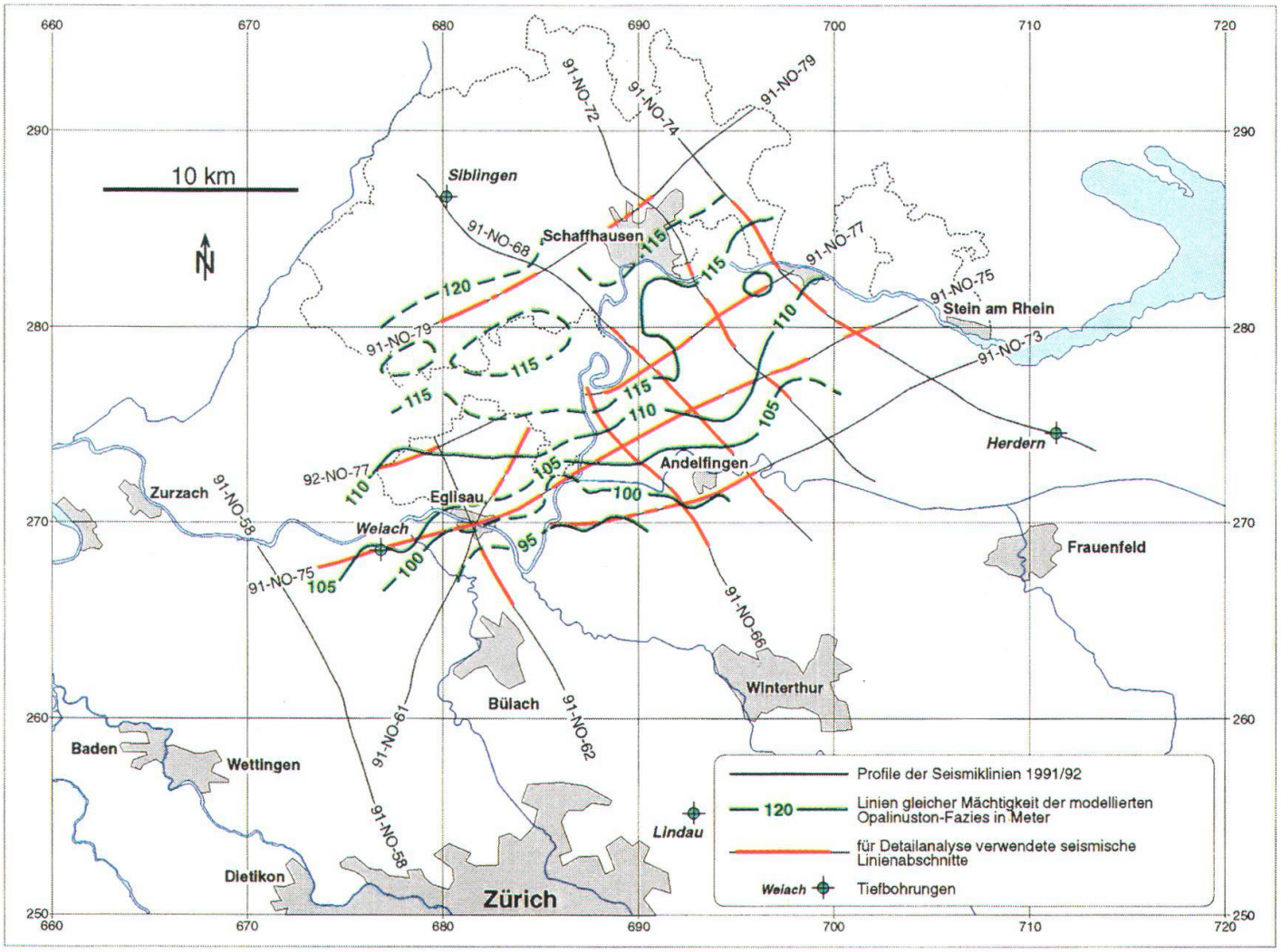


Fig. 5: Mächtigkeitskarte der modellierten Opalinuston-Sequenz; für belastbare Ergebnisse bedarf es einer guten Seismikqualität, die zumindest auf den rot markierten Linienabschnitten erreicht wurde. Die grünen Isopachen zeigen, dass die zusammenhängende Ton-Fazies des Aaleniens nach NW generell zunimmt.

Gipskeuper variiert, um den Einfluss solcher Änderungen auf das seismische Bild untersuchen zu können.
Zahlreiche Serien von synthetischen Seismogrammen mit systematisch variierenden Modellparametern wurden berechnet und – ausgehend von Weiach – in regelmässigen Abständen mit allen qualitativ ausreichenden Linienabschnitten der Kampagne 91/92 verglichen. Figur 4 zeigt ein Beispiel aus der Linie 91-NO-75, CDP 1894. Die modellierte Tonfazies und die daraus berechnete Mächtigkeit des Opalinustons ist dabei nicht ganz identisch mit dessen stratigraphischer Abgrenzung. Denn der oberste, mergelig-sandige Abschnitt des Opalinustons macht sich bereits durch eine erste, wenn auch relativ schwache Reflexion bemerkbar und wird deshalb nicht mehr in die eigentliche, reflexionslose Tonfazies einbezogen. So beträgt z.B. in der Bohrung Weiach die modellierte Mächtigkeit 105 m während die Mächtigkeit der lithostratigraphisch fixierten Formation 111 m umfasst.
Die Isopachen des so ermittelten Opalinustons im Untersuchungsgebiet sind in Figur 5 dargestellt; die Werte schwanken zwischen 95 m im Süden und bis zu 120 m im Norden. Dieses Ergebnis steht zwar in gewissem Widerspruch zu den Angaben von Hofmann (1981), wonach der Opalinuston im Wutach - Randen - Gebiet generell viel geringmächtiger ist (60 - 70 m), fügt sich aber zwangslos in das überregionale paläogeographische Bild des unteren Aaleniens ein. Danach nimmt die Mächtigkeit des Opalinustons vom Alemannischen Hoch im Süden, wo zu dieser Zeit noch terrestrische Bedingungen mit Erosion herrschten, nach Norden bis zu einem Beckenzentrum im Gebiet Schwarzwald - Schwäbische Alb sukzessive zu.
Wie bei jedem Inversionsverfahren gibt es auch hier mehrere Modelle, welche die zu interpretierenden seismischen Daten erklären können. Eine Überprüfung dieser Ergebnisse anhand einer neuen Bohrung im zentralen Untersuchungsgebiet ist deshalb unerlässlich.

3. Interpretation

3.1 Isohypsenkarte und geologische Profile

Die im Abschnitt 2.2 definierten Markerhorizonte wurden anhand zeitmigrierter Papierkopien der neuen Seismiklinien kartiert und dann mit Hilfe eines EDV-Interpretationssystems am Bildschirm kontrolliert, resp. in kritischen Bereichen überarbeitet. Davon ausgehend konnten dann auch alle älteren seismischen Linien bearbeitet und in die bestehende Interpretation eingebaut werden.
Die Tiefenumrechnung erfolgte anhand regionaler, aus den verfügbaren Bohrdaten errechneter Geschwindigkeitskarten für die drei Molasseformationen sowie die mesozoischen Intervalle Malm, Dogger, Lias + Keuper und Trias + Buntsandstein. Deshalb mussten aus den interpretierten Seismiklinien zuerst Zeitkarten der abgrenzenden Markerhorizonte erstellt werden, um diese dann mit Hilfe der Geschwindigkeitskarten in Tiefen- oder Isohypsenkarten umzurechnen. Diese Umrechnung erfolgte wiederum auf dem EDV-Interpretationssystem, wurde aber abschliessend editiert, d.h. von Hand auf ihre Konsistenz überprüft.
Die so mit relativ grossem Aufwand erstellten Isohypsenkarten enthalten stockwerkweise eine Fülle von strukturellen Informationen, die ein plausibles Bild der regionalen Geologie ergeben. Für eine anschauliche Darstellung wurden letztlich entlang der seismischen Profile 1991/92 geologische Profile konstruiert. Die Isohypsenkarten sowie die geologischen Profile sind im Nagra Technischen Bericht NTB 94-14 (Naef et al. 1995) publiziert. Im folgenden wird am Beispiel der Struk-

turkarte «Basis Opalinuston», deren Interpretation für die heutige Beurteilung der Endlageroption Opalinuston entscheidend ist, noch auf die wichtigsten regionalgeologischen Phänomene hingewiesen.

3.2 Strukturkarte Basis Opalinuston

In Figur 1 wurde ein Überblick der bestimmenden tektonischen Einheiten der Nordschweiz, sowohl im Kartenbild wie auch in 2 schematisierten Profilen, vermittelt. Wie sieht die Situation nun auf dem Niveau «Basis Opalinuston» aus? Wo liegen die gesuchten, tektonisch ruhigen Gebiete und wo ist der Opalinuston tektonisch gestört ?
In Figur 6 wird versucht, anhand einfacher Strukturkriterien die 4 tektonischen Baueinheiten

A Kettenjura resp. abgescherte Molasse
B Vorfaltenzone
C Tafeljura resp. Plateaumolasse und
D Hegau - Bodensee-Graben

auf dem Niveau des Opalinustons gegeneinander abzugrenzen. Dabei wird stark vereinfachend von der Voraussetzung ausgegangen, dass in den Baueinheiten A und B kompressive und in den Baueinheiten C und D extensive Strukturen dominieren. Ohne hier näher darauf einzugehen, wurde festgestellt, dass die Zerrungsstrukturen, Verwerfungen und Flexuren im allgemeinen älter sind als die durch den mio- pliozänen Fernschub verursachten Auf- und Überschiebungen des Kettenjura und der Vorfaltenzone. Dies ist unter anderem dadurch belegt, dass die Strukturkarte Basis Mesozoikum ausschliesslich Verwerfungen und Flexuren aufweist, welche zumindest in grossen Zügen den Verlauf der späteren Abscherung bestimmt haben (vgl. z.B. Laubscher 1986). Diese Altersbeziehung kann aber streng nur in den Baueinheiten Aund B etabliert werden, wo sowohl Zerrungs- wie auch Kompressionsstrukturen vorkommen.

Fernschub und Vorfaltenzone
Die Beziehung zwischen Zerrung im Sockel und späterer Abscherung resp. Kompression im darüberliegenden Deckgebirge wird z.B. an der Fernschubfront auf der Linie 91-NO-58 deutlich (Fig. 7A). Hier entwickelte sich über einer durch Brüche gegliederten Flexur (=Nordrand tiefer Permokarbontrog?) eine flache Überschiebungsrampe, die im Opalinuston ein – seismisch nicht genauer analysierbares – Muster von Kleinstrukturen bewirkte, die aber an der Erdoberfläche höchstens in Form einer leichten Antiklinale kartiert werden kann (und tatsächlich bis heute nicht bekannt war!). Solche Bereiche werden in Figur 6 als «kleinräumig gestört» bezeichnet (Baueinheit B1). Im NW der Rampenfalte folgt dann der, zumindest im seismischen Abbild, ungestörte, von Kompressionsstrukturen freie Tafeljura (Baueinheit C), während im Südosten ein ruhig gelagerter Bereich innerhalb der Vorfaltenzone anschliesst, wo der Opalinuston aber im Gegensatz zur Baueinheit C durchaus kompressive Kleinstrukturen und Scherhorizonte aufweisen kann (Baueinheit B3).
Auf Linie 91-NO-62 hat die seismisch kartierbare Front des Fernschubs einen etwas anderen Charakter (Fig. 7B); hier konzentriert sich die kompressive Deformation auf kleinräumige Verschiebungen in der Trias, welche eine deutliche Verdickung des tieferen Mesozoikums bewirken, während der darüberliegende Opali-

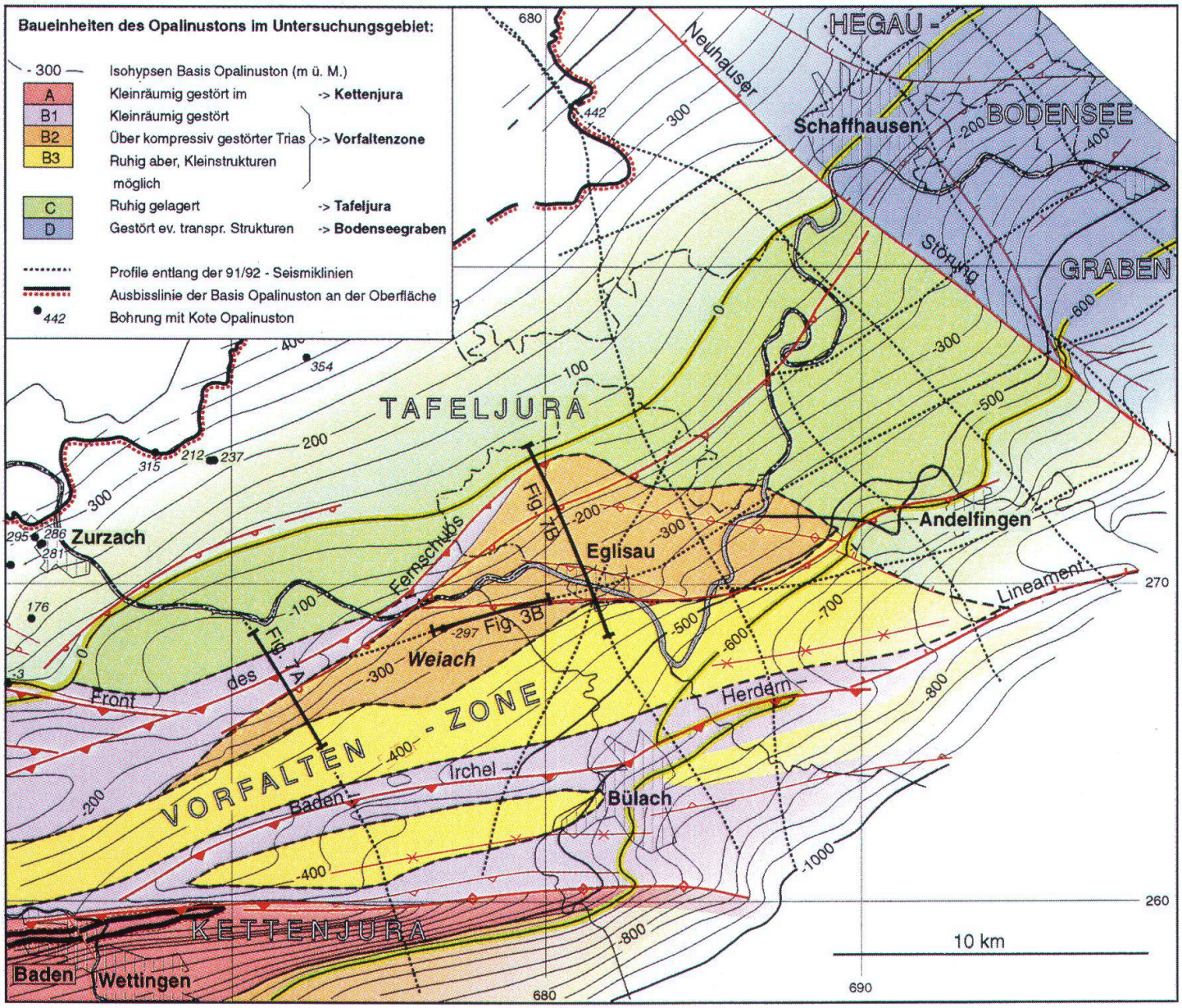
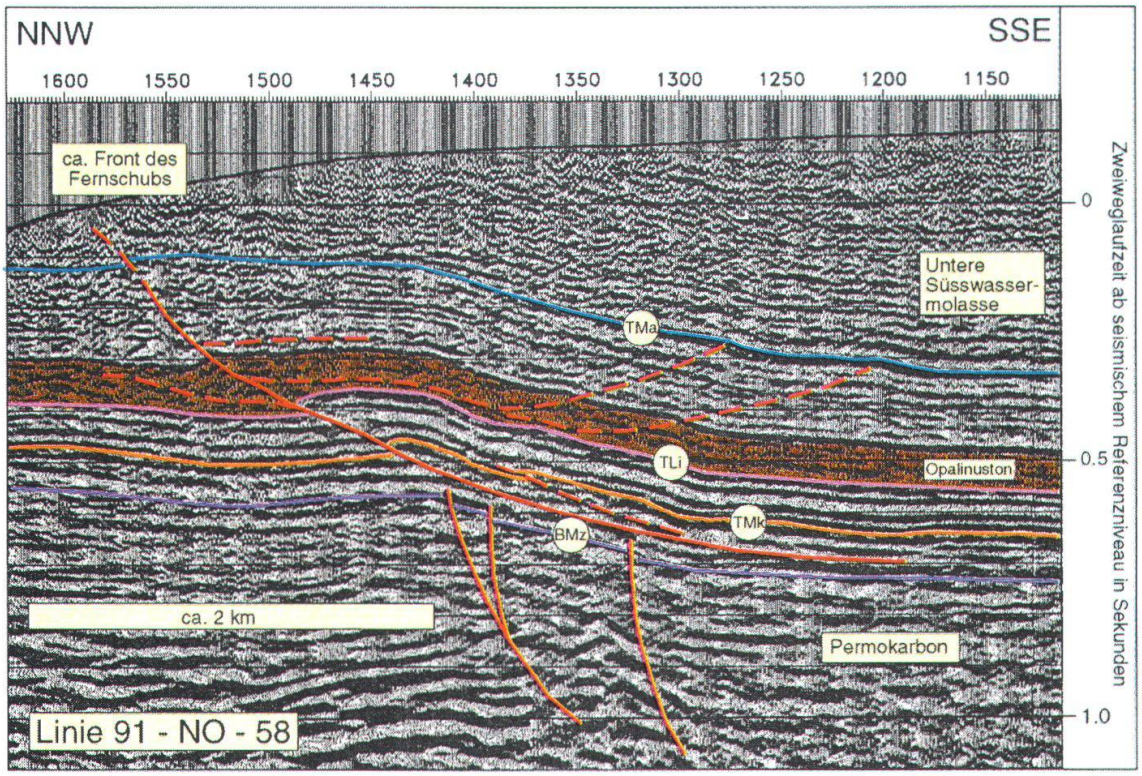


Fig. 6: Strukturkarte der Basis Opalinuston (Marker TLi) mit Abgrenzung der wichtigen Baueinheiten im engeren Untersuchungsgebiet. Erklärungen siehe Text.

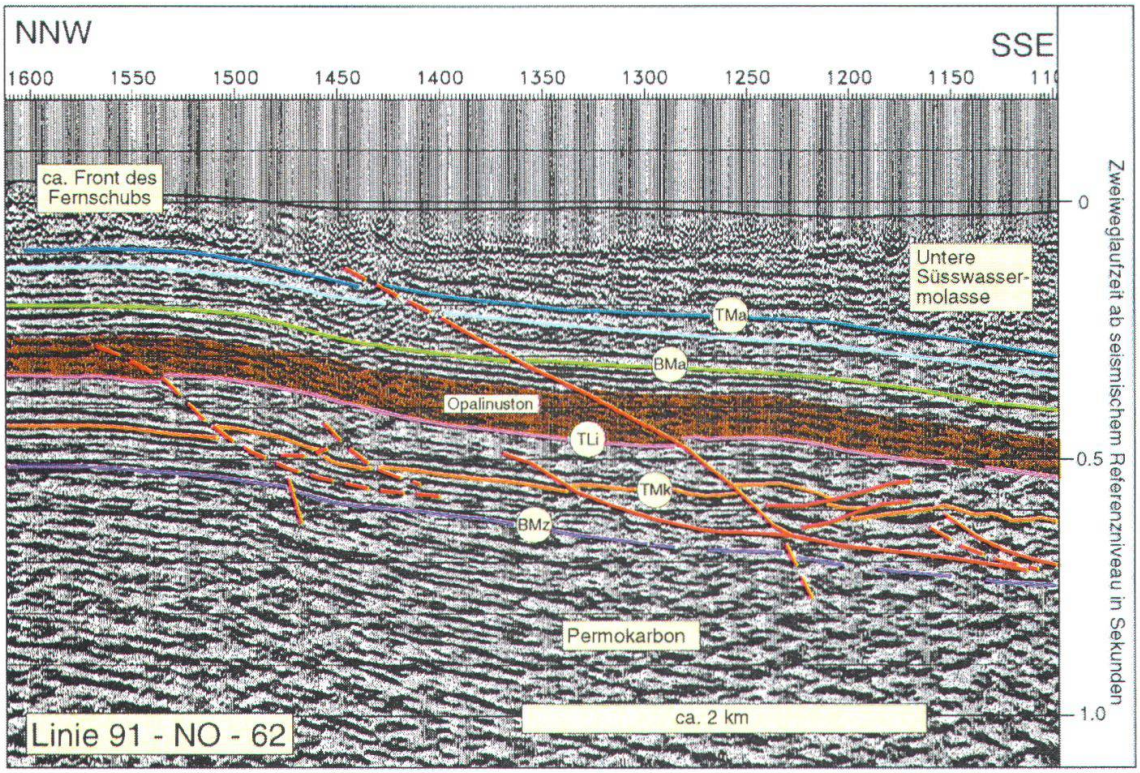
nuston nur leicht deformiert ist; in Fig. 6 sind solche Bereiche als Bautyp B2, Opalinuston über kompressiv stark gestörter Trias, bezeichnet.

Tafeljura und Bodensee-Graben

Ausserhalb des durch kompressive Strukturen geprägten Bereichs der Vorfaltenzone und des Kettenjuras resp. der abgescherten Molasse liegt der Tafeljura resp. die Plateau-Molasse (grün in Fig. 6). Dieses Gebiet ist auf allen Profilen auffallend ruhig gelagert, weist kaum Verwerfungen, sondern höchstens über mehrere Linien korrelierbare Flexuren auf (Baueinheit C). Auf Linie 91-NO-68 (Beilage 1) wird die Plateaumolasse im SE an einer sehr prominenten Verwerfung versetzt, die Teil eines ausgedehnten vom Raum nördlich Lägern bis nach Herdern verfolgbaren Lineaments ist (Baden-Irchel-Herdern-Lineament); dieses wurde im Bereich der Vorfaltenzone als steile Überschiebung reaktiviert.



a)



b)

Fig. 7: Die seismisch kartierbare Abscherungsfront des Fernschubs im Mesozoikum der Vorfaltenzone nördlich der Lägeren (Profilspuren siehe Fig. 6):
a) Flache Rampenfalte im Gebiet Rümikon - Siglistorf als grössere Einzelstruktur.
b) Kleinräumige Zerscherung und damit tektonische Verdickung der tieferen Trias sowie Ansätze zur Rampenbildung bis ins höhere Mesozoikum; Gebiet Eglisau - Wil.

Eine ebenso ausgeprägte, wahrscheinlich aus mehreren diskreten Teilstücken bestehende Verwerfungszone ist die sogenannte Neuhauser Störung. Sie ist NW des Rheins aus Oberflächenkartierungen bekannt (Hofmann 1981), setzt sich aber offensichtlich noch weit nach SE fort. Sie äussert sich auf Linie 91-NO-75 als grosse Einzelstörung mit einer Verwerfung der Basis Mesozoikum von weit über 100 m (Beilage 2).
Die ausgewerteten Seismiklinien zeigen östlich dieser Neuhauser Störung allgemein eine deutlich unruhigere Lagerung des gesamten Mesozoikums. Aufgrund dieser Beobachtung wurde angenommen, dass sich die im Gebiet Hegau-Bodensee seit langem bekannte Bruchtektonik (z.B. Schreiner 1992) bis etwa zur Neuhauser Störung ausdehnt und diese ganze Zone als Hegau-Bodensee-Graben bezeichnet. Dabei soll der Abschnitt zwischen Randen- resp. Schinerberg-Verwerfung und Neuhauser Störung als westliche Grabenrand-Zone bezeichnet werden. Hier sind wohl ruhig gelagerte, mit dem Tafeljura vergleichbare Teilgebiete vorhanden, ihre Ausdehnung dürfte aber nirgends mehr als nur wenige km^2 erreichen. Zudem besteht hier aufgrund des seismischen Charakters einzelner Störungsäste der Verdacht auf transpressive, d.h. einengende Bewegungen. Solche wären insbesondere im Rahmen neotektonischer Szenarien des Gebietes durchaus plausibel und entsprechend zu berücksichtigen.

3.3 Schlussfolgerungen

Die regionale Reflexionsseismik 1991/92 der Nagra im Gebiet Nördlich Lägern - Zürcher Weinland hat im wesentlichen drei Dinge gezeigt:
1. Mit einer sorgfältigen Analyse bestehender Daten sowie guter Vorbereitung und Überwachung der Feldarbeit wie auch der Datenverarbeitung konnte die bisher erreichte Auflösung der 2D-Reflexionsseismik im Gebiet Nordostschweiz wesentlich verbessert werden. Mit diesem Datensatz war es erstmals möglich, auch fazielle Veränderungen im Mesozoikum zu erkennen und die Mächtigkeitsverteilung des Opalinustos mit Hilfe einer Inversionsmethode zu kartieren.
2. Das Strukturinventar im Untergrund der Nordostschweiz ist wesentlich differenzierter als bisher angenommen. Es können heute mindestens 4 Phasen tektonischer Aktivität unterschieden werden, denen jeweils charakteristische Strukturen zugeordnet werden können.
3. Die aufgrund der bisherigen Erkenntnisse für eine Endlageroption am besten geeigneten Opalinuston-Vorkommen beschränken sich auf das tektonisch ruhig gelagerte Gebiet zwischen Andelfingen und dem Cholfirst im Zürcher Weinland. Diese Region soll deshalb mit weiterer Reflexionsseismik und einer Tiefbohrung gezielt abgeklärt werden.

4. Geplante weitere seismische Messungen

4.1 Vorgehen

Der noch ausstehende, vom Bundesrat geforderte Nachweis eines genügend ausgedehnten Wirtgesteinskörpers als Option für die Aufnahme eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle bedingt eine Anpassung des bisher zur Untersuchung tiefliegender Sedimentgesteine in der Schweiz angewendeten seismischen Messver-

fahrens. Das Gestein muss nun räumlich im Detail überprüft werden. Dabei sollten auch kleine Störungen von einigen Metern Verschiebungsbetrag im Bereich des Wirtgesteins erkannt werden. Anstelle der bisherigen, regionalen seismischen Profilmessungen ist deshalb geplant, ein flächendeckendes Messverfahren anzuwenden, welches eine lückenlose, dreidimensionale Abtastung des Untergrundes erlaubt (3D-Seismik). Dieses Verfahren wird seit ca. 10 Jahren in verschiedenen Ländern vor allem von der Erdölindustrie mit grossem Erfolg angewendet.
Die Messparameter der von der Nagra für Winter 1996/97 geplanten 3D-Seismik im Zürcher Weinland wurden darauf ausgerichtet, den Zielhorizont Opalinuston im gesamten Untersuchungsgebiet mit hoher Auflösungsgenauigkeit abzubilden. Bei der Planung musste aber auch darauf geachtet werden, dass der Feldaufwand für die betroffene Bevölkerung insgesamt in einem zumutbaren Rahmen bleibt. So zum Beispiel können die Messlinien nicht in einem beliebig dichten Raster durch Felder, Wälder und Dörfer gelegt werden. Um sicherzustellen, dass die bestmöglich realisierbare Datenqualität erreicht wird, sind die zu wählenden Feldparameter anhand von Analysen bestehender Daten überprüft worden.
Dabei hat sich gezeigt, dass die Messkabel optimal in Abständen von ca. 180 Metern ausgelegt werden. Die seismischen Signale sollen ebenfalls in Abständen von ca. 180 Metern, quer zu den Messkabeln, entlang sogenannter Schusstraversen ausgesendet werden. Die Distanz zwischen den einzelnen Messpunkten entlang der Messkabel und Traversen ist auf 30 Meter festgelegt worden. Dadurch kann der Untergrund mit einem regelmässigen Raster von 15 auf 15 Meter und einer nominal 20-fachen Mehrfachüberdeckung abgetastet werden (Figur 8).
Die Linienabstände von 180 Metern führen zu einer gewissen Flexibilität im Feld, beim Ausweichen oder Umgehen von Hindernissen. Verschiebungen von Schusspunkten werden vor allem durch die notwendigen Sicherheitsabstände zu Leitungen (Wasser, Abwasser, Gas, Strom, Telefon, etc.) sowie zu Gebäuden bestimmt. Die erforderliche, genaue Vorplanung wurde computerunterstützt mit Hilfe von digitalisierten Leitungsplänen und rezenten, farbigen Luftaufnahmen durchgeführt (Kuhn & Graf, 1996).

4.2 Zielsetzungen der geplanten 3D-Seismik

Übergeordnetes Ziel der für Winter 1996/97 geplanten 3D-seismischen Feldmessungen ist eine möglichst lückenlose räumliche Detailerkundung des Sedimentgesteins Opalinuston im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland.

Die 1991/92 aufgenommenen, regionalen Profildaten haben gezeigt, dass aufgrund der vorherrschenden seismischen Geschwindigkeiten und Frequenzen im Bereich des Wirtgesteins ein vertikales Auflösungsvermögen von ca. 15 m erreicht werden kann. Im neuen, dreidimensionalen Datensatz soll versucht werden, auch Störungsmuster kleinerer Verwerfungen, sowie fazielle Änderungen im Bereich des Wirtgesteins zu kartieren.
Die aus diesen Überlegungen abgeleiteten Teilzielsetzungen für die Erstellung und Auswertung des geplanten 3D-seismischen Datensatzes lauten:
(1) Lückenlose Abbildung der mesozoischen Sedimentgesteine im Tiefenbereich 250 bis ca. 1'200 m u.T.
(2) Erfassung und räumliche Lokalisierung von Strukturen innerhalb der abgebildeten Sedimentschichten, deren vertikaler Versatz mehr als 15 m beträgt.

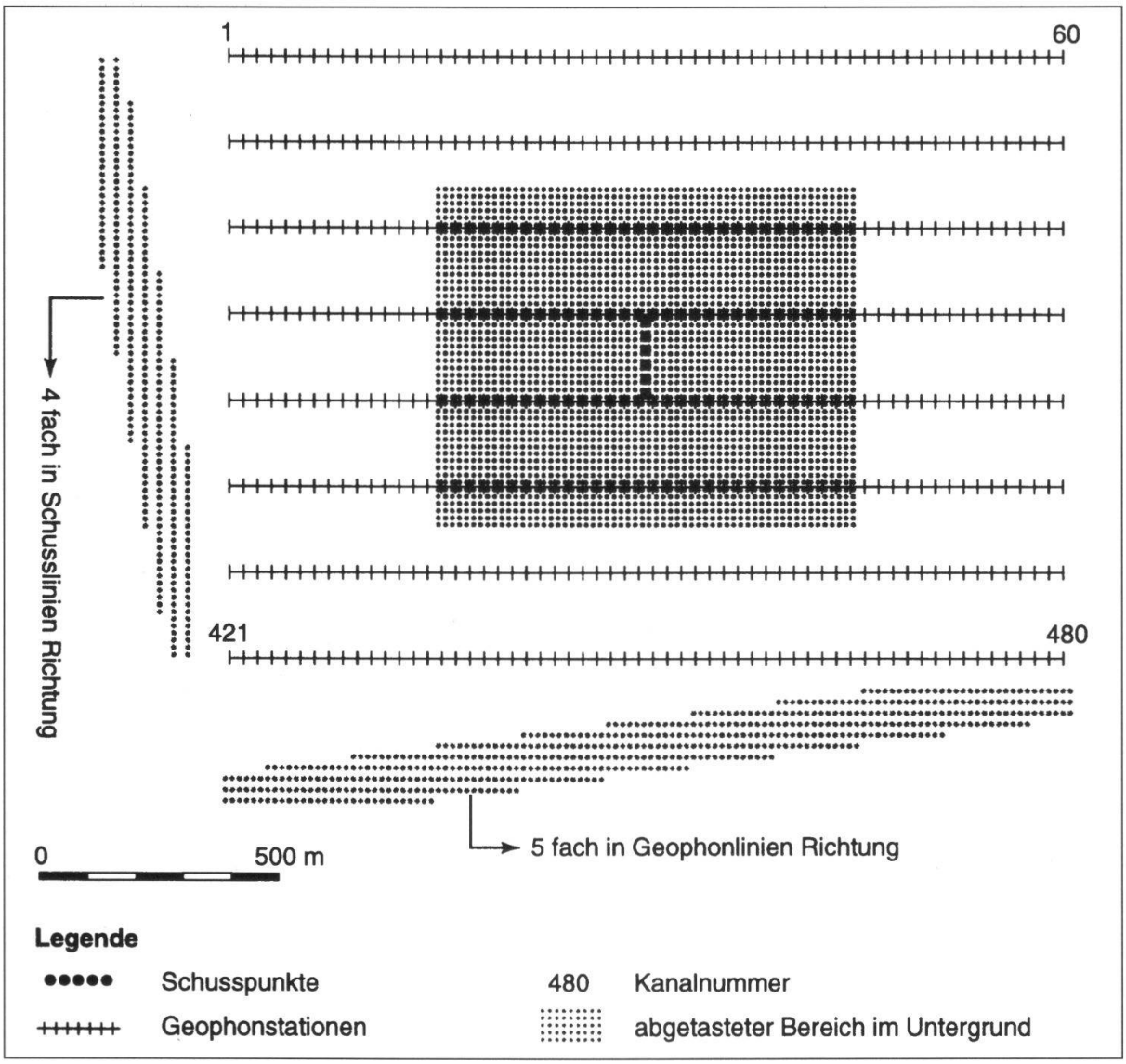
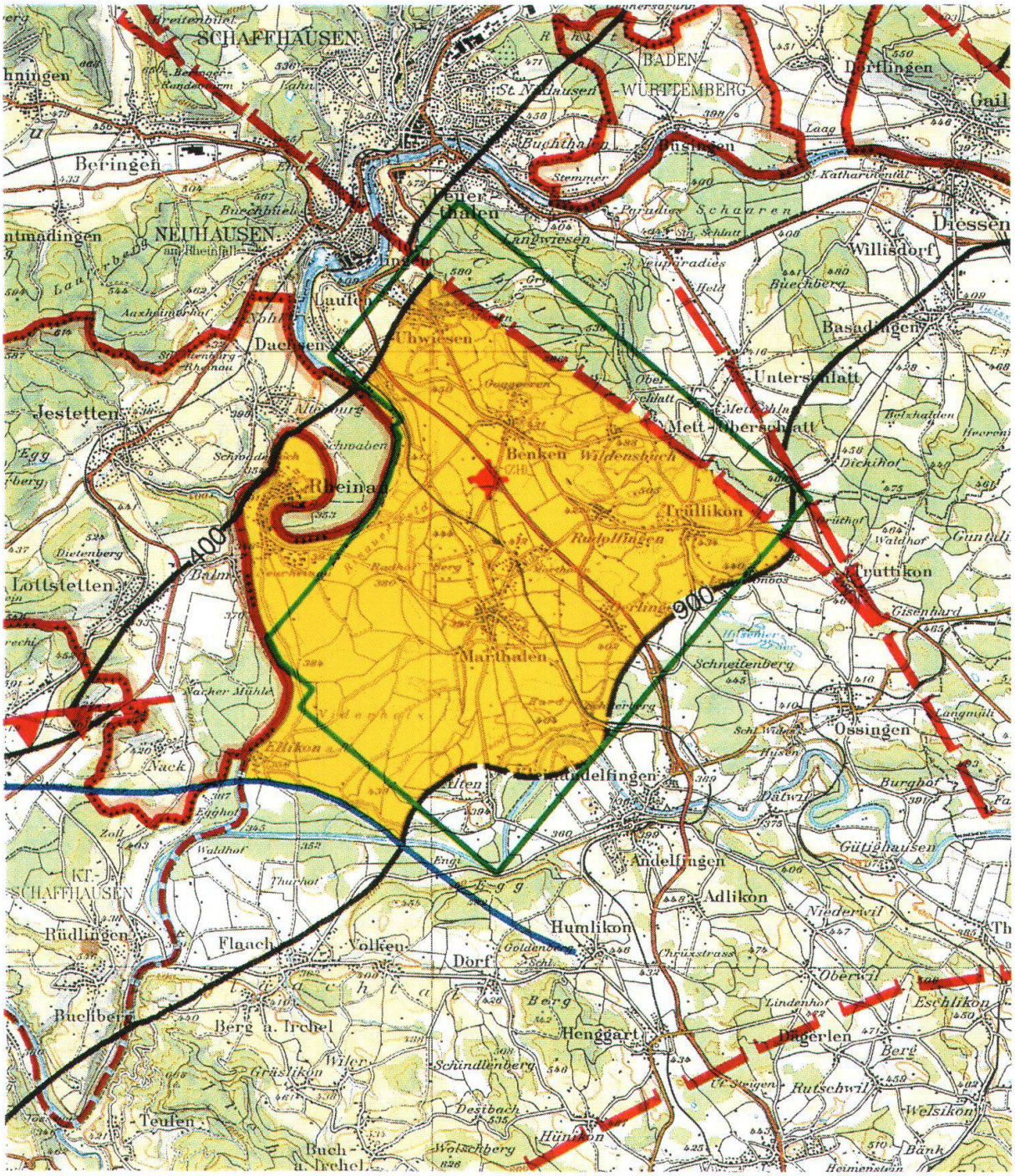


Fig. 8: Flächenhafte Abtastung des Untersuchungsgebietes bei der geplanten 3D-Seismik

(3) Erkennung und Kartierung von Strukturen mit kleineren Verwerfungsbeträgen (zwischen ca. 8 und 15 m) im Bereich des Opalinustons und der angrenzenden Schichten.
(4) Abklärung der Mächtigkeitsverteilung des Wirtgesteins im Untersuchungsgebiet, sowie der seismisch erkennbaren faziellen Änderungen im Bereich des Opalinustons.
(5) Laterale Extrapolation von Bohrbefunden über das gesamte Messgebiet.

4.3 Umfang der Feldmessungen und Zeitplan

Die Messfläche der geplanten 3D-Seismik dehnt sich über ca. 7.5 x 7.9 km aus, wobei sie nicht rechteckig ist, sondern sich nach SW verjüngt (Figur 9). Dabei ergibt sich eine Gesamtfläche von ca. 50 km^2.
Da sich der grösste Teil der Schusspunkte auf Äckern und Wiesen sowie in Wäldern befindet, können in diesem Gebiet Vibrationslastwagen nur begrenzt einge-



Strukturgeologie:

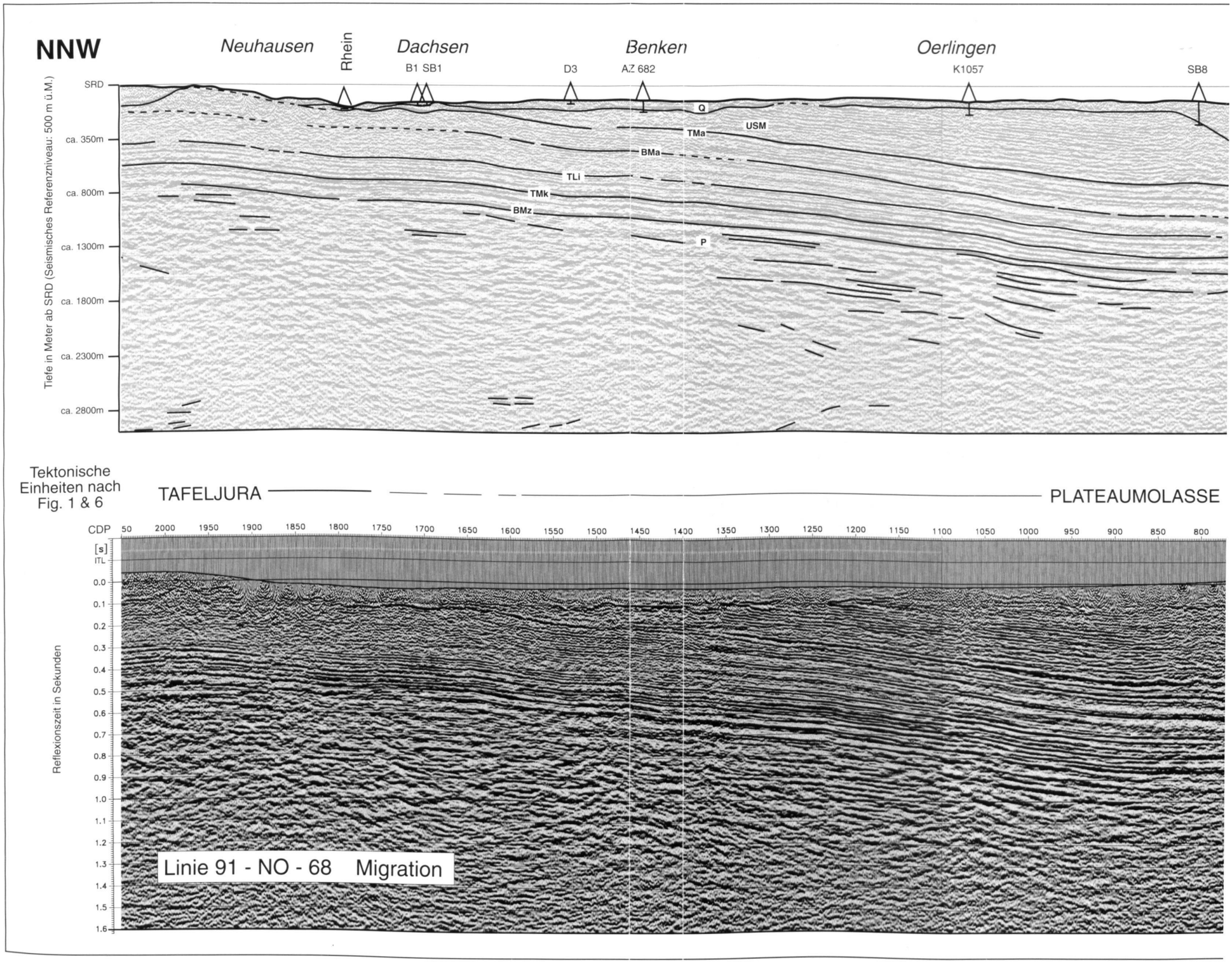
- Nordrand Fernschub
- Überschiebung
- Abschiebung

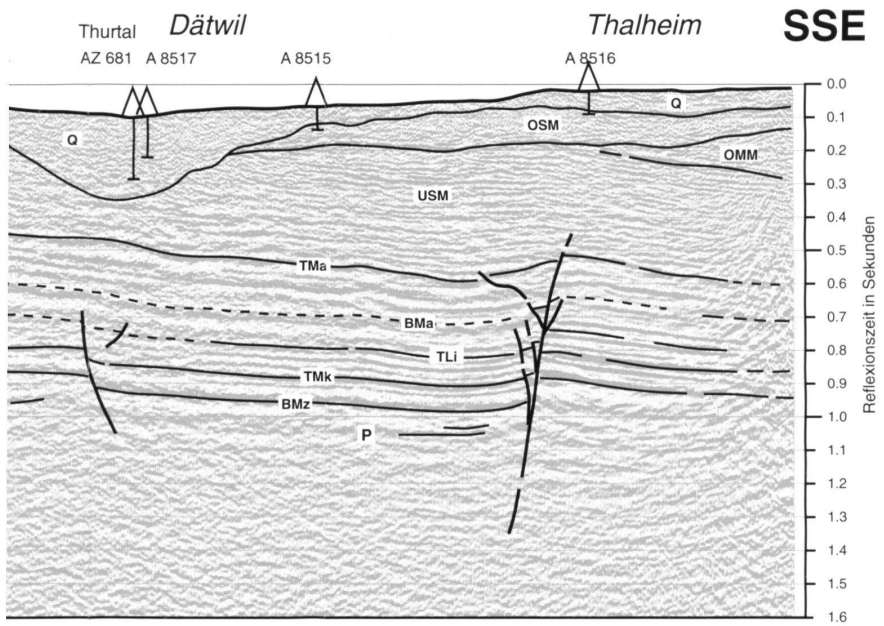
Tiefenbegrenzung:

- 400 – Kote Top Opalinuston in m u.T.
- 900 – Kote Basis Opalinuston in m u.T.
- geplante 3D-Seismik Fläche

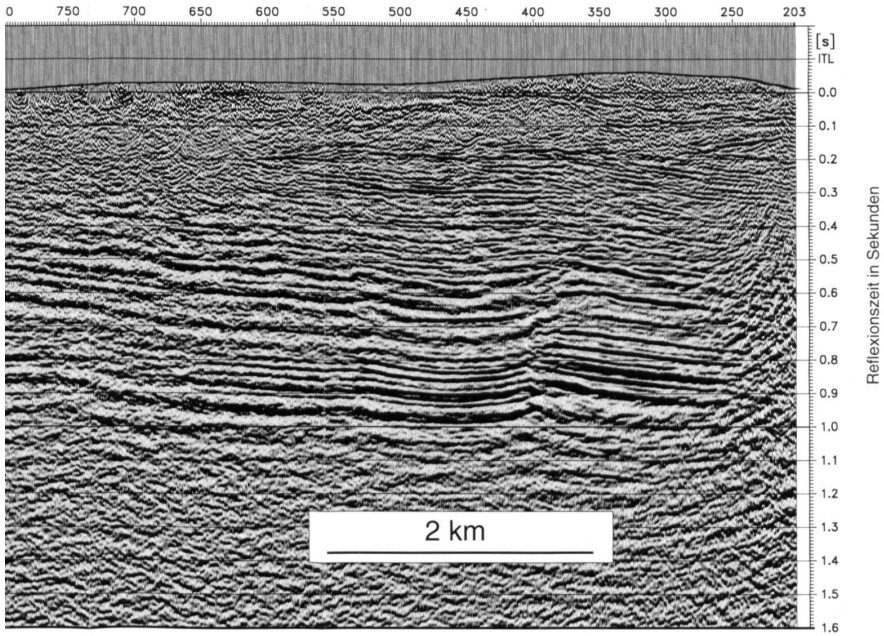
0 1 2 3 4 5km

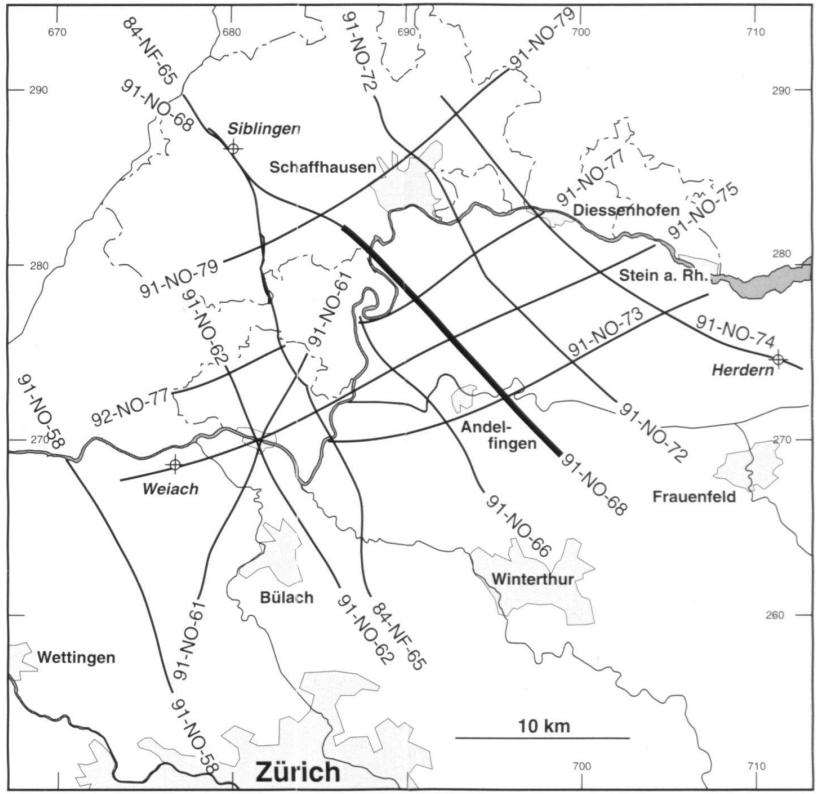
Fig. 9: Lage der geplanten 3D-Seismik im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland.


NNW
Neuhausen
Rhein
Dachsen
Benken
Oerlingen
B1 SB1
D3
AZ 682
K1057
SB8
SRD
ca. 350m
ca. 800m
ca. 1300m
ca. 1800m
ca. 2300m
ca. 2800m
Tiefe in Meter ab SRD (Seismisches Referenzniveau: 500 m ü.M.)
Q
USM
TMa
BMa
TLi
TMk
BMz
P
Tektonische Einheiten nach Fig. 1 & 6
TAFELJURA
PLATEAUMOLASSE
CDP
[s]
ITL
Reflexionszeit in Sekunden
Linie 91 - NO - 68 Migration



Baden-Irchel-Herdern - Lineament





Abgrenzung der Molasseformationen:

Q	Quartär
OSM	Obere Süsswassermolasse
OMM	Obere Meeresmolasse
USM	Untere Süsswassermolasse

Markerhorizonte des Mesozoikums:

TMa	Top Malm ~ Basis Molasse
BMa	Basis Malm
TLi	Top Lias ~ Basis Opalinuston
TMk	Top Muschelkalk ~ Basis Keuper
BMz	Basis Mesozoikum

Submesozoische Reflexionen:

P	Perm (Obere Trogfüllung)
K	Kohle-Serie (Untere Trogfüllung)

——— auf Charakter kartierbar

- - - - - interpoliert / extrapoliert

Signaturen

——— Störung, Verwerfung, Überschiebung (gesichert)

- - - - Störung, Verwerfung, Überschiebung (vermutet)

Quartärbohrung

Refexionsseismik zur Erkundung des Opalinustons	**Beilage 1**
Linie 91-NO-68 Süd: Neuhausen - Thalheim 1:50'000	
Büro für angewandte Geologie 9042 Speicher	Na / Sept. 96

setzt werden. Abseits von Strassen und Wegen sind diese Geräte für ihren Einsatz zu schwer. Ausserdem ist die Ankopplung auf weichem Untergrund eher schlecht, so dass keine ausreichend guten seismischen Signale erzeugt werden könnten. Der Anteil an Strassen und Wegen im Messgebiet beschränkt den Einsatz des Vibroseisverfahrens auf ca. 15 % der Messfläche. Im offenen Gelände und in Waldgebieten soll mittels Schuss-Seismik gearbeitet werden. Zum Bohren der Schusslöcher werden leichte, tragbare oder auf Traktoren montierte Bohrgeräte eingesetzt.
Als begleitende Messungen sind mehrere Aufzeitbohrungen geplant, um eine gleichmässige, der Komplexität des quartären Untergrundes angepasste Verteilung von Kalibrationspunkten zur Bestimmung der oberflächennahen Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen zu erhalten.
Wegen der besseren Zugänglichkeit von Feldern und Wiesen wird in der Winterperiode, voraussichtlich von Januar bis März 1997 gearbeitet.
Nach den Feldmessungen werden die registrierten Daten im Rechenzentrum verarbeitet. Die umfangreiche Datenverarbeitung dauert voraussichtlich bis Ende 1997. Spätestens Mitte 1998 soll eine Erstauswertung des gesamten 3D-Datensatzes vorliegen.

Literaturverzeichnis

BLÄSI, H.-R. 1987: Lithostratigraphie und Korrelation der Doggersedimente in den Bohrungen Weiach, Riniken und Schafisheim. Eclogae geol. Helv. 80/2, 415-430.

DIEBOLD, P. & NAEF, H. 1991: Der Nordschweizer Permokarbontrog. Nagra informiert 12/2, 29-36.

DIEBOLD, P., NAEF, H. & AMMANN, M. 1991: Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz. Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen. Nagra Tech. Ber. NTB 90-04. Nagra, Wettingen.

ERB, L., 1992: Geologische Karte Hegau und westlicher Bodensee, 1: 50 000. Geol. Landesamt Baden-Württemberg.

ETTER, W. 1990: Paläontologische Untersuchungen im unteren Opalinuston der Nordschweiz. Diss. Univ. Zürich.

HOFMANN, F. 1981: Erläuterungen zum Blatt Nr. 74: Neunkirch (LK 1031) des Geologischen Atlas der Schweiz. Schweiz. geol. Komm.

HOFMANN, F. 1981: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt Nr. 74: Neunkirch (LK 1031). Schweiz. geol. Komm.

KOBLER, H.U. 1972: Geochemische, sedimentologische und ökologische Untersuchungen im Braunen Jura alpha (Opalinuston) der Schwäbischen Alb. Arb. Geol.-Paläont. Inst. tech. Hochsch. Stuttgart [N.F.] 66, 1-134.

KUHN, P. & GRAF, R. 1996: GIS als Hilfsmittel für 3D-Seismikmessungen im Zürcher Weiland (Schweiz). Bull. angew. Geol. 1/2, 135-143

LAUBSCHER, H.P. 1986: The eastern Jura: Relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional. Geol. Rdsch. 75/3, 535-553.

LAUBSCHER, H.P. 1987: Die tektonische Entwicklung der Nordschweiz. Eclogae geol. Helv. 80/2, 287-303.

LAUBSCHER, H.P. 1992: Jura kinematics and the Molasse basin. Eclogae geol. Helv. 85/3, 653-675.

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, Wettingen.

NAEF, H. & DIEBOLD, P. 1991: Tektonik des östlichen Tafeljuras und der angrenzenden Molasse. Nagra informiert 12/2, 37-46.

NAEF, H., BIRKHÄUSER, P. & ROTH, P. 1995: Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren - Zürcher Weinland. Nagra Tech. Ber. NTB 94-14. Nagra, Wettingen.

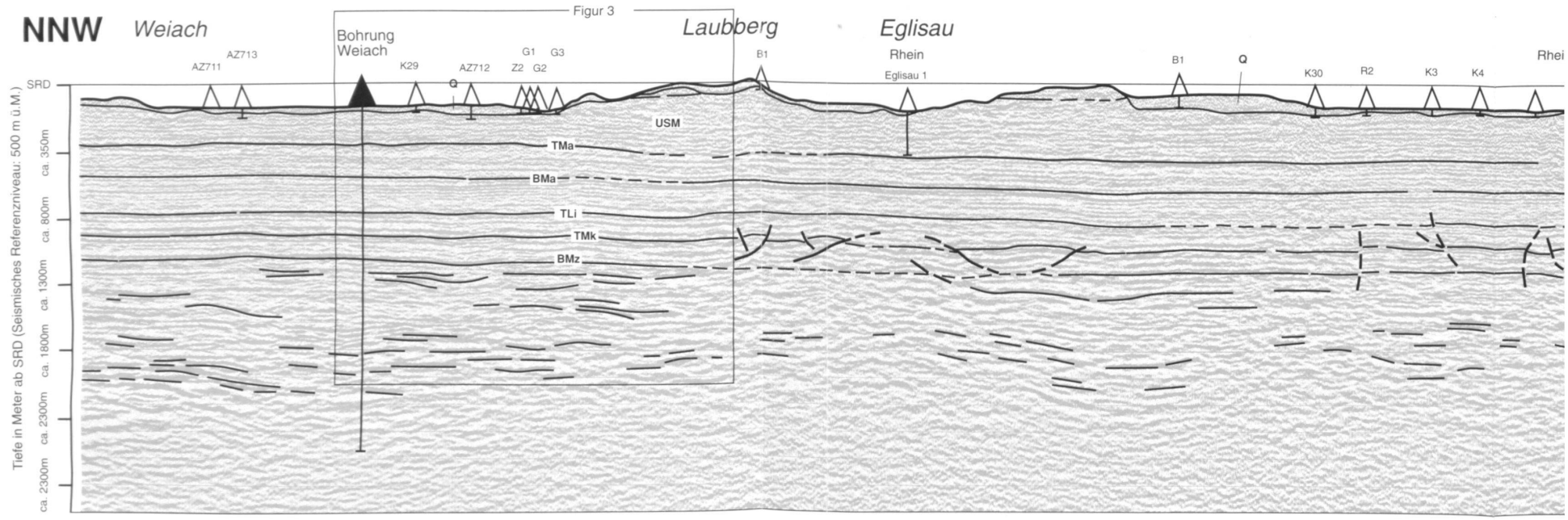
NAGRA 1988: Sedimentstudie - Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. (Textband und Beilagenband). Nagra Tech. Ber. NTB 88-25. Nagra, Wettingen.

NAGRA 1991: Sedimentstudie Zwischenbericht 1990, Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen. Nagra Tech. Ber. NTB 91-19. Nagra, Wettingen.

SCHREINER, A. 1992: Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee. Geol. Karte Baden-Württ. 1:50'000, Stuttgart.

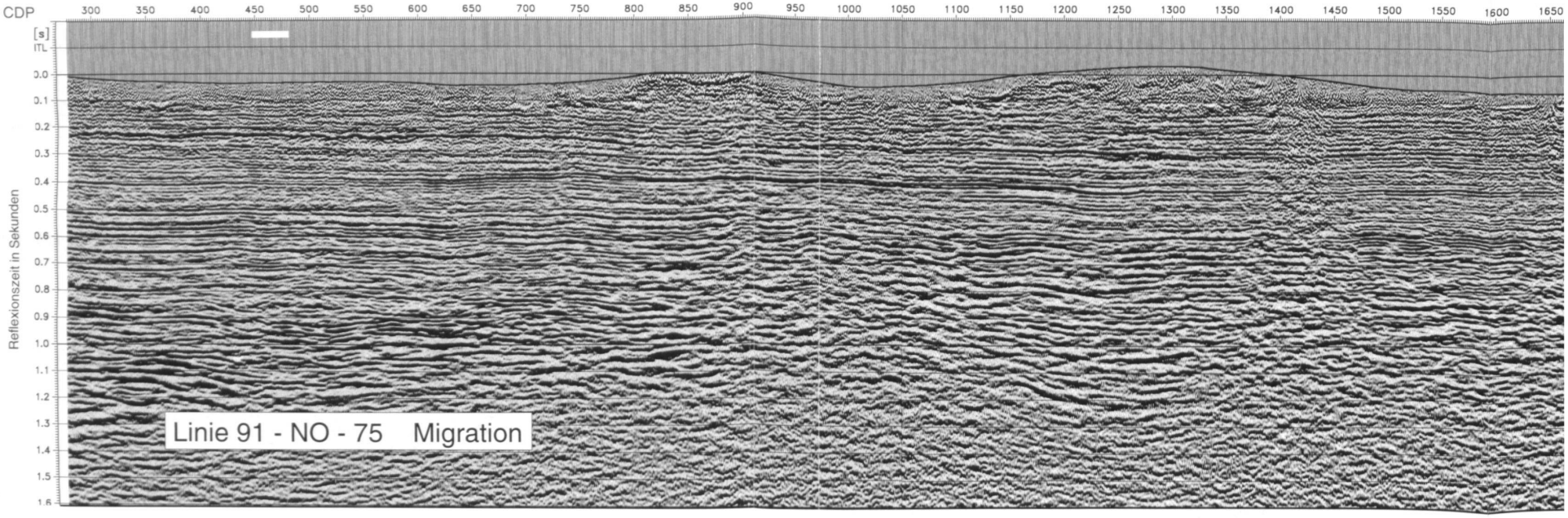
SPRECHER, C. & MÜLLER, W.H. 1986: Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik 82. Nagra Tech. Ber. NTB 84-15. Nagra, Wettingen.

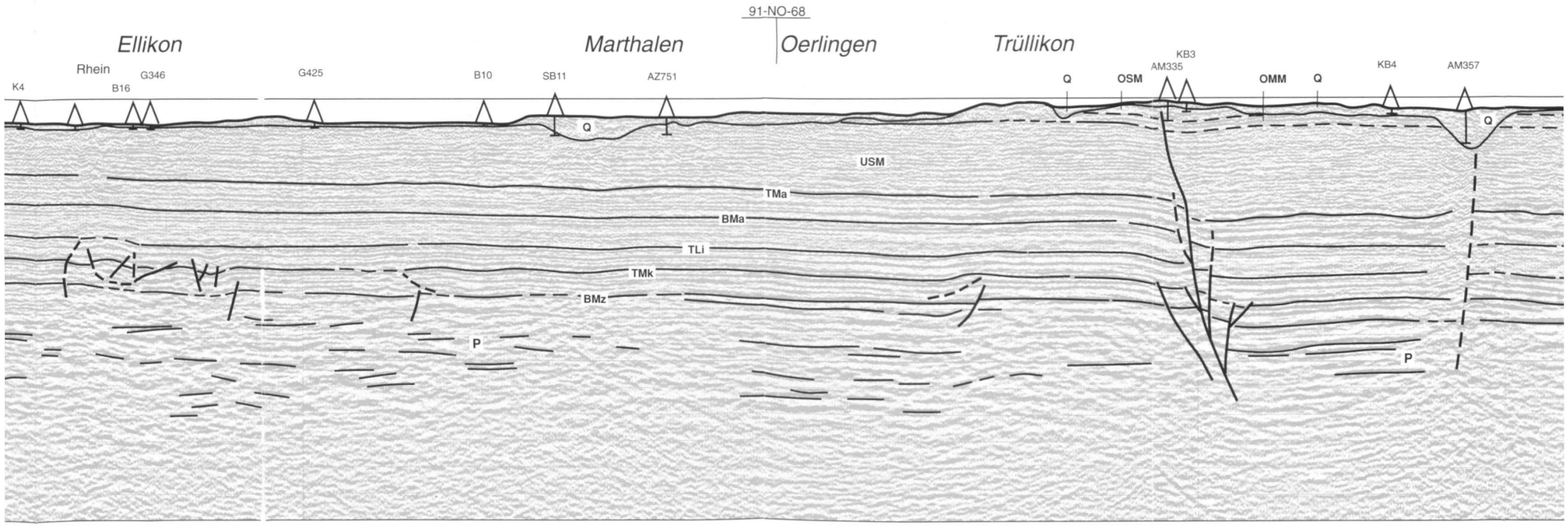
WETZEL, A., ALLIA, V., GONZALEZ, R. & JORDAN, P. 1993: Sedimentation und Tektonik im Ostjura. Bericht über die Exkursion der Schweizerischen Geologischen Gesellschaft am 29. 9. 1992. Eclogae geol. Helv., 86/1, 313-332.



