

Stefan Stange (LGRB, Freiburg) & Jürgen Strehlau (Universität Kiel)

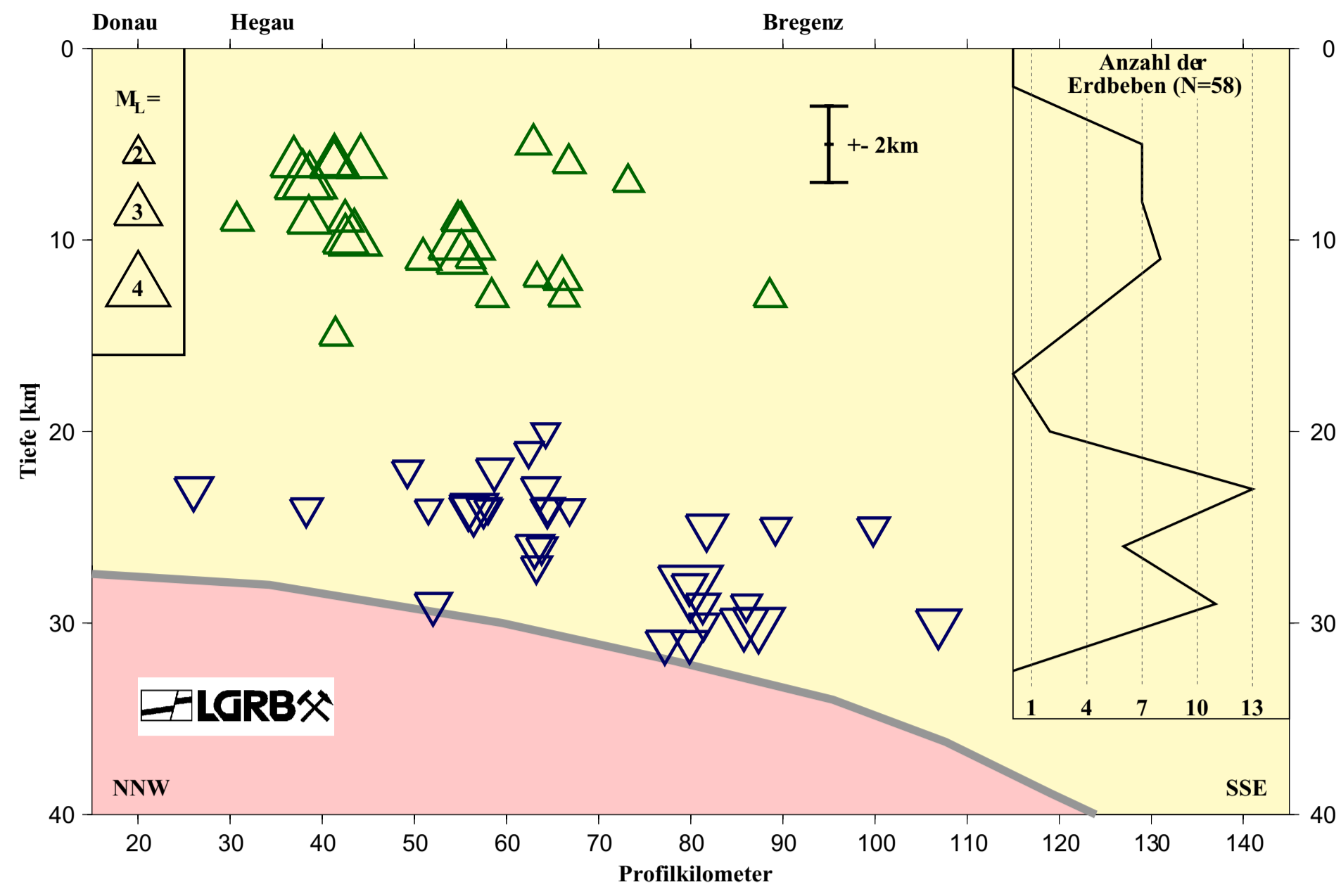


Abb. 2: Schnitt von der Donau in Richtung S30E mit den Hypozentren der Beben aus Abb. 1. Die Trennung in seismogene Ober- und Unterkruste fällt deutlich ins Auge.

## Daten

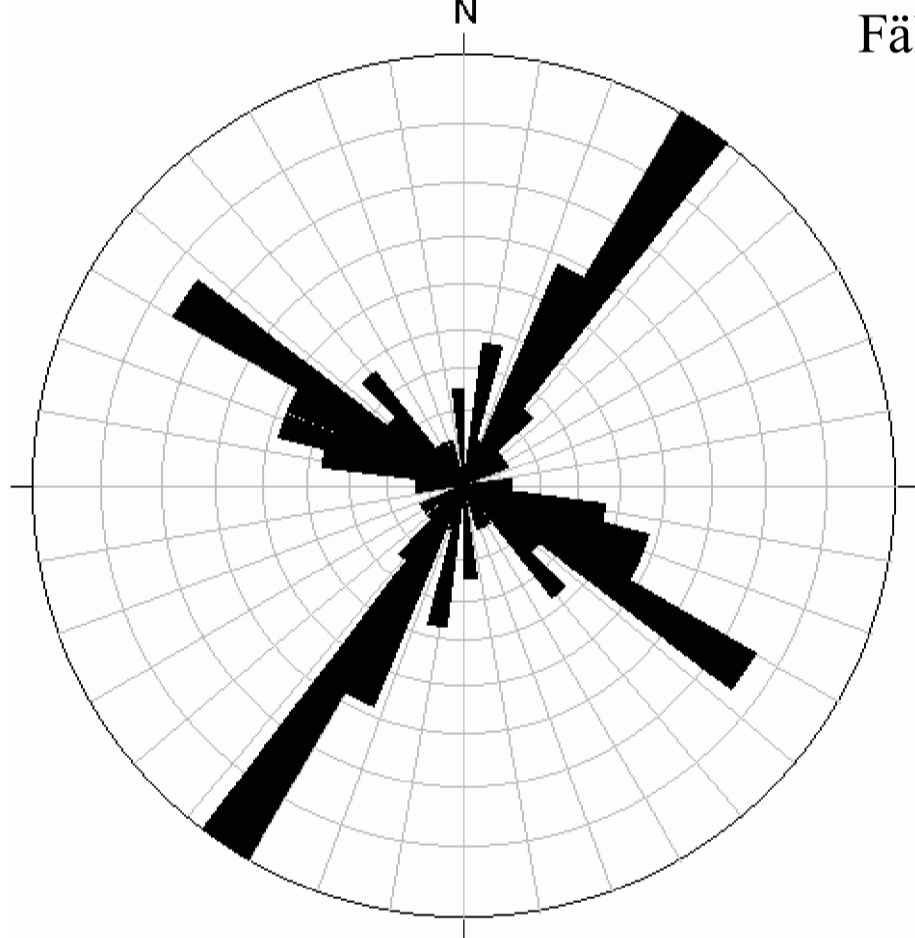
Die Erdbeben im deutsch-schweizerisch-österreichischen Grenzgebiet werden von Seismographen der verschiedenen Agenturen aufgezeichnet (Abb. 1); die dargestellten Stationen waren aber nie alle gleichzeitig in Betrieb, so dass die Rohdatengrundlage zeitweise etwas ausdünnert. Für eine möglichst präzise Herdtiefenbestimmung benötigt man Stationen, die nahe genug am Epizentrum liegen, um direkt nach oben gelaufene Strahlen zu registrieren. Die Tiefenaufklärung von Phasen wie Pn und PmP (und den entsprechenden S-Phasen) ist zwar gut, nimmt aber bei zunehmendem Laufweg durch Modellfehler ab. Die unter die Alpen abtauchende Moho stellt dabei eine zusätzliche Komplikation dar. Pg und Sg liefern nur wenig Information über die Herdtiefe.

Von den Ereignissen der letzten 10 Jahre erfüllten 58 Beben (Abb. 1 und 2) die strengen Qualitätsanforderungen bezüglich der Hypozentrumstiefe, die eine hohe Signifikanz der Tiefenverteilung gewährleisten. Zur Vereinheitlichung des Datensatzes wurde in den meisten Fällen eine eigene Relokalisierung vorgenommen und zusätzlich einige Relokalisierungen des Schweizer Erdbebendienstes (SED) verwendet.

Die resultierende Verteilung (Abb. 2) zeigt als stabiles Merkmal - auch unter Berücksichtigung konservativer Fehlerbereiche ( $\pm 2$  km in der Tiefe und größer) - eine deutliche Trennung der Seismizität in Ober- und Unterkruste.

## Herdflächenlösungen

Abb. 3 zeigt die zur Verfügung stehenden Herdflächenlösungen für das Molassegebiet, unterteilt nach Ober- und Unterkruste. Neben 19 Eigenbestimmungen wurden 32 veröffentlichte Herdflächenlösungen (z.B. vom SED) herangezogen. Kriterium für die Verwendbarkeit war eine eindeutige Zuordnung zu Ober- oder Unterkruste. Präzise Lokalisierungen - vergleichbar mit dem Datensatz aus Abb. 1 - liegen in den meisten Fällen vor. 23 Ereignisse sind beiden Datensätzen (Abb. 1 bzw. Abb. 3) gemeinsam.



Es wurden bis auf eine Ausnahme nur Strike-Slips und (Schräg-)Abschiebungen gefunden. Abb. 4 zeigt die Kompilation der Streichrichtungen der Herdflächen als Rosettendiagramme. Die jeweils konjugierten Flächen für die Strike-Slips bzw. die Abschiebungen kommen deutlich zum Ausdruck. Die Streuung ist für die Abschiebungen etwas ausgeprägter. Der Vergleich der beiden Herdtypen zeigt eine enge Nachbarschaft (ca.  $15^\circ$ ) der jeweils etwa NW-SE streichenden Flächen, während die Haupttrichtungen der konjugierten Flächen um etwa  $30^\circ$  voneinander abweichen.

Abb. 4: Streichrichtungen von Herdflächen der Beben aus Abb. 3. Radialkoordinate = Anzahl pro  $7,5^\circ$ -Bin. **Oben:** Zusammenstellung aller 29 Strike-Slips (53 Flächen), größter Petalwert: 9. Für fünf Erdbeben wurde nur die durch Relativlokalisierung bestimmte Bruchfläche eingetragen. **Unten:** 21 Abschiebungen und eine Aufschiebung (44 Flächen), größter Petalwert: 5.

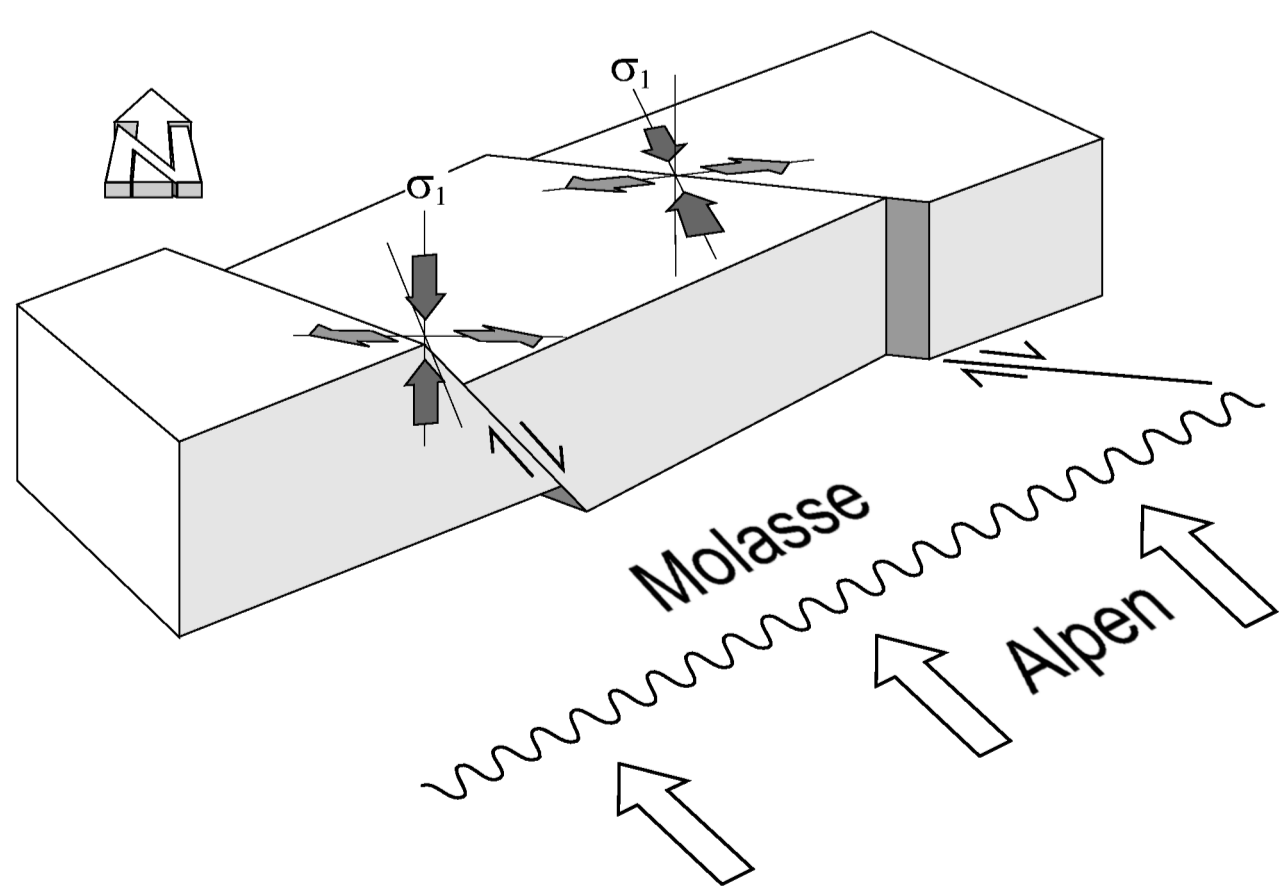


Abb. 6: Prinzipskizze der Hauptspannungsrichtungen, exemplarischer Bruchflächen und der Alpenkompression im Molassegebiet. Wie entsteht die vertikale maximale Hauptspannung ( $\sigma_1$ ) für die Abschiebungen?

## Beobachtungen

Unter dem Molassebecken des nordalpinen Vorlandes (Abb. 1) finden Erdbeben nicht nur in der Oberkruