TECHNISCHER BERICHT 83-21

GEOPHYSIKALISCHES UNTERSUCHUNGS-PROGRAMM NORDSCHWEIZ REGIONALE REFRAKTIONSSEISMISCHE MESSUNGEN

N. SIERRO
A. BINDSCHÄDLER
J. ANSORGE
ST. MÜLLER

SEPTEMBER 1983

INSTITUT FÜR GEOPHYSIK DER ETH-ZÜRICH

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 83-21

GEOPHYSIKALISCHES UNTERSUCHUNGS-PROGRAMM NORDSCHWEIZ REGIONALE REFRAKTIONSSEISMISCHE MESSUNGEN

N. SIERRO
A. BINDSCHÄDLER
J. ANSORGE
ST. MÜLLER

SEPTEMBER 1983

INSTITUT FÜR GEOPHYSIK DER ETH-ZÜRICH

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

VORWORT DER NAGRA

Die Interpretation und die Diskussion der hier vorgelegten refraktionsseismischen Daten stützt sich auf geologische Randbedingungen, wie sie Mitte 1982 bekannt waren. In der Zwischenzeit wurde die unerwartet komplizierte Struktur der Kristallinoberfläche durch reflexionsseismische Messungen und später durch Tiefbohrungen bestätigt.

Den Autoren dieses Berichtes ist es als erste gelungen, aufgrund seismischer Messungen die mehr als 1000 m tiefe Senke im Grundgebirge östlich des unteren Aaretales nachzuweisen. Diese Senke ist - wie wir heute wissen - Teil des nordschweizerischen Permokarbontroges, dem dominierenden Strukturmerkmal der Kristallinoberfläche, dessen Entdeckung sowohl für das Verständnis der regionalen Geologie wie auch für das Sondierprogramm der Nagra von grösster Bedeutung ist.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der detaillierten geophysikalischen Landesaufnahme in der Nordschweiz (nordöstliche Ausläufer des schweizerischen Jura) wurde mit der Methode der Refraktionsseismik versucht, die Tiefenlage der Grundgebirgsoberfläche und die Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen der an dieser Grenzfläche - im Südschwarzwald auch oberflächennah - anstehenden kristallinen Gesteine zu erfassen. Gemeinsame Träger dieser Untersuchungen sind die Schweizerische Geophysikalische Kommission und die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Baden. Die Organisation, Durchführung und Auswertung der Messungen lagen beim Institut für Geophysik der ETH Zürich.

Im Südschwarzwälder Gneisgebiet liegt die Geschwindigkeit der Kompressionswellen an der Oberfläche zwischen 2.2 km/s und 4.5 km/s. Bis zu einer Tiefe von 300 m steigt die Geschwindigkeit auf etwa 5.0 km/s an; in 1 km Tiefe beträgt die Geschwindigkeit etwa 5.5 km/s und in 2 km Tiefe 5.8 km/s. In dem maximal erfassten Tiefenbereich von 3 km liegt die Geschwindigkeit immer noch unter 6.0 km/s. Laterale Geschwindigkeitsänderungen oder signifikante Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Profilen im Schwarzwaldkristallin konnten nicht festgestellt werden. Dies gilt auch für Unterschiede zwischen den erfassten Gneis- und Granitgebieten.

Die Geschwindigkeits-Tiefen-Struktur unter den nordöstlichen Ausläufern des Schweizer Jura und der angrenzenden Molassegebiete basiert auf den Profilen von Villigen, demjenigen zwischen Hallwilersee und Kaisten sowie auf dem Profil Kaisten - Ost. Für die mesozoischen Schichten wurde eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3.7 km/s bis 3.8 km/s ermittelt. Darunter folgt eine vermutlich stark zerrüttete Uebergangszone im kristallinen Grundgebirge, in welcher die Geschwindigkeit über einen Tiefenbereich von etwa 300 m auf 5.2 km/s erreicht. Die Geschwindigkeit von 6 km/s ist im Mittel bei etwa 2300 m bis 2500 m unter der Sedimentbasis zu erwarten.

Die in einem Tiefenlinienplan dargestellte Kristallinoberfläche im Gebiet des nordöstlichen Schweizer Jura und der angrenzenden Molassegebiete sinkt nach SSE unter die mesozoischen und känozoischen Sedimente ab. Das Abtauchen ist unter dem Tafeljura und östlich der Aare wesentlich stärker als weiter südlich, wo sich das Relief merklich verflacht. Dem allgemeinen Einfallen nach Süden sind ausgeprägte Ost-West streichende Schwankungen überlagert. Westlich des Aaretals deuten sich bei Mönthal und Frick zwei kleinere Mulden an.

Oestlich der Aare fällt das Kristallin von Norden nach Süden unter dem Rhein auf eine Tiefe von 2100 m unter Meeresniveau ab. Vermutlich tragen permo-karbonische Sedimente zu dieser unerwartet ausgeprägten Eintiefung bei. Die östlichen Ausläufer des Faltenjura liegen ebenfalls über einer allerdings weit weniger ausgeprägten Kristallinmulde. Südlich anschliessend zwischen Wildegg und Mellingen wird das allgemeine Abtauchen der Kristallinoberfläche durch eine relative Hochlage von etwa 200 m überlagert.

Die unerwartet geringe Geschwindigkeit des Kristallins weist auf einen starken Verwitterungsgrad hin, welcher unter Umständen so gross sein kann, dass die Kristallinoberfläche selbst nur relativ ungenau erfasst wird.

Summary

In the framework of the geophysical survey of Switzerland the depth to the basement under the northeastern parts of the Swiss Jura mountains was determined by means of the seismic refraction method. This included an assessment of the seismic velocities within this crystalline basement at depth as well as for its outcrop in the nearby southern part of the Black Forest. The Swiss Geophysical Commission (SGPK) and the National Cooperative for the Storage of Radioactive Waste (NAGRA) were joint sponsors of this survey.

The Institute of Geophysics of the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETH-Z) organized the fieldwork and performed the interpretation of the data.

In the near-surface gneisses of the southern Black Forest the compressional wave velocities range from 2.2 km/s to 4.5 km/s. The velocity increases to about 5.0 km/s down to a depth of 300 m. It reaches values of about 5.5 km/s and 5.8 km/s at depths of 1 km and 2 km, respectively. At 3 km, which was the maximum depth reached, the velocity is still less than 6 km/s. No lateral changes or significant differences of velocity could be detected along or between the various profiles in the crystalline part of the Black Forest. This holds also for the surveyed gneissic and granitic areas.

The velocitity - depth structure under the northeastern parts of the Swiss Jura and the adjacent parts of the Molasse basin is based on data from profiles which run from shotpoints near Villigen, the Hallwilersee and Kaisten in various directions. An average velocity of 3.7 to 3.8 km/s was derived for the intire Mesozoic overburden. Underneath there is evidence for a heavily fractured transition zone in the crystalline basement with a gradual increase of velocity to about 5.2 km/s at a depth of 300 m below the base of the Mesozoic sediments. On the average a velocity of 6 km/s can be expected 2300 to 2500 m below this interface.

On a contour map covering the area of the northeastern Jura and the adjacent fringe of the Molasse basin the basement dips down to the south-southeast under the Mosozoic and Cenozoic sediments. This dip is more pronounced under the tabular Jura mountains and east of the Aare river than further south where the relief flattens out considerably. Pronounced east-west striking variations overlie the general southward oriented slope. Two small scale troughs seem to exist near Mönthal and Frick west of the Aare valley.

To the east of the Aare valley the crystalline basement forms a regional trough with a maximum depth of 2100 m below mean sea level. This unexpectedly large trough is likely to be filled with Permo-Carboniferous sediments. The eastern ranges of the folded Jura mountains again are underlain by a depression in the basement which is much less marked, however. To the south of this area, between Wildegg and Mellingen, a relative high of 200 m is superimposed on the generally SSE dipping basement.

The unexpected low velocities of the upper basement indicate severe weathering. Possibly the uppermost rocks are altered to such a degree that the location of the top of the basement is relatively inaccurate.

Résumé

Dans le cadre du relevé géophysique de la Suisse, on a cherché à déterminer, au moyen de la sismique de réfraction, la profondeur du socle cristallin sous les prolongements nords orientaux du Jura Suisse. Ceci comprend la recherche des vitesses des ondes sismiques dans les roches cristallines composant le socle en profondeur tout aussi bien qu'en surface au sud de la Forêt Noire. La Commission géophysique Suisse (SGPK) et la Coopérative nationale pour l'élimination des déchets radioactifs (CEDRA) furent les responsables de ces recherches. L'organisation, l'exécution et l'interprétation des mesures ont été accomplies par l'Institut de géophysique de l'école polytechnique fédérale de Zurich.

Dans les gneiss du sud de la Forêt Noire proche de la surface, la vitesse des ondes de compression varie entre 2.2 km/s et 4.5 km/s. La vitesse s'accroît jusqu'à environ 5.0 km/s à une profondeur de 300 m. Elle atteint des valeurs proches de 5.5 km/s à 1 km et 5.8 km/s à 2 km de profondeur. A la profondeur de 3 km, profondeur maximale atteinte par ces mesures, la vitesse est toujours inférieure à 6 km/s. On n'a pas pu déceler de changements latéraux, des différences significatives de vitesses le long ou entre les profils situés sur la partie cristalline de la Forêt Noire. Cette constatation est également valable pour les zones gneissiques et granitiques.

La structure, vitesse-profondeur sous les prolongements nords orientaux du Jura Suisse et le bassin molassique y attenant est établie sur la base des profils rayonnants des points de tirs près de Villigen, du lac de Hallwyl et Kaisten. Dans les séries mésozoiques une vitesse moyenne de 3.7 km/s à 3.8 km/s a été calculée. On trouve en dessous, dans le socle cristallin, une zone de transition probablement fortement fissurée, dans laquelle la vitesse augmente graduellement jusqu'à 5.2 km/s à quelque 300 m en dessous de la base des sédiments mésozoiques. Sous cet horizon sédimentaire on peut s'attendre à une vitesse moyenne de 6.0 km/s à environ 2300 à 2500 m de profondeur.

Sur la carte représentant les contours de la surface du socle cristallin couvrant la région nord orientale du Jura et celle du bassin molassique, le socle s'enfonce dans la direction sud, sud-est sous les sédiments mésozoiques et tertiaires. L'inclinaison est plus prononcée sous le Jura tabulaire et à l'est de l'Aar, que plus au sud, où le relief du socle tend sensiblement vers l'horizontal. A l'inclinaison générale vers le sud se superposent des accidents marqués, orientés est-ouest. Il semble exister à l'ouest de la vallée de l'Aar près de Moental et de Frick deux dépressions de moindre importance.

A l'est de la vallée de l'Aar, le socle cristallin s'enfonce jusqu'à une profondeur maximale de 2100 m en dessous de l'altitude moyenne des océans. Cet inattendu profond bassin est probablement rempli de sédiments permo-carbonifères. Les prolongements orientaux du Jura plissé sont également accompagnés d'une dépression du socle, cependant bien moins marquée. En poursuivant vers le sud, entre Wildegg et Mellingen, à l'inclinaison générale sud, sud-est du socle se superpose un haut de 200 m environ.

Les inattendues faibles vitesses dans le socle supérieur indiquent un degré élevé d'altération. Il est possible que les roches les plus proches de la surface du socle étant à un tel point altérées que la surface même du socle puisse seulement être déterminée de manière relativement imprécise.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINFUEHRUNG 1

2. DATENERFASSUNG 3

2.1 Messtechnik 3

2.2 Abfolge der Messungen 3

2.2.1 Messabschnitt Villigen 6

2.2.2 Messabschnitt Hallwilersee - Kaisten - Todtmoos und Kaisten - Ost (Rafzerfeld) 6

2.2.3 Refraktionsmessungen der Firma Prakla-Seismos auf dem Messabschnitt Hallwilersee - Kaisten - Todtmoos 8

3. DATENAUFBEREITUNG 8

3.1 Seismogrammontagen 8

3.2 Höhenkorrekturen 10

4. INTERPRETATIONSVERFAHREN 14

5. GESCHWINDIGKEITS-TIEFENVERTEILUNG IM ANSTEHENDEN KRISTALLIN UND TIEFENLAGE DES GRUNDGEBIRGES UNTER DER NORDSCHWEIZ 17

5.1 $v_p(z)$ im anstehenden Kristallin des Südschwarzwalds 17

5.1.1 Laufzeitinterpretation 17

5.1.2 Amplitudeninterpretation 24

5.1.3 Vergleich der Geschwindigkeits-Tiefenfunktion aus der Laufzeit- und Amplitudenauswertung 24

5.1.4 Unterschiede der Kompressionswellengeschwindigkeit im Gneis- und Granitgebiet des Südschwarzwalds 28

5.2 Die Tiefenlage der Kristallinoberfläche im Untersuchungsgebiet 28

5.2.1 Profilfächer Villigen 31

5.2.1.1 Laufzeitenvergleich 31

5.2.1.2 Randbedingungen 34

5.2.1.3 Strukturmodelle 35

5.2.1.4 Vergleich der Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für die Profile V80 und V260 38

5.2.2 Profile Kaisten - Ost (Rafzerfeld) und Kaisten - Hallwilersee 47

5.2.1 Randbedingungen 47

5.2.2.2 Strukturmodelle 47

5.3 Tiefenlinienplan der Kristallinoberfläche aus den Profilen Villigen, Kaisten - Ost und Kaisten - Hallwilersee 52

INHALTSVERZEICHNIS (Fortsetzung)

6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE 54

7. FEHLERABSCHÄTZUNG 56

8. DANK 58

9. LITERATURVERZEICHNIS 59

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN IM TEXT

Abb. 1: Schematisierte tektonische Karte des Untersuchungsgebietes (nach SPICHER, 1972a) mit der Lage von Sprengpunkten und Refraktionsprofilen

Abb. 2: Lage der Messpunkte und Profile im Messgebiet

Abb. 3: Seismogrammontage des Profils V80 im reduzierten Zeitmassstab (Reduktionsgeschwindigkeit 6 km/s)

Abb. 4: Einfluss der Höhenkorrektur auf die auf den Seismogrammen bestimmten Ersteinsatzzeiten für das Profil V80

Abb. 5: Topographie und Bezugsniveau des Profils Kaisten - Todtmoos (KANORD)

Abb. 6: Laufzeitwerte ohne (x) und mit (*) Höhenkorrektur für das Profil Kaisten - Todtmoos (KANORD)

Abb. 7: Strahlengang und Laufzeitkurven für eine Schicht über einem Halbraum

Abb. 8: Geologische Karte des Südschwarzwalds nach METZ (1980) mit der Lage der Refraktionsprofile

Abb. 9a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil Kaisten - Todtmoos (KANORD)

Abb. 9b: Geschwindigkeitstiefenfunktion für das Profil Kaisten - Todtmoos (KANORD)

Abb. 10a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil Todtmoos - Kaisten (SWSUED)

Abb. 10b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion des Profils Todtmoos - Kaisten (SWSUED)

Abb. 11a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil V310

Abb. 11b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für den kristallinen Tiefenbereich des Profils V310

Abb. 12a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil V330

Abb. 12b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für den kristallinen Tiefenbereich des Profils V 330 (Sprengung FV)

Abb. 13a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil V360

Abb. 13b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für den kristallinen Tiefenbereich des Profils V360

Abb. 14a: Amplitudenabnahme auf dem Profil Kaisten - Todtmoos

Abb. 14b: Amplitudenabnahme auf dem Profil Todtmoos - Kaisten

Abb. 15: Beobachtete und berechnete Amplitudenabnahme für das Profil Todtmoos - Kaisten (SWSUED)

Abb. 16: Geschwindigkeits-Tiefenstruktur für den Südschwarzwald, abgeleitet aus Laufzeit- und Amplitudenbeobachtungen

Abb. 17: Ausschnitt aus der geologisch-petrographischen Uebersichtskarte des Hotzenwalds (1:50'000) mit der Lage des Profils Kaisten - Gugel

Abb. 18: Laufzeitenvergleich der Beobachtungen auf den Profilen Kaisten - Todtmoos und Kaisten - Gugel (Granitgebiet)

Abb. 19: Reduzierte und korrigierte Laufzeiten der Ersteinsätze auf den Villigen-Profilen

Abb. 20: Reduzierte und korrigierte Laufzeiten der Ersteinsätze für das Profil V260

Abb. 21: Strukturmodell für das Profil V360

Abb. 22: Strukturmodell für das Profil V310

Abb. 23: Strukturmodell für das Profil V260

Abb. 24: Strukturmodell für das Profil V175

Abb. 25: Strukturmodell für das Profil V110

Abb. 26: Strukturmodell für das Profil V80

Abb. 27: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion unter den Profilen V80 und V260 in 10 km und 9 km Entfernung vom Sprengpunkt Villigen

Abb. 28: Strukturmodell für das Profil Kaisten - Ost, Rafzerfeld (KAOST)

Abb. 29: Strukturmodell für das Profil Kaisten - Hallwilersee (KASUED)

Abb. 30: Strukturmodell für das gesamte Gegenschuss-Profil Kaisten - Hallwilersee (KASUED - HSNORD), abgeleitet aus den Messungen von Kaisten nach Süden und Hallwilersee nach Norden

Abb. 31: Tiefenlinienplan der Kristallinoberfläche unter den nord-östlichen Ausläufern des Schweizer Jura

Tabelle 1: DATEN DER SPRENGUNGEN BEI VILLIGEN, AM HALLWILERSEE, BEI KAISTEN und TODTMOOS

Tabelle 2: SEISMISCHE GESCHWINDIGKEITEN FUER DIE HÖHENKORREKTUR

Tabelle 3: ANFANGSWERTE DER GESCHWINDIGKEITEN IM UNTERGRUND

Tabelle 4: GESCHWINDIGKEITS- UND TIEFENWERTE FÜR DIE PROFILE V80 und V260

1. EINFUEHRUNG

Schweizerische Geophysikalische Kommission und die NAGRA haben im Februar 1981 eine engere Zusammenarbeit zur Beschleunigung der detaillierten geophysikalischen Landesaufnahme, zur Unterstützung des geowissenschaftlichen Untersuchungsprogramms der NAGRA und zur besseren Nutzung der von beiden Seiten eingesetzten Finanzmittel vereinbart.

In diesem Rahmen soll durch den koordinierten Einsatz verschiedener geophysikalischer Untersuchungs- und Kartierungsmethoden versucht werden, die Möglichkeiten und Grenzen der Erfassung der Grundgebirgsoberfläche in der Nordschweiz abzuklären. Dazu gehört auch die Gliederung und Struktur der an dieser Grenzfläche anstehenden kristallinen Gesteine.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der vereinbarten regionalen refraktionsseismischen Untersuchungen zusammen. Die Refraktionsmethode beruht auf der Aufzeichnung und Auswertung von Laufzeiten und Amplituden seismischer Wellen über einen bestimmten Entfernungsbereich. Speziell dafür angesetzte chemische Sprengungen liefern die notwendige seismische Energie. Die Laufzeit, die Phase und das Amplitudenverhalten in Abhängigkeit von der Beobachtungsentfernung bilden die Parameter, aus welchen Schichtmächtigkeiten, die Tiefenlage von Grenzflächen und die Geschwindigkeiten seismischer Wellen bzw. deren Aenderung mit der Tiefe bestimmt werden können.

Das Hauptziel der vorliegenden Studie war die regionale Kartierung der kristallinen Grundgebirgsoberfläche und die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Kompressionswellen in einem Tiefenbereich von etwa drei Kilometern.

Die angewandte Untersuchungsmethode und Anordnung der Feldaufnahmen erlaubt es nicht, die Detailstruktur der Sedimenthülle zu bestimmen, Bruchzonen zu orten oder kleinräumige Deformationen von seismischen Horizonten zu kartieren.

Das Untersuchungsgebiet umfasst von Norden nach Süden (Abb.1)

- den südlichen Schwarzwald mit dem an der Oberfläche anstehenden kristallinen Sockel südlich der West-Ost streichenden Devon-Karbon-Zone (Abb. 8);

- den nordöstlichen schweizerischen Anteil des Tafeljura und die östlichen Ausläufer des Kettenjura zwischen Liestal - Olten und Dielsdorf;

- Teile des nördlichen mittelländischen Molassebeckens im Gebiet von Aarau - Hallwilersee im Westen bis Glattfelden - Kloten im Osten.

Dieser Bericht wurde am Institut für Geophysik, ETH-Zürich erarbeitet. Beiträge haben geliefert: Frl. A. Bindschädler, die Herren N. Sierro, J. Ansorge, St. Müller.

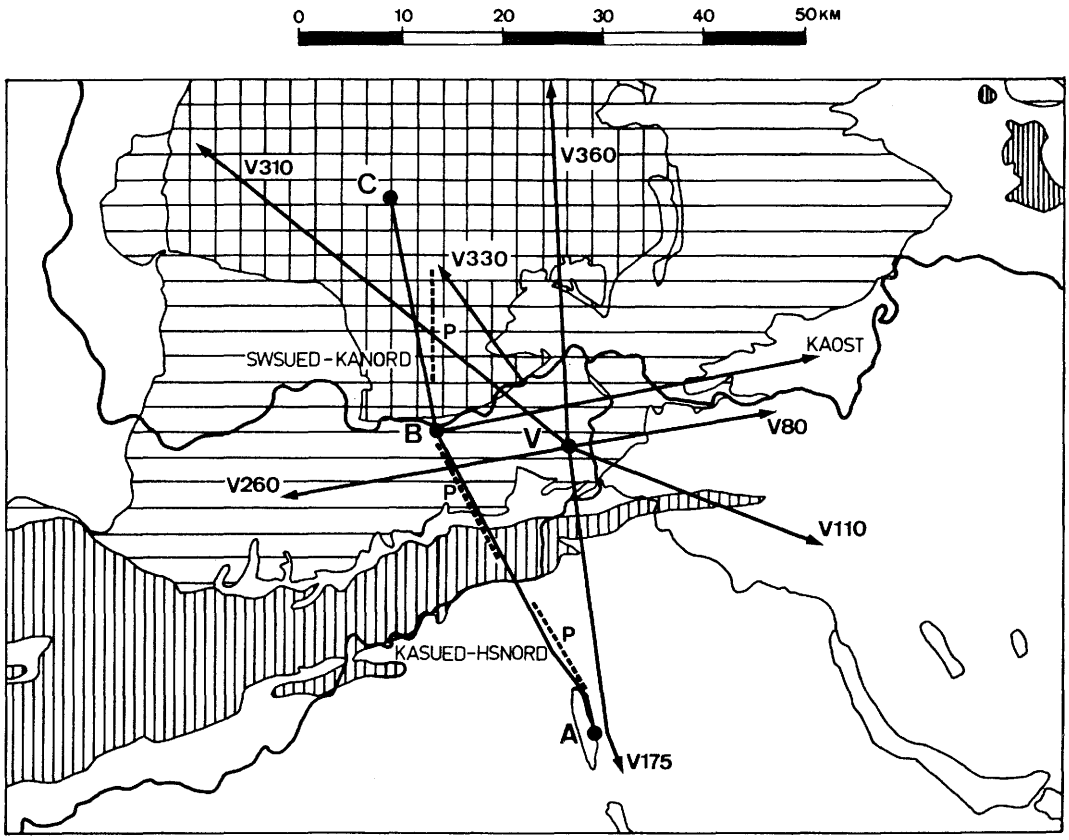


Abb.1: Schematisierte tektonische Karte des Untersuchungsgebietes (nach SPICHER, 1972a) mit der Lage von Sprengpunkten und Refraktionsprofilen

——— Refraktionsseismische Profile des Instituts für Geophysik der ETH Zürich

P ----- Refraktionsseismische Profile der Firma Prakla-Seismos, Hannover

Sprengpunkte: V Villigen, A Hallwilersee, B Kaisten, C Todtmoos

V80 - V360: Refraktionsseismische Profile von Villigen aus

SWSUED - KANORD, KASUED - HSNORD: Gegengeschossene Profile A bis C

KAOST: Refraktionsseismische Profile von Kaisten (B) nach Osten

Mittelländische Molasse, im Jura und im Oberrheingraben

Tafeljura

Kettenjura

Kristalliner Kern des Schwarzwald-Massivs

Tertiäre Ergussgesteine

2. DATENERFASSUNG

Die seismischen Beobachtungsdaten wurden in vier zeitlichen Abschnitten in der Zeit vom Mai 1981 bis Mai 1982 gewonnen.

Sämtliche am Institut für Geophysik der ETH Zürich bearbeiteten refraktionsseismischen Daten sind in Form von Seismogrammontagen für die einzelnen Messprofile zusammengefasst. Tabelle 1 enthält alle technischen Angaben über die Sprengungen.

In Abb.2 sind alle Messpunkte auf den einzelnen Profilen aufgetragen; dieses Bild gibt somit einen Eindruck von der Messdichte im Untersuchungsgebiet.

2.1 Messtechnik

Die vom Institut für Geophysik der ETH Zürich organisierten Messungen wurden vorwiegend mit den Gerätetypen MARS 66 und MARS 72 (Magnetbandapparaturen für Refraktionsseismik) ausgeführt, d.h. alle beteiligten Institute haben denselben Gerätetyp [BERCKHEMER, 1970] eingesetzt. Bei den MARS 66 und MARS 72 Registriergeräten werden die seismischen Signale zusammen mit einem Zeitzeichen im Frequenzmultiplexverfahren analog auf Magnetband aufgezeichnet.

Die verwendeten Geophone sind Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer mit 2 Hz Eigenfrequenz. Die meisten Geräte waren mit Dreikomponentengeophonen ausgerüstet zur Aufnahme der vertikalen und horizontalen Bodenschwinggeschwindigkeit.

Die Firma Prakla-Seismos setzte für ihren Teil der Messungen zwei Digitalapparaturen vom Typ CFS I mit je 48 Registrierkanälen ein. Die Weiterverarbeitung dieser Daten erfolgte in Hannover.

2.2 Abfolge der Messungen

Bedingt durch die unterschiedliche Anordnung der Messprofile, die verschiedenen Methoden zur Anregung der seismischen Energie und teilweise andere Messverfahren - hier der Firma Prakla-Seismos -, erfolgten die Messungen in mehreren Abschnitten.

