

# Tele- und Reflektionsseismik: Einblicke in die Tiefenstruktur der Baikalregion

Ein Vortrag von Daniel Dörner

08.06.2006

# Inhalt

1. Kurze Einführung in die seismologische Begriffe.
2. Weshalb wurden seismische Methoden in der Baikalregion angewendet.
3. Vorstellung und mögliche Interpretationen ausgewählter Beispiele.

# Kurze Einführung in die Seismik

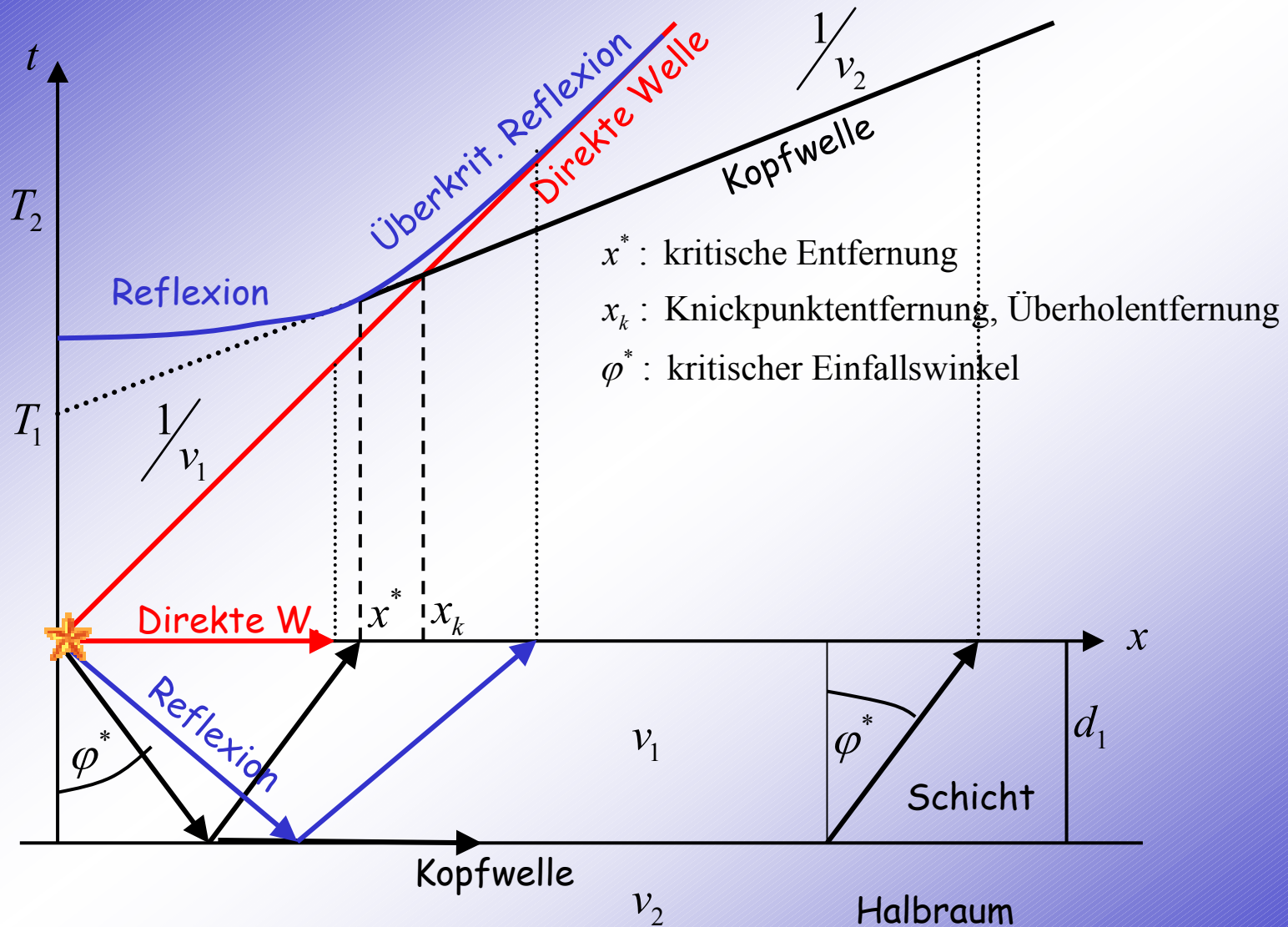
- Reflektionsseismik (es werden die seismischen Wellen ausgewertet, die an Grenzschichten unterhalb der Messregion reflektiert werden).
- Refraktionsseismik (es werden die seismischen Wellen ausgewertet, die an Grenzschichten refraktiert werden).
- Reflektions- und Refraktionsseismik werden v.a. dann benutzt, wenn oberflächennahe Regionen bzw. die Erdkruste untersucht werden sollen. Es werden künstliche Quellen verwendet.
- Teleseismik (Verwendung der seismischen Wellen von globalen Erdbeben, um etwas über den tiefen Untergrund unterhalb des (regionalen) Netzwerkes seismischer Stationen zu erfahren).
- Bei der herkömmlichen Teleseismik wird ein regionales Stationsnetz in der Untersuchungsregion, z.B. der BRZ aufgebaut. Dieses regionale Netz zeichnet globale Erdbeben auf, die ausgewertet werden um Informationen über den Untergrund der Untersuchungsregion zu erhalten.

- Bei der inversen Teleseismik werden Erdbeben ausgewertet, die unter der Untersuchungsregion entstanden sind und von den Stationen des globalen seismischen Netzwerkes aufgezeichnet wurden, wobei allerdings diverse Korrekturen angebracht werden müssen.
- Von einer Inversion wird gesprochen, wenn versucht wird, aus Messdaten, die an der Erdoberfläche aufgezeichnet wurden, auf die Strukturen des Erdinneren zu schließen, von denen die Messdaten erzeugt bzw. beeinflusst worden sind.
- Die Tomographie ist eine Methode, die dreidimensionale Verteilung einer physikalischen Größe im Erdinneren durch mehrere zweidimensionale Flächen darzustellen.
- Ausgewertet werden in der Seismik immer die Laufzeiten seismischer Wellen, weil die Zeit, die eine seismische Welle benötigt, um von ihrer Quelle zum Empfänger zu laufen, ein Maß für den Untergrund ist, durch den die Welle läuft.

# Vorteile des inversen teleseismischen Verfahrens

- ITS liefert eine große Zahl von station – event Paaren, wodurch die Quellen- und Stationskorrekturen, die für die Berechnung der Laufzeitresiduen sehr wichtig sind, besonders gut bestimmt werden können.
- Die Zahl der Daten ist für ITS sehr viel größer als für das herkömmliche Verfahren, da die Zahl der Stationen im globalen Netzwerk sehr viel größer ist als im Falle eines temporären lokalen Netzwerkes. Außerdem zeichnet sich die Baikalregion durch erhöhte Seismizität aus, wodurch eine ausreichende Eventzahl gewährleistet ist.
- Eine dichte Verteilung von Quellen im Vergleich zur Stationsverteilung ermöglicht die Untersuchung relativ flacher Strukturen.
- Die Informationen des globalen seismologischen Netzwerkes sind in internationalen Datenbanken gespeichert, wobei es recht einfach ist, aus diesen Datenbanken die Informationen für jede beliebige, tektonisch aktive Region herauszuziehen.
- Die Datenqualität des globalen seismologischen Netzwerkes ist mittlerweile sehr gut, da nur noch die qualitativ besten Stationen der stationären lokalen Netzwerke in das globale Netzwerk einbezogen werden.
- Ein Nachteil von ITS besteht darin, dass die Bestimmung der genauen Lage des Epizentrums einen großen Einfluss auf die Resultate hat. Dabei ist gerade die Bestimmung der Epizentrumslage bei teleseismischen Strahlen sehr ungenau. Um die Ungenauigkeit bei der Quellbestimmung so gering wie möglich zu halten, wird oft eine Relokation durch regionale Laufzeiten vorgenommen.

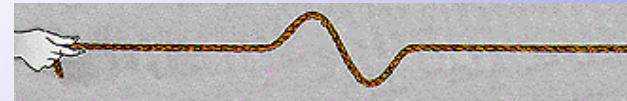
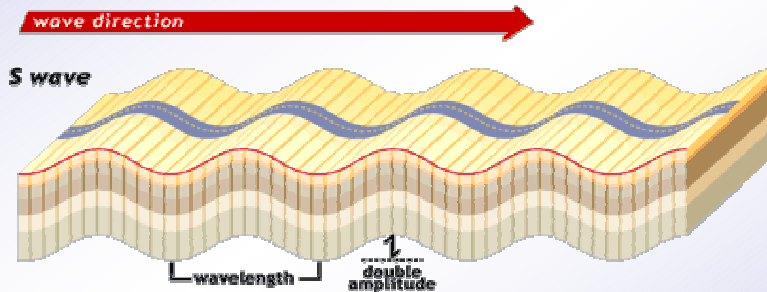
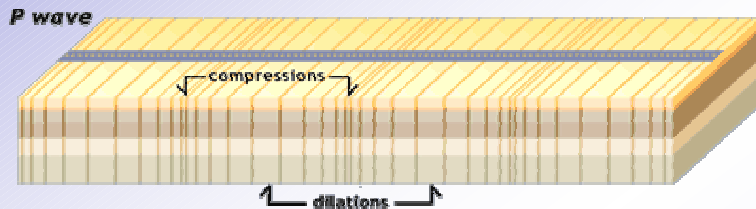
# Strahlverlauf und Laufzeitkurven



# Elastisches Medium: P und S Wellen

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \text{ P-Wellengeschwindigkeit}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \text{ S-Wellengeschwindigkeit}$$



+ Oberflächenwellen, Luftschall

Geschwindigkeit ( $v$ ) = charakteristischer Materialparameter

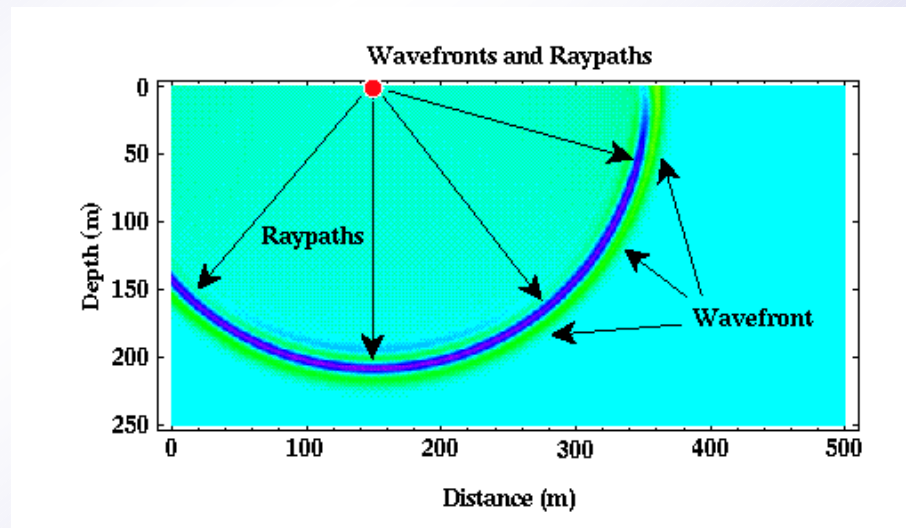
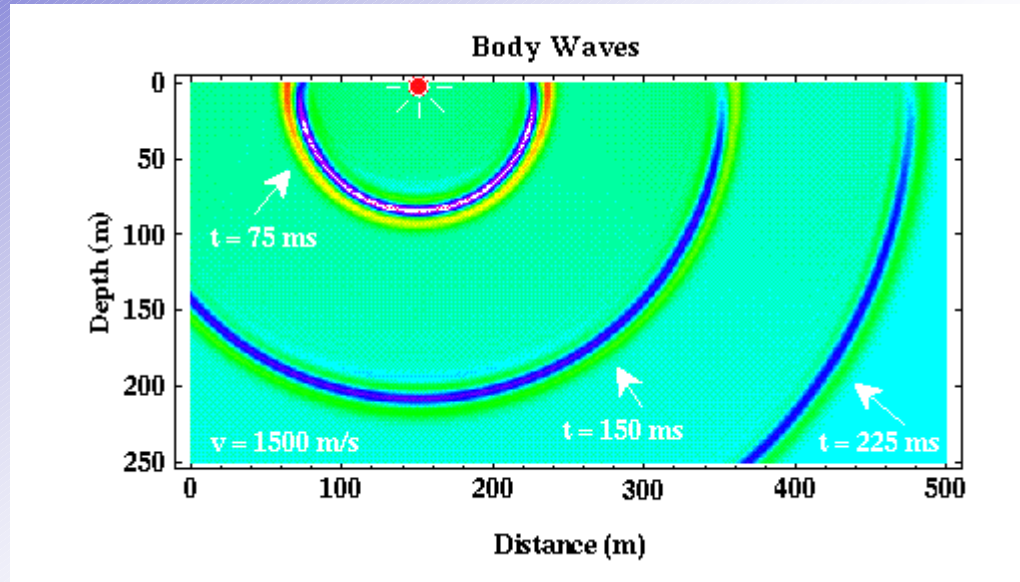
Messung liefert Laufzeit für bekannte Stationsabstände

## Kompressionswellengeschwindigkeit von Gesteinen

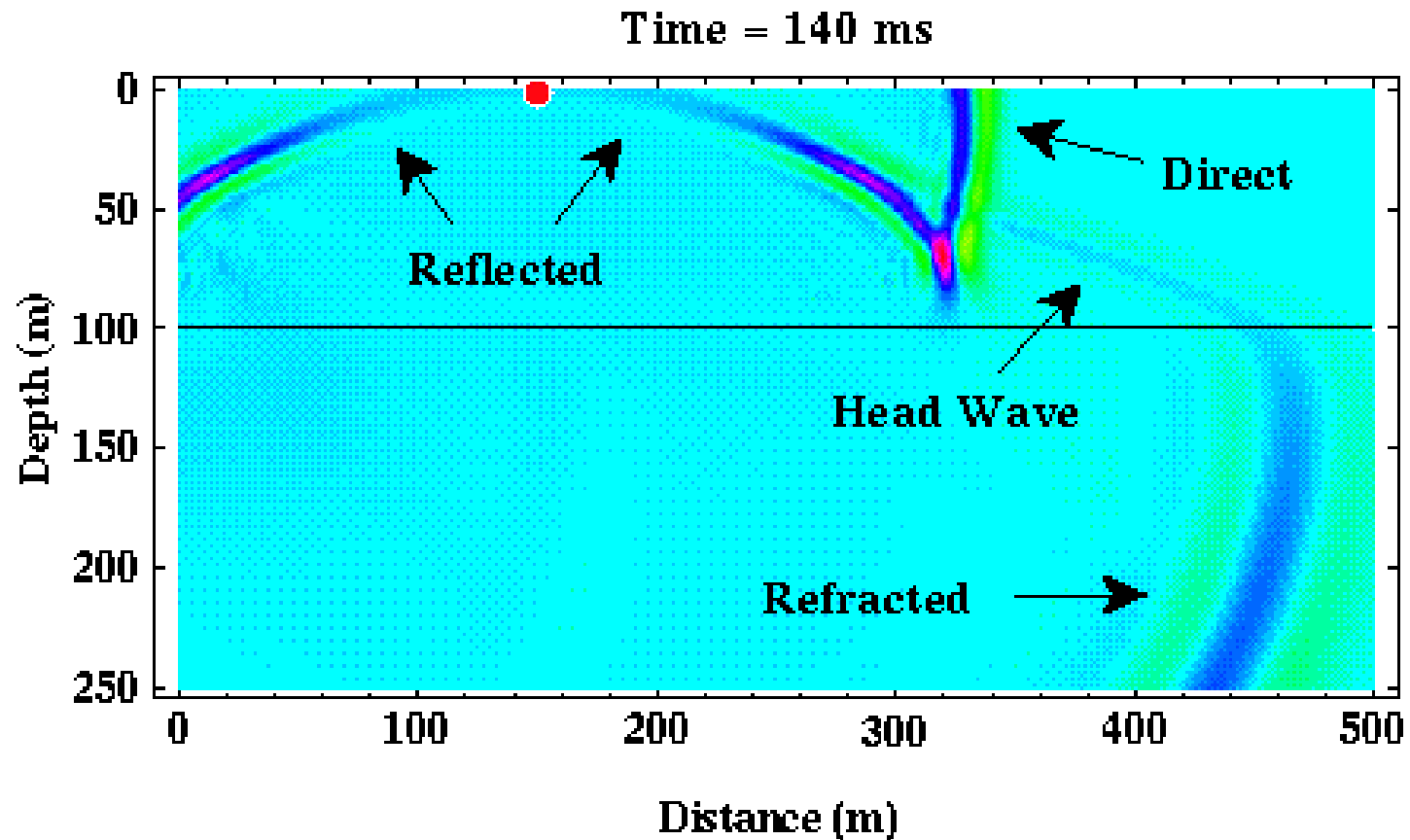
Gesteinstyp	Gestein	$v_p$ [km/s]
sedimentäres Gestein	Sandstein	1.4 - 4.5
sedimentäres Gestein	Kalkstein	1.7 - 7.1
magmatisches Gestein	Granit	5.1 - 6.0
magmatisches Gestein	Basalt	5.1 - 6.4
magmatisches Gestein	Peridotit	7.4 - 8.6



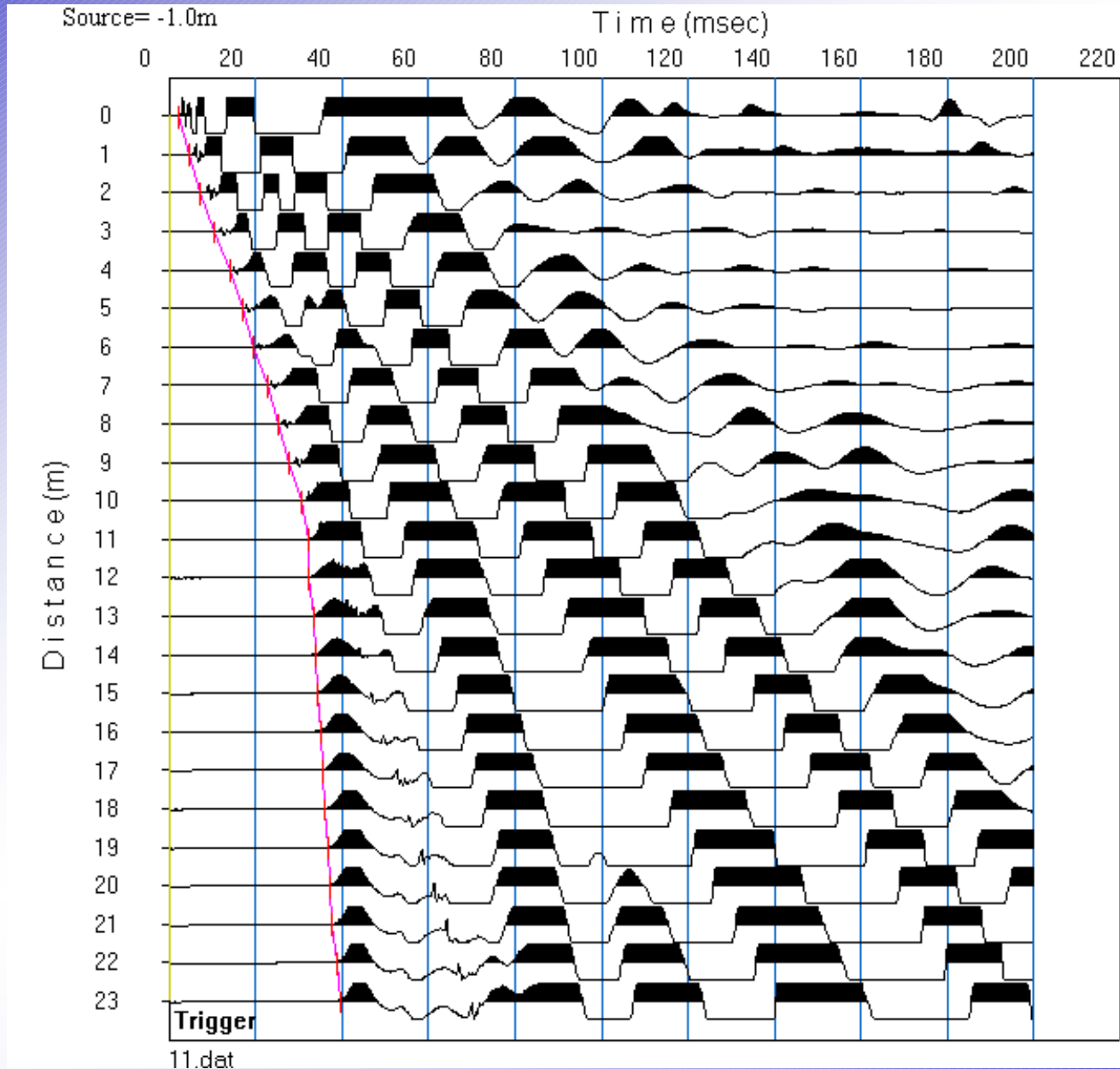
# Ausbreitung seismischer Wellen



# Direkte, reflektierte, refraktierte Welle, und Kopfwelle



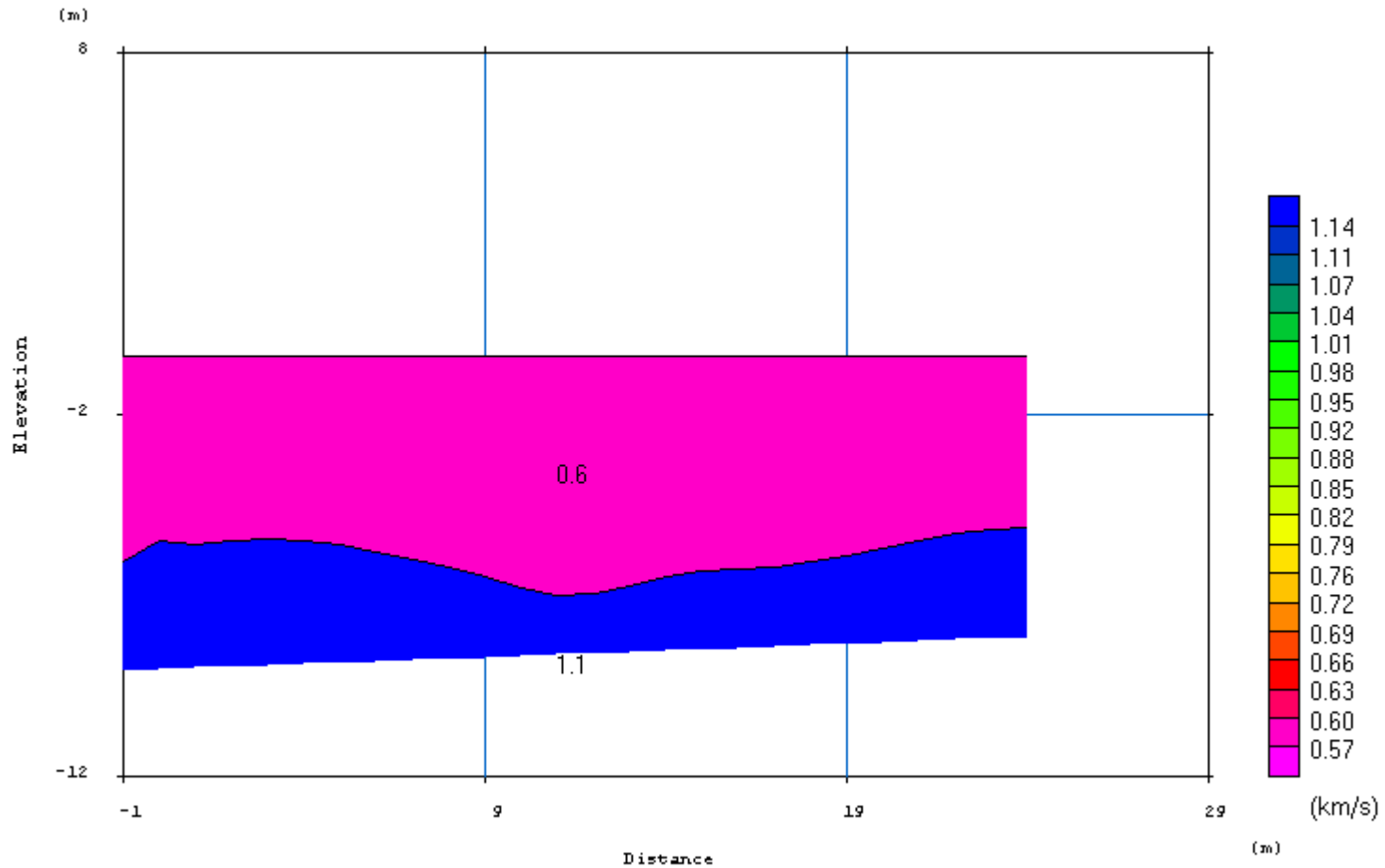
# Picken der Ersteinsätze



# Schichtmodell

lo editing

Layered model : # of layers = 2



77.vs

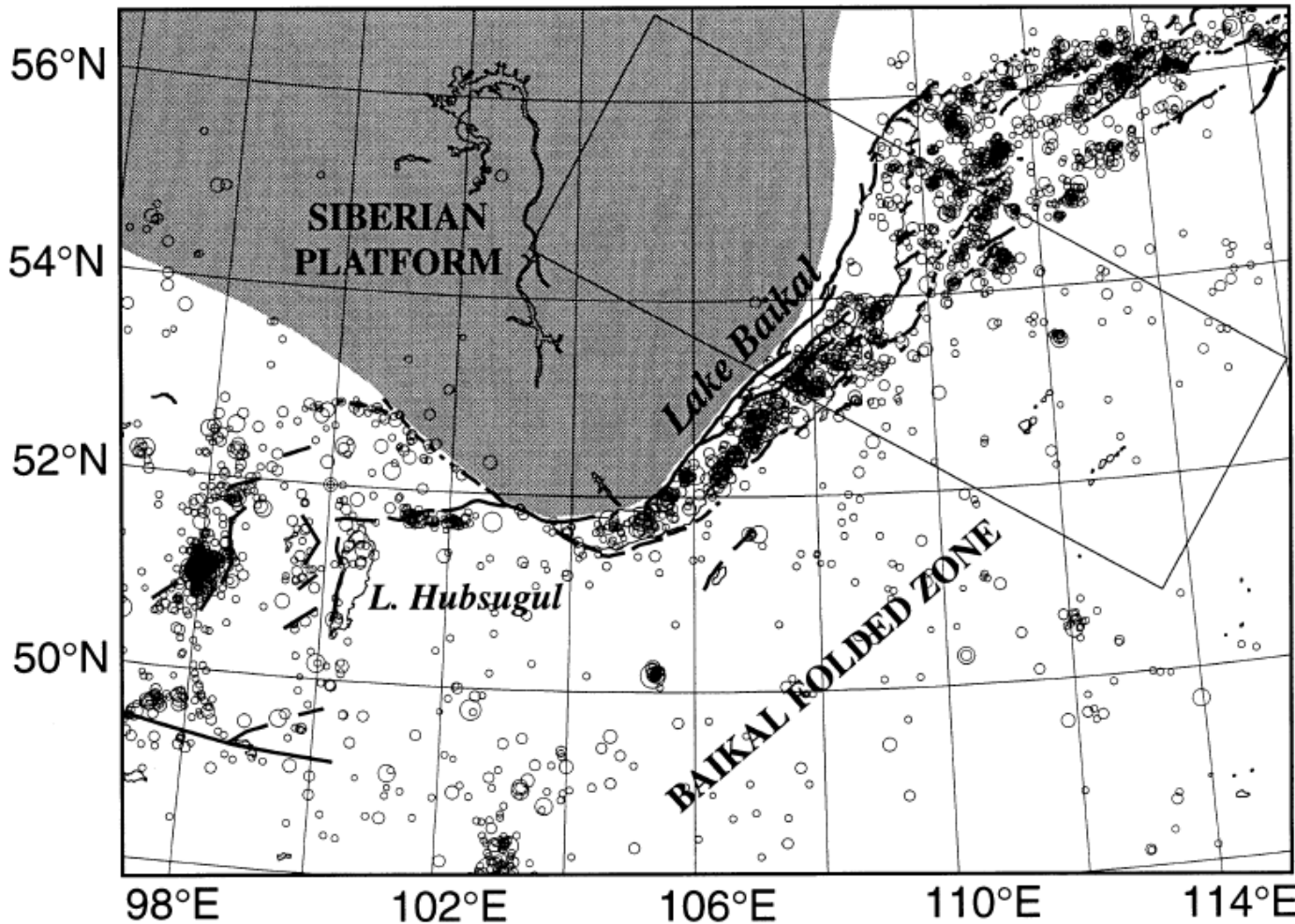
Scale = 1 / 167

# Seismologische Untersuchungen der BaikalRiftZone (BRZ)

- Ziel der seismischen Untersuchungen war es, die Verteilung der seismischen Geschwindigkeit unter der BRZ zu ermitteln, also ein Geschwindigkeitsmodell zu erstellen.
- Außerdem sollte herausgefunden werden, welchen Einfluss regionale Prozesse des tiefen Erdmantels gegenüber den über-regionalen Effekten der Plattentektonik auf die BRZ haben.
- Gerade für den zweiten Punkt ist die BRZ sehr gut geeignet, da es Dehnungsprozesse im Bereich der BRZ seit ca. 3 Millionen Jahren gibt und auch heute noch beobachtet werden können, was sich in einer erhöhten Seismizität und einer deutlichen Dehnung der Kruste bemerkbar macht, wobei die Dehnung der Kruste für eine junge, kontrastreiche Topographie sorgt, die aus diversen Störungszonen resultiert.

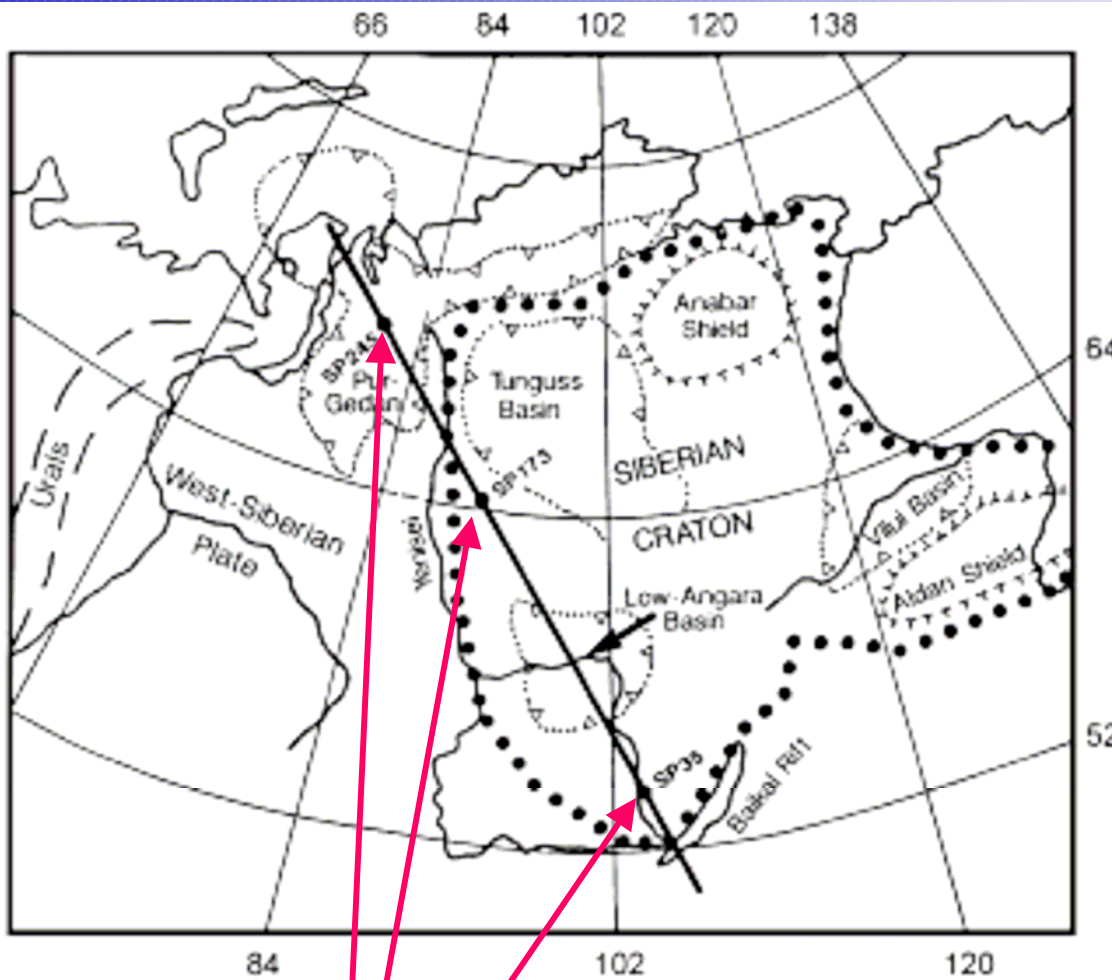
- Hintergrund dieser Überlegungen:
  - Es ist bekannt, dass Prozesse des tiefen Mantels (z.B. Diapirismus der Asthenosphäre, Entstehung von Plumes) eine wichtige Rolle bei der Entstehung und Entwicklung von Riftzonen spielen.
  - Es ist aber nicht vollständig geklärt, welche Bedeutung diese Mantelprozesse im Bereich von Riftzonen im Vergleich zu Prozessen der Plattentektonik eigentlich haben.
  - Bei der Entstehung und Entwicklung einer Riftzone ist oft eine Kombination beider Faktoren am Werk.
  - Außerdem wird die Bildung und Entstehung einer Riftzone stark von der Struktur der Lithosphäre beeinflusst, die ihrerseits stark von der tektonischen Entwicklung und Orogenese der Region geprägt ist.

# Seismizität und aktive Störungszonen



Die BRZ befindet sich an der Nahtstelle zweier struktureller Einheiten: dem paläomesozoischen Baikalfaltensystem und dem sibirischen Kraton.

Fig. 1. Seismicity and active faults of the Baikal area. Open circles are epicentres of  $M > 3$  events recorded by the regional network between 1960 and 1996. Thick lines are active faults. The thin rectangle locates the cross-section of Fig. 9. The Siberian craton is colored in grey. Note that the Siberian craton is nearly aseismic, whereas the Baikal folded zone depicts a relatively high background activity. The rift system is underlined by the highest epicentre density.

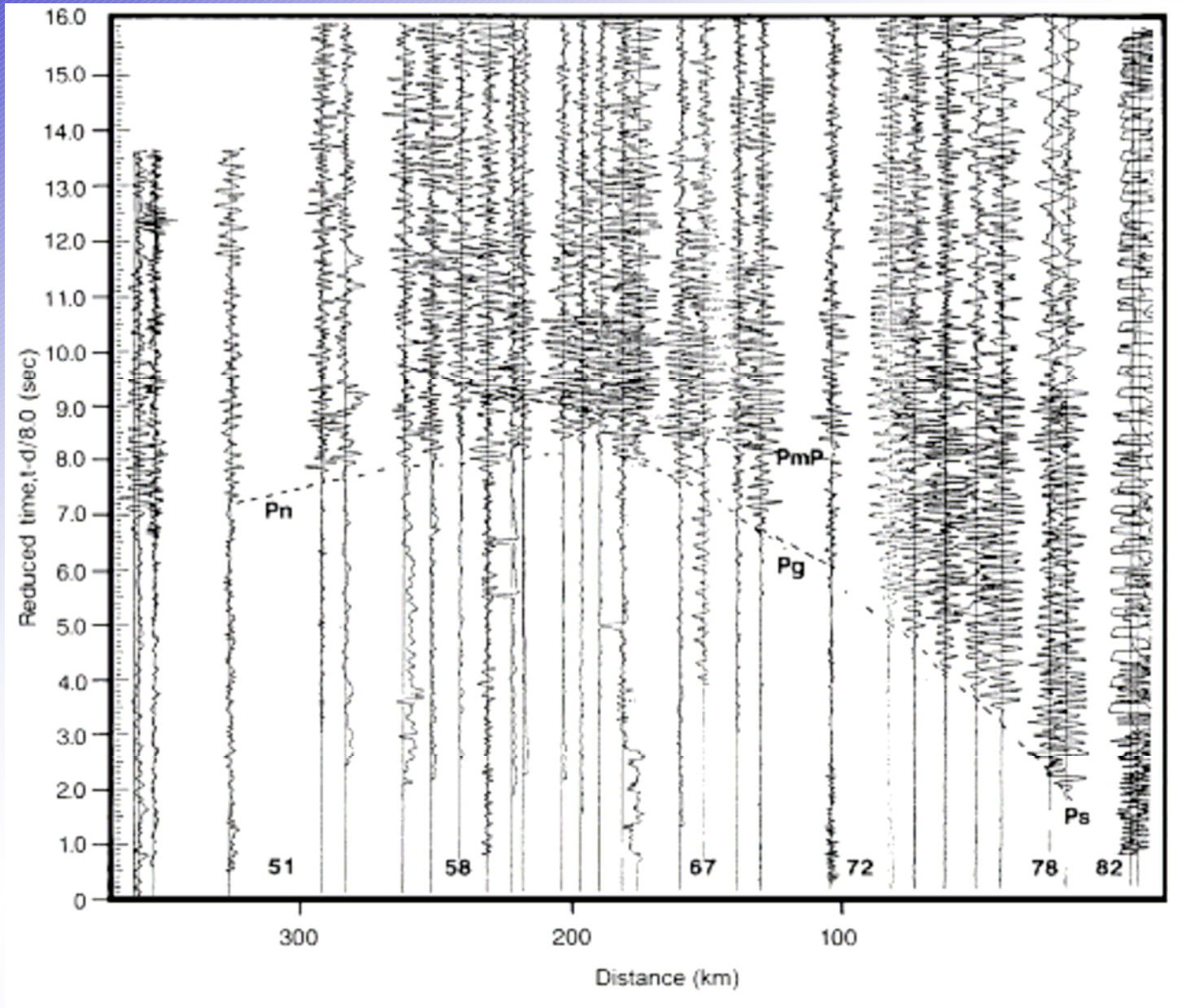


Es wurden  
 Laufzeiten von 30  
 konventionellen und  
 3 nuklearen  
 Explosionen  
 ausgewertet.

Atomsprengungen



# Beispiel einer Seismogramm – Montage aus der Beispielregion



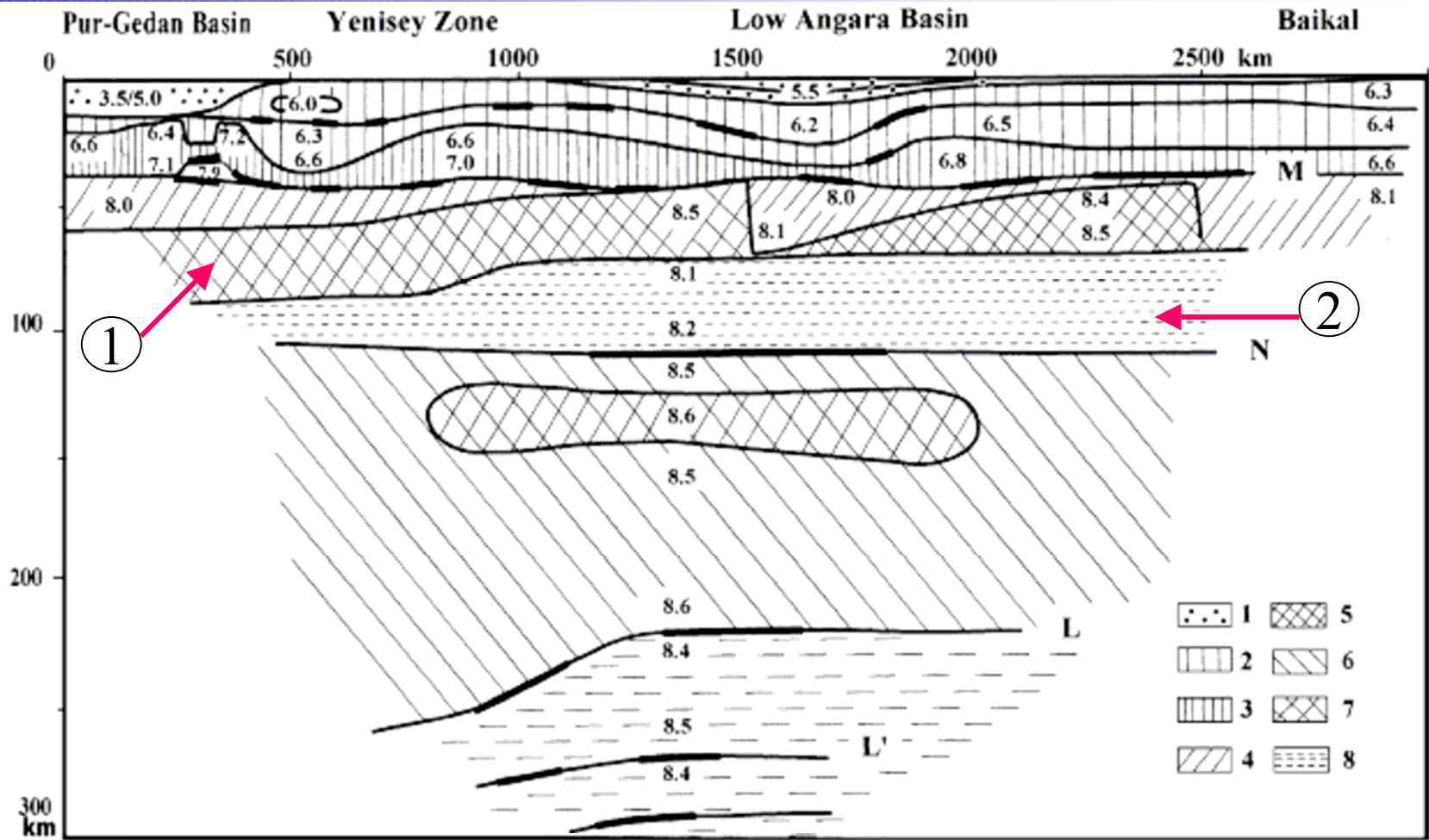


Fig. 9. 2D model of the upper mantle for the RIFT profile determined from the ray-tracing analysis. The crustal model is a simplification of the 2D crustal model shown in Fig. 5. The thick lines show reflectors. Seismic velocities: (1) 2.5–5.6 km/s, (2) 6.0–6.7 km/s, (3) 6.8–7.2 km/s, (4) 8.0–8.3, (5) 8.4–8.5 km/s, (6) 8.5–8.6 km/s, (7) high velocity gradient zone, (8) velocity inversion zone.

# Diskussion des Profilquerschnittes (Teil 1)

- Der sibirische Kraton zeichnet sich durch eine relativ mächtige Kruste mit einer hohen Geschwindigkeit und durch hohe Mantelgeschwindigkeiten aus.
- Im Bereich von Pur-Gedan und Baikal sind die Geschwindigkeiten des oberen Mantels kleiner, was zu dem größeren Wärmefluss passt, den man in diesen Regionen beobachtet.
- Die relative hohe Geschwindigkeit im obersten Mantel des sibirischen Kratons (1) wird am plausibelsten durch seismische Anisotropie erklärt. Ursache könnten Mantelströmungen während der Kratonbildung sein. Auch die Spannungsverteilung könnte sich in diesem Ergebnis zeigen.

# Diskussion des Profilquerschnittes (Teil 2)

- In einer Tiefe von etwa 100 km ist eine Zone mit einer recht geringen seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeit zu beobachten (2). Die Existenz dieser Zone ist noch nicht endgültig geklärt.
- Ein Erklärung könnte sein, dass sich durch die Konzentration von Mantelfluiden, die durch metamorphe Prozesse entstanden sind, in einer Tiefe von 100-150 km eine derartige langsame Schicht herausbildet. Diese wäre dann die Unterseite der starren Lithosphäre.

# Teleseismische Tomographie

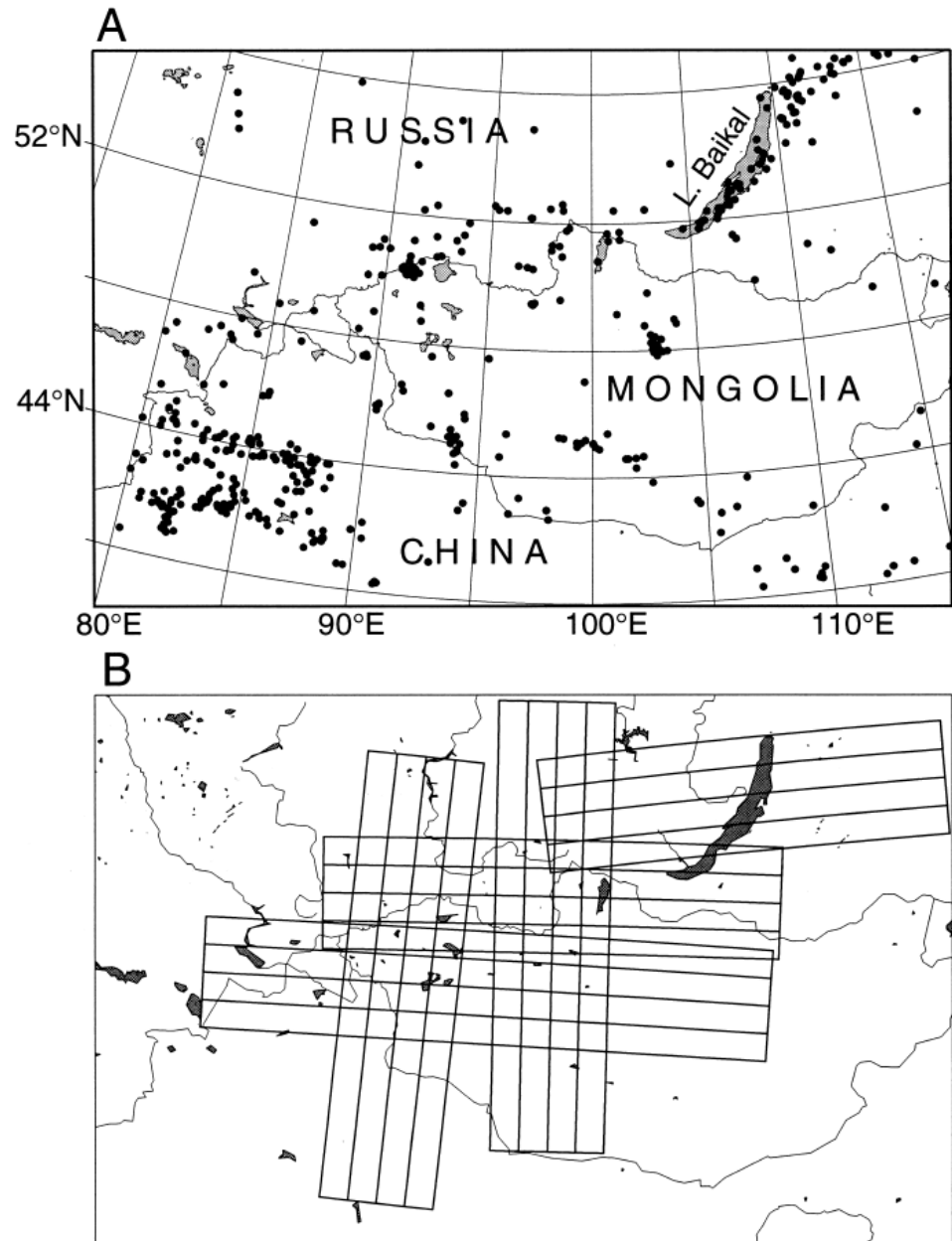


Fig. 2. Data and location of inverted areas for the ITS (Inverse Teleseismic Scheme). (A) Epicentre position of selected teleseismic sources. (B) Map view of the prisms where velocity inversion has been performed.

# Ergebnisse der teleseismischen Tomographie

Negative Geschwindigkeitsanomalie:  
Geschwindigkeitsreduktion (langsamere  
Wellenausbreitung).

Positive Geschwindigkeitsanomalie:  
Geschwindigkeitserhöhung (schnellere  
Wellenausbreitung).

Bezogen auf das Hintergrundmodell!

Residuals:

$$T_{\text{res}} = T_{\text{obs}} - T_{\text{cal}}$$

$$V_{\text{res}} = v_{\text{obs}} - v_{\text{cal}} \text{ mit } v = s/T$$

$$T_{\text{res}} < 0 \Rightarrow V_{\text{res}} > 0$$

$$T_{\text{res}} > 0 \Rightarrow V_{\text{res}} < 0$$

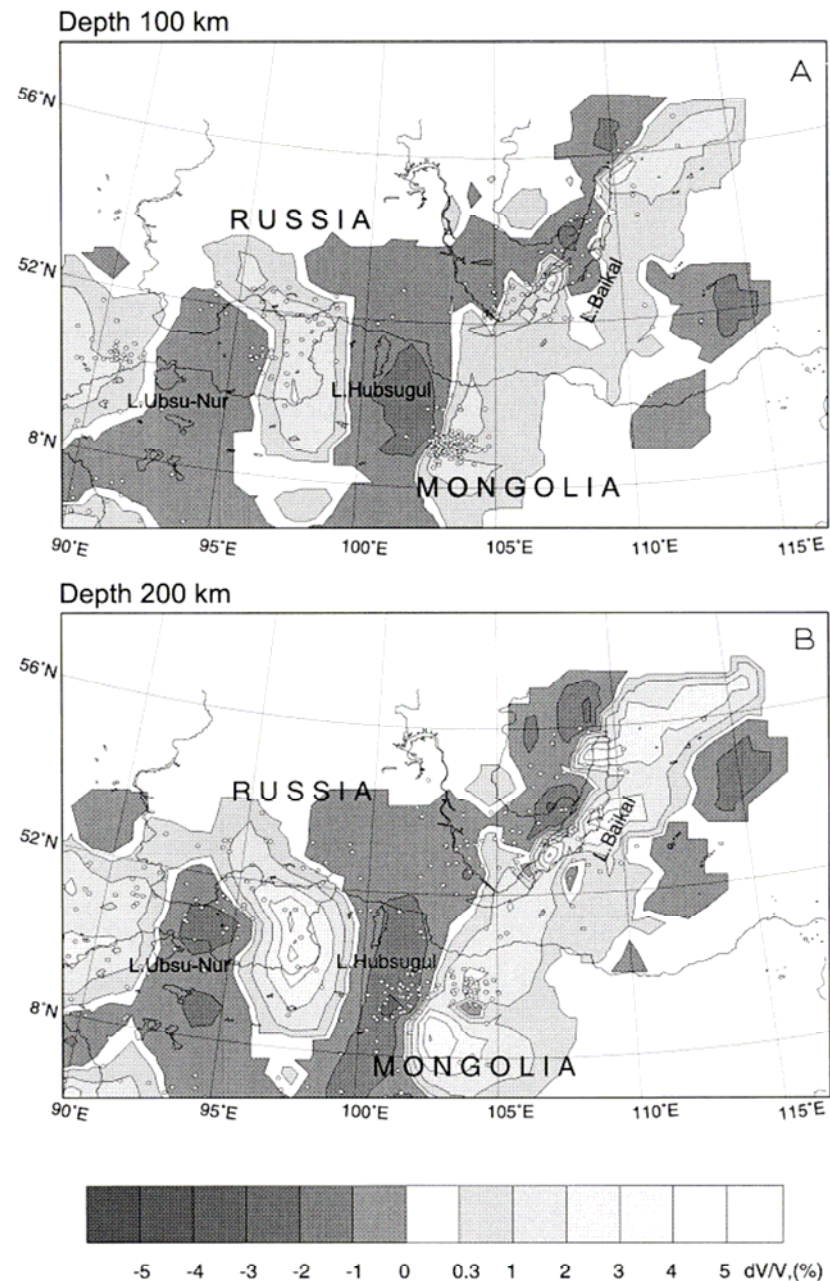


Fig. 3. Three-dimensional velocity model of the P-velocity anomalies in the upper mantle obtained by teleseismic tomography at depths of 100 (a), 200 (b), 400 (c) and 600 (d) km. Contour intervals are given every 1%. Dark areas depict negative anomalies. The position of nodes where velocity anomalies were calculated are shown by small circles.

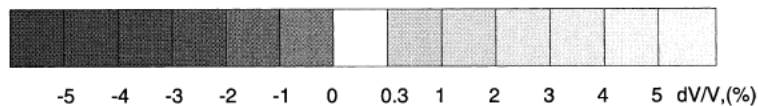
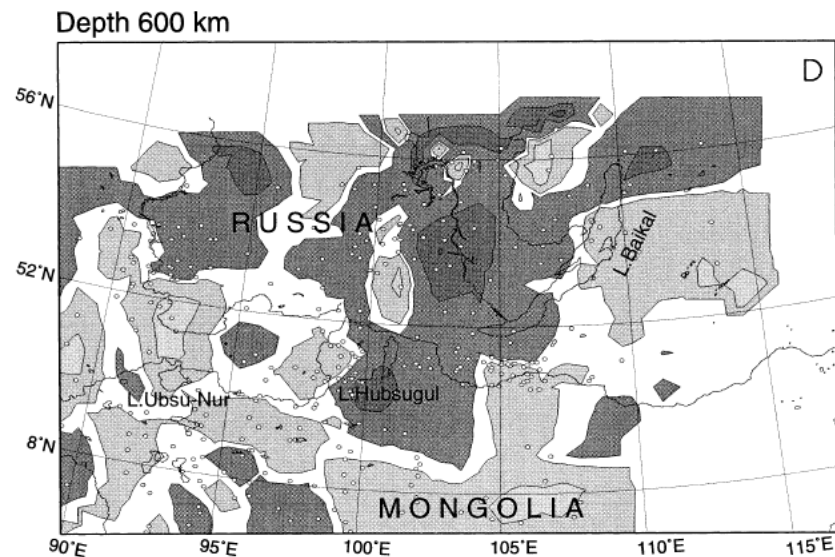
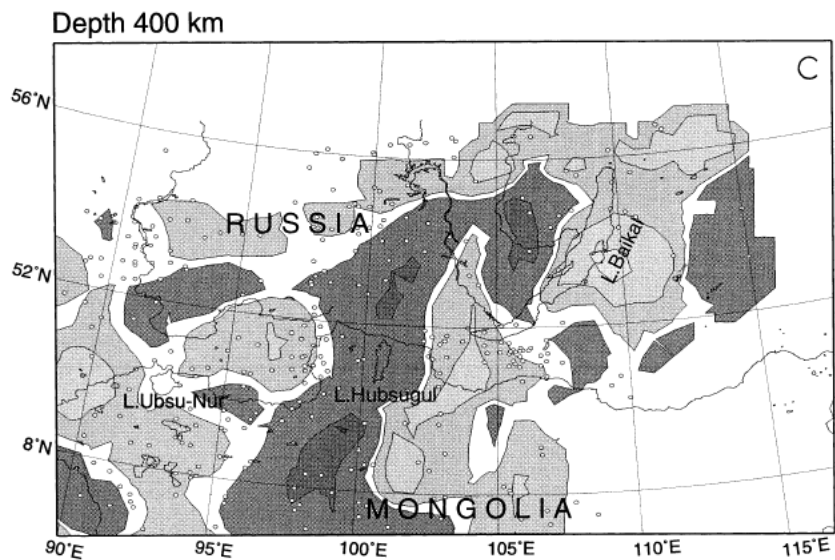


Fig. 3 (continued).

Am auffälligsten ist die Periodizität von recht schmalen negativen und positiven Geschwindigkeitsanomalien in N-S-Richtung! Zwischen 100 und 200 km Tiefe ist es möglich, diese Anomalien mit der geologischen Struktur der BRZ in Verbindung zu bringen, beide verlaufen von SW nach NE. Weiter südlich, z.B. in der Mongolei, scheint dies nicht mehr möglich, da die Störungs-zonen dort eine E-W oder NW-SE Orientierung aufweisen.

# „Lokale“ Tomographie

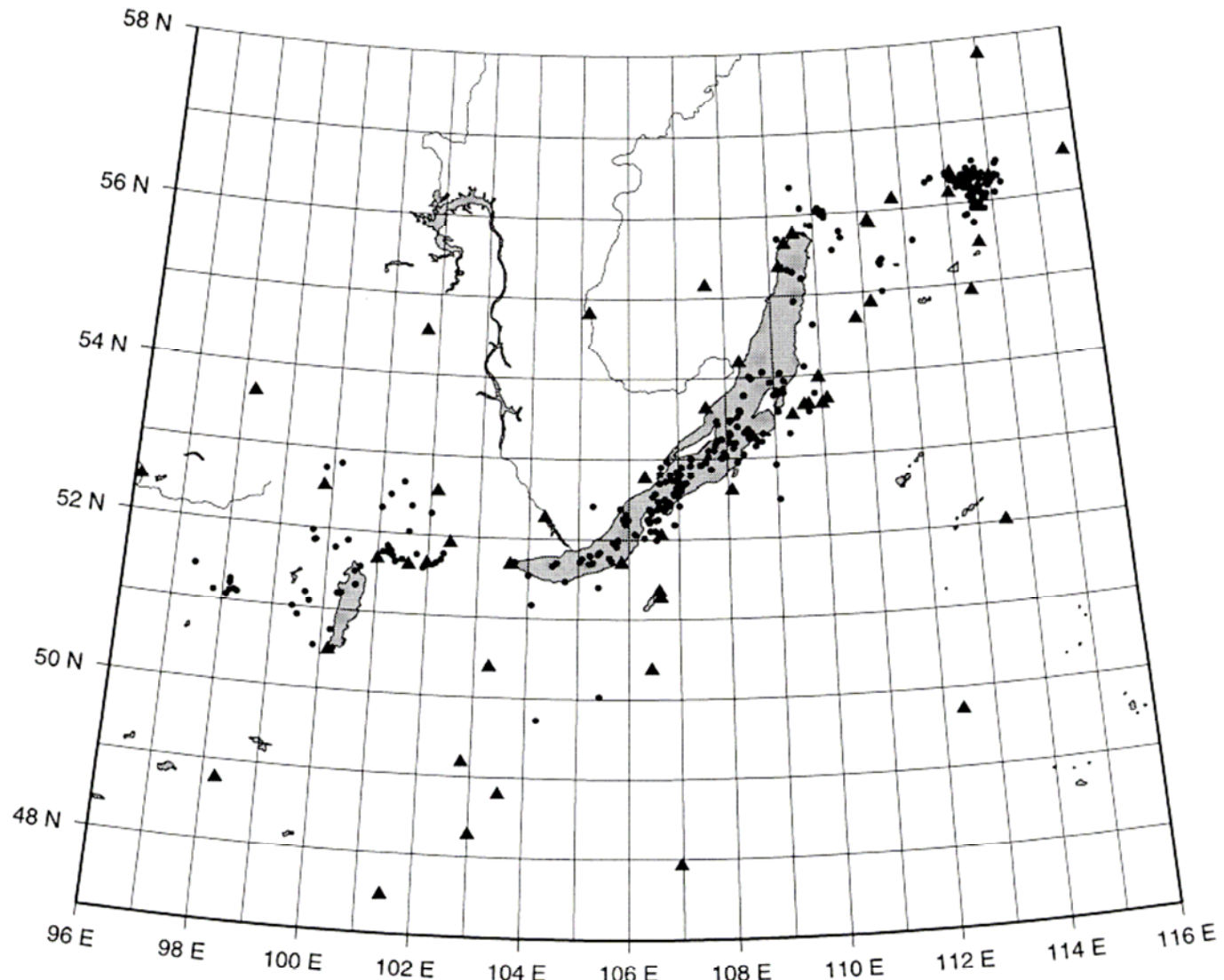


Fig. 4. Map of the 374 earthquakes used for local inversion (dots). Triangles are stations of the regional network.



# Ergebnisse der lokalen Inversion

Unter dem Baikalsee ist eine Zone mit niedriger Geschwindigkeit zu erkennen, die durch eine dicke Sedimentationsschicht und eine hohe Wassersättigung zu erklären ist.

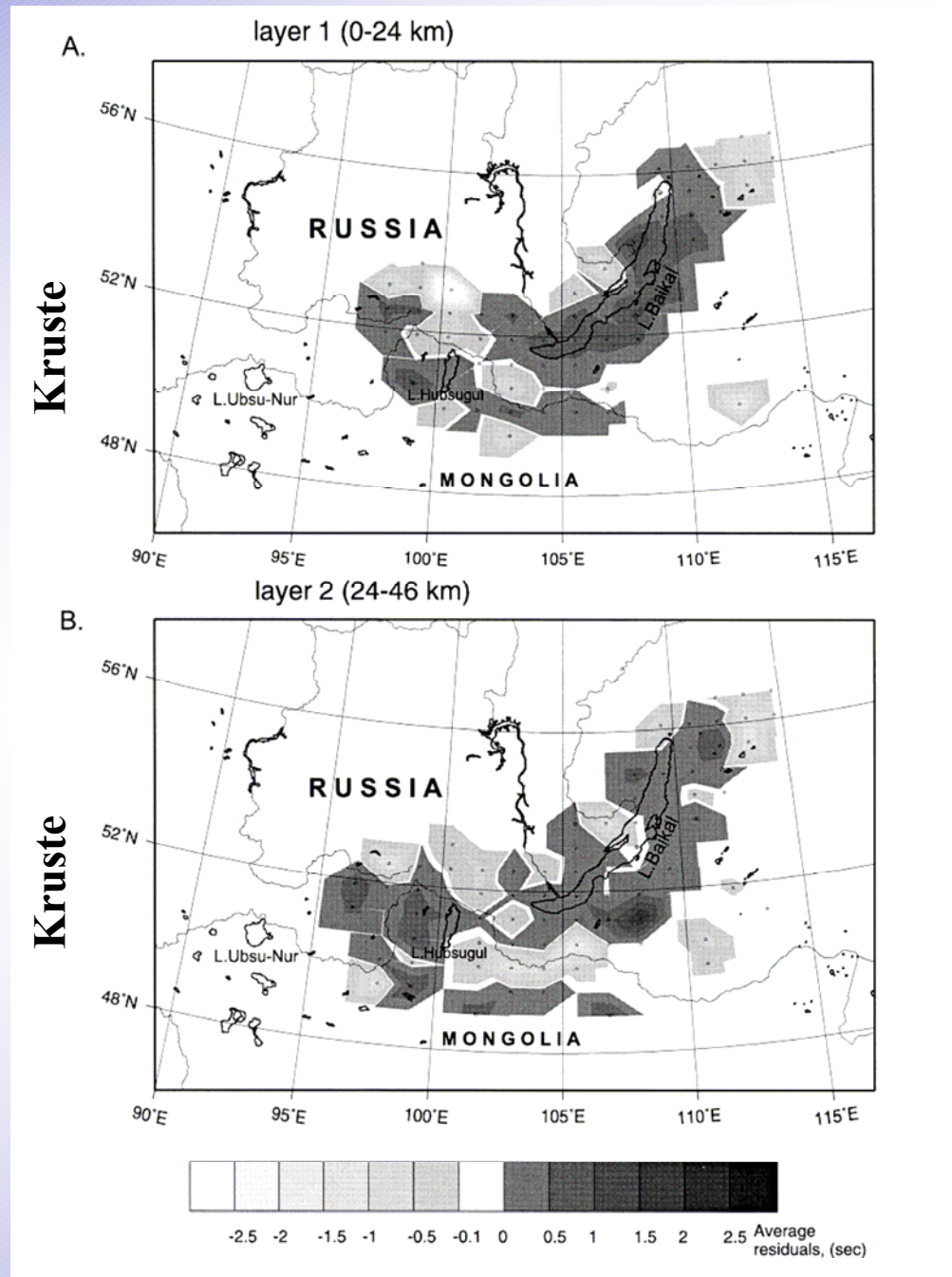
Residuals:

$$T_{\text{res}} = T_{\text{obs}} - T_{\text{cal}}$$

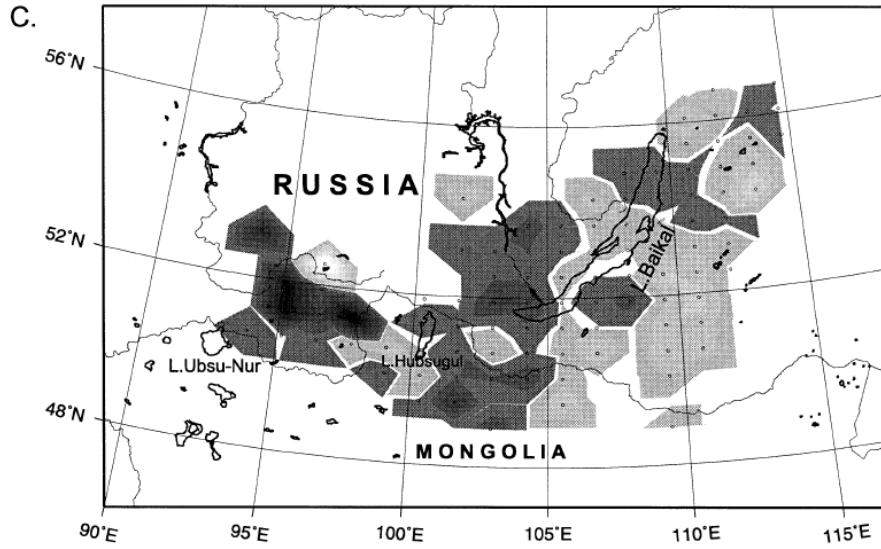
$$V_{\text{res}} = v_{\text{obs}} - v_{\text{cal}} \text{ mit } V = s/T$$

$$T_{\text{res}} < 0 \Rightarrow V_{\text{res}} > 0$$

$$T_{\text{res}} > 0 \Rightarrow V_{text{res}} < 0$$

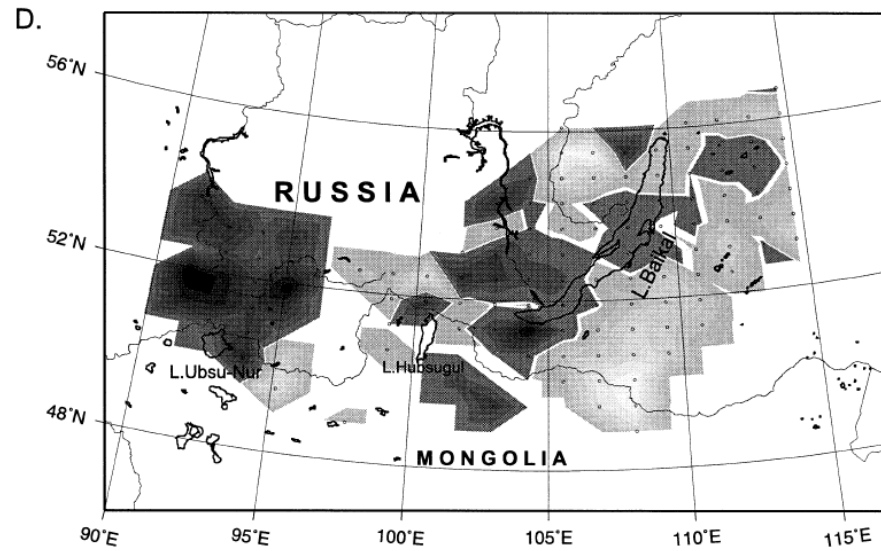


layer 3 (46-48 km)



Mantel

layer 4 (48-70 km)



Mantel



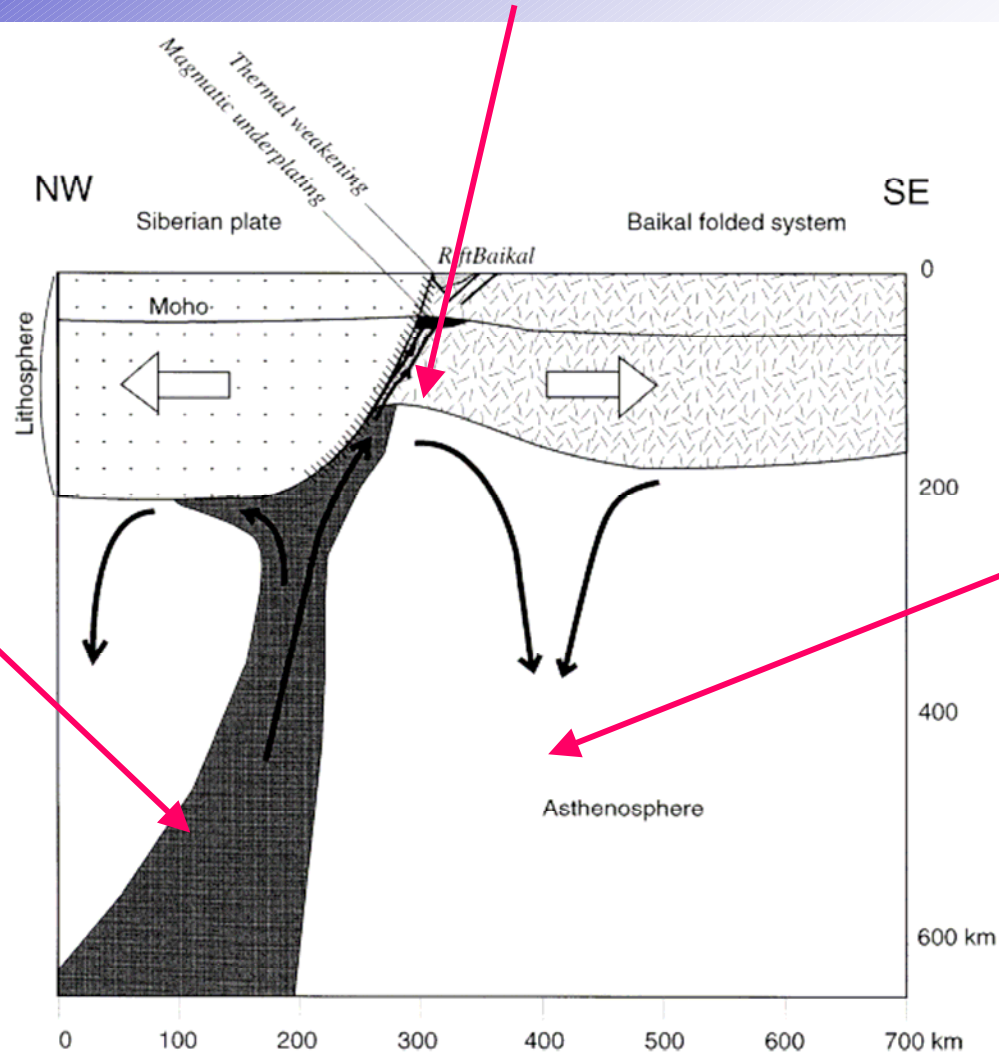
-2.5 -2 -1.5 -1 -0.5 -0.1 0 0.5 1 1.5 2 2.5 Average residuals, (sec)

# 1. Interpretationsversuch

- Die negative Geschwindigkeitsanomalie unterhalb der sibirischen Platte ist aufgrund ihrer geringen lateralen Ausdehnung vermutlich nicht mit einer größeren Aufwölbung der Asthenosphäre verbunden. Sie wird als dünner, heißer Mantelplume unterhalb der Riftachse interpretiert, der den südöstlichen Rändern des sibirischen Kratons folgt.
- Das heiße Mantelmaterial wird entlang des Randes des sibirischen Kratons in die Lithosphäre geleitet.
- Dadurch könnte der Plume eine gewisse Rolle bei den Dehnungsprozessen in der BRZ spielen, weil er der mechanischen Diskontinuität, die die sibirische Platte vom Baikal-Faltensystem trennt, eine thermische Schwächung hinzufügt. Und gerade Schwächungszonen sind die Regionen, in denen bevorzugt Riftbildung zu beobachten ist.

# Geringe Aufwölbung der Asthenosphäre

Geschwindigkeitsreduktion, da heiß



Geschwindigkeitserhöhung, da kalt

Fig. 9. Simplified interpretative cross-section of the tomographic images in terms of mantle dynamics (see Fig. 1 for approximate location). Dark and white areas represent the regions of upwelling 'hot' mantle and downgoing 'cold' mantle, respectively. Open arrows represent the extensional stress field.

- Es ist also durchaus möglich, dass ein schmaler Manteldiapir, der der südlichen Grenze des sibirischen Kratons folgt, verantwortlich für die Schwächung der Nahtfläche zwischen sibirischer Platte und Baikal-Faltensystem ist. Diese Nahtfläche reagiert auf die tektonischen Spannungen, die durch die Kollision der eurasischen mit der indischen Platte entstehen, bevorzugt mit Dehnungsprozessen.
- Als Fazit können die plattentektonischen Effekte als die treibende Kraft bei der Bildung der BRZ bezeichnet werden.
- Die regionalen (dynamischen) Prozesse des tiefen Mantels stellen keinen bestimmenden Faktor dar.

- Die Schwächung der Lithosphäre im Bereich der BRZ, die mit der Orogenese der Region zu früheren Zeiten zu erklären ist und von den beschriebenen Prozessen des oberen Mantels (Plume) verstärkt wird, ist der bestimmende Faktor in Bezug auf die Lage und die Ausrichtung der Riftzone.
- Unterstützt wird diese These durch die Tatsache, dass es im Bereich der BRZ keine ausgedehnten Geschwindigkeitsanomalien gibt, die sich von der Kruste aus bis in den oberen und unteren Mantel ausdehnen, wie es z.B. beim Keniarift der Fall ist.
- Außerdem zeigen auch aktuelle Untersuchungen des Spannungsfeldes, dass die

- Darüber hinaus gibt es weitere Untersuchungen (z.B. Untersuchungen des Wärmeflusses im Bereich der BRZ, der im Durchschnitt eher niedrig ist, Untersuchungen der Mantelxenolithe und Schweremodelle der Lithosphäre), die zeigen, dass die Lithosphäre im Bereich der BRZ nicht so ausgedünnt sein kann wie sie es sein müsste, wenn ein ausgedehnter Manteldiapir unter dem Baikalrift die Moho erreichen würde.
- Auch die Tatsache, dass der aktuelle Vulkanismus nicht wirklich ausgeprägt ist, unterstreicht nochmals diese These.

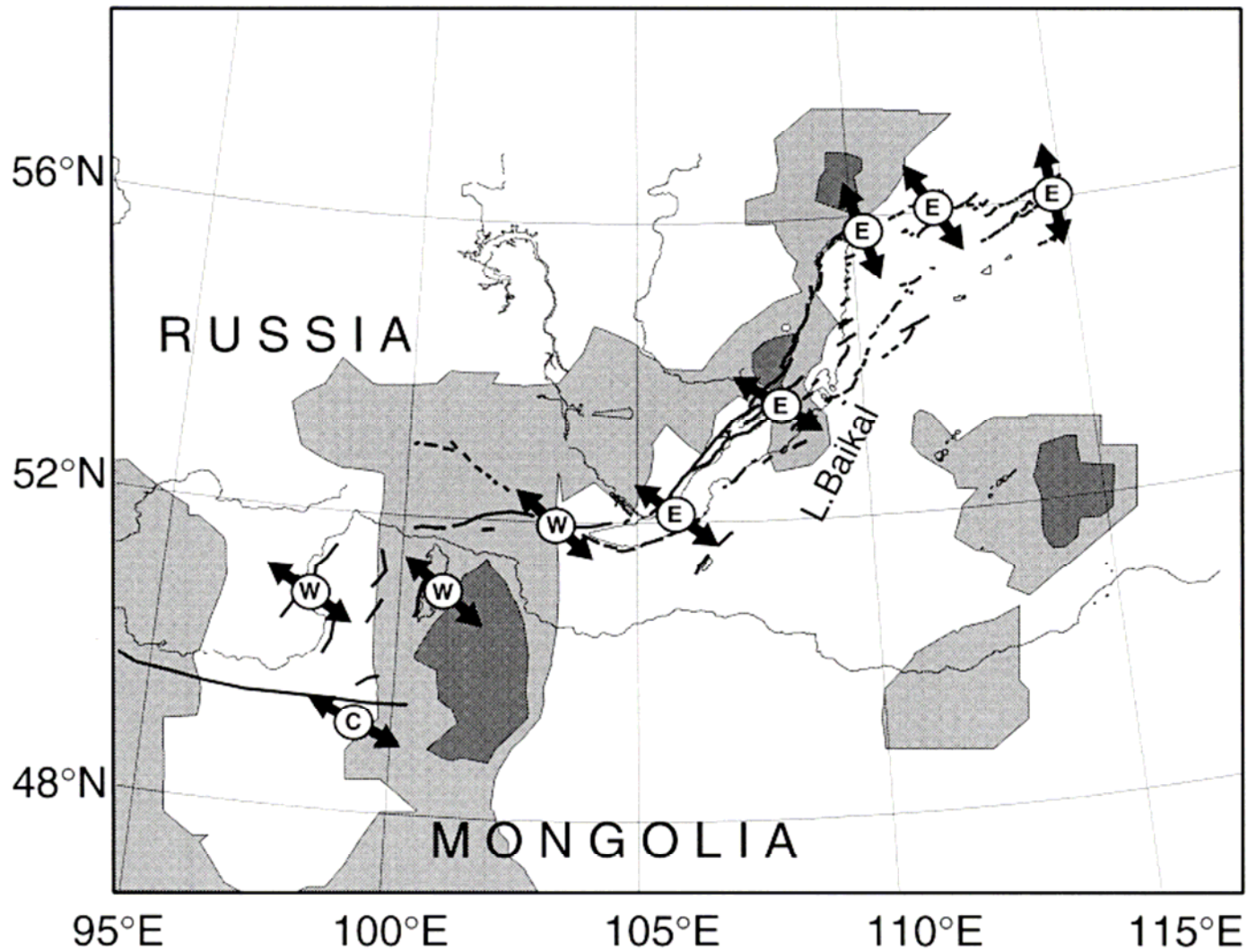


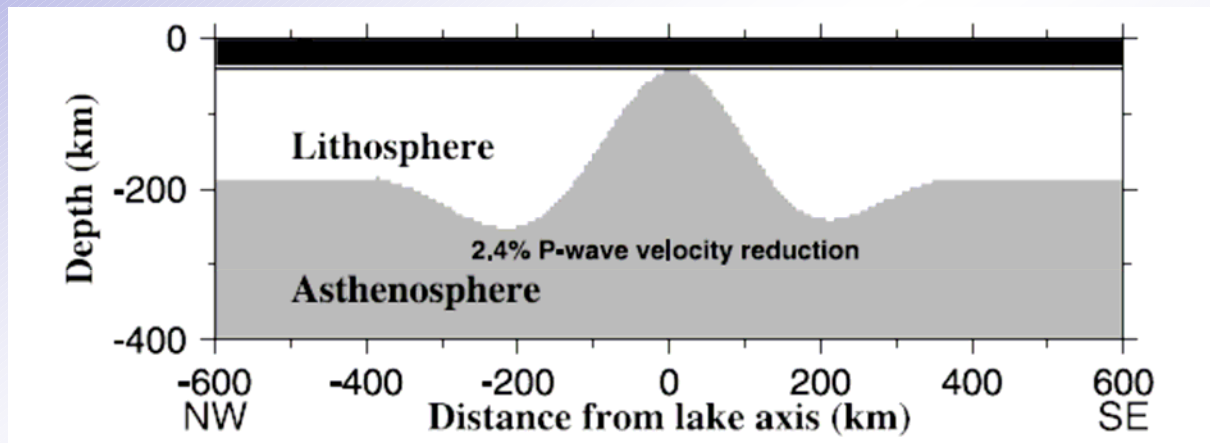
Fig. 8. Comparison between the pattern of velocity reduction obtained at 100 km (grey areas, see Fig. 3a) and the direction of the minimal horizontal stress (solid arrows) in the Baikal area. Stress regime variations are indicated as follows: *E* = extensional; *W* = wrench; *C* = compressional (after Petit et al., 1996).



- Die Abbildung zeigt, dass die negative seismische Anomalien nicht systematisch mit dem Vorhandensein eines Dehnungsfeldes verbunden ist.
- Es ist vielmehr so, dass die Geschwindigkeitsanomalien Gebiete bedecken, die sich durch sehr deutliche Änderungen des Spannungsfeldes auszeichnen, so dass es nicht möglich ist, den Anomalien einen bestimmten Spannungszustand zuzuordnen.
- Auf der anderen Seite ist im nordöstlichen Teil der Riftzone eine Dehnung sehr gut belegt, die über einer ausgeprägten positiven Anomalie liegt.
- Daraus lässt sich folgern, dass die beobachteten Mantelstrukturen das aktuelle Spannungsfeld der BRZ nicht sehr stark beeinflussen.
- Aus diesen Resultaten darauf zu schließen, dass die Öffnung des Baikalfurts durch Mantelströmungen unter der BRZ gesteuert wird, ist daher sehr schwierig.

## 2. Interpretationsversuch

- Nach Meinung einiger Autoren werden die Anomalien durch einen ausgedehnten Diapir unter dem Baikalsee hervorgerufen, der seinen Ursprung in der Asthenosphäre hat und bis in eine Tiefe von 40 bis 50 km reicht und die Ausdehnungsprozesse antreibt.
- Gestützt wird diese Meinung durch eine Zone niedriger seismischer Geschwindigkeit (7,8 km/s) unterhalb der Moho in der Nähe der Riftachse, die durch seismische Untersuchungen bestätigt wird.
- Die Analyse von Schwereanomalien und seismologische Daten lassen auch den Schluss zu, dass die Lithosphäre im Bereich der BRZ (auf eine Länge von etwa 300 km entlang der Riftachse) auf die Dicke der Kruste reduziert ist (ca. 40-50 km).



# Literatur

- Carole Petit, Ivan Koulakov, Jacques Deverchère: Velocity structure around the Baikal rift zone from teleseismic and local earthquake traveltimes and geodynamic implications; Elsevier; Tectonophysics 296 (1998) 125-144
- G.A. Pavlenkova, K. Priestley, J. Cipar: 2D model of the crust and uppermost mantle along rift profile, Siberian craton; Elsevier; Tectonophysics 355 (2002) 171-186
- Stephen S. Gao, Kelly H. Liu, Paul M. Davis, Phillip D. Slack, Yuliy A. Zorin, Valentina V. Mordvinova, Vladimir M. Kozhevnikov: Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone; Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No. B4, 2003
- Christopher A. Scholz, Kim D. Klitgord, Deborah R. Hutchinson, Uri S. Ten Brink, Lev. P. Zonenshain, Alexander Y. Golmshtok and Theodore C. Moore: Results of 1992 Seismic Reflection Experiment in Lake Baikal; Eos, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 74, No. 41, Oktober 12, 1992, Pages 465, 469-470

**ENDE**

Danke für die  
Aufmerksamkeit