Tektonische Einheiten nach Fig. 1 & 6

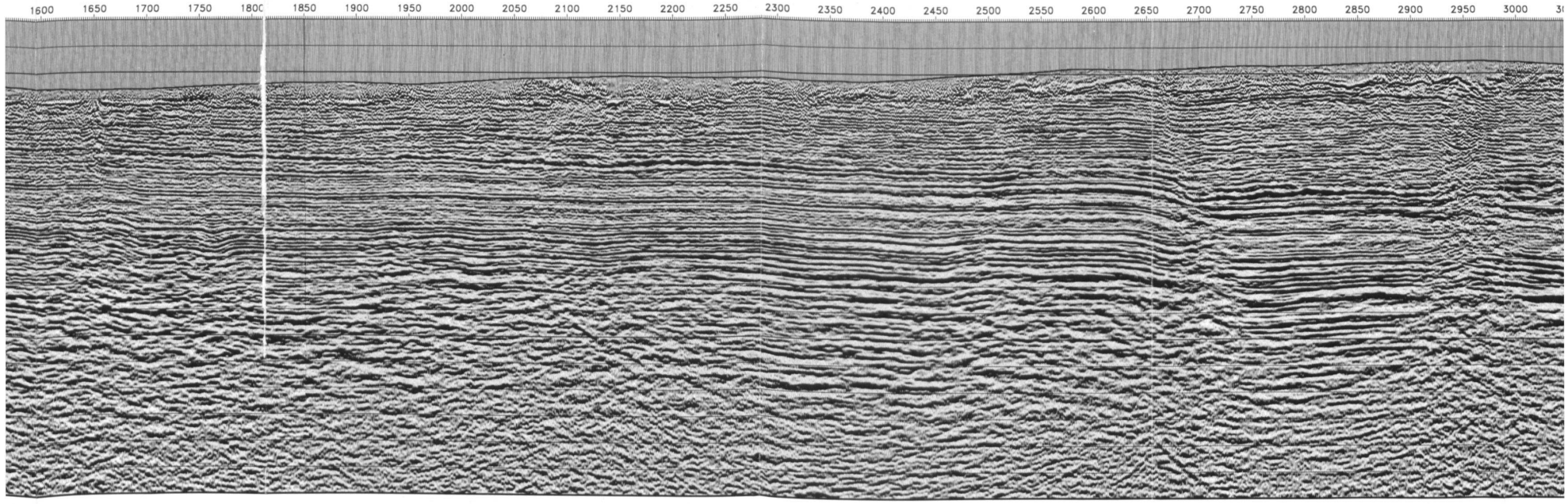
ABGESCHERTE MOLASSE

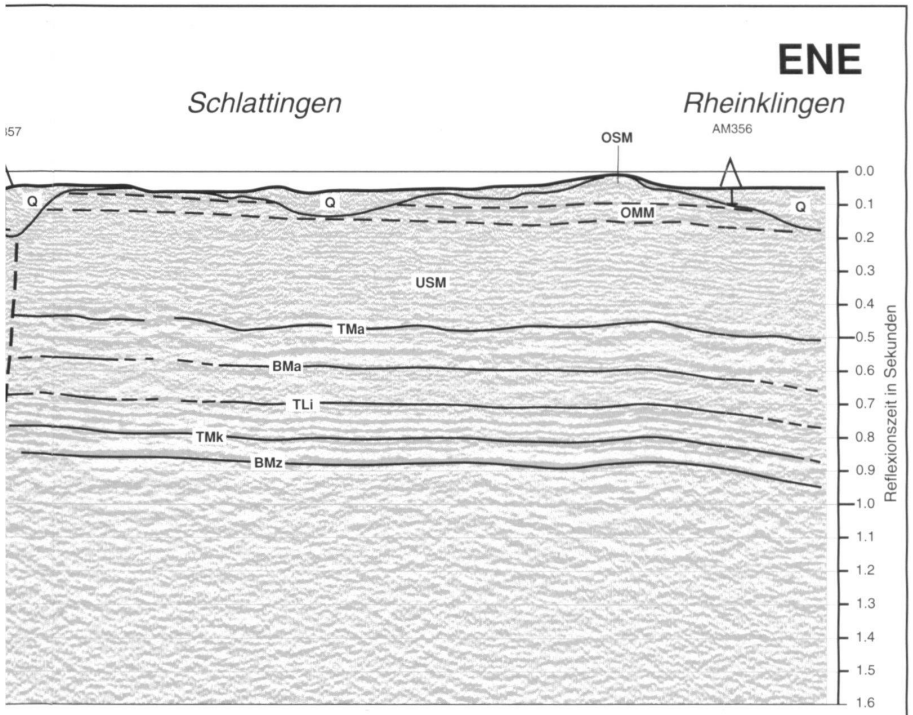


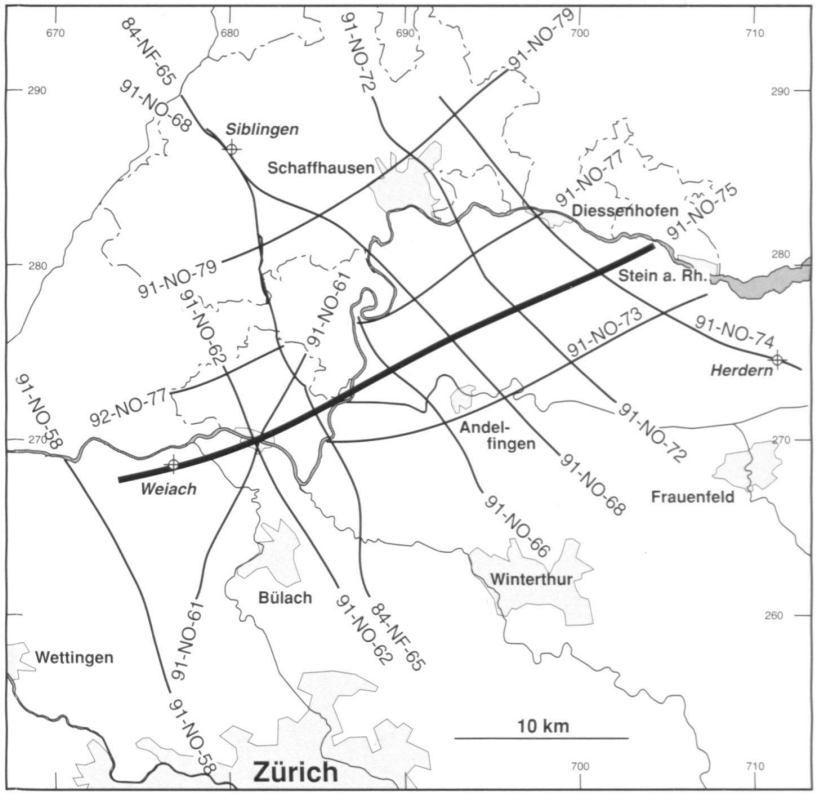


Neuhauser Störung

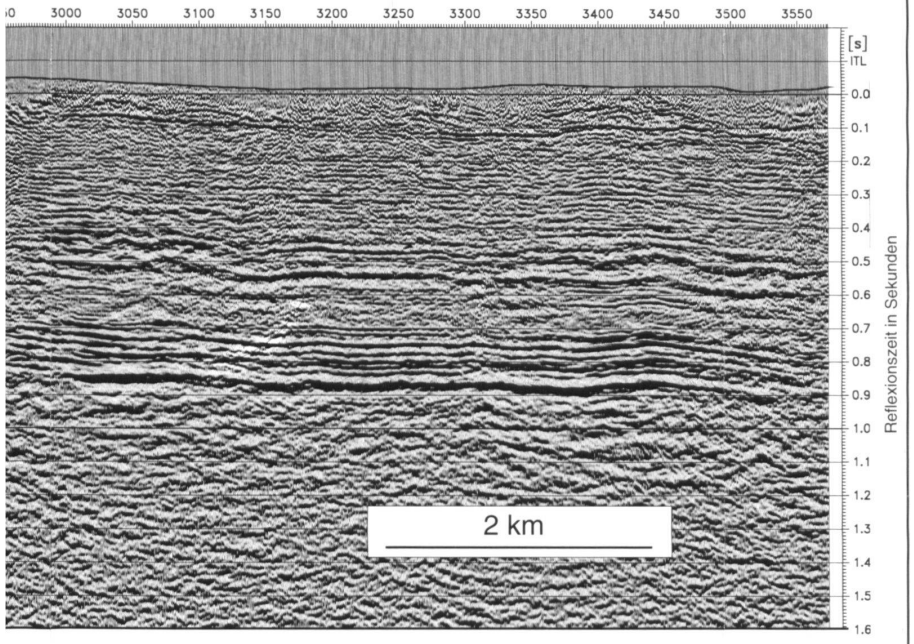
PLATEAUMOLASSE — WESTLICHE RAI







LICHE RANDZONE DES BODENSEE - GRABENS



Abgrenzung der Molasseformationen:

Q	Quartär	TMa	Top Malm ~ Basis Molasse
OSM	Obere Süsswassermolasse	BMa	Basis Malm
OMM	Obere Meeresmolasse	TLi	Top Lias ~ Basis Opalinuston
USM	Untere Süsswassermolasse	TMk	Top Muschelkalk ~ Basis Keuper
		BMz	Basis Mesozoikum

Submesozoische Reflexionen:

P	Perm (Obere Trogfüllung)	———	auf Charakter kartierbar
K	Kohle-Serie (Untere Trogfüllung)	- - - - -	interpoliert / extrapoliert

Signaturen

———	Störung, Verwerfung, Überschiebung (gesichert)	— — —	Störung, Verwerfung, Überschiebung (vermutet)
△	Quartärbohrung		

Refexionsseismik zur Erkundung des Opalinustons	**Beilage 2**
Linie 91-NO-75: Weiach - Rheinklingen 1:50'000	
Büro für angewandte Geologie 9042 Speicher	Na / Sept. 96