SCHUSS	KOORDINATEN				HOEHE	DATUM	ZEIT	LADUNG
	Y	X	LAENGE	BREITE	(m)	T M J	STD MIN SEC	(KG)
AV	656687.4	264880.9	8 11 33.1	47 32 00.1	578	19.05.81	16 05 04.53	470
BV	656673.7	264833.5	8 11 32.4	47 31 59.4	578	20.05.81	11 49 59.90	512
CV	656672.7	264814.1	8 11 32.4	47 31 58.8	578	20.05.81	16 05 00.39	512
DV	656675.8	264782.3	8 11 32.4	47 31 57.8	579	21.05.81	16 06 01.48	500
FV	656814.9	265170.3	8 11 39.3	47 32 10.3	556	17.09.81	11 51 57.466	450
A1	659850.	236230.	8 13 50.4	47 16 32.2	453	15.09.81	06 20 37.803	100
A2	659890.	236235.	8 13 52.3	47 16 32.4	453	16.09.81	06 20 23.706	200
A3	659810.	236225.	8 13 48.5	47 16 32.1	453	18.09.81	05 20 19.880	200
B1	643950.	266355.	8 01 24.6	47 32 52.2	309	15.09.81	06 25 22.337	300
B2	643985.	266320.	8 01 26.2	47 32 51.1	309	16.09.81	06 25 20.705	100
B3	644010.	266300.	8 01 27.4	47 32 50.4	309	18.09.81	05 40 20.674	300
B4	644010.	266300.	8 01 27.4	47 32 50.4	309	11.12.81	12 30 59.864	100
B5	643950.	266355.	8 01 24.6	47 32 52.2	309	04.05.82	21 05 03.99	250
B6	643985.	266320.	8 01 26.2	47 32 51.1	309	05.05.82	21 05 06.60	250
C1	639606.	289766.	7 58 04.3	47 45 31.2	1122	15.09.81	06 30 20.991	600
C2	639672.	289728.	7 58 07.5	47 45 30.0	1122	16.09.81	06 30 20.110	500
C3	639707.	289753.	7 58 09.2	47 45 30.8	1128	18.09.81	05 45 20.628	200

TABELLE 1: DATEN DER SPRENGUNGEN BEI VILLIGEN, AM HALLWILERSEE, BEI KAISTEN UND TODTMOOS

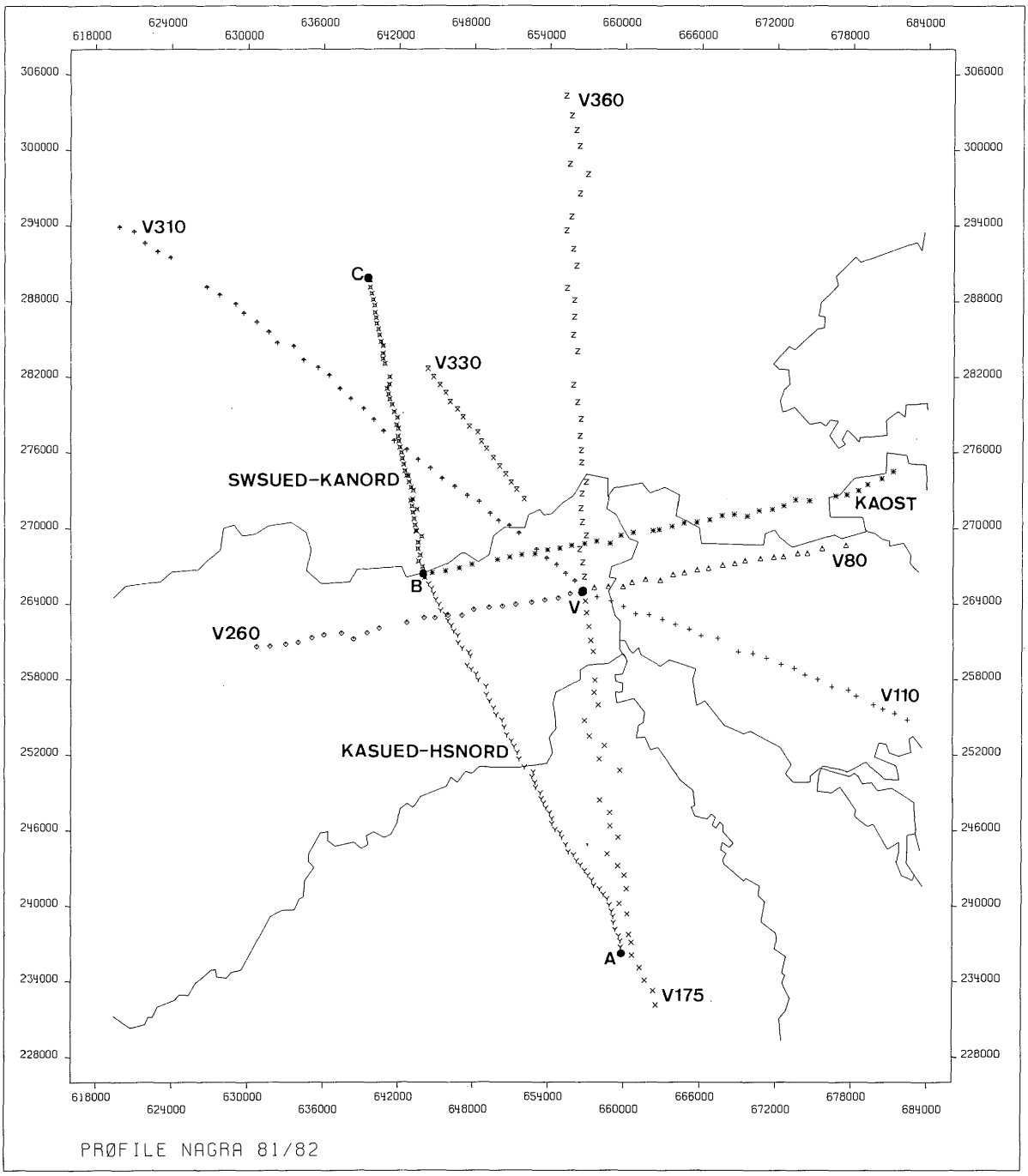


Abb.2: Lage der Messpunkte und Profile im Messgebiet
(●: Sprengpunkte; Bezeichnungen wie in Abb.1)

2.2.1 Messabschnitt Villigen

Vom 19. bis 21. Mai 1981 wurden vier Sprengungen (Tabelle 1) in einem Steinbruch bei Villigen (AG) auf sechs sternförmig angeordneten Refraktionsprofilen registriert (Abb.1). Die maximale Beobachtungsentfernung reicht auf dem längsten Profil V310 bis 47 km. Die Kennzeichnung der Profile V80, V110, V175, V260, V310, V330 und V360 bezeichnet den Schusspunkt Villigen (V) und deren azimutale Ausrichtung. Jede der vier Sprengungen wurde mit je vier Bohrlöchern von 21 m Tiefe und einer Gesamtladung zwischen 475 kg und 512 kg Sprengstoff momentan gezündet. Der mittlere Abstand zwischen den Beobachtungspunkten auf den Profilen betrug etwa 1 km.

Die sechs Profile erfassen im einzelnen folgende Gebiete:

V80, V110 : Tafeljura und Kettenjura (Lägeren) östlich der Aare sowie nördliche Randgebiete des Molassebeckens

V175 : Querprofil zum Tafel- und Kettenjura, Nordrand des Molassebeckens

V260 : Tafeljura in west-östlicher Streichrichtung

V310, V360: nördliche Randgebiete des Tafeljura und der benachbarten Triasformationen sowie die kristallinen Bereiche des Südschwarzwalds.

Neben den Mitarbeitern des Instituts für Geophysik der ETH Zürich, mit 20 Apparaturen ausgerüstet, beteiligten sich fünf weitere wissenschaftliche Institute aus der Bundesrepublik Deutschland an diesen Messungen. Insgesamt wurden 51 Beobachter mit 47 Messgeräten eingesetzt.

Die Daten des Untersuchungsabschnittes Villigen wurden von BINDSCHAEDLER [1982] in einer ersten Auswertung bearbeitet.

2.2.2 Messabschnitt Hallwilersee - Kaisten - Todtmoos und Kaisten-Ost - (Rafzerfeld)

Nach den vorangegangenen regionalen Untersuchungen, die von dem Sprengpunkt bei Villigen ausgingen, wurde im zweiten Abschnitt vom 15.-18. September 1981 versucht, auf einem Nord-Süd-Profil durch das Untersuchungsgebiet noch detailliertere Aufschlüsse über die Geschwindigkeitsstruktur zu erhalten (Abb.1). Bei den Orten Todtmoos (C) im Norden, Kaisten (B) am südlichen Rheinufer und am Hallwilersee (A) speziell angesetzte Bohrlochsprengungen ermöglichten zwei gegengeschossene Profilabschnitte. Die technischen Angaben über die jeweils drei Sprengungen pro Punkt im zweiten Messabschnitt sind ebenfalls in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Bohrungen und Sprengungen bei Todtmoos im Schwarzwald (Punkt C in Abb.1) wurden von der Firma Prakla-Seismos, Hannover, ausgeführt. Die notwendigen Zustimmungen der verschiedenen Behörden und der Gemeindeverwaltung von Häg-Ehrsberg, auf deren Gemeindegebiet die Bohrungen lagen, haben das Geophysikalische Institut der Universität Karlsruhe und das Institut für Geophysik der ETH Zürich gemeinsam eingeholt.

Auf der schweizerischen Seite bei Kaisten und am Hallwilersee war die Firma "Gesellschaft für angewandte Sprengtechnik (Gefas)", Effretikon, mit der Durchführung von Bohrungen und Sprengungen beauftragt (Punkte A und B in Abb.1).

Um Bohrkosten zu sparen und einen grösseren Wirkungsgrad zu erzielen, war ursprünglich geplant, die Sprengungen am südlichen Profilende im Baldegger- oder Hallwilersee zu zünden. Aus Gründen des Umwelt- und Fischereischutzes wurde davon abgesehen und statt dessen eine Lokalität im Uferbereich des Hallwilersees ausgewählt. Alle notwendigen Genehmigungen bei kantonalen Behörden und den Gemeindeverwaltungen von Kaisten und Fahrwangen wurden im Namen der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission eingeholt.

Auf diesem zweiten Untersuchungsabschnitt kam dieselbe Anzahl von Feldgeräten und Teilnehmern zum Einsatz. Der mittlere Abstand zwischen den Beobachtungspunkten lag bei 0.5 km. Die Entfernungen zwischen den Sprengpunkten A am Hallwilersee, B bei Kaisten und C bei Todtmoos betragen 34 km und 24 km.

Während derselben Messreihe wurde vom Sprengpunkt Villigen aus noch ein weiterer Profilabschnitt V330 im Schwarzwald zwischen Villigen und Todtmoos aufgenommen.

Für das Teilprofil Kaisten - Todtmoos hat SIERRO [1982] eine Geschwindigkeits-Tiefen-Verteilung im kristallinen Grundgebirge des Südschwarzwalds bestimmt.

Aufgrund der ersten Auswertungen der Messreihe Villigen vom Mai 1981, die ausgeprägte laterale Strukturänderungen im kristallinen Grundgebirge andeuteten, wurde am 4. und 5. Mai 1982 ein weiteres Profil vom Schusspunkt B bei Kaisten aus in östlicher Richtung bis in das Rafzerfeld vermessen. Die zwei zusätzlichen Sprengungen wurden ebenfalls von der Firma Gefas, Effretikon, ausgeführt. Die technischen Daten sind in Tabelle 1 enthalten. Bei diesem speziellen Projekt kamen 19 Feldmessgeräte mit einem mittleren Stationsabstand von einem Kilometer zum Einsatz.

2.2.3 Refraktionsmessungen der Firma Prakla-Seismos auf dem Messabschnitt Hallwilersee - Kaisten - Todtmoos

Zwischen den Sprengpunkten A, B und C wurde zusätzlich die Firma Prakla-Seismos auf drei Profilabschnitten zur Verdichtung der Refraktionsmessungen eingesetzt. Auf den 9.5 km langen Profilstücken (gestrichelt eingetragen in Abb.1) wurde jeweils eine Sprengung bei A, B und C mit einem Geophongruppenabstand von 100 m registriert.

Der Prakla-Seismos Profilabschnitt im Südschwarzwald lag zwischen Kilometer 4.5 und Kilometer 8.0 vom Schusspunkt B aus auf Gneisen und zwischen Kilometer 8 und 14 im Granitgebiet des Südschwarzwalds, während das Hauptprofil zwischen B und C durchgehend im Gneis lag. Damit sollte versucht werden, eventuell vorhandene Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Gneis und Granit zu erfassen.

Die Auswertung der Prakla-Seismos-Daten erfolgte in Hannover.

3. DATENAUFBEREITUNG

Alle Registrierungen der vorliegenden Untersuchung wurden zentral am Institut für Geophysik der ETH Zürich mit Hilfe eines von N. Deichmann entwickelten Programmsystems digital weiterverarbeitet.

Das vom Magnetband abgenommene Analogsignal wird nach der Demodulation mit einer Abtastrate von 400 Hz pro Kanal digitalisiert. In einer Folge von Programmschritten werden die Rohdaten dann gefiltert, zeit- und distanzmässig eingeordnet, auf Magnetband-und Registrierfehler geprüft, die Verstärkung bei der Aufnahme berücksichtigt und die Bewegungskomponenten für einzelne Profile zusammengefasst. Danach stehen die aufbereiteten Daten auf Magnetband in digitaler Form, nach Profilen geordnet, zur Verfügung.

3.1 Seismogrammontagen

Für die Auswertung werden die Seismogramme profilweise in Form von Seismogrammontagen mit reduziertem Zeitmassstab gezeichnet. Dazu wird für jedes Seismogramm ein neuer "Nullpunkt" der Laufzeit bestimmt. Die reduzierten Laufzeiten werden durch folgende Formel definiert:

$$T_{red} = T_{obs} - x/v_{red}$$

Hierbei ist x die Entfernung des jeweiligen Beobachtungspunktes vom Schusspunkt und v_{red} die sogenannte Reduktionsgeschwindigkeit. Für die vorliegende Untersuchung wurde der für Krustenuntersuchungen übliche Wert von 6 km/s angenommen. Durch diese Darstellung wird eine höhere Auflösung von Wellengruppen mit Scheingeschwindigkeiten um 6 km/s erreicht, was deren Erkennen und Korrelieren erleichtert. Abbildung 3 zeigt mit dem Profil V80 ein Beispiel der Seismogrammontagen.

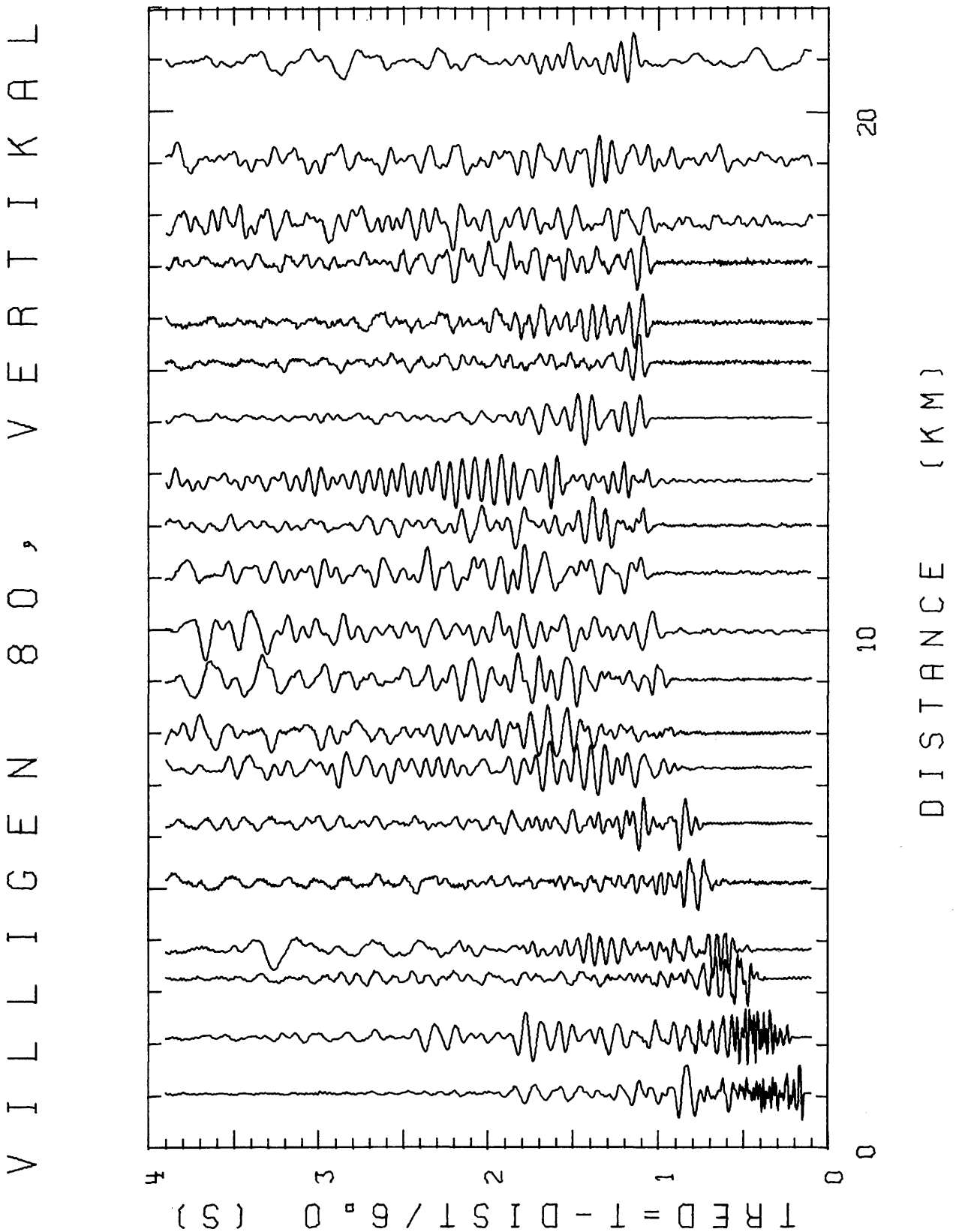


Abb.3: Seismogrammontage des Profils V80 im reduzierten Zeitmassstab (Reduktionsgeschwindigkeit 6 km/s)

Die Amplituden der einzelnen Seismogramme, hier der Vertikalkomponente, sind jeweils auf den Maximalwert im gewählten Zeitfenster normiert. Bei dieser Art der Darstellung treten starke Streuungen der Amplituden nicht in Erscheinung. Direkte Vergleiche der Amplituden zwischen einzelnen Seismogrammen innerhalb der Montagen sind daher nur beschränkt möglich. Zur Bestimmung der wahren Amplitudenverhältnisse müssen für jede einzelne Seismogrammspur die Gerätekonstanten und Verstärkungen in Form von Skalierungsfaktoren berücksichtigt werden. Die vorhandenen Digitalbänder enthalten die Daten aller drei Schwinggeschwindigkeitskomponenten, soweit sie im Gelände registriert wurden, mit den entsprechenden Skalierungsfaktoren.

3.2 Höhenkorrekturen

Für eine möglichst genaue Bestimmung der Geschwindigkeits-Tiefenstruktur v(z), d.h. um vergleichbare Modelle zu erzielen und die Streuung zu reduzieren, müssen die einzelnen Mess- und Sprengpunkte auf eine einheitliche Bezugshöhe reduziert werden.

Für die vom Sprengpunkt Villigen ausgehenden Profile und das Profil Hallwilersee - Kaisten wurde ein mittleres horizontales Bezugsniveau von 400 m ü.M. gewählt.

Auf dem Profil Kaisten - Todtmoos nimmt die Höhenlage der Messpunkte zusätzlich zu den topographischen Schwankungen von 309 m bei Kaisten auf 1300 m beim Sprengpunkt Todtmoos zu. Daher wurde hier als Bezugsniveau für die einzelnen Beobachtungspunkte eine geneigte Ausgleichsgerade durch alle Messpunkte zugrunde gelegt.

Eine gewisse Unsicherheit ist durch die Wahl der Korrekturgeschwindigkeiten für die oberflächennahen geologischen Formationen gegeben. Aus Mangel an genügenden lokalen Detailinformationen und in Anbetracht des mehr regionalen Charakters dieser Untersuchung wurden für diesen Auswertungsschritt Geschwindigkeitswerte aus der Literatur oder direkt gewonnene Beobachtungswerte aus den vorliegenden Profilen verwendet (Tabelle 2).

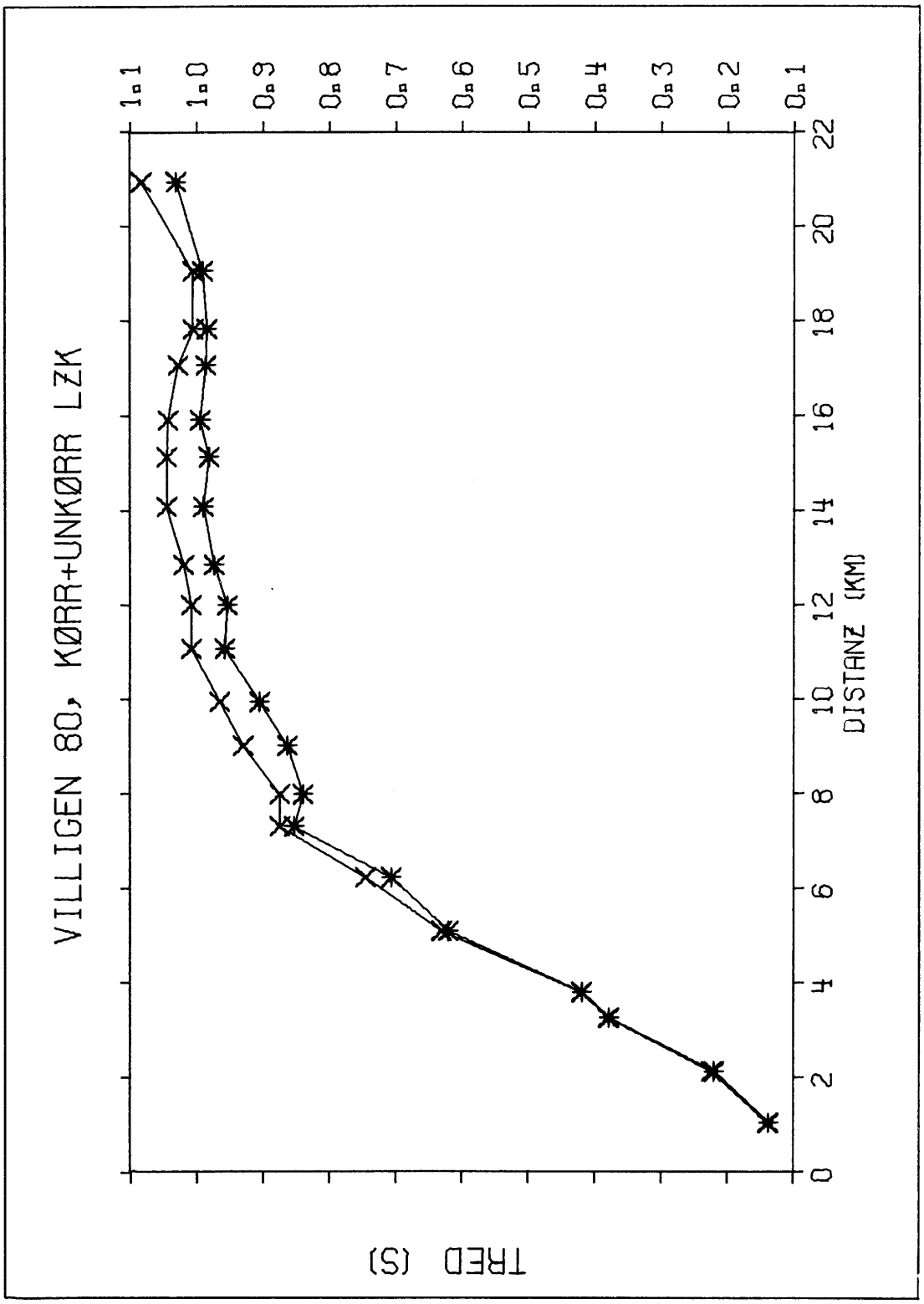


Abb.4: Einfluss der Höhenkorrektur auf die aus den Seismogrammen bestimmten Ersteinsatzzeiten für das Profil V80 (x unkorrigiert, * höhenkorrigiert)

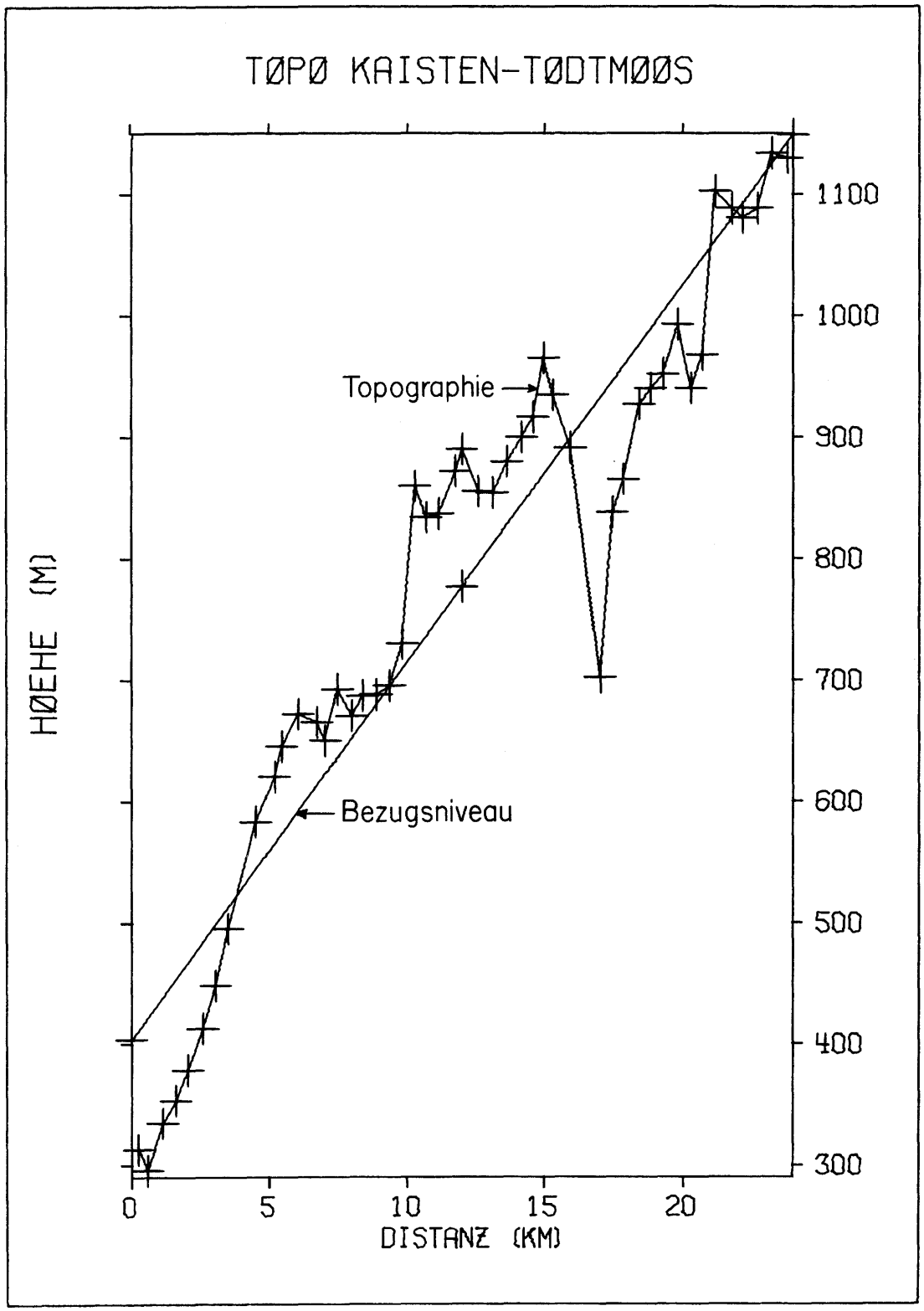


Abb.5: Topographie und Bezugsniveau des Profils Kaisten - Todtmoos (KANORD)

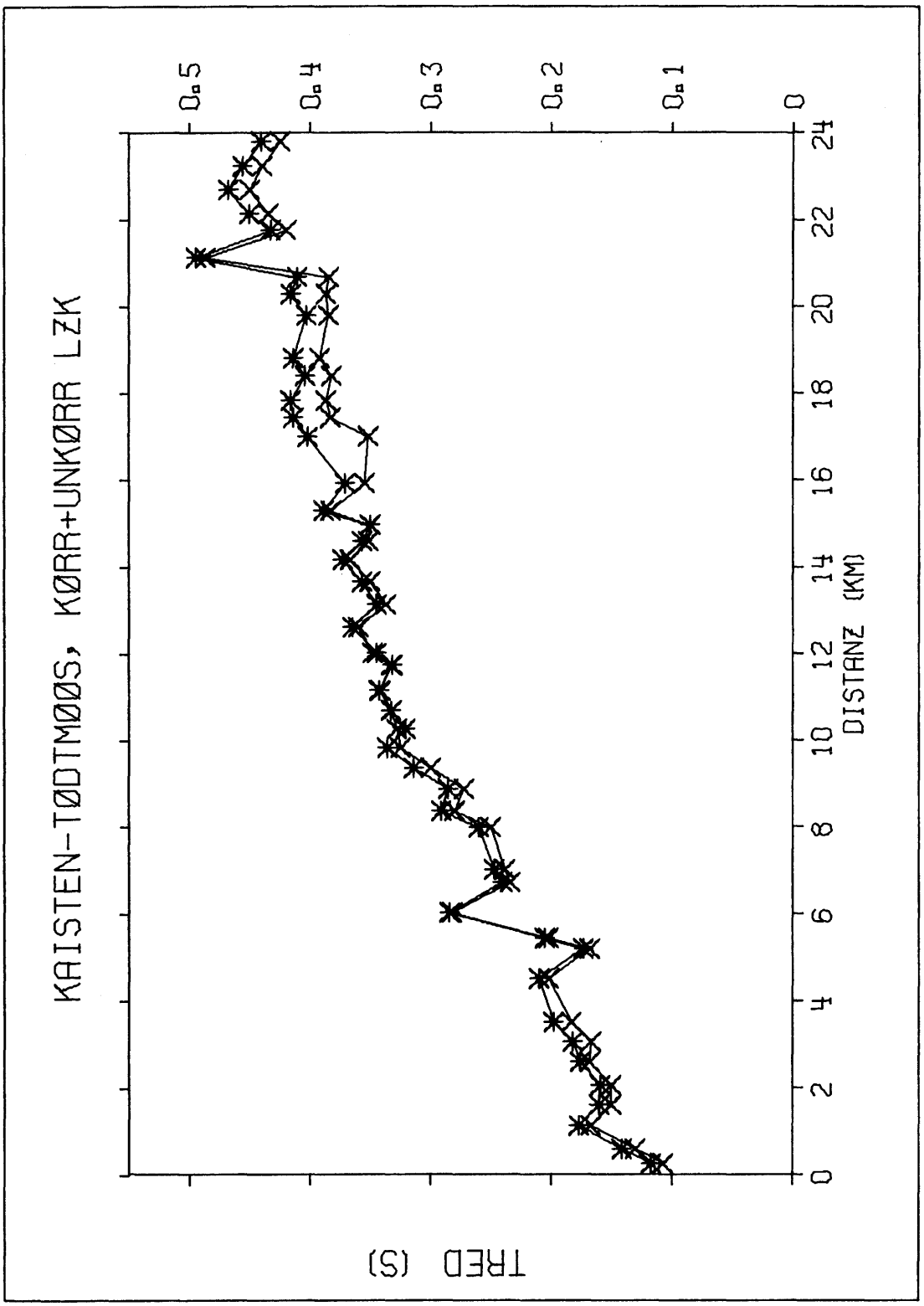


Abb.6: Laufzeitwerte ohne (x) und mit (*) Höhenkorrektur für das Profil Kaisten - Todtmoos (KANORD)

Tabelle 2: SEISMISCHE GESCHWINDIGKEITEN FÜR DIE HÖHENKORREKTUR

Fluviatile Schotter	1.5 km/s	Rybach, 1962
Deckenschotter	2.1 km/s	Rybach, 1962
Molasse	2.8 km/s	Rybach, 1962
Kalk	3.6 km/s	Messwert aus Nahbereich
Schwarzwald-Kristallin	4.4 km/s	Messwert aus Nahbereich

Als Beispiel zeigt Abb.4 für das Profil V80 von Villigen nach Osten den Einfluss der Höhenkorrektur auf die Laufzeiten der abgelesenen Ersteinsätze im reduzierten Zeitmassstab. Der Betrag der Korrektur liegt zwischen 0.001 s und 0.067 s und beträgt auf den anderen Profilen dieses Schusspunktes bis zu 0.1 s.

Die Profile Hallwilersee - Kaisten und Kaisten - Ost (Rafzerfeld) wurden in gleicher Weise reduziert.

Abb.5 zeigt die Topographie und das geneigte Bezugsniveau des Profils Kaisten - Todtmoos und Abb.6 die darauf beobachteten unkorrigierten und korrigierten Laufzeitwerte.

4. INTERPRETATIONSVERFAHREN

Je nach dem Untersuchungsgebiet, d.h. anstehendes kristallines Grundgebirge im Südschwarzwald, flachliegende mesozoische Sedimente über dessen südlicher Fortsetzung im Tafeljura oder ausgeprägte Tiefenvariationen der Kristallinoberfläche in Teilbereichen dieses Gebietes, kamen unterschiedliche Auswertungsverfahren zur Anwendung.

Die Grundinformation, die durch die Feldmessungen gewonnen wurde, besteht aus den Laufzeiten und dem Amplitudenverhalten verschiedener Wellentypen in Abhängigkeit von der Entfernung.

Im einfachsten Fall einer horizontalen Lagerung von homogenen Schichten mit konstanter Geschwindigkeit ergibt sich der in Abb.7 wiedergegebene Strahlengang mit dem entsprechenden System von Laufzeitkurven. Man unterscheidet direkte Wellen, Steilwinkelreflexionen, refraktierte Wellen und Weitwinkelreflexionen.

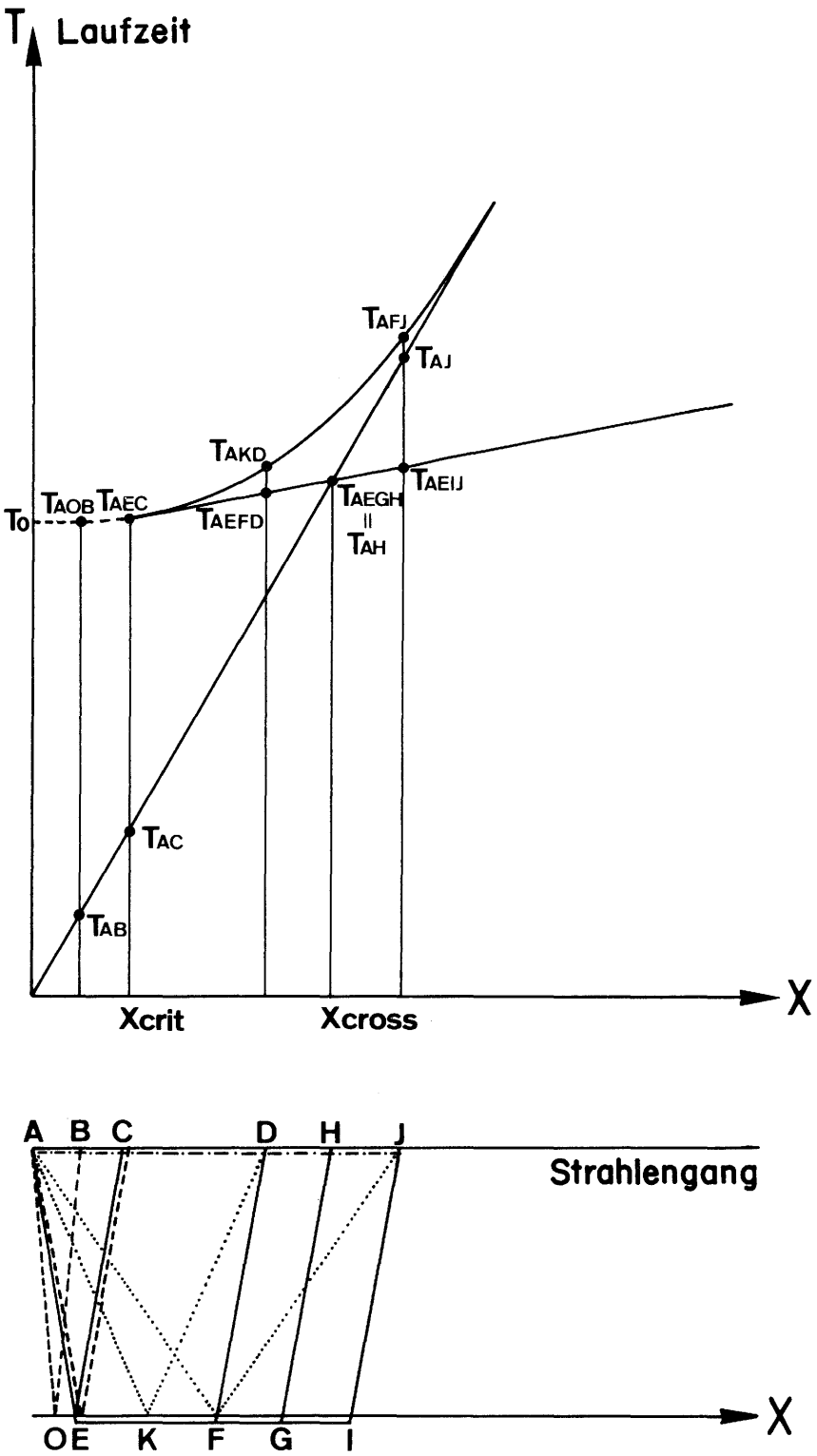


Abb.7: Strahlengang und Laufzeitkurven für eine Schicht über einem Halbraum

—·—·—	Direkte Welle
-------	Steilwinkelreflexion
———	Refraktierte Welle
.....	Weitwinkelreflexion

Dieses einfache Schema wird durch Schichtneigungen, Mehrfachschichtung, Geschwindigkeitsgradienten innerhalb der einzelnen Schichten und laterale Aenderungen der Schichtmächtigkeiten sowie Wechselwellen abgewandelt und erheblich kompliziert. Die Scheingeschwindigkeiten in den einzelnen Schichten sind durch die reziproken Steigungen der Laufzeitkurven gegeben.

Je nach dem Charakter des Untersuchungsgebietes und den daraus resultierenden Beobachtungsdaten wurden die folgenden Interpretationsverfahren angewandt:

- Laufzeitauswertung von reflektierten und refraktierten Wellen bei ebener oder geneigter Schichtung mit und ohne Geschwindigkeitsgradienten in den einzelnen Schichten. Vergleich mit den Feldbeobachtungen.

- Direkte Inversion der Laufzeit in Abhängigkeit von der Entfernung für eine Wellenausbreitung in einem Medium mit kontinuierlicher Geschwindigkeitszunahme in der Tiefe (Verfahren von Wiechert-Herglotz).

- Berechnung von Laufzeiten für einzelne Strahlen in einer lateral sich ändernden Geschwindigkeitsstruktur und deren Vergleich mit den Messungen. Jeder Strahl wird unter einem anderen Winkel von der seismischen Quelle abgestrahlt und durch die gesamte Modellstruktur gebrochen ("Ray Tracing"). Alle Strahlen zusammen überdecken den Bereich des Abstrahlwinkels, der zu der gewünschten Beobachtungsentfernung gehört. Die Schichtmächtigkeiten und Geschwindigkeitsgradienten können sich lateral unter dem Beobachtungsprofil ändern. Das verwendete Rechenprogramm wurde von GEBRANDE [1976] entwickelt.

- Berechnung synthetischer Seismogramme für lateral homogene Strukturmodelle und variable Geschwindigkeitsgradienten in den einzelnen Schichten. Amplitudenvergleich mit den Beobachtungsdaten. Verwendet wurden die Berechnungsmethoden der "Reflectivity" von FUCHS und MÜLLER [1971] und die Strahlenmethode nach ČERVENÝ, MOLOTKOV und PŠENČÍK [1977].

5. GESCHWINDIGKEITS-TIEFENVERTEILUNG IM ANSTEHENDEN KRISTALLIN UND TIEFENLAGE DES GRUNDGEBIRGES UNTER DER NORDSCHWEIZ

5.1 $v_p(z)$ im anstehenden Kristallin des Südschwarzwalds

Im Anschluss an die zuvor diskutierte Höhenkorrektur wurde zunächst die Kompressionswellengeschwindigkeit in den obersten 2-3 km des kristallinen Grundgebirges im Schwarzwald bestimmt. Abb.8 zeigt noch einmal die Lage der Profile im Südschwarzwald auf der detaillierten geologischen Karte von METZ [1980].

5.1.1 Laufzeitinterpretation

Die Abbildungen 9a, 10a, 11a, 12a und 13a zeigen die höhenkorrigierten Laufzeitwerte für die Profile KANORD (Kaisten - Todtmoos), SWSUED (Todtmoos - Kaisten), V310, V330 und V360. Die Laufzeiten ergeben sich aus den den Seismogrammontagen entnommenen Ersteinsatzzeiten. Auf Profil V330 (Abb.12a) fehlen Laufzeitwerte im Entfernungsbereich von 0 km bis 8 km, da hier mit den Messungen erst nördlich des Rheins begonnen wurde. Die Laufzeiten der Profile V310, V330 und V360 (Abb.11a, 12a, 13a) weichen bis Entfernungen von 15 km, bedingt durch die in ihrer Mächtigkeit schwankende Sedimentauflage zwischen dem Schusspunkt und dem anstehenden Kristallin, stark von denjenigen des reinen Kristallinprofils Hallwilersee - Todtmoos ab.

Die verbleibenden Schwankungen der Laufzeitwerte sind durch wechselnde Mächtigkeiten der nicht erfassten oberflächennahen Verwitterungszone des Kristallins bedingt. Daher wurden für die weitere Bearbeitung Ausgleichskurven durch die streuenden Laufzeitwerte gelegt.

Das Resultat der nachfolgenden Inversion mit Hilfe des Wiechert-Herglotz-Verfahrens ist in den Abbildungen 9b, 10b, 11b, 12b und 13b enthalten. Man muss hier berücksichtigen, dass die Geschwindigkeitswerte in Tiefen von weniger als etwa 1 km für die drei Profile von Villigen V310, V330, V360 durch die aufliegenden Sedimente im Anfangsteil keine Information über die Kristallingeschwindigkeiten liefern. Daher sind diese Tiefenbereiche in den Abbildungen 11b, 12b und 13b nur gestrichelt gezeichnet. Die Interpretation mit Hilfe des Wiechert-Herglotz-Verfahrens ist hier grob vereinfachend, da es eine lateral homogene Struktur voraussetzt. Im zweiten Teil dieser Untersuchung über den tieferen Untergrund unter dem Jura wurden diese Profile noch einmal mit der Methode des "Ray Tracing" ausgewertet, welche lateral inhomogene Strukturen zulässt.

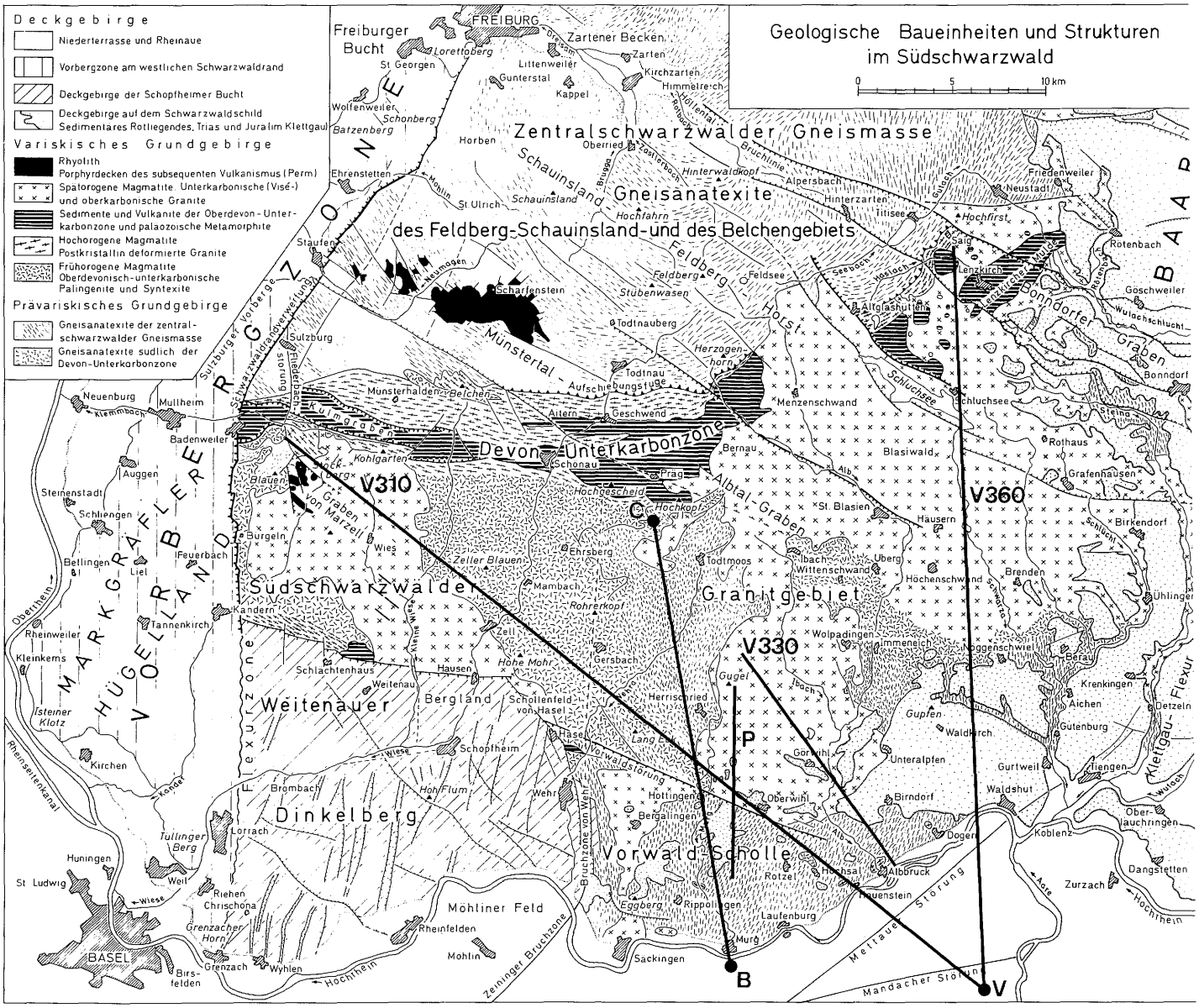


Abb.8: Geologische Karte des Südschwarzwalds nach METZ [1980] mit der Lage der Refraktionsprofile

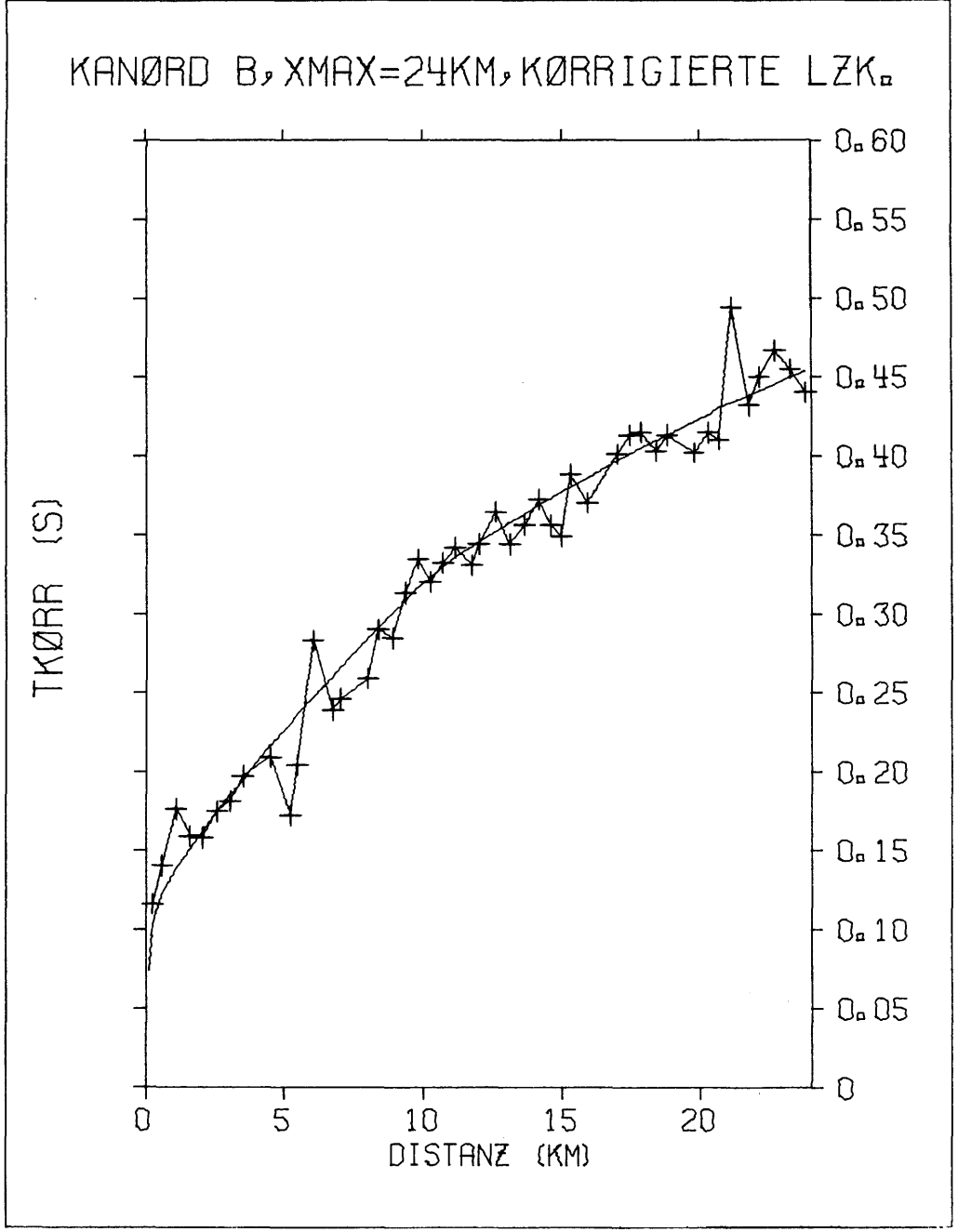


Abb.9a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil Kaisten - Todtmoos (KANORD)

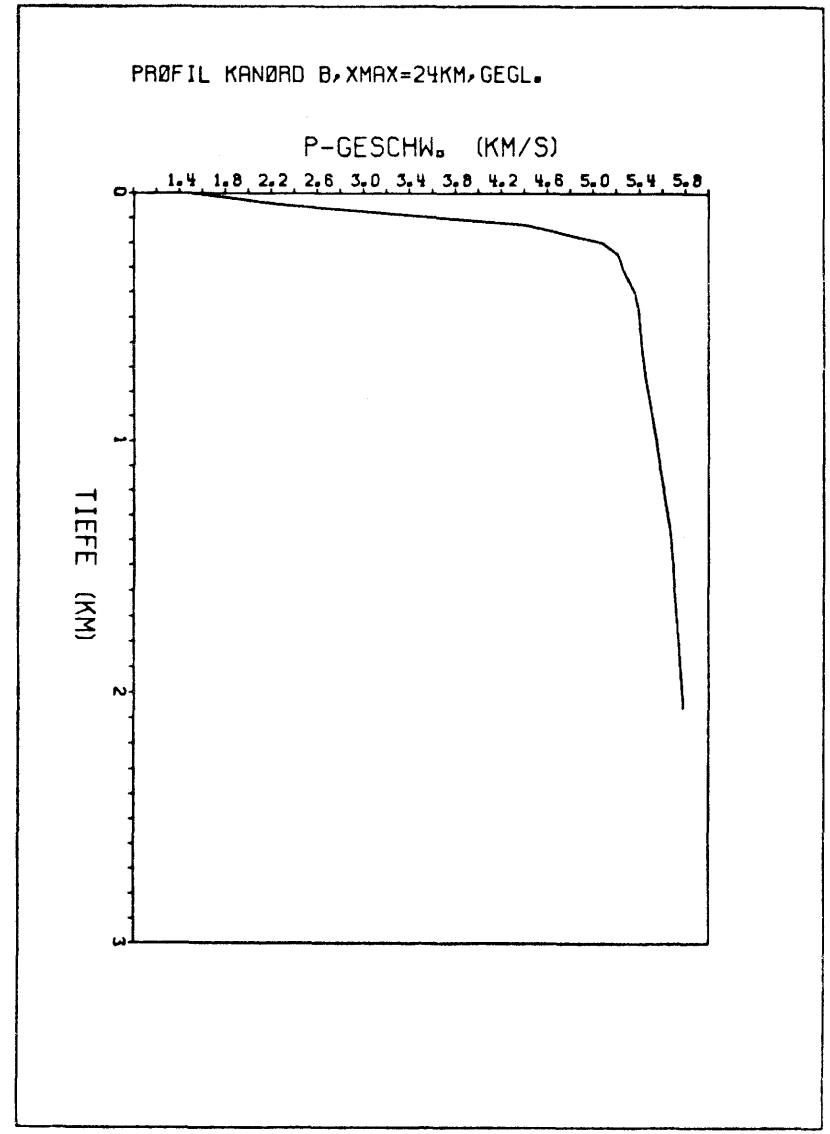


Abb.9b: Geschwindigkeitstiefenfunktion für das Profil Kaisten - Todtmoos (KANORD)

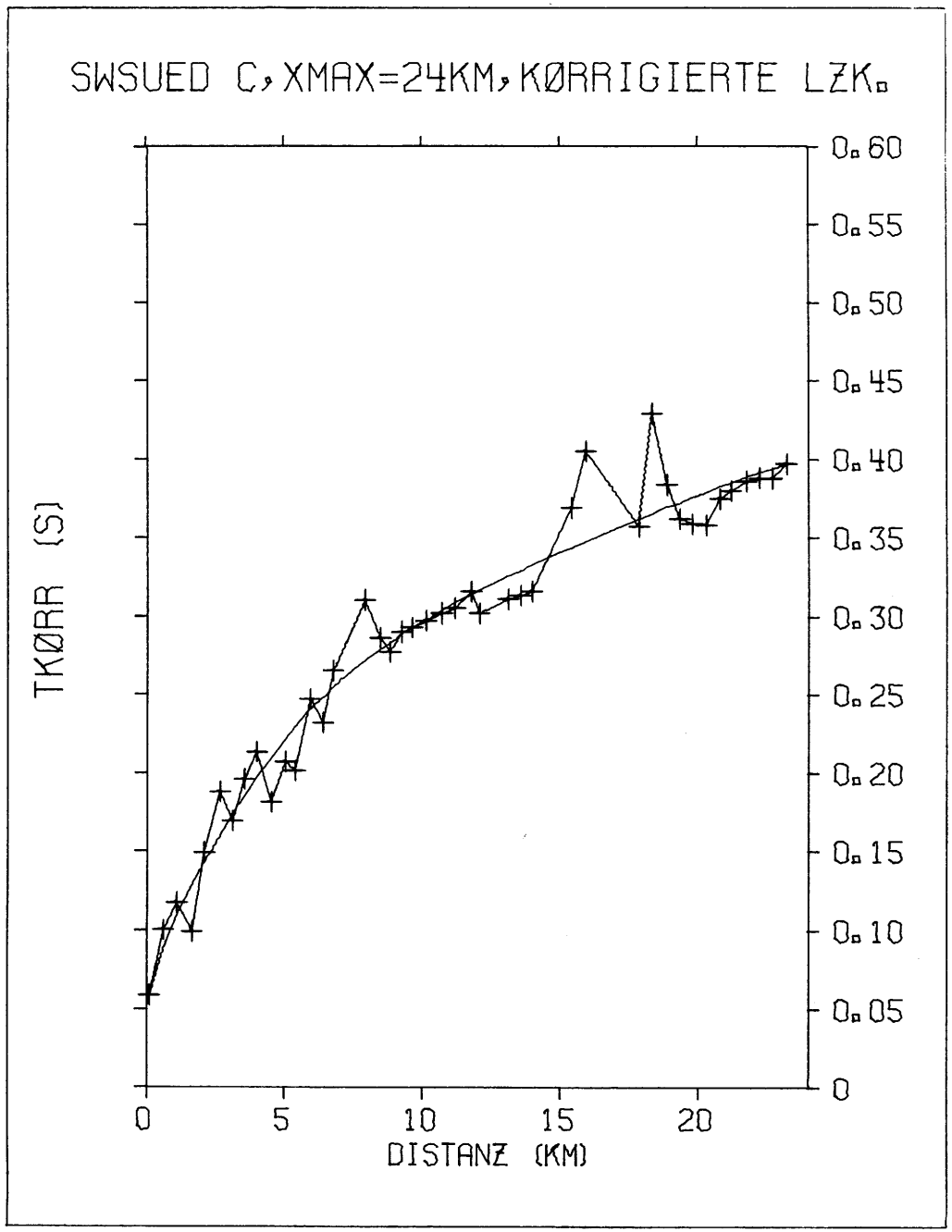


Abb.10a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil Todtmoos - Kaisten (SWSUED)

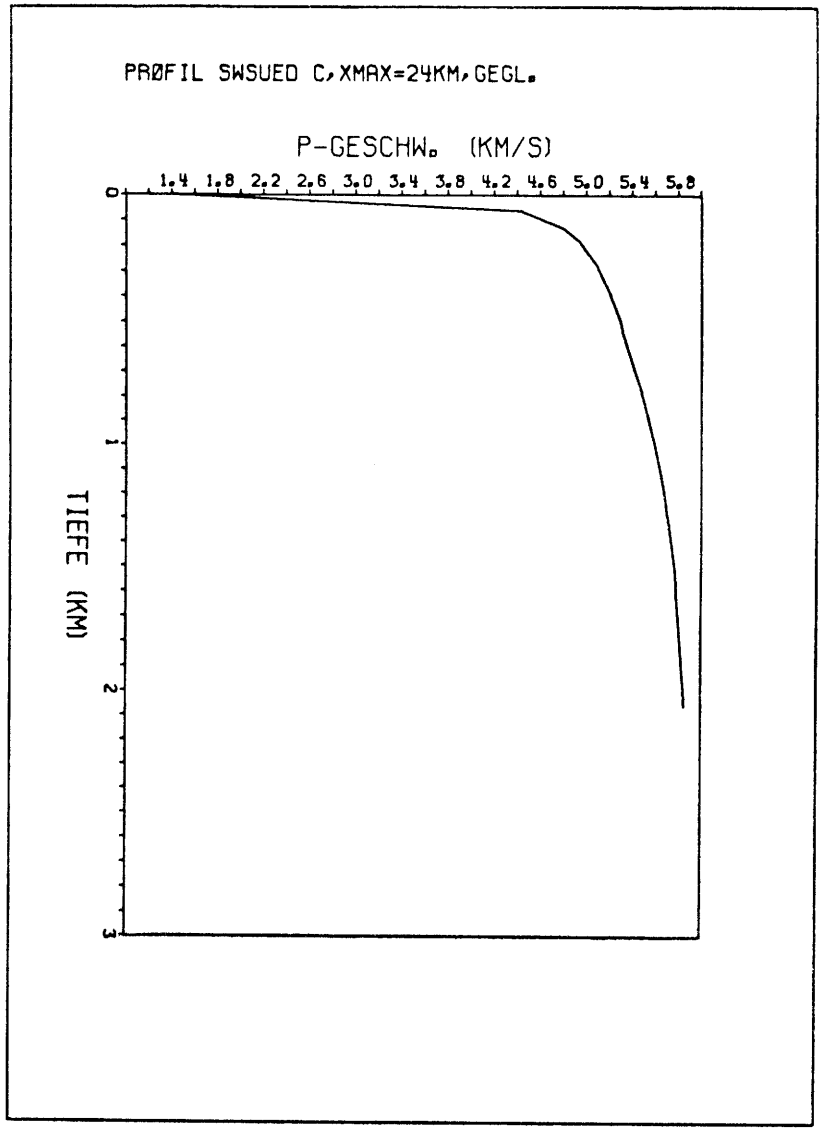


Abb.10b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion des Profils Todtmoos - Kaisten (SWSUED)

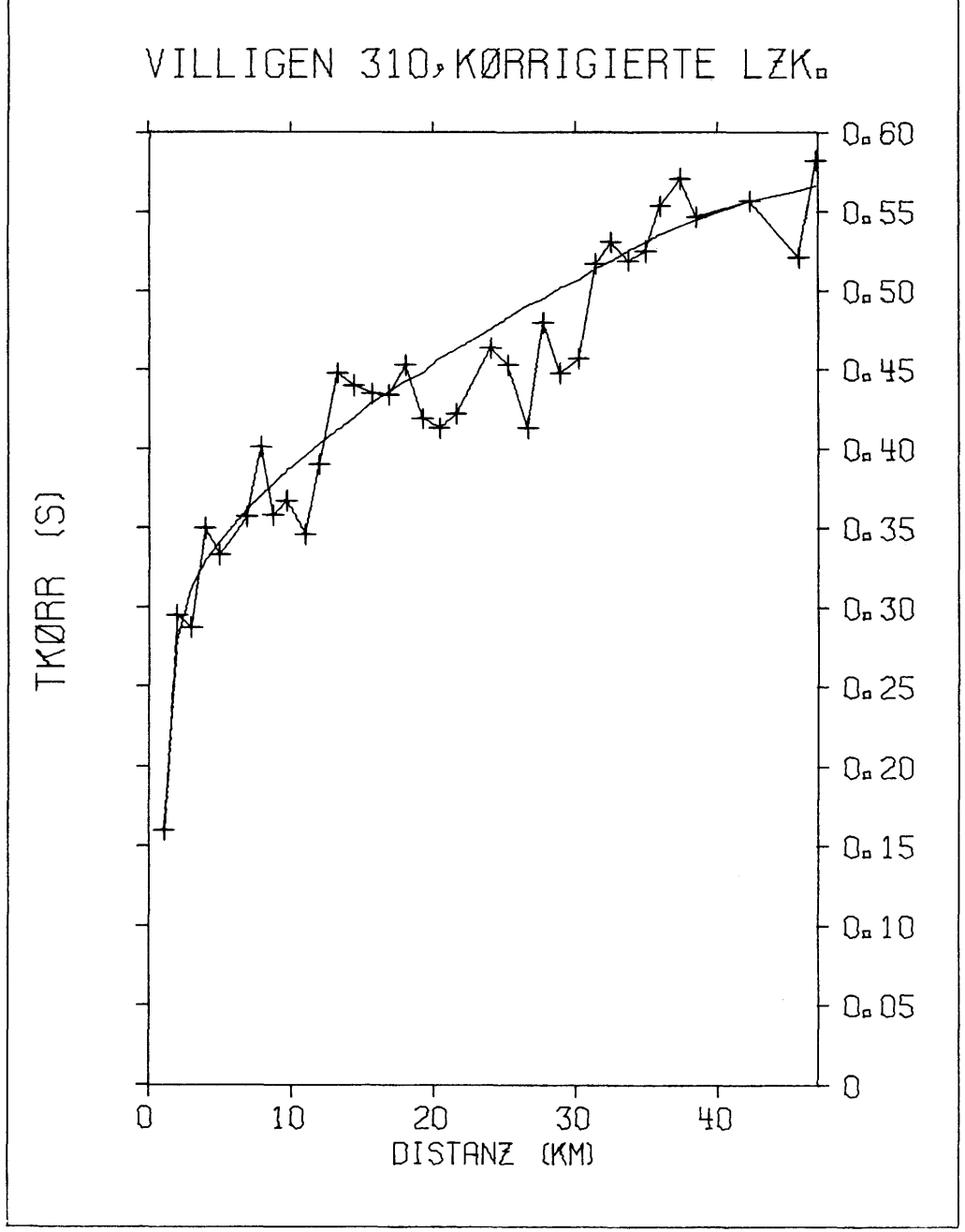


Abb.11a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil V310

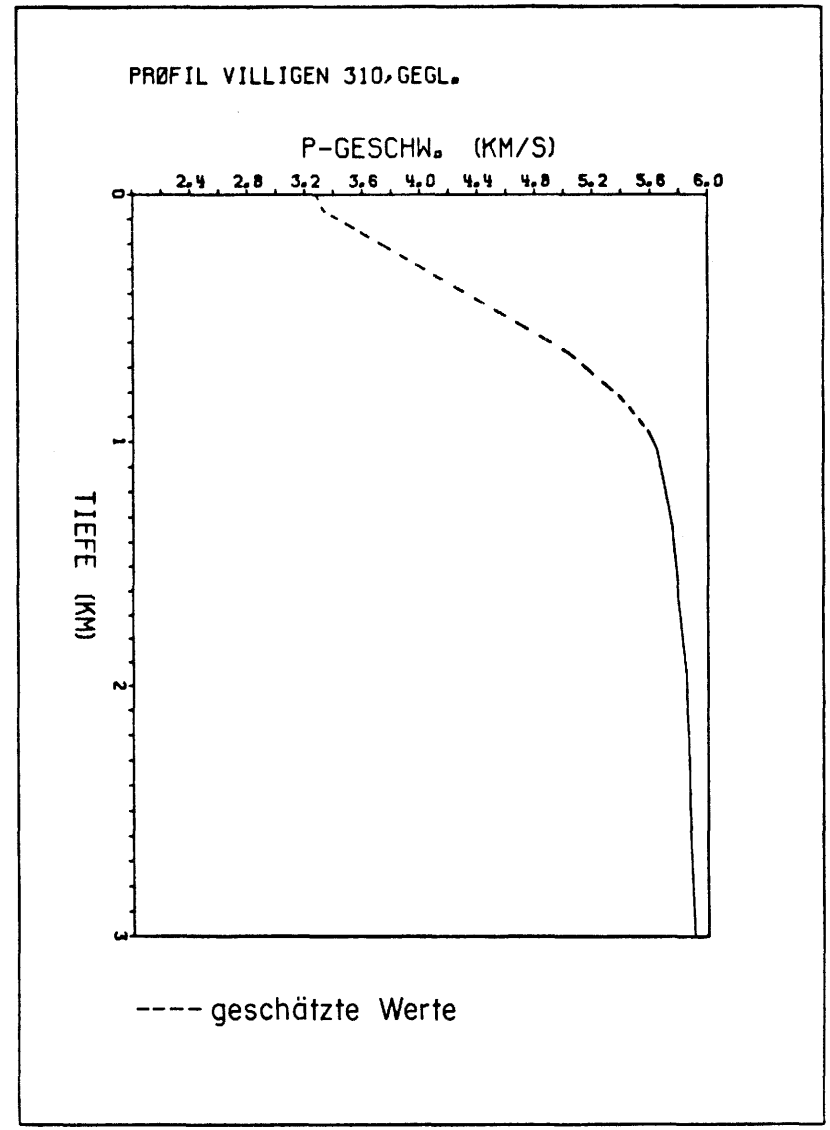
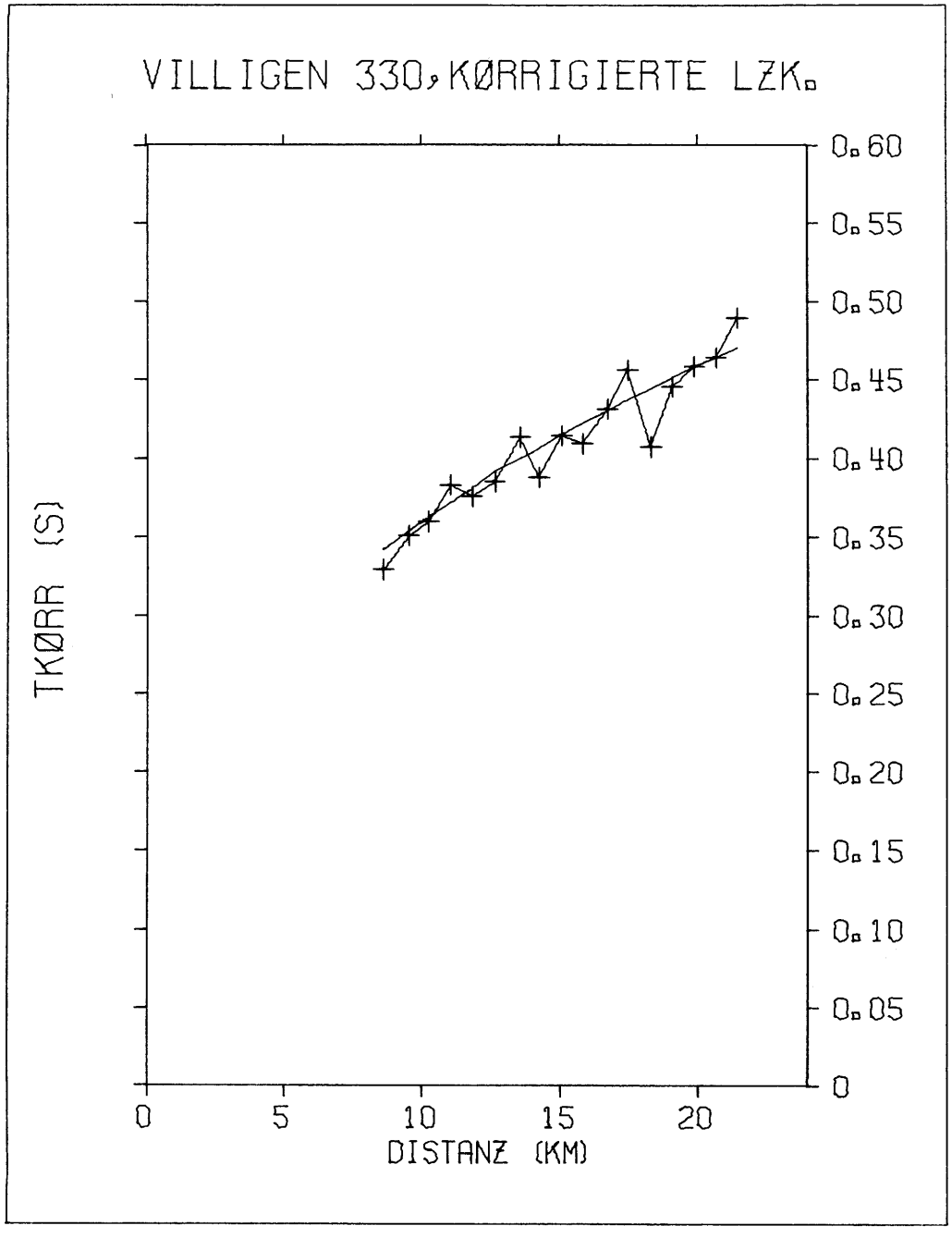


Abb.11b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für den kristallinen Tiefenbereich des Profils V310



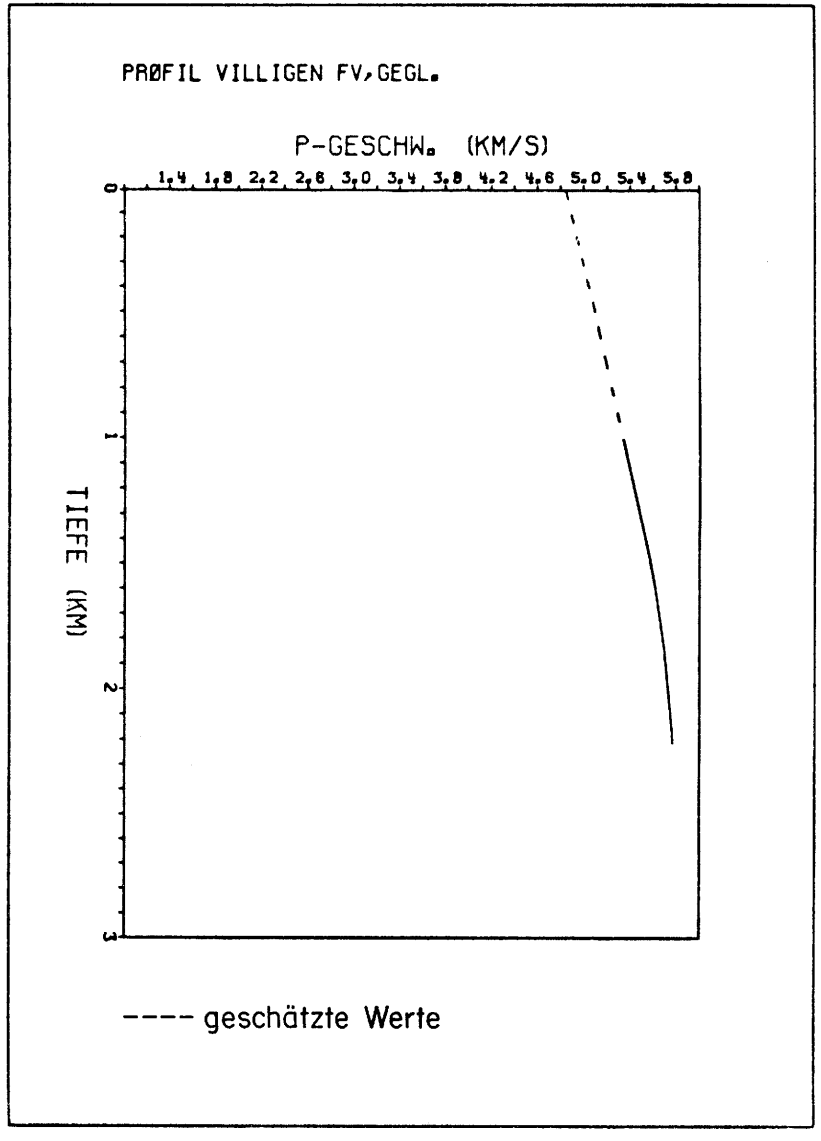


Abb.12a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil V330

Abb.12b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für den kristallinen Tiefenbereich des Profils V330 (Sprengung FV)

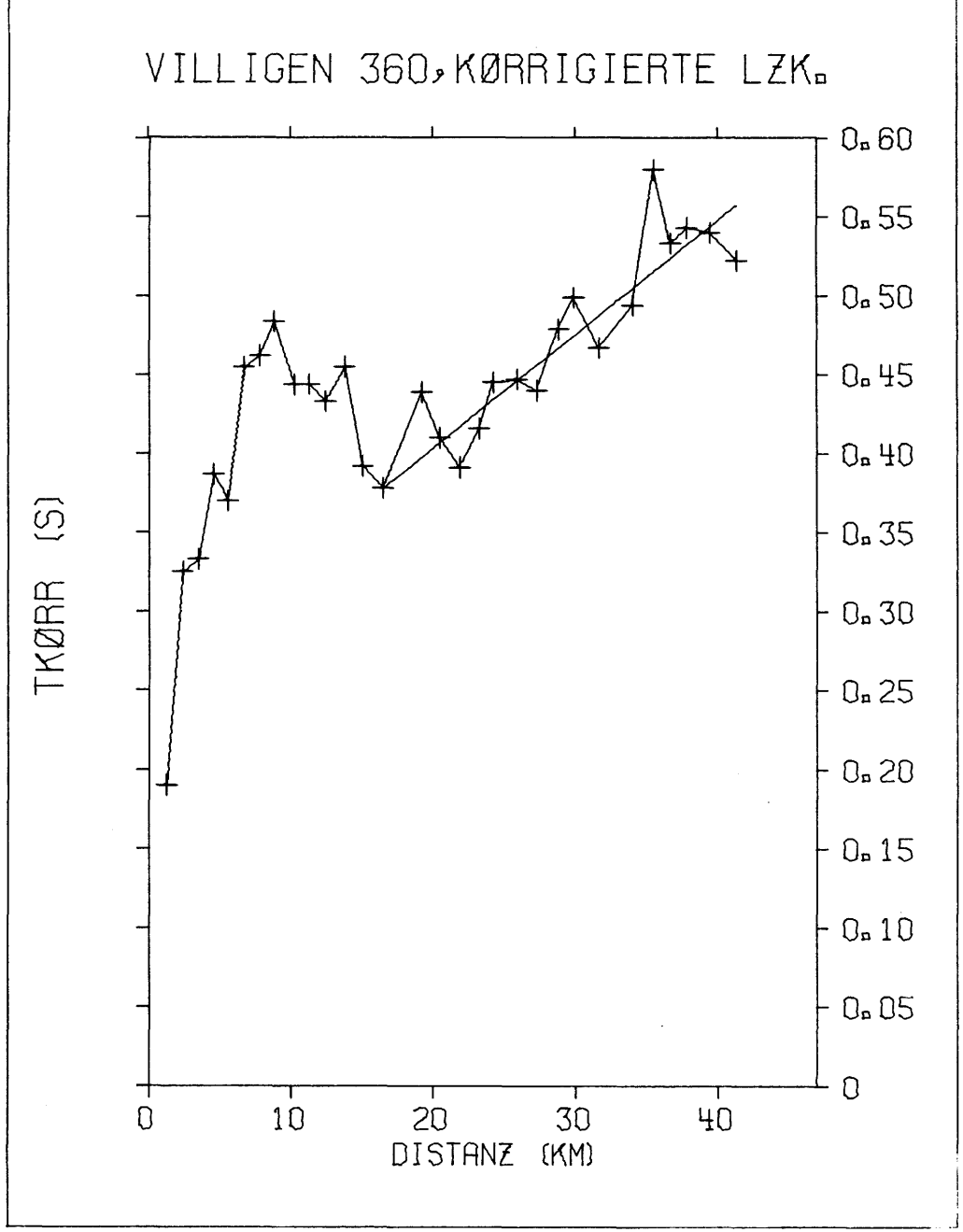


Abb.13a: Topographisch korrigierte Laufzeiten mit Ausgleichskurve für das Profil V360

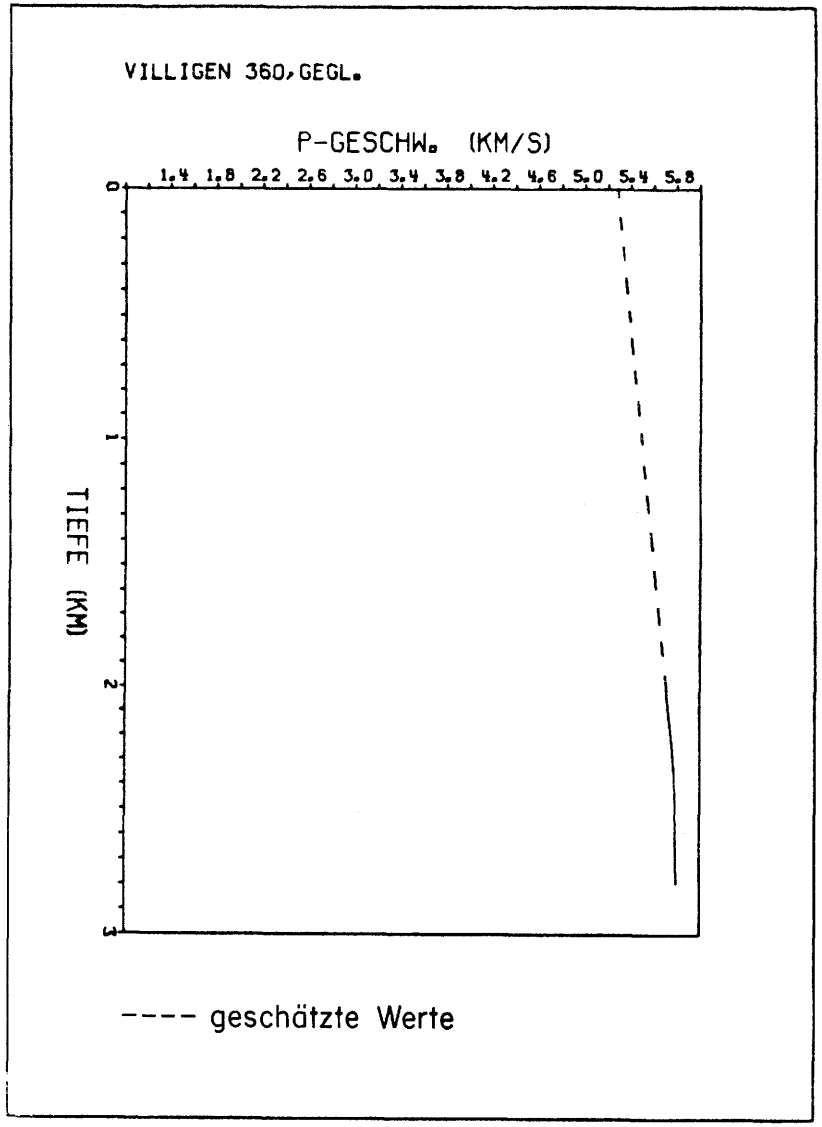


Abb.13b: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für den kristallinen Tiefenbereich des Profils V360

5.1.2 Amplitudeninterpretation

Das Profil Kaisten - Todtmoos liegt in dem relativ homogenen Südschwarzwälder Gneisgebiet. Damit sind die Voraussetzungen für den Vergleich von gemessenen Amplituden mit denjenigen, die aus synthetischen Seismogrammen für eine lateral homogene Geschwindigkeitsstruktur berechnet werden können, gut erfüllt.

Da an den beiden Sprengpunkten Kaisten und Todtmoos dieselbe Bohr- und Sprengtechnik angewandt wurde, war es möglich, die Amplituden auf beiden Profilen auf eine Bezugssprengung zu normieren. Systematische Unterschiede in den beobachteten Amplituden, die durch verschieden grosse Sprengladungen (Tabelle 1) verursacht wurden, konnten mit Hilfe der an Teststationen gemessenen Amplituden korrigiert werden.

Die Abbildungen 14a und 14b zeigen die so gewonnene Amplitudenabnahme der Ersteinsätze mit der Entfernung auf diesen beiden Profilen. Ausgehend von der Laufzeitinterpretation wurden durch die Berechnung synthetischer Seismogramme die dort erzielten Geschwindigkeitsmodelle weiter verfeinert. Abb.15 zeigt einen Vergleich der gemessenen Amplituden mit den für das Schlussmodell synthetisch berechneten Werten.

5.1.3 Vergleich der Geschwindigkeits-Tiefenfunktion aus der Laufzeit- und Amplitudenauswertung

In Abb.16 sind die Geschwindigkeits-Tiefenmodelle aus den Laufzeitauswertungen und das Schlussmodell (Kurve C), welches aus den Amplitudenauswertungen gewonnen wurde, zusammengestellt. Wie man sieht, liegt die grösste Diskrepanz zwischen den aus beiden Verfahren gewonnenen $v_p(z)$ Funktionen in den oberflächennahen Bereichen. Dies deutet daraufhin, dass mit den hier angewandten Messmethoden, d.h. Beobachtung über grosse Entfernungsbereiche, die Detailstruktur nicht erfasst werden kann. Um diese Information zu erhalten, müsste über den gesamten Entfernungsbereich zwischen Kaisten und Todtmoos eine kleinräumige Detailuntersuchung vorgenommen werden, die auch laterale Aenderungen in der Mächtigkeit der oberflächennahen Verwitterungszone einschliesst. Solche Strukturänderungen sind, wie schon erwähnt, bei den bisher diskutierten Auswerteverfahren nicht berücksichtigt worden.

Das aus der Amplitudeninterpretation gewonnene Modell (Kurve C) beginnt an der Oberfläche mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit von 4.5 km/s gegenüber 1.5 - 2.0 km/s aus der Laufzeitauswertung. Diese Geschwindigkeitsstruktur gilt für den nördlichen Profilteil. Im Süden bei Kaisten sind die oberflächennahen Geschwindigkeiten geringer. Dies ist

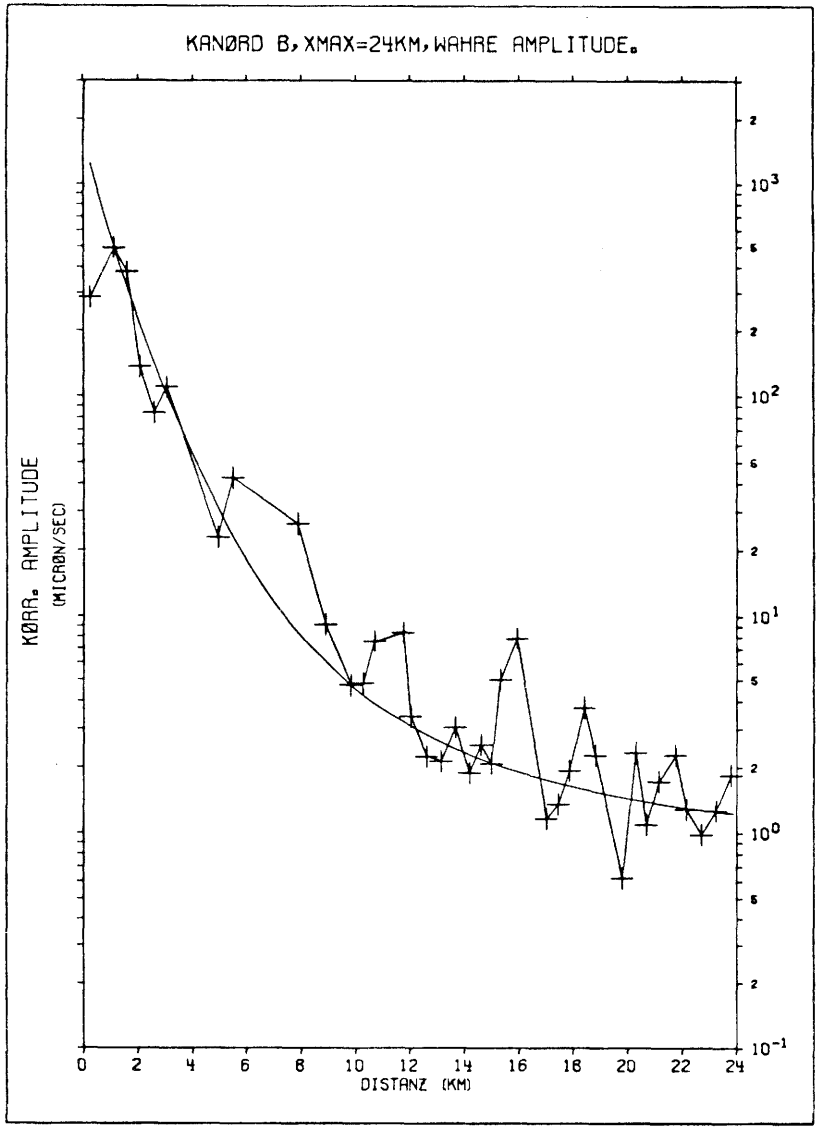


Abb.14a: Amplitudenabnahme auf dem Profil Kaisten - Todtmoos (KANORD) mit Ausgleichskurve, normiert auf die Sprengung B2

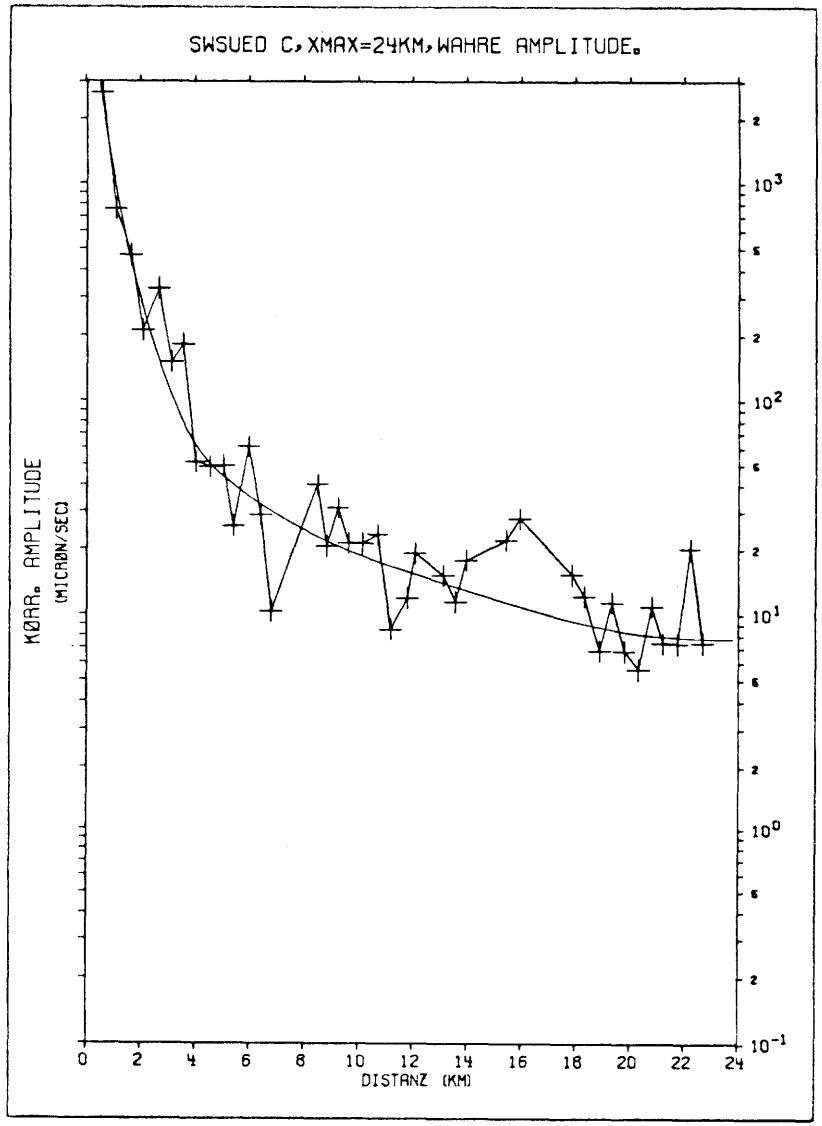


Abb.14b: Amplitudenabnahme auf dem Profil Todtmoos - Kaisten (SWSUED) mit Ausgleichskurve, normiert auf die Sprengung C1

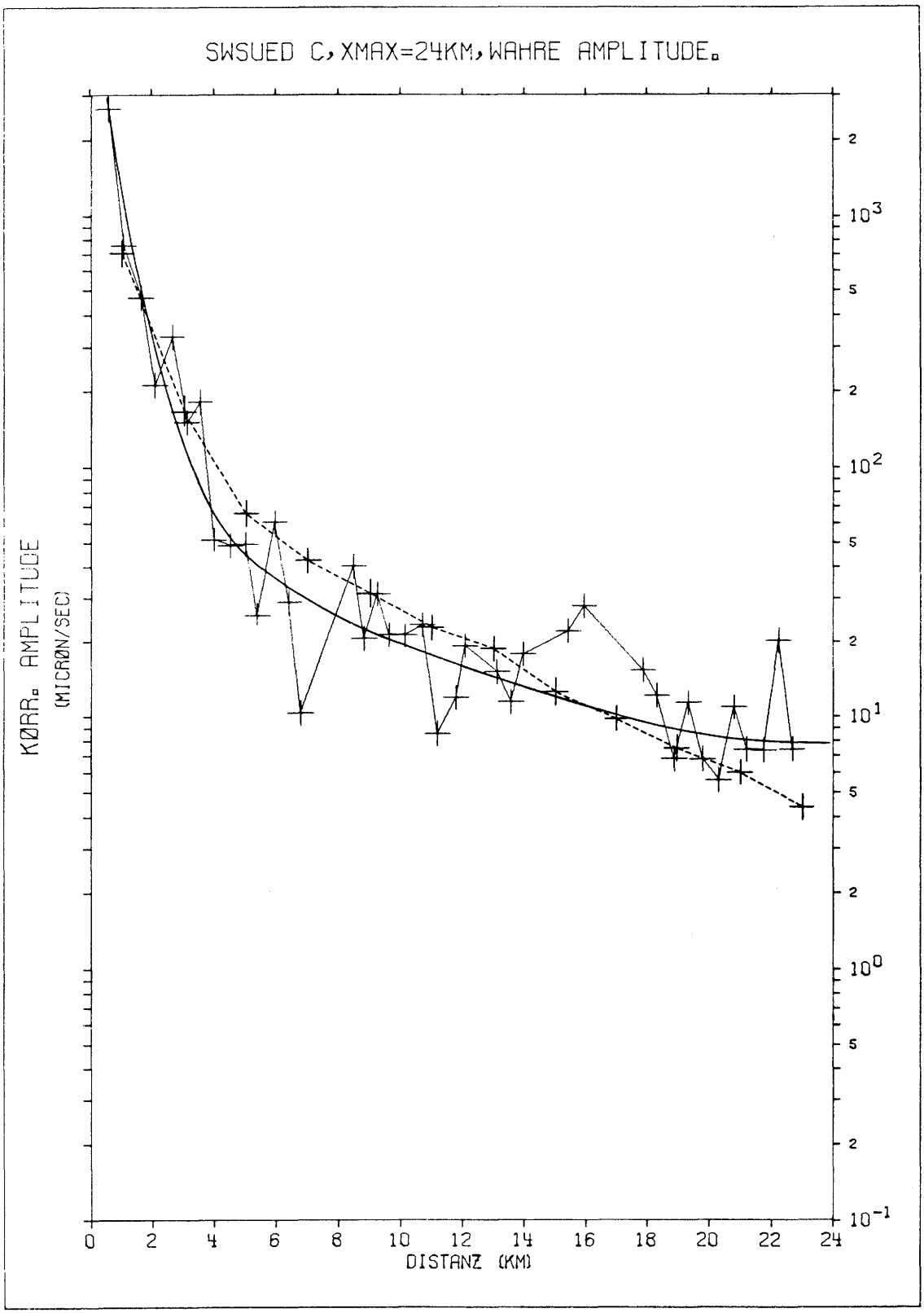


Abb.15: Beobachtete (——) und berechnete (---) Amplitudenabnahme für das Profil Todtmoos - Kaisten (SWSUED)

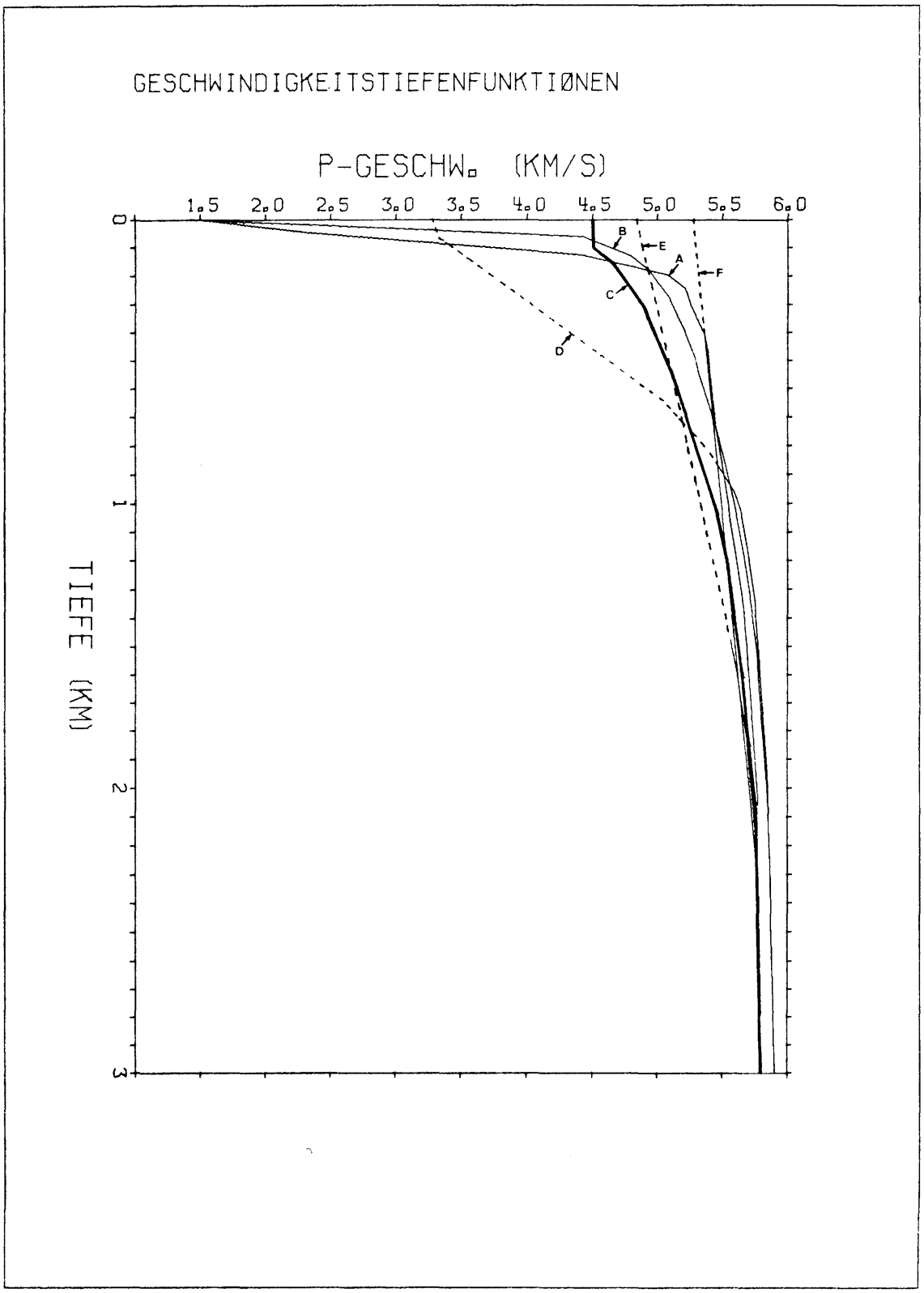


Abb.16: Geschwindigkeits-Tiefenstruktur für den Südschwarzwald, abgeleitet aus Laufzeit- und Amplitudenbeobachtungen

A: Kaisten - Todtmoos (Laufzeiten)
B: Todtmoos - Kaisten (Laufzeiten)
C: Todtmoos - Kaisten (Laufzeiten + Amplituden)
D: V310
E: V330
F: V360

einerseits durch eine vermutlich mächtigere Verwitterungsschicht des Kristallins und andererseits durch noch vorhandene mächtige Rheinschotter bedingt, in welchen der Schusspunkt Kaisten liegt.
Die Kombination der $v_p(z)$ Funktionen für die Kristallinprofile zeigt unter einer 200-300 m mächtigen Gradientenzone, in der die Geschwindigkeit lateral stark schwankt, im Mittel aber auf 5.1 - 5.2 km/s ansteigt, eine relativ stetige Geschwindigkeitszunahme auf 5.4 - 5.5 km/s in 1 km Tiefe. In dieser Tiefe werden die Werte von den Villigen-Daten voll bestätigt. Die abgeleiteten Geschwindigkeitswerte liegen noch bis in eine Tiefe von 3 km unter 6 km/s.

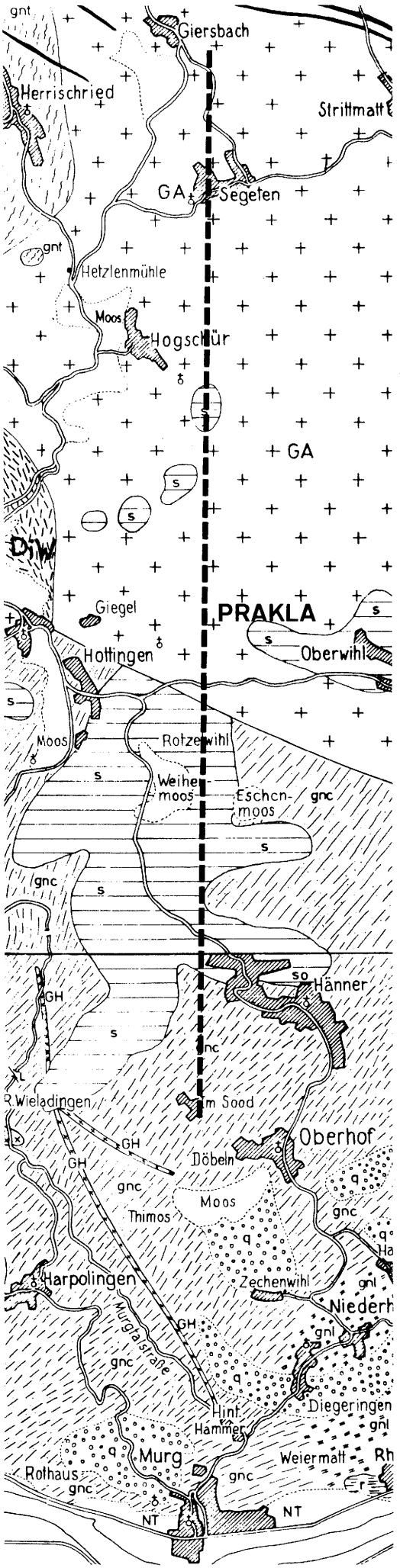
5.1.4 Unterschiede der Kompressionswellengeschwindigkeit im Gneis- und Granitgebiet des Südschwarzwalds

Wie in Abschnitt 2.2.3 schon erwähnt, wurden von der Firma Prakla-Seismos, Hannover, parallel zu den Messungen des Instituts für Geophysik der ETH Zürich auf ausgewählten Teilstrecken zwischen Hallwilersee und Todtmoos zusätzliche Feldregistrierungen ausgeführt. Im Südschwarzwald (Abb.8 und 17) sollten damit Unterschiede zwischen den Kompressionswellengeschwindigkeiten von Gneis und Granit erfasst werden.

Die Messstrecke Kaisten - Todtmoos liegt vollständig im Südschwarzwälder Gneisgebiet. Das von der Firma Prakla-Seismos registrierte Profilstück verläuft östlich zwischen 4.5 km und 8.0 km vom Schusspunkt ebenfalls im Gneis und danach bis 14 km im Granit. In Abb.17 sind die absoluten Laufzeiten auf den zwei Profilen zum Vergleich übereinander aufgetragen. Daraus ergeben sich keine Hinweise auf Geschwindigkeitsunterschiede für einen Tiefenbereich von 1-1.5 km. Da unbekannt ist, wie sich der Granitstock in der Tiefe fortsetzt, sollte dieses Ergebnis nicht überbewertet werden. Ein zuverlässiger Vergleich kann nur durch eine lokale Detailuntersuchung mit einer Reihe von kurzen Refraktions- und Reflexionsprofilen erreicht werden.

5.2 Die Tiefenlage der Kristallinoberfläche im Untersuchungsgebiet

Dieser Teil der Untersuchung basiert auf den Profilen, die von Villigen ausgehen, und auf den Messungen zwischen Kaisten und Hallwilersee sowie denjenigen von Kaisten nach Osten (Abb.1). In einer Vorauswertung hat zunächst BINDSCHAEDLER [1982] die sechs von Villigen ausgehenden Hauptprofile analysiert. Im nächsten Schritt wurden nach den folgenden Messungen am Hallwilersee und bei Kaisten die ersten vorläufigen Ergebnisse noch einmal überarbeitet. In dem nun vorliegenden Bericht sind alle verfügbaren refraktionsseismischen Daten in diesem Gebiet zusammengefasst und in einer synoptischen Auswertung berücksichtigt worden.



NT Niederterrasse (Schotter, Kiese, Sande)

q Risseiszeitliche Moränen, altquartäre Schotter und Deckenschotter

s Oberer Buntsandstein

r Oberrotliegendes

L Lamprophyr

GA Albtalgranit

GH Granit von Hauenstein

DiW Gesteinskomplex des Wiesen-Wehratalgebiets, diatektisch veränderte Paragneise mit granodioritischen Palingeniten

gnt Gneisanatexite Typ Todtmoos

gnc Gneisanatexite Typ Hauensteiner Murgtal

gnl Gneisanatexite Typ Laufenburg

Abb.17: Ausschnitt aus der geologisch-petrographischen Uebersichtskarte des Hotzenwalds (1:50'000) mit der Lage des Profils Kaisten - Gugel, ausgeführt durch die Firma Prakla-Seismos [nach R. METZ, 1980].

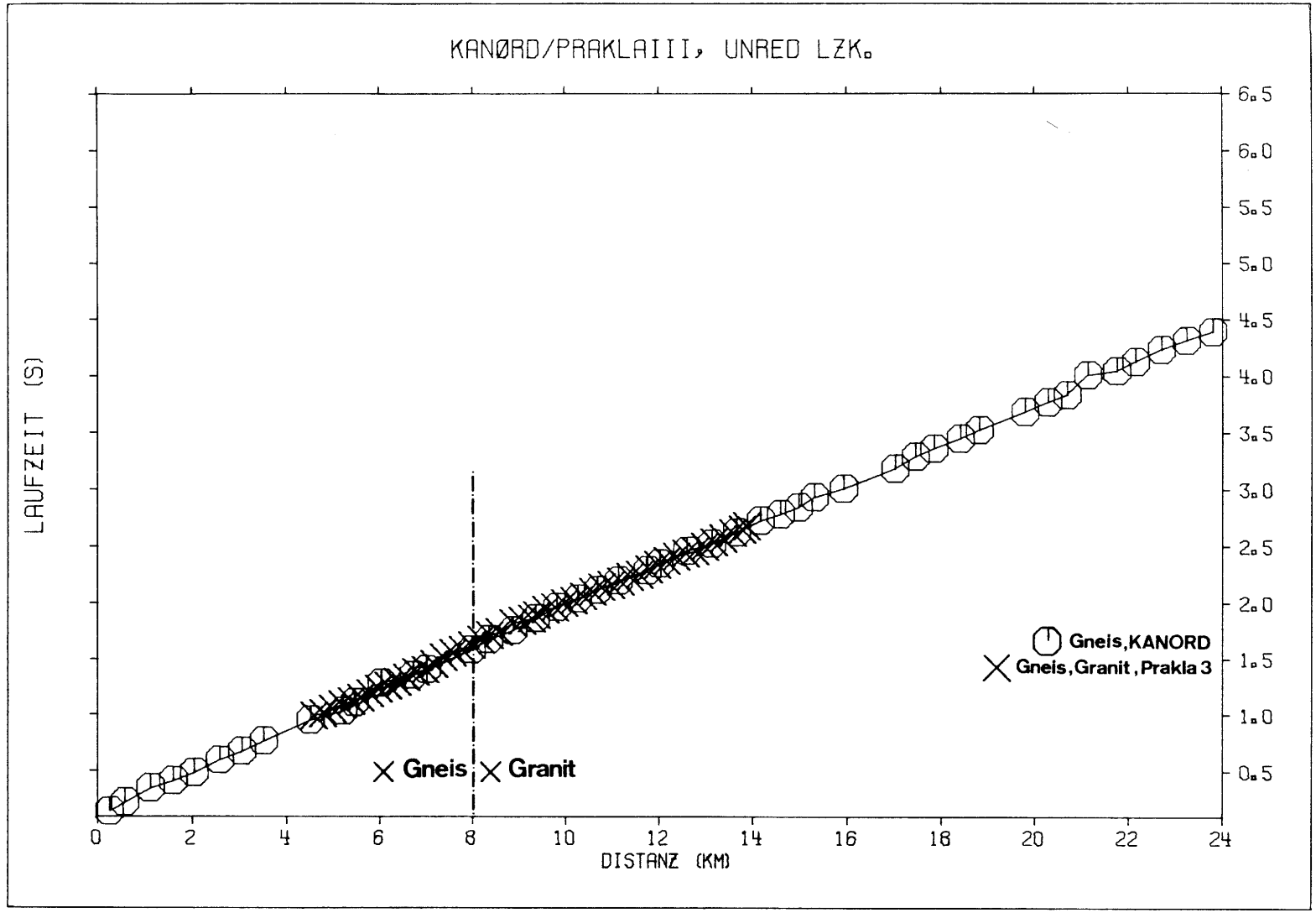


Abb.18: Laufzeitenvergleich der Beobachtungen auf den Profilen Kaisten - Todtmoos und Kaisten - Gugel (Granitgebiet in Abb.17), ausgeführt durch die Firma Prakla-Seismos

5.2.1 Profilfächer Villigen

5.2.1.1 Laufzeitenvergleich

Erste Hinweise für regionale Unterschiede im Verlauf seismischer Geschwindigkeiten mit der Tiefe und damit in der geologischen Struktur liefert ein Vergleich der beobachteten Laufzeiten. Zu diesem Zweck sind in Abb.19 alle beobachteten reduzierten und höhenkorrigierten Laufzeiten für die sternförmig von Villigen ausgehenden Profile zusammengestellt.

Ein derartiges Laufzeitendiagramm kann - ohne schon hier auf Details der einzelnen Profile einzugehen - nach dem in Abb.20 wiedergegebenen Schema qualitativ interpretiert werden, in welchem die Laufzeitbeobachtungen auf dem Profil V260 (von Villigen nach Westen, auf dem Tafeljura) als Beispiel herausgegriffen sind.

Im Entfernungsbereich von 0 km bis 3.0 km lassen sich die Beobachtungen zu einer Laufzeitgeraden mit der Geschwindigkeit von 3.75 km/s zusammenfassen. Dies entspricht den schusspunktnahen mesozoischen Sedimenten. Im nächsten Entfernungsbereich von 3.0 km bis 8.5 km wird mit der Geschwindigkeit von 4.70 km/s das unterste Mesozoikum und die Verwitterungszone im obersten Bereich des kristallinen Grundgebirges erfasst. Das nachfolgende Entfernungsintervall von 8.5 km bis zum Profilende wurde zum leichteren Verständnis in dieser Abbildung mit einer mittleren Laufzeitgeraden von 5.89 km/s nur sehr grob angenähert. Diese Geschwindigkeit kennzeichnet das kristalline Grundgebirge in einem Tiefenbereich von 1.6 km bis 4.3 km. Bei einer horizontalen Lagerung charakterisiert jede einzelne der dargestellten Laufzeitkurven die Schichtgeschwindigkeit.

Die Position der Laufzeitkurve im Laufzeit-Distanz-Diagramm (vgl. Abb.7) liefert Informationen über die Tiefenlage einer Schicht. Wie die weitere Auswertung zeigen wird, müssen für eine realistischere Bearbeitung die einzelnen Schichten mit konstanter Geschwindigkeit durch solche mit Geschwindigkeitsgradienten ersetzt werden. Trotz dieser anfänglichen Vereinfachung weist die Zusammenstellung der Laufzeitbeobachtungen auf den einzelnen Profilen in Abb.19 auf deutliche Unterschiede in der Tiefenlage der Kristallinoberfläche hin:

- Die geringste Laufzeit der durch das kristalline Grundgebirge gelaufenen Welle zeigen, wie erwartet, die Profile V310 und V360. Nördlich des Sprengpunktes Villigen nimmt die Mächtigkeit der mesozoischen Sedimente schnell ab, und im Schwarzwald liegen die Profilpunkte ganz im Kristallin.

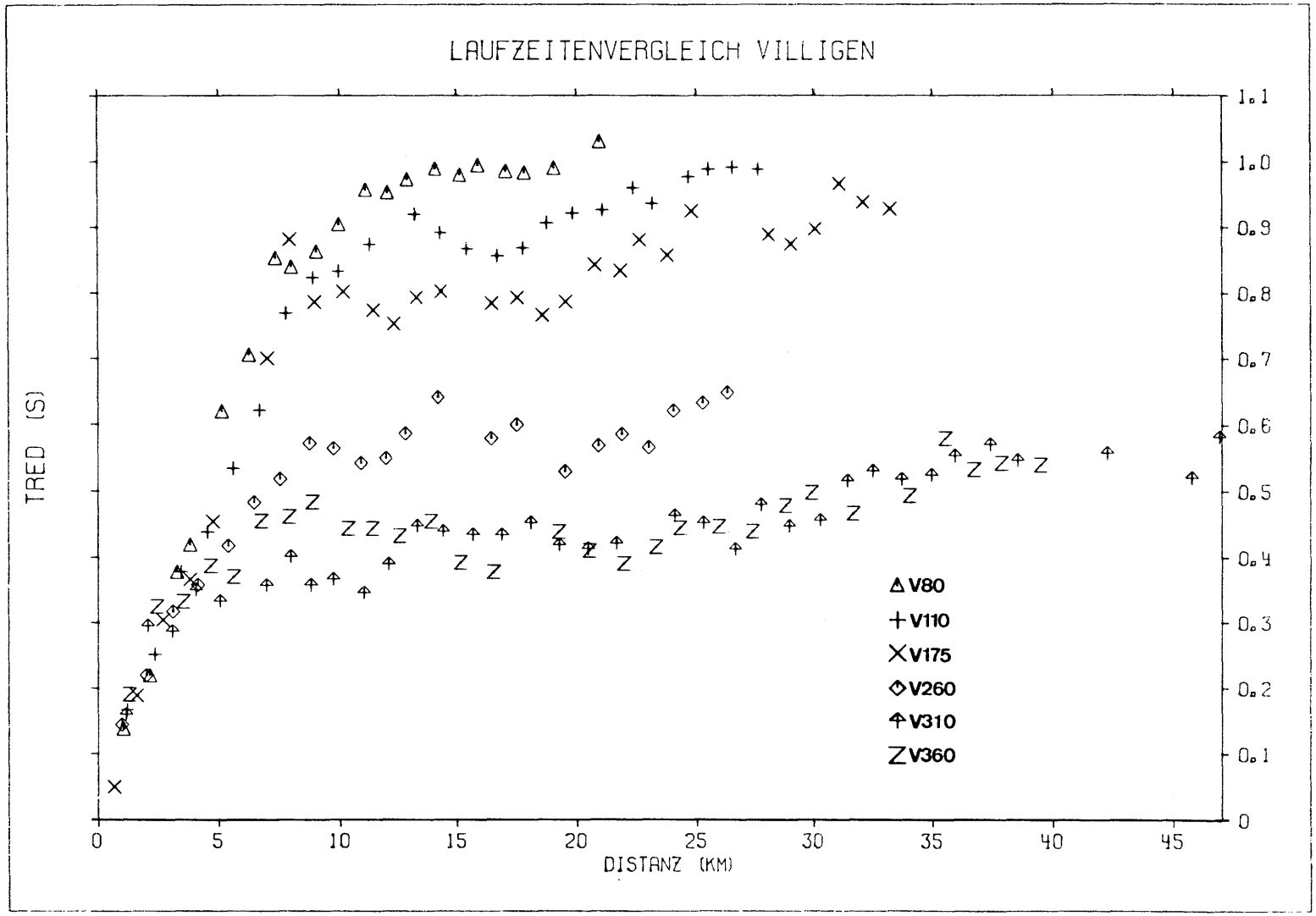


Abb.19: Reduzierte und korrigierte Laufzeiten der Ersteinsätze auf den Villigen-Profilen

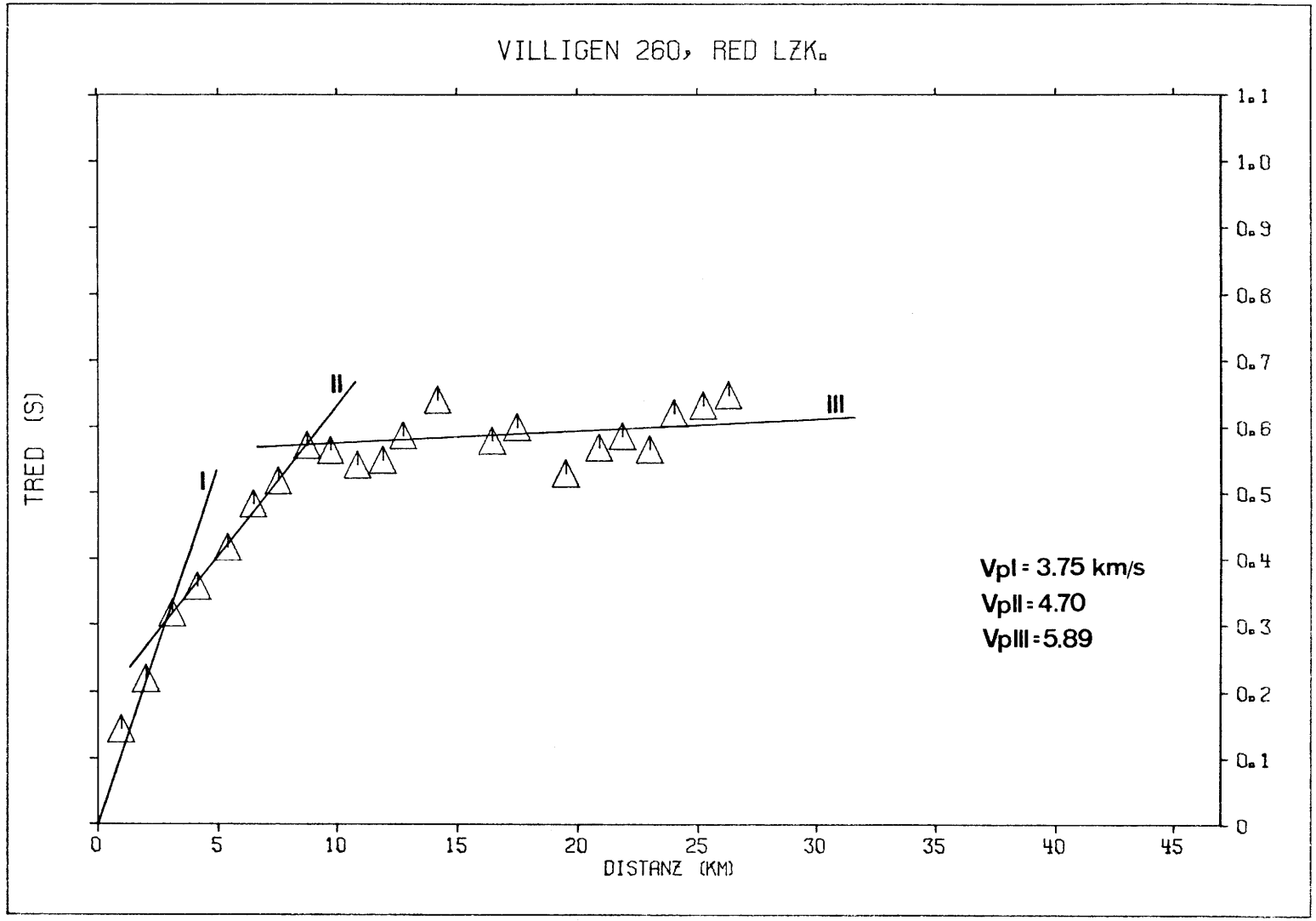


Abb.20: Reduzierte und korrigierte Laufzeiten der Ersteinsätze für das Profil V260 mit drei Laufzeitgeraden, die den Sedimenten, einer kristallinen Verwitterungszone und dem kompakten Grundgebirge zugeordnet werden.

- Demgegenüber sind die Einsätze auf dem nach Westen gerichteten Profil V260 im Tafeljura deutlich um etwa 0.1 s verzögert.

- Eine weitere Verzögerung derselben Phase um 0.25 s auf dem Profil V175 nach Süden kann durch das Abtauchen der Kristallinoberfläche und die zunehmende Mächtigkeit der langsameren Molasse-Sedimente erklärt werden.

- Auf den Profilen V80 und V110 nach Osten und Südosten würde man demgegenüber wieder geringere Laufzeiten erwarten; etwa vergleichbar denjenigen des Profils V260 oder durch die Molasse-Sedimente bedingt eher etwas grösser. In Wirklichkeit liegen hier die Ersteinsätze um über 0.4 s später als auf dem Profil V260.

Aus diesen Befunden kann man schliessen, dass die Profile V360, V310, V260 und V175 die erwartete Tendenz der Kristallintiefe und -topographie gut wiedergeben. Dagegen muss angenommen werden, dass für das Gebiet östlich der Aare und Limmat unerwartete Strukturverhältnisse vorliegen.

5.2.1.2 Randbedingungen

Die Profilanordnung und -lage bedingt einige Annahmen über die generelle Struktur des untersuchten Tiefenbereichs.

- Die sternförmige Anordnung der Villigen-Profile lässt zumindest im Nahbereich bis zu etwa 15 km Distanz einen ähnlichen Aufbau des Untergrundes erwarten.

- Für alle Profile muss die Extrapolation von Schichtgrenzen unter dem Sprengpunkt Villigen dieselbe Tiefenlage ergeben.

- Die Diskussion im vorangegangenen Abschnitt hat gezeigt, dass mit einer Einteilung in die drei Geschwindigkeitsbereiche die Messdaten in befriedigender Weise erklärt werden können:

  I Tertiäre und mesozoische Sedimente

  II Uebergangszone von der Basis des Mesozoikums in das unverwitterte Kristallin

  III Kompaktes kristallines Grundgebirge

- Die Geschwindigkeiten für die einzelnen Tiefenbereiche wurden zunächst aus einer gemittelten Korrelation der entsprechenden Laufzeitkurvenabschnitte ermittelt und dann iterativ für die einzelnen Profile angepasst. Die mittlere Geschwindigkeitsabfolge gibt Tabelle 3 wieder, wobei jeder Bereich noch einen Geschwindigkeitsgradienten aufweist, der durch die Schichtmächtigkeit und das angegebene Geschwindigkeitsintervall gegeben ist.

- Bedingt durch die Sedimentauflage und damit die grössere Tiefe sind die Geschwindigkeiten an der Grenzfläche von den Sedimenten zum Kristallin entsprechend höher als die im Schwarzwald an der Oberfläche gefundenen Werte. Der Geschwindigkeitsgradient entspricht etwa demjenigen des Schwarzwaldkristallins.

- Da die Profile nicht gegengeschossen sind, werden Aenderungen der Tiefenlage von Grenzflächen aus den Abweichungen der beobachteten Geschwindigkeiten von den mittleren wahren Geschwindigkeiten bestimmt.

- Laterale Geschwindigkeitsänderungen in den drei Strukturbereichen können nur indirekt erfasst werden, müssen aber als reell angenommen werden, wie sich an dem Profil Kaisten - Hallwilersee zeigt. Solche Geschwindigkeitsänderungen in derselben Schicht können durch Tiefenänderungen, d.h. Aenderung der lithostatischen Auflast, oder durch einen wechselnden Grad der Zerrüttung und Verwitterung bedingt sein. Letzteres kann Schwankungen der seismisch erfassten Kristallintiefe vortäuschen.

- Bei den nicht gegengeschossenen Profilen ist die oberflächennahe Struktur in grösserer Entfernung vom Schusspunkt nur schlecht belegt, da über das ganze Profil die gleiche Schichtabfolge vorausgesetzt werden muss.

- Das Bezugsniveau für die einzelnen "Ray Tracing"-Modelle liegt bei 400 m ü.M.

5.2.1.3 Strukturmodelle

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Voraussetzungen und Methoden führen zu den nun folgenden Strukturmodellen unter den Villigen-Profilen. Wie bei der vergleichenden Diskussion der Laufzeiten in Abschnitt 5.2.1.1 werden die Profile in azimutaler Abfolge entgegen dem Uhrzeigersinn behandelt. Die x bzw. + Symbole auf den Laufzeitdiagrammen kennzeichnen gemessene bzw. berechnete Werte.

TABELLE 3: ANFANGSWERTE DER GESCHWINDIGKEITEN IM UNTERGRUND

Bereich	Formation	Kompressionswellengeschwindigkeit v_p (km/s) und Zunahme in diesem Bereich
Sedimente	Mesozoikum	
	im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes (V310, V360, Kaisten-Ost, Profilanfang Kaisten-Süd)	3.3 - 3.4
	im mittleren Teil des Untersuchungsgebietes (V80, V110, V175)	3.6 - 3.8
	Tertiäre Molasse im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes, Hallwilersee-Nord	3.3 - 3.4
Uebergangszone Basis Mesozoikum - unverwittertes Kristallin	ca. 200 m	4.5 - 4.8
	ca. 100 m	4.8 - 5.2
	ca. 900 m	5.2 - 5.9
kompaktes (unverwittertes) kristallines Grundgebirge		5.9 - 6.2

Profile V360 und V310 (Abb.21 und 22)

Die mesozoischen Sedimente keilen auf den beiden nördlichen Profilen bei Entfernungen von 15 km und 9 km vom Sprengpunkt Villigen aus. Nach den geologischen Kartierungen kann in diesen Gebieten von einer weitgehend horizontalen Lagerung der Sedimente ausgegangen werden. Die dabei eingeschlossenen Mandacher und Mettauer Störungen können nur mit wesentlich kleinräumigeren Feldmessungen erfasst werden. Das Kristallin steigt ab Villigen von etwa 500 m unter dem 400 m-Bezugsniveau gleichmässig nach Norden und Nordwesten an. Die darunter liegende Uebergangs- bzw. Gradientenzone folgt parallel zur Kristallinoberfläche, um sich nach dem Auskeilen der Sedimente zu verdicken. Letzteres ist durch die geringere Kristallingeschwindigkeit an der sedimentfreien Oberfläche belegt. Inwieweit die Flexuren in den Gradientenzonen des Kristallins bei 10 km und 27 km Entfernung auf Profil V310 tektonisch oder petrographisch bedingt sind, kann hier nicht entschieden werden. An den Schnittpunkten mit dem Profil Kaisten-Ost (KAOST) ergeben sich innerhalb der Fehlergrenzen dieselben Tiefenwerte für das Kristallin.

Profil V260 (Abb.23)

Profil V260 liegt bis in etwa 12 km Entfernung auf dem Dogger des Tafeljura und verläuft dann an dessen Nordrand durch Keuper und Muschelkalk. Ab einer Entfernung von 20 km wurde in dem Modell unter dem Mesozoikum eine bei Wintersingen erbohrte Permo-Karbonschicht in die Rechnung einbezogen. Auf diesem Profil fallen vor allem die starken Schwankungen der Kristallintiefe auf. Die Mulde bei 12 bis 14 km Entfernung liegt in der Senke von Frick. Hier können langsame Talfüllungen von unbekannter Mächtigkeit eine zusätzliche Vertiefung der Kristallinmulde vortäuschen. Etwa bei Kilometer 15 kreuzt das Profil die Mettauer Störung. Der Geschwindigkeitsgradient im Kristallin scheint über die gesamte Profildistanz weitgehend konstant zu bleiben.

Profil V175 (Abb.24)

Die Messpunkte dieses Profils liegen zum grössten Teil auf tertiären und quartären Sedimenten. Bis zu einer Entfernung von 15 km vom Schusspunkt folgen darunter Teile des Tafeljura und des Faltenjura. Danach verläuft das Profil im zunehmend mächtiger werdenden Molassetrog des Mittellandes, der in der Modellstruktur entsprechend berücksichtigt wurde. Dagegen reichen die nördlich davon auf dem Jura liegenden Sedimente nicht aus, um die Laufzeitverzögerung zwischen 5 km und 12 km Entfernung zu erklären.

Die Kristallinoberfläche zeigt zwischen dem Sprengpunkt bei Villigen und dem Südrand des Faltenjura bei 11 km bis 12 km Entfernung eine deutliche Absenkung. Der Geschwindigkeitsverlauf im Kristallin zeigt keine lateralen Inhomogenitäten.

Profil V110 (Abb.25)

Das Profil kreuzt in ESE-Richtung das Aare-Tal, quert die Molasse-Sedimente nördlich der Lägeren-Kette und endet 10 km weiter in der Molasse nördlich von Zürich. Wie schon in Abschnitt 5.2.1.1 (Abb.19) diskutiert, sind dieses und das benachbarte Profil V80 durch eine ausgeprägte Laufzeitverzögerung gekennzeichnet. Diese Verzögerung kann durch die Wirkung der etwas langsameren Molasse-Sedimente nicht erklärt werden. Der Laufzeitbeitrag der Molasse lässt sich in etwa abschätzen, wenn man die etwas früheren Einsätze auf der Lägeren-Kette des Jura bei Kilometer 15 mit den umgebenden Werten vergleicht. Die Differenz beträgt ungefähr 0.05 s. Die gesamte Laufzeitverzögerung gegenüber dem nach Westen gerichteten Profil V260 beträgt dagegen 0.35 s. Dies führt bei der Interpretation zu einem starken Absinken der Kristallinoberfläche in Profilrichtung mit gleichbleibender Tiefenlage bis zum Profilende. Zusätzlich wird eine weitere Vertiefung am Nordrand der Lägeren-Kette beobachtet, die wohl derjenigen auf dem Profil V175 unter dem nördlichen Tafeljura entsprechen dürfte (Abb.24).

Profil V80 (Abb.26)

Das letzte der Villigen-Profile liegt östlich der Aare am Nordrand des Molassebeckens nördlich der Lägeren-Kette. Die Kristallinoberfläche auf diesem Profil zeigt einen ähnlichen Verlauf wie auf dem zuvor diskutierten Profil V110. Die anzunehmende weniger mächtige Molassedecke führt zu einer geringfügig kleineren Kistallintiefe. Daneben wird die Struktur durch das Fehlen der Faltenjurakette gegenüber dem vorigen Bild (Abb.25) vereinfacht. Der Befund einer unerwarteten Vertiefung der Kristallinoberfläche östlich der Aare wird auch hier voll bestätigt.

5.2.1.4 Vergleich der Geschwindigkeits-Tiefenfunktion für die Profile V80 und V260

Wie für die Geschwindigkeitsverteilung im Kristallin des Südschwarzwalds in Abschnitt 5.1.3 wurden dieselben Funktionen von zwei Profilen des Jura getrennt herausgegriffen. Abbildung 27 zeigt den Geschwindigkeits-Tiefen-Verlauf in Entfernungen von 9 km und 10 km auf den Profilen V260 und V80. Die Tabelle 4 enthält die genauen Geschwindigkeits- und Tiefenwerte.

Die Geschwindigkeitsabfolge unter dem Profil V260 gibt schematisch die mittlere Struktur für das Mesozoikum und für das darunterliegende Kristallin wieder.

Auf Profil V80 liegen an der Oberfläche etwa 100 m Molasse, deren Mächtigkeit natürlich lateral stark schwanken kann. Darunter sind das Mesozoikum und tieferliegende vermutete Permo-Karbon-Einlagerungen in einer einzigen Schicht mit einem linearen Geschwindigkeitsgradienten von 3.6 km/s auf 3.7 km/s zusammengefasst.

In 700 m bzw. 2100 m unter dem Bezugsniveau von 400 m ü.M. beginnt das hier erfasste kristalline Grundgebirge mit unerwartet niedrigen Geschwindigkeiten, die regional stark streuen können. Erst nach einer Uebergangszone von etwa 1 km Mächtigkeit wird in beiden Beispielen eine Geschwindigkeit von 5.6 km/s erreicht. Für Tiefen von über 4 km sind die Geschwindigkeiten wegen der relativ kurzen Profillängen nur sehr ungenau erfasst.

TABELLE 4: GESCHWINDIGKEITS- UND TIEFENWERTE FUER DIE PROFILE V80 UND V260

Tiefe (km)	V_p(km/s)
V80 (10 km Distanz)	
z = 0.00	v = 2.9
z = .10	v = 2.9
z = .10	v = 3.6
z = 2.12	v = 3.7
z = 2.12	v = 4.5
z = 2.32	v = 4.8
z = 2.42	v = 5.2
z = 3.67	v = 5.9
z = 5.00	v = 6.2
V260 (9 km Distanz)	
z = 0.00	v = 3.7
z = .72	v = 3.8
z = .72	v = 4.5
z = .92	v = 4.8
z = 1.02	v = 5.2
z = 1.92	v = 5.6
z = 5.00	v = 6.4

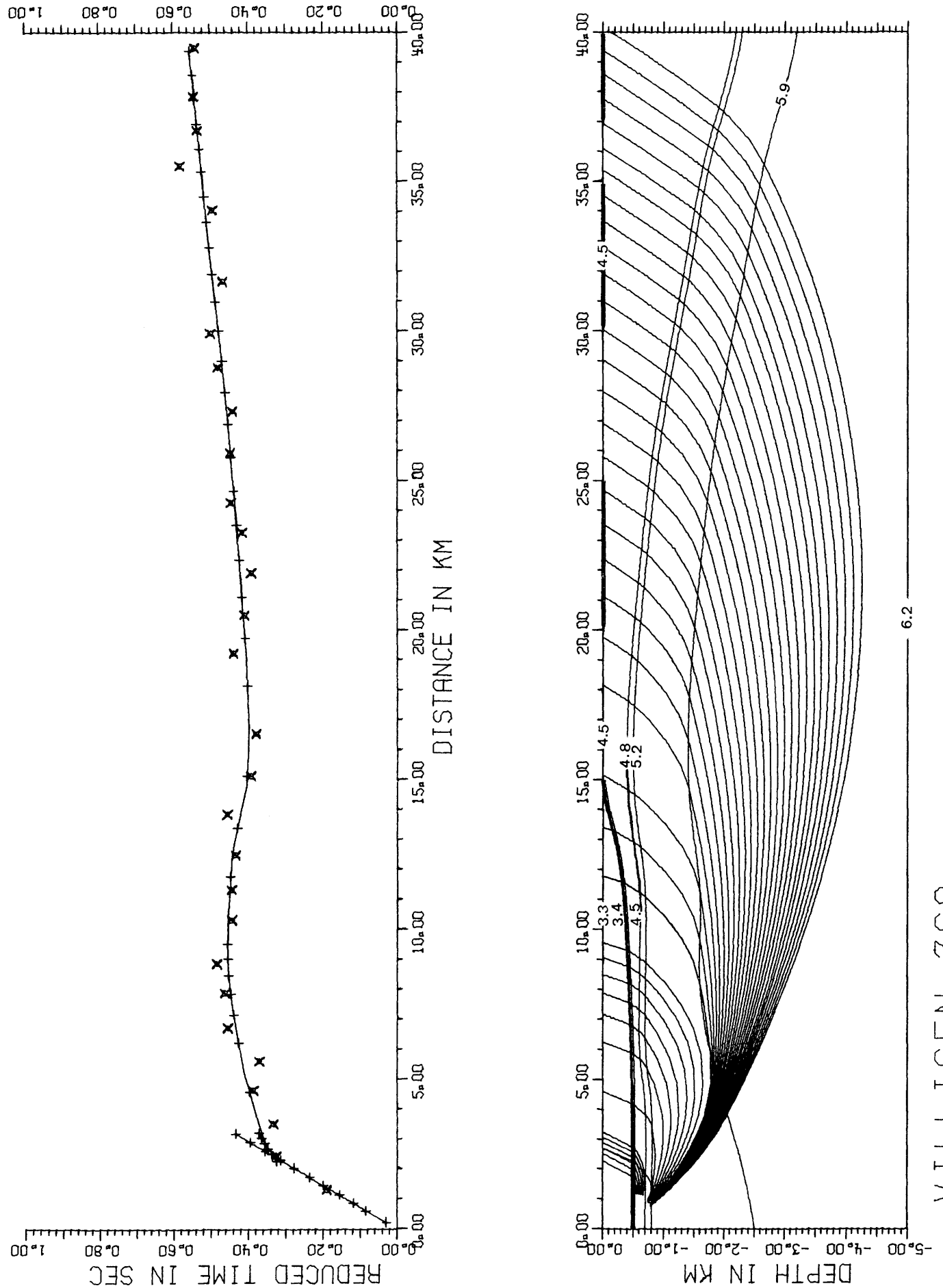
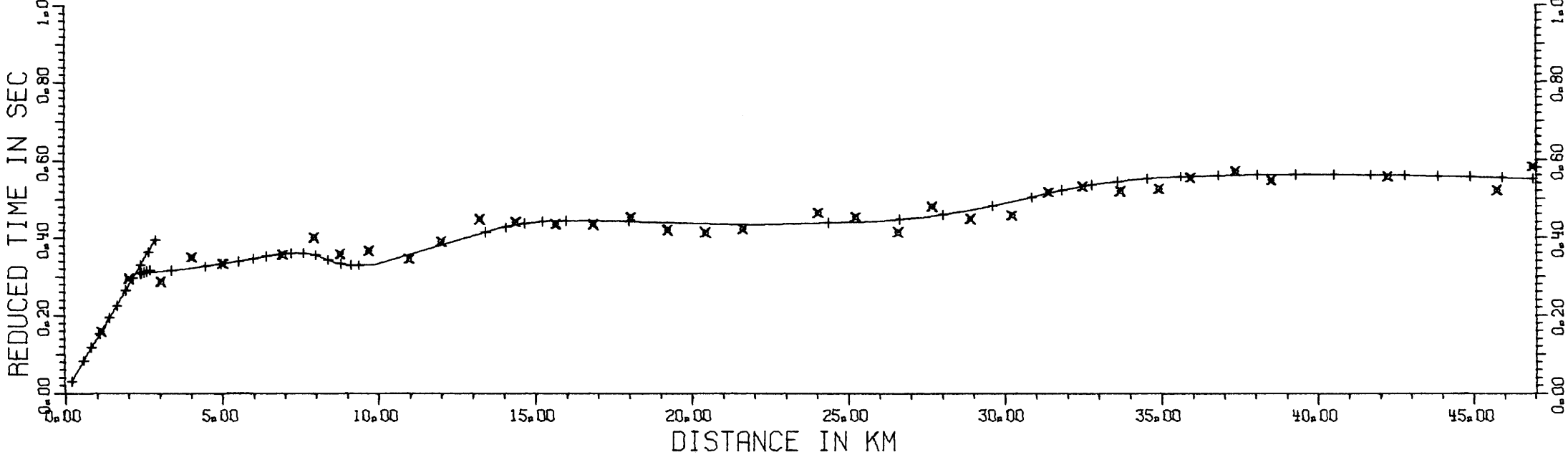
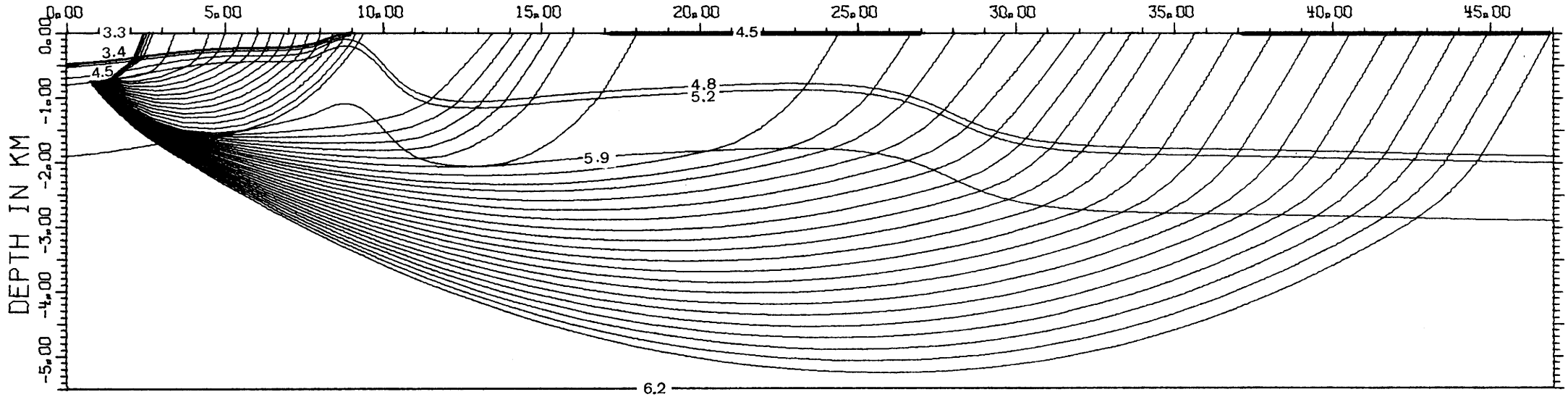


Abb.21: Strukturmodell für das Profil V360





VILLIGEN 310

Abb.22: Strukturmodell für das Profil V310

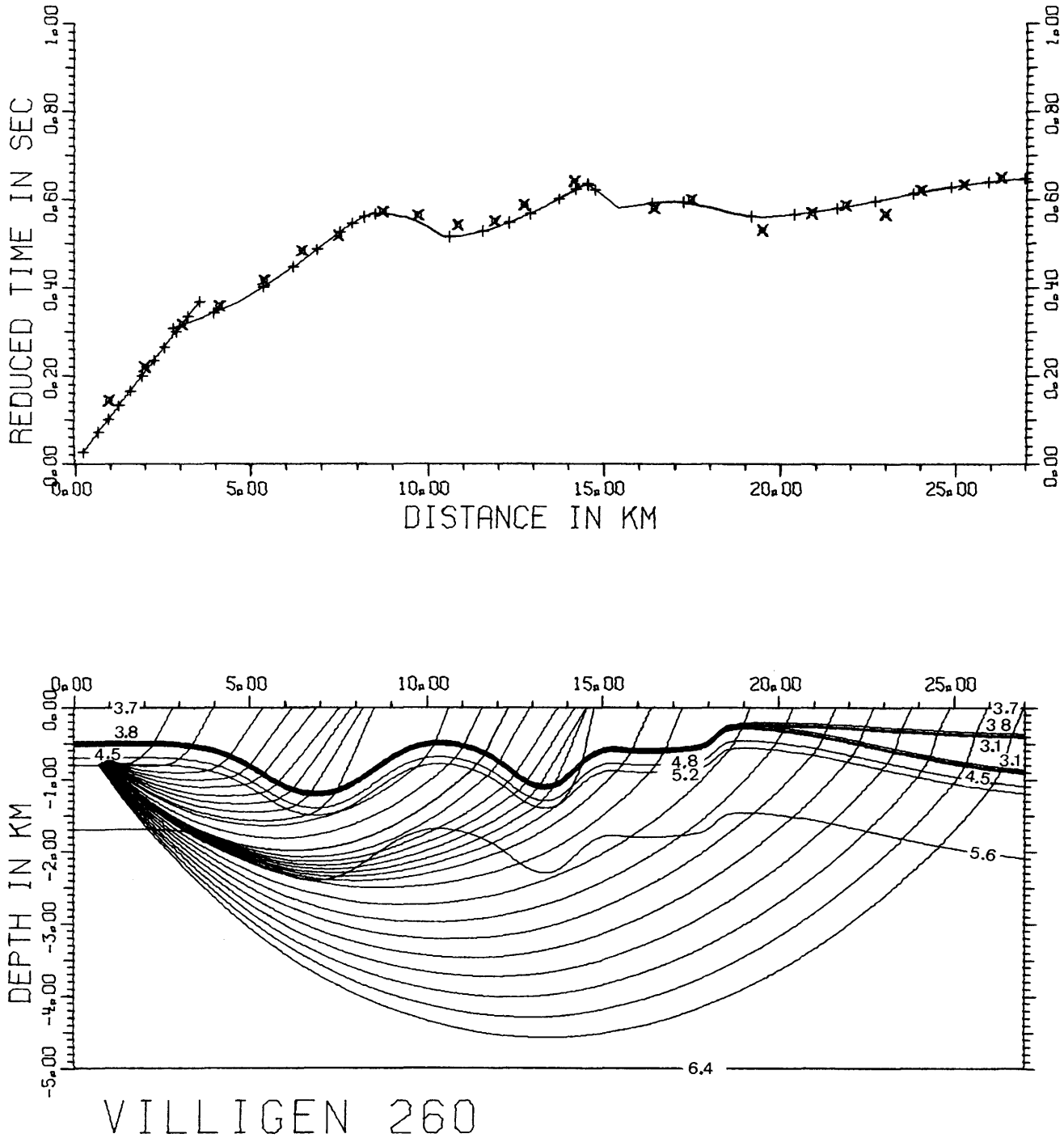


Abb.23: Strukturmodell für das Profil V260

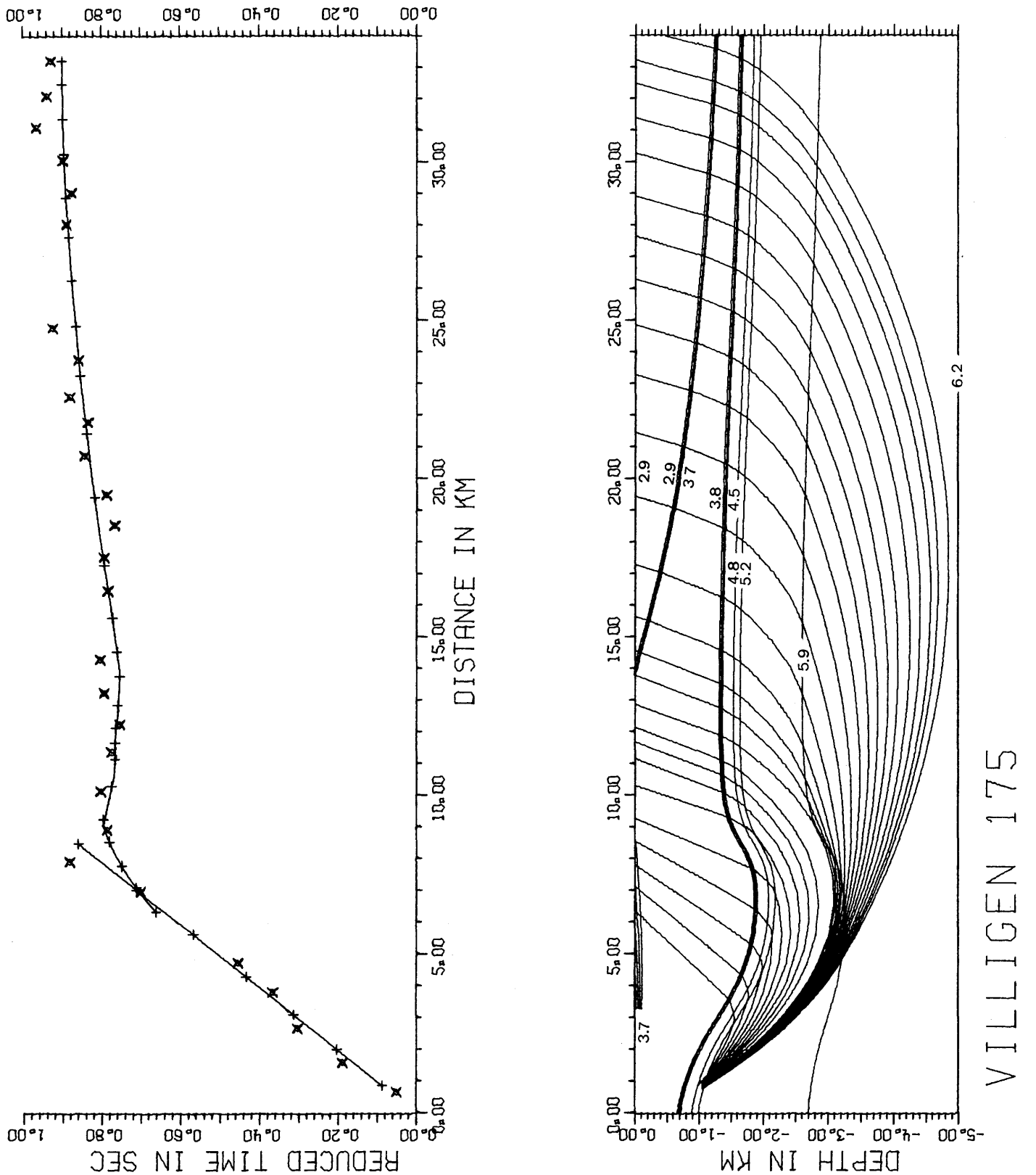


Abb.24: Strukturmodell für das Profil V175

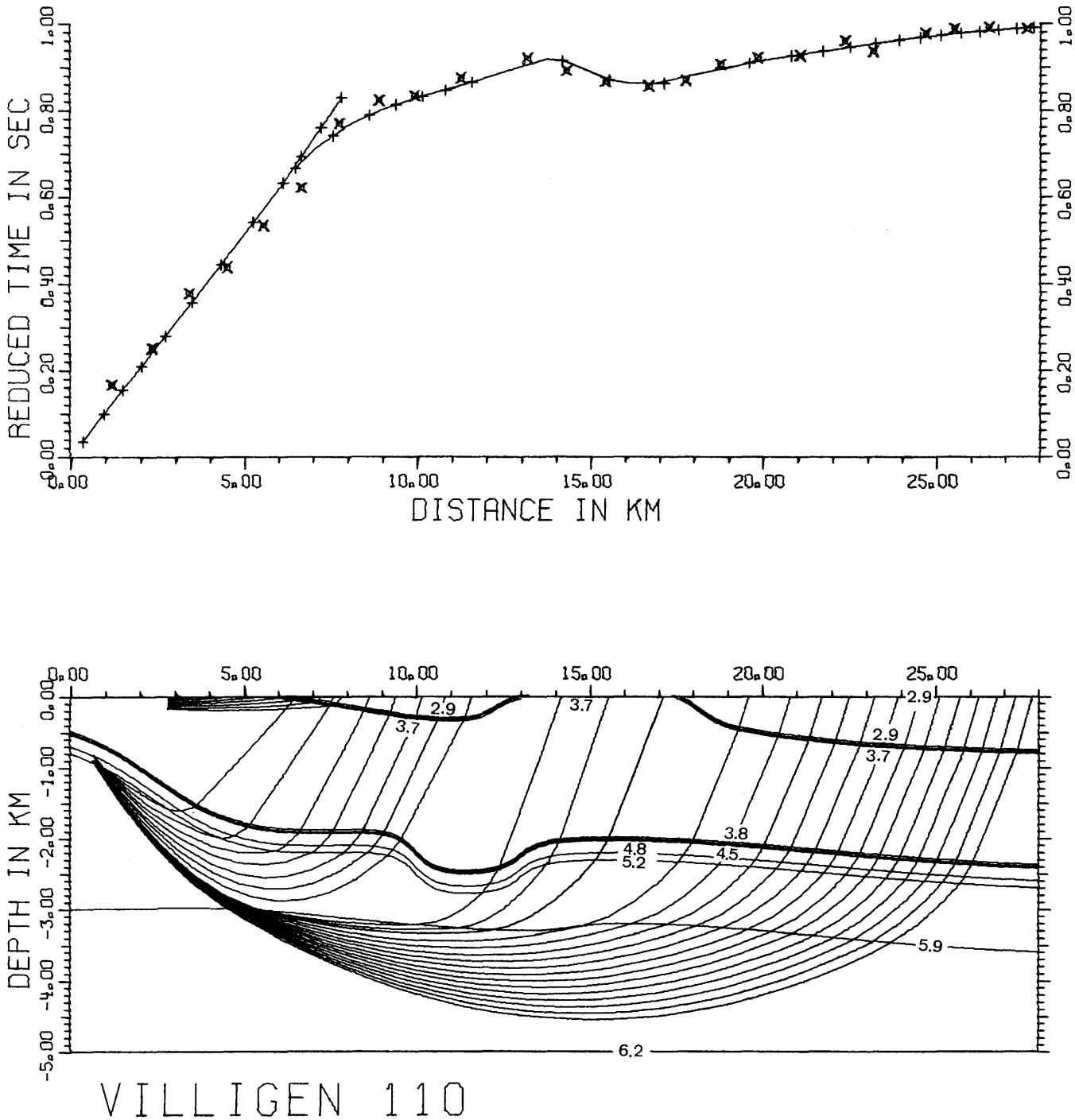


Abb.25: Strukturmodell für das Profil V110

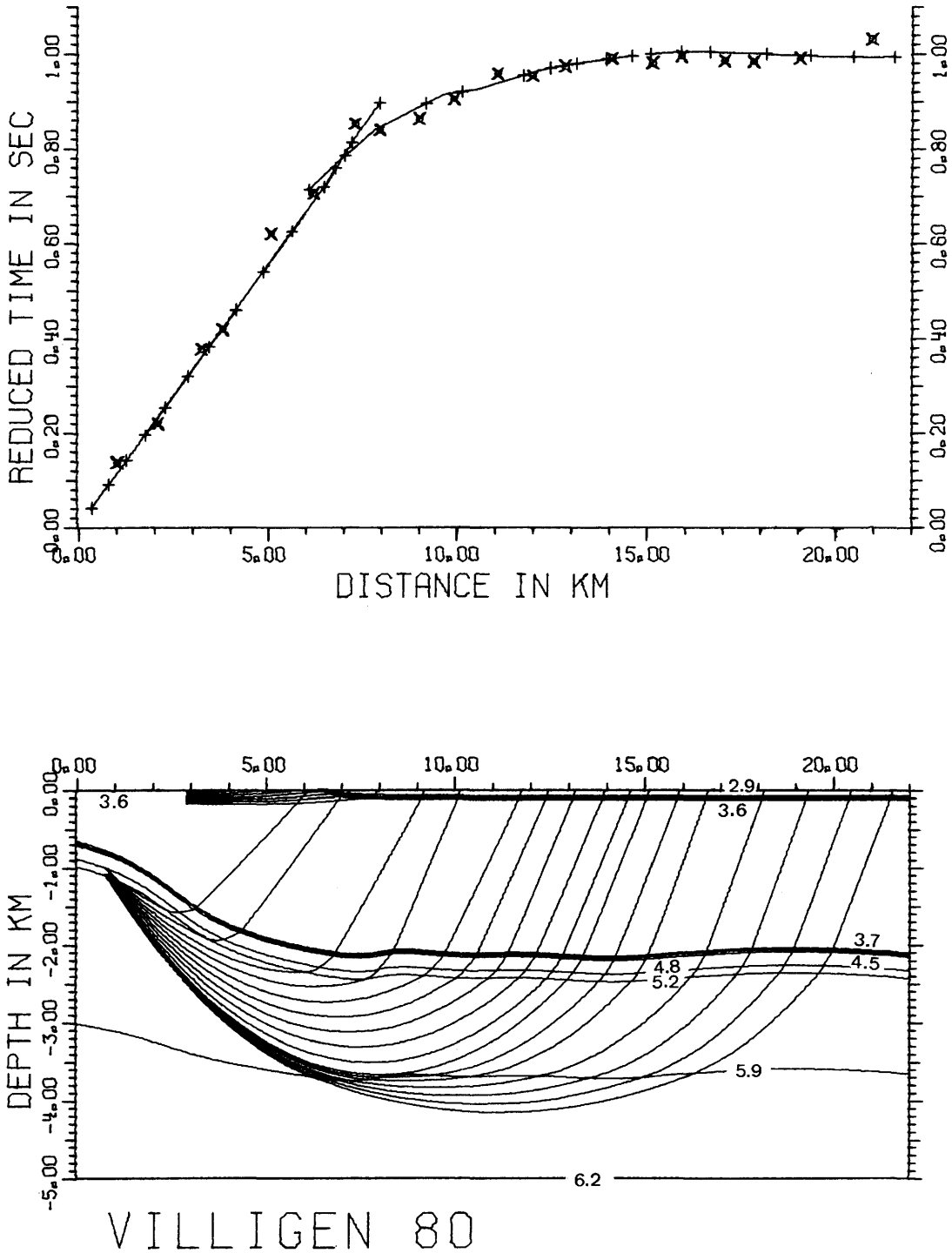


Abb.26: Strukturmodell für das Profil V80

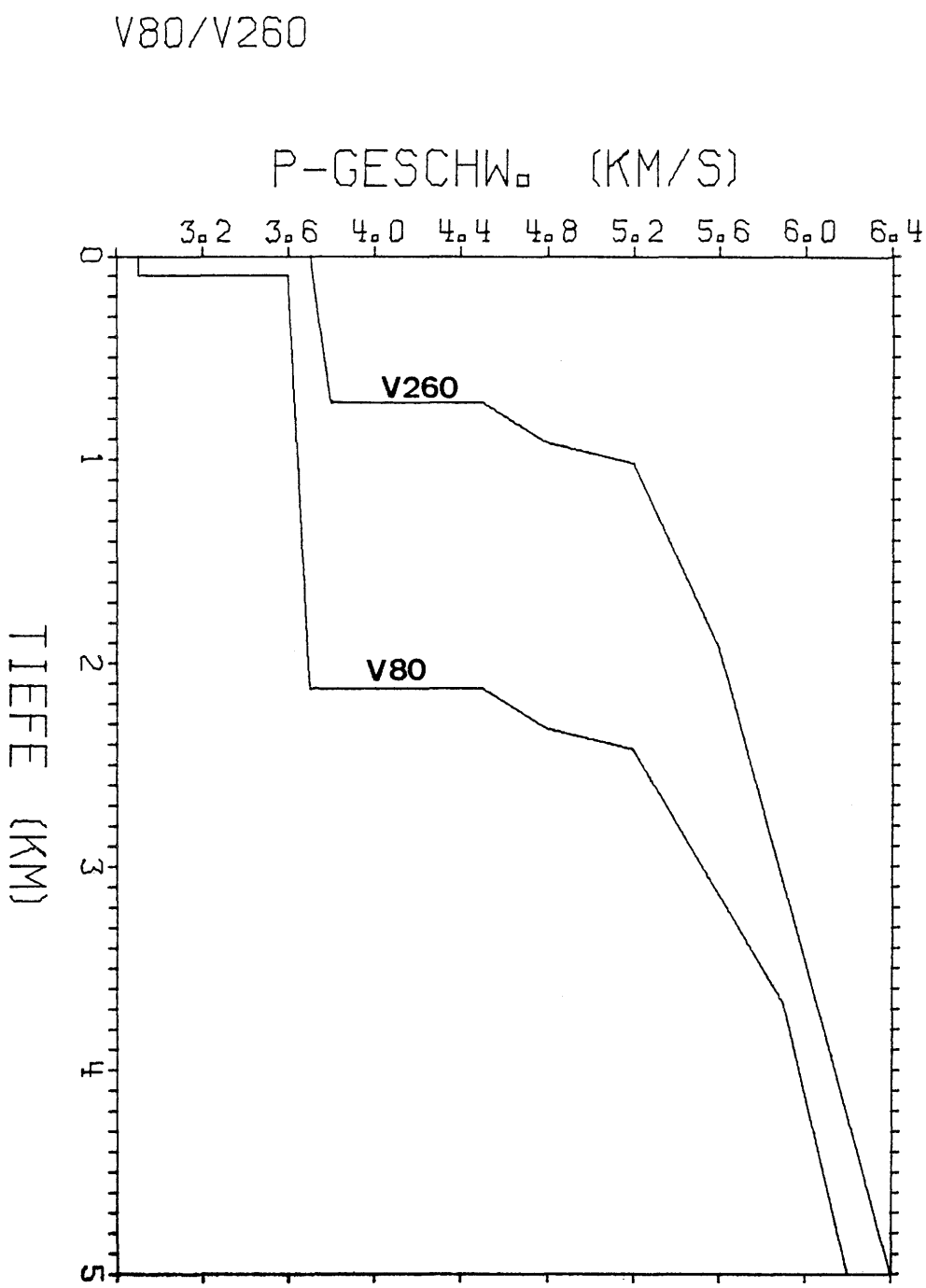


Abb.27: Geschwindigkeits-Tiefenfunktion unter den Profilen V80 und V260 in 10 km und 9 km Entfernung vom Sprengpunkt Villigen

5.2.2 Profile Kaisten - Ost (Rafzerfeld) und Kaisten - Hallwilersee

5.2.2.1 Randbedingungen

Wie bei der Diskussion der Villigen-Profile geschehen, sind auch bei den Profilen von Kaisten und vom Hallwilersee aus zuvor einige Randbedingungen zusätzlich zu den früher genannten zu erläutern. Dies bezieht sich vor allem auf das Profil Kaisten - Hallwilersee.

Obwohl dieses Profil als einziges von zwei Sprengpunkten aus untersucht wurde, bedingt die starke laterale Aenderung der geologischen Struktur, dass ohne weitere Informationen aus dem Mittelteil des Profils die Auswertung der Sprengungen bei Kaisten und am Hallwilersee allein keine abschliessende Bestimmung der Kristallinstruktur dazwischen erlauben. Die Hauptschwierigkeit in der Interpretation liegt darin, dass bei gleichbleibender geologischer Abfolge der mesozoischen Sedimente und des Kristallins infolge der nach Süden zunehmenden Tiefenlage dieser Schichten unter der Molasse eine ausgeprägte Geschwindigkeitszunahme in eben diesen Schichten auftritt. Aus Gründen der Auswertetechnik mussten die lateralen Geschwindigkeitsänderungen durch fiktive Grenzflächen (a, b, c in Abb.30) im Mesozoikum sowie im oberen und im tiefen Kristallin angenähert werden.

5.2.2.2 Strukturmodelle

Profil Kaisten - Ost (Rafzerfeld, KAOST) (Abb.28)

Das Profil von Kaisten nach Osten bis in das Rafzerfeld (Abb.28) liegt 4 km nördlich und parallel zum Profil V80 mit einem um 12 km weiter westlich liegenden Sprengpunkt (Abb.1). Bis zu einer Entfernung von 12 km besteht der Untergrund aus Keuper und Muschelkalk. Daran anschliessend folgen bis 17 km Entfernung Schotter des Aaretals. Der östlich der Aare anstehende Jura wird ab 25 km Entfernung von Molasse und Schottern des Rafzerfeldes überdeckt. Die Kristallinoberfläche sinkt östlich des Aaretals zwar deutlich ab; die Tiefe unter dem nur wenige Kilometer südlicher gelegenen Profil V80 wird dagegen bei weitem nicht erreicht. Die Sedimentbasis fällt demnach zwischen den Profilen Kaisten - Ost und Villigen 80 (V80) im Gebiet von Zurzach - Kaiserstuhl um etwa 1500 m nach Süden ein.

Profil Kaisten - Hallwilersee (Abb.29 und 30)

Das Strukturmodell des Profils Kaisten - Hallwilersee (KASUED - HSNORD) wird in zwei Abschnitten diskutiert, da die entlang dieses Profils stark variierende Oberflächengeologie die Auswertung wesentlich beeinflusst. Von Norden nach Süden quert das Profil Muschelkalk, Keuper und Tafeljura bis zu einer Entfernung von 10 km. Danach folgen 6 km Profilstrecke im Faltenjura. Die zweite Profilhälfte bis zum Hallwilersee liegt in den Schottern des Aaretals und auf Moränenrücken, die die Molasse bedecken.

Abbildung 29 gibt das aus den Beobachtungen von Kaisten nach Süden abgeleitete Strukturmodell wieder, welches im südlichen Teil weitgehend demjenigen von Profil V175 entspricht. Ob die auf den Profilen V110 und V175 gefundene Mulde in der Tiefenlage des Kristallins unter dem Faltenjura weiter westlich unter dem Profil Kaisten - Hallwilersee noch vorhanden ist, kann aus den vorliegenden Daten nicht mit Sicherheit entschieden werden. Die Kristallinoberfläche taucht gleichmässig nach Süden mit zunehmender Mächtigkeit der Molassesedimente ab. Die aus dem Modell berechneten Laufzeiten bestätigen die Beobachtungen hinreichend gut.

Betrachtet man wie in Abbildung 30 die Messungen vom Hallwilersee nach Norden, so ergeben sich, verglichen mit dem Profil von Kaisten nach Süden, deutliche Unterschiede. Das am Südende noch einfache Kaisten-Modell (Abb.29) kann die beobachteten Laufzeiten am südlichen Sprengpunkt nicht erklären. Nur eine deutliche Modifikation, die vor allem durch merklich höhere Geschwindigkeiten gekennzeichnet ist, führt zu einer zufriedenstellenden Uebereinstimmung.

Das stark schematisierte Strukturmodell erklärt die Beobachtungen von den Sprengpunkten Kaisten und Hallwilersee aus in befriedigender Weise. Die Detailstruktur und Geschwindigkeitsabfolge sollte aber nicht überbewertet werden. Vom Hallwilersee aus gesehen, verzögern sich die Ersteinsätze im nördlichen Profilteil deutlich, was auf eine geringere Geschwindigkeit im tiefen kristallinen Untergrund gegenüber demjenigen im Südteil des Profils hinweist. Dieser Tiefenbereich wird von den Sprengungen bei Kaisten nicht erfasst.

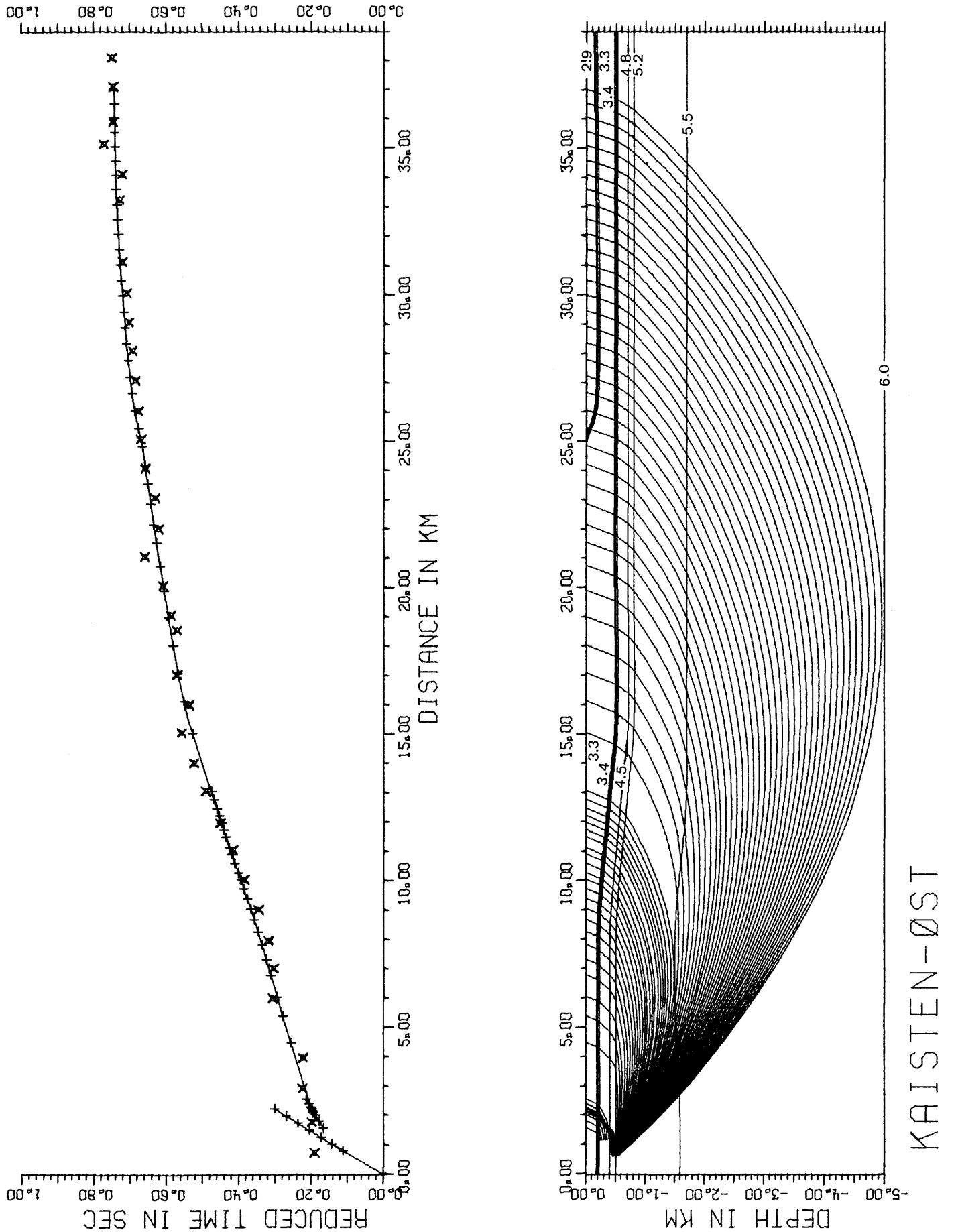


Abb.28: Strukturmodell für das Profil Kaisten - Ost, Rafzerfeld (KAOST)

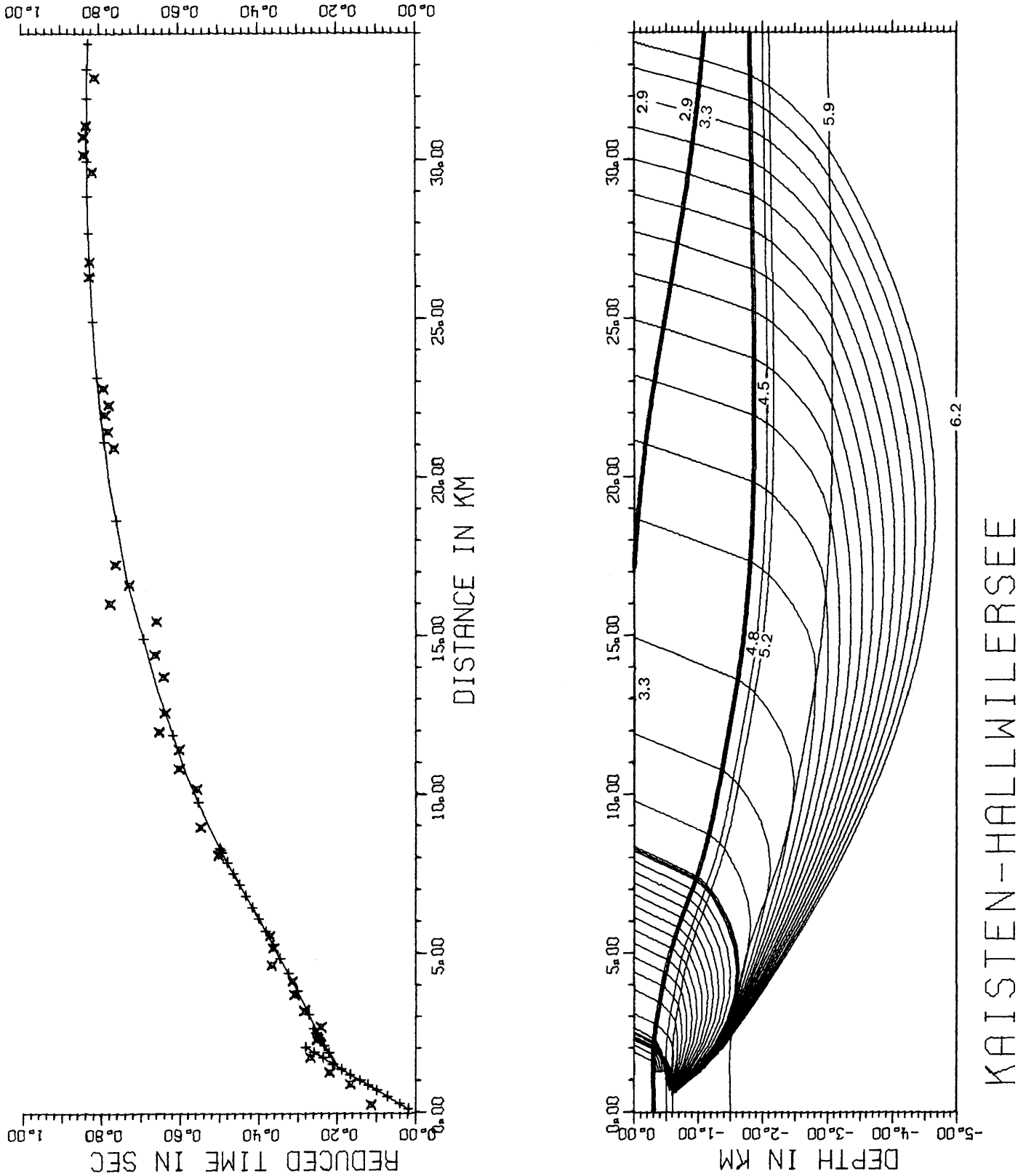


Abb.29: Strukturmodell für das Profil Kaisten - Hallwilersee (KASUED)

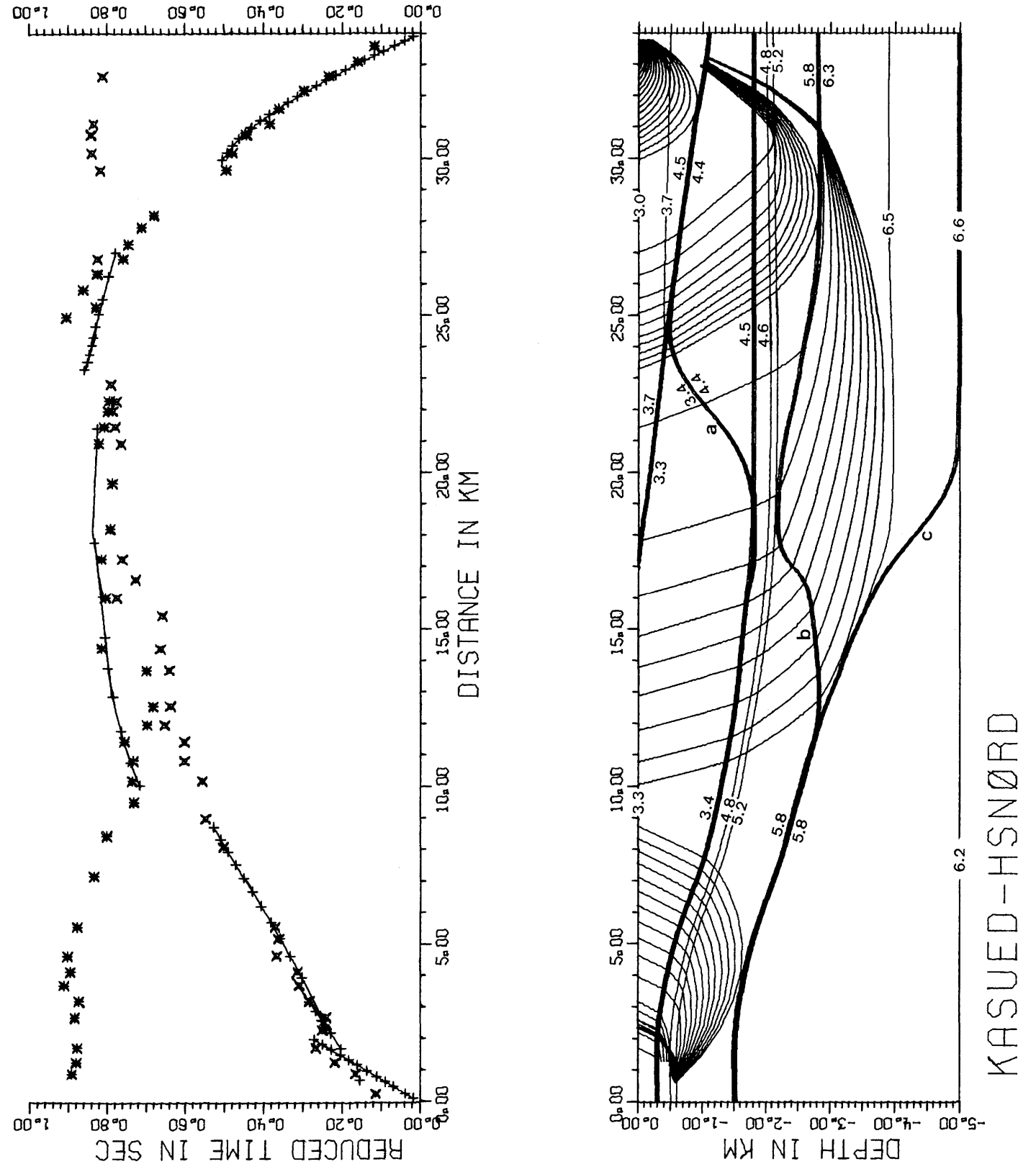


Abb.30: Strukturmodell für das gesamte Gegenschuss-Profil Kaisten - Hallwilersee (KASUED - HSNORD), abgeleitet aus den Messungen von Kaisten nach Süden und Hallwilersee nach Norden.
Die Grenzflächen a, b und c sind nicht reell, sondern deuten nur laterale Geschwindigkeitsänderungen an.

5.3 Tiefenlinienplan der Kristallinoberfläche aus den Profilen Villigen, Kaisten - Ost und Kaisten - Hallwilersee

Nachdem für alle verfügbaren refraktionsseismischen Profile Strukturmodelle in der Form von vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen vorliegen, kann daraus ein Tiefenlinienplan der Kristallinoberfläche unter dem Untersuchungsgebiet konstruiert werden.

Abbildung 31 zeigt einen detaillierten Tiefenlinienplan mit der Lage der einzelnen Messpunkte als Hintergrund. Entsprechend der Profildichte wurden zuverlässigere Tiefenwerte in Profilnähe durchgezogen und extrapolierte oder vermutete Bereiche mit durchbrochenen Linien gekennzeichnet. Die Aequidistanz der Isolinien beträgt 200 m bei kleinen Linienabständen und 100 m bei grösseren. Die Tiefenangaben der Isolinien beziehen sich auf Meeresniveau im Gegensatz zu den vertikalen Strukturmodellen, in welchen das Bezugsniveau bei 400 m ü.M. liegt.

Unter Berücksichtigung der Fehlerabschätzung in Abschnitt 6 können einige markante Befunde über die Tiefenlage des Kristallins deutlich herausgestellt werden.

- Die Kristallinoberfläche fällt im nördlichen Teil steiler nach SSE ein als weiter südlich des Rheins.

- Dem allgemeinen Einfallen nach Süden sind deutliche West-Ost streichende Schwankungen in der Tiefenlage überlagert. Im Westteil sind dies zwei Mulden auf dem Profil V260 und die Andeutung eines Rückens unter dem Profil Kaisten - Hallwilersee. Oestlich davon folgt die von Norden sehr steil einfallende Mulde unter den Profilen V80 und V110 bis zu einer Tiefe von 2100 m unter Meeresniveau. Der Wiederanstieg an der südlichen Begrenzung der Mulde wird durch den generellen Abfall in dieser Richtung abgeschwächt.

- Die östlichen Ausläufer des Faltenjura sind etwa ab Aarau in der Tiefe von einer zusätzlichen kleinen Mulde im Kristallin begleitet.

- Nach Süden deutet sich mit dem Reusstal als Achse ein relatives Hoch von etwa 200 m an.

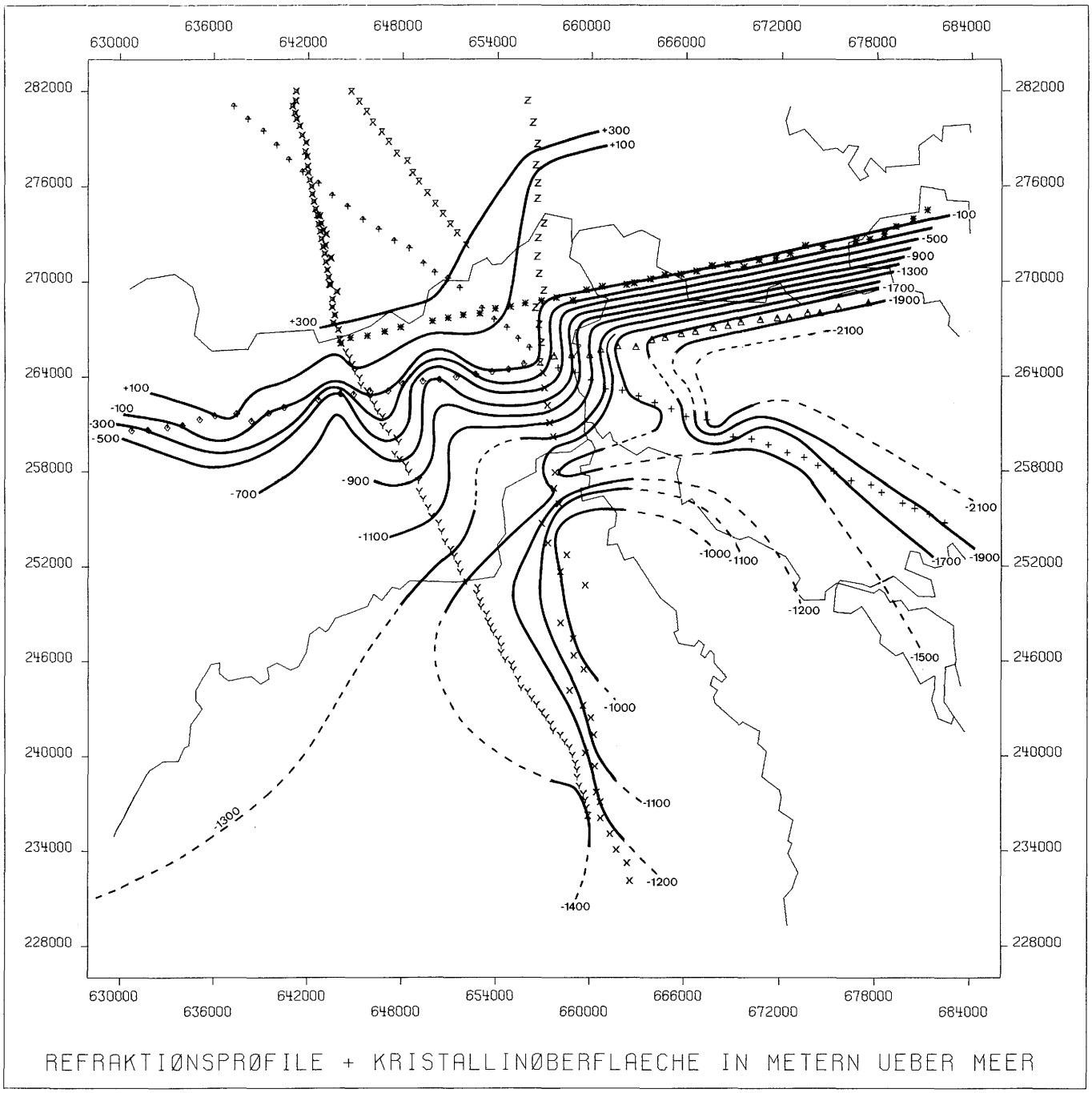


Abb.31: Tiefenlinienplan der Kristallinoberfläche unter den nordöstlichen Ausläufern des Schweizer Jura in Metern ü.M. auf einem Lageplan der Profilmesspunkte

6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die regionalen refraktionsseismischen Messungen als Teil des Geophysikalischen Untersuchungsprogramms Nordschweiz hatten zum Ziel, die Tiefenlage der Grundgebirgsoberfläche und die Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen der an dieser Grenzfläche anstehenden Gesteine zu erfassen. Diese Aufgabe wurde in zwei Teilabschnitten angegangen:

- die Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten in dem an der Oberfläche anstehenden kristallinen Gestein des Südschwarzwalds;

- die Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten in den Sedimenten und in dem darunter liegenden Kristallin im Untersuchungsgebiet der Nordschweiz mit der Erstellung eines Tiefenlinienplans dieser Grenzfläche.

Die Datenerfassung erfolgte in vier zeitlichen Abschnitten in der Zeit von Mai 1981 bis Mai 1982:

(1) auf 7 sternförmig von einem Steinbruch bei Villigen ausgehenden Refraktionsprofilen bis zu einer Entfernung von 47 km;

(2) mit zwei gegengeschossenen Refraktionsprofilen zwischen Hallwilersee im Süden, Kaisten am Rhein und Todtmoos/ Schwarzwald im Norden;

(3) Durch zusätzliche Refraktionsmessungen der Firma Prakla-Seismos auf ausgewählten Messabschnitten des Profils Hallwilersee - Todtmoos;

(4) Ergänzungsmessungen auf einem Refraktionsprofil von Kaisten nach Osten parallel zum Rhein.

Die Daten wurden anschliessend mit den heute üblichen Methoden der digitalen Datenverarbeitung aufbereitet und stehen in Form von analogen Seismogrammontagen und auf Magnetband in digitaler Form zur Verfügung. Neuere Auswerteverfahren für die Berechnung von Laufzeiten und synthetischen Seismogrammen sowie die "Ray Tracing"-Methode erlauben es, repräsentative Modelle der Geschwindigkeits-Tiefen-Struktur für die Profile in dem Untersuchungsgebiet abzuleiten.

Südschwarzwald

Im Südschwarzwälder Gneisgebiet zwischen Kaisten und Todtmoos liegt die Geschwindigkeit der Kompressionswellen an der Oberfläche je nach Verwitterungsgrad zwischen 2.2 km/s und 4.5 km/s. Die Streuung in den oberflächennahen Bereichen deutet darauf hin, dass mit den hier angedeuteten Messmethoden, das heisst Beobachtung über grosse Entfernungsbereiche,

die Detailstruktur nicht erfasst werden kann. Um diese Information zu erhalten, müsste über den ganzen Entfernungsbereich zwischen Kaisten und Todtmoos eine kleinräumige Detailuntersuchung vorgenommen werden. Es muss angenommen werden, dass laterale Aenderungen in der Mächtigkeit der oberflächennahen Verwitterungszone auftreten können. Unter dieser Verwitterungszone steigt die Geschwindigkeit relativ stetig von 5.0 km/s auf 5.4 - 5.5 km/s in 1 km Tiefe an.

Sämtliche Daten der vorliegenden Untersuchung liefern in 3 km Tiefe Geschwindigkeitswerte, die deutlich unter 6 km/s liegen. Diese niedrigen Werte deuten darauf hin, dass in diesem Gebiet insgesamt eine tiefreichende Verwitterungs- und Zerrüttungszone angenommen werden muss.

Mit den Messungen erfasste Granitgebiete und ein speziell dafür vorgesehener Profilabschnitt der Firma Prakla-Seismos zeigen in dem erfassten Tiefenbereich keine signifikanten Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Gneis und Granit.

Untersuchungsgebiet in der Nordschweiz

Die Geschwindigkeits-Tiefenstruktur basiert in diesem Teil des Untersuchungsgebietes auf einem Profilfächer von Villigen aus, dem gegengeschossenen Profil zwischen Kaisten und Hallwilersee sowie auf dem Profil Kaisten - Ost.

Bei der Auswertung wurden die Mächtigkeiten der oberflächennahen tertiären Molasse-Sedimente, soweit sie bekannt sind, berücksichtigt. Kleinräumige laterale Mächtigkeitsschwankungen konnten mit dem verwendeten Messverfahren dagegen nicht erfasst werden. Für die darunter liegenden mesozoischen Schichten wurde an der Kontaktfläche eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3.7 km/s angenommen, die bis auf etwa 3.8 km/s an der Sedimentbasis ansteigt.

Die schon in den oberflächennahen Bereichen des Schwarzwaldkristallins gefundene Verwitterungszone hat hier unter der Sedimentbasis eine Mächtigkeit von etwa 300 m, in der die Geschwindigkeit auf 5.2 km/s ansteigt. Geschwindigkeiten von 5.6 km/s bzw. 6 km/s werden etwa 1000 m bzw. 2300 m bis 2500 m unter der Sedimentbasis erreicht.

Die Geschwindigkeits-Tiefen-Strukturen unter den einzelnen Profilen wurden abschliessend zu einem Tiefenlinienplan der Kristallinoberfläche im Gebiet des nordöstlichen Schweizer Jura und der angrenzenden Molassegebiete zusammengefasst (Abb.31). Der Tiefenlinienplan stimmt mit den Werten aus Bohrungen bei Böttstein, Wintersingen und Zurzach gut überein.

Neben dem zu erwartenden Absinken dieser Grenzfläche nach SSE fallen mehrere zusätzliche Eintiefungen auf. Die tiefste Mulde liegt mit etwa 2100 m unter Meeresniveau östlich des Aaretals und nördlich der Lägerenkette. Ob diese Mulde mit den weiter westlich folgenden Eintiefungen unter dem Profil V260 und südlich davon zusammenhängt, kann aus den vorliegenden Messungen allein nicht geklärt werden.

Die gebietsweise unerwartet grosse Tiefenlage der hier kartierten Kristallinoberfläche, die erstmals von BINDSCHAEDLER [1982] in einer Vorauswertung der Villigen-Profile nachgewiesen wurde, kann entweder durch mächtigere mesozoische Formationen, durch einen darunterliegenden Permo-Karbontrog oder eine Kombination von beidem erklärt werden. Es kann weiter hinzukommen, dass in diesem Gebiet das kristalline Gestein so stark zersetzt ist, dass der seismisch kartierbare Horizont mit einer Geschwindigkeit von über 4.5 km/s erst in grösserer Tiefe erfasst wird. Die unerwartet geringe Geschwindigkeit des Kristallins spricht für diese Erklärung.

Bei den vorherrschenden Frequenzen zwischen 10 Hz und 15 Hz der Kompressionswellen auf den Villigen-Profilen im Entfernungsbereich bis zu 40 km und bei mittleren Geschwindigkeiten von 4 km/s für die Sedimentauflage beträgt die durchschnittliche Wellenlänge etwa 300 m. Dieser Betrag stellt ein Mass für das Auflösungsvermögen der hier angewandten Methode der Refraktionsseismik dar. Er liegt in derselben Grössenordnung, wie der der bei der Fehlerabschätzung ermittelten ± 150 m. Um mit Sicherheit eine höhere Auflösung der Tiefenstruktur zu erhalten, muss von der hier durchgeführten grossräumigen Regionaluntersuchung auf ein wesentlich dichteres Netz an Refraktionsprofilen bzw. auf die Methode der Reflexionsseismik übergegangen werden.

7. FEHLERABSCHAETZUNG

Bei der Fehlerbetrachtung muss man zwei Quellen der Ungenauigkeit unterscheiden.

Zum einen sind dies Fehler, die durch die Lokalisierung des Messpunktes im Gelände, durch die Datenverarbeitung und durch die Genauigkeit bei der Bestimmung von Laufzeiten der Ersteinsätze gegeben sind. Diese Fehler lassen sich in Form einer Zeitungenauigkeit aufaddieren und liegen zusammen bei etwa ± 0.02 s. Das entspricht je nach der in Frage kommenden Geschwindigkeit einer Tiefenungenauigkeit von ± 80 m bis ± 120 m.

Die zweite Fehlerquelle ist schwerwiegender und die Ursachen sind schwieriger zu erfassen. Fehler dieser Art werden verursacht durch die Unsicherheit der Zuordnung von Ersteinsätzen zu einzelnen Laufzeitästen und damit durch die Ungenauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung für einzelne

Schichten. Die Schichtgeschwindigkeiten können in Schusspunktnähe noch relativ gut bestimmt werden. Bei nichtgegengeschossenen Profilen oder grossen Schusspunktabständen wird vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeiten einzelner Schichten sich nicht ändern. Diese Voraussetzung ist häufig aber sicher nicht erfüllt, wie das Beispiel des Profils Kaisten - Hallwilersee zeigt. Der Fehler wird also mit zunehmender Entfernung grösser werden. Eine weitere Ungenauigkeit wird durch oberflächennahe Strukturschwankungen verursacht, die, falls sie nicht erkannt werden, Aenderungen der Tiefe einer Grenzfläche vortäuschen. Hierzu gehört ebenfalls der Fehler, welcher bei der Höhenkorrektur durch Unsicherheiten in den Korrekturgeschwindigkeiten hervorgerufen wird.

Bei diesen Betrachtungen bleibt natürlich ganz offen, inwieweit es sich bei dem kartierten Horizont in Wirklichkeit tatsächlich um die Kristallinoberfläche handelt, oder ob wechselnde Mächtigkeiten der Verwitterungszone, Tiefenänderungen vortäuschen können.

8. DANK

Abschliessend möchten wir uns bei den zahlreichen Institutionen, ohne deren Unterstützung und Entgegenkommen diese Studie nicht möglich gewesen wäre, bestens bedanken.

Besonderer Dank gebührt den zuständigen kantonalen Behörden für die Bewilligung der Sprengungen bei Kaisten und Fahrwangen und den dazugehörigen seismischen Messungen.

Den Gemeindeverwaltungen von Fahrwangen/AG, Kaisten/AG und Häg-Ehrsberg/Schwarzwald sind wir für ihre bereitwillige Zustimmung zu den Bohrungen und Sprengungen auf ihrem Gemeindegebiet zu Dank verpflichtet. Das grosszügige Entgegenkommen des Landschaftschutzverbandes Hallwilersee, der betroffenen Grundeigentümer sowie des Kreisforstamtes II, Aarau und der Forstdirektion Südbaden in Freiburg i.Br. trug wesentlich zum Erfolg der Untersuchungen bei.

Die Sprengungen der Portland-Cement-Werke, Würenlingen-Siggenthal AG, lieferten die seismische Energie für die Messungen von Villigen aus. Sie bilden einen wichtigen Beitrag zu den regionalen Untersuchungen.

Das Geophysikalische Institut der Universität Karlsruhe erleichterte in dankenswerter Weise die formale Abwicklung und die Untersuchungen auf deutscher Seite. Den Teilnehmern aus den geophysikalischen Hochschulinstituten von Clausthal, Frankfurt/Main, Karlsruhe, München und Zürich sowie des Geowissenschaftlichen Observatoriums Schiltach sei bestens für ihren Einsatz gedankt.

9. LITERATURVERZEICHNIS

BERCKHEMER, H.: MARS 66, Eine Magnetbandapparatur für seismische Tiefensondierung. Geophys. 36, 501-518, 1970.

BINDSCHAEDLER, A.: Struktur und Tiefenlage des Schwarzwaldmassivs unter der Nordschweiz. Diplomarbeit ETH Zürich, 105 p., 1982.

ČERVENÝ, V., MOLOTKOV, I.A., PŠENČÍK, 1.: Ray Method in Seismology. Univ. Karlova, Praha, 214 p., 1977.

FUCHS, K., MÜLLER, G.: Computation of Synthetic Seismograms with the Reflectivity Method and Comparison with Observations. Geophys. J.R. astr. Soc. 23, 417-433, 1971.

GEBRANDE, H.: A Seismic-Ray Tracing Method for Two Dimensional Inhomogeneous Media. In: Explosion Seismology in Central Europe, P. Giese, C. Prodehl, A. Stein (eds.), 162-167, Springer, Heidelberg, 1976.

METZ, R.: Geologische Landeskunde des Hotzenwalds. Moritz Schauenburg Verlag, Lahr/Schwarzwald, 1980.

RYBACH, L.: Refraktionsseismische Untersuchungen im Raum Aare-, Limmat- und Surbtal. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 5, 49 p., 1962.

SIERRO, N.: Kompressionswellen-Geschwindigkeiten in den oberflächennahen Bereichen des Schwarzwald-Kristallins. Diplomarbeit ETH Zürich, 196 p., 1982.

SPICHER, A.: Tektonische Karte der Schweiz., Hsg. Schweizerische Geologische Kommission, 1972a.

SPICHER, A.: Geologische Karte der Schweiz., Hsg. Schweizerische Geologische Kommission, 1972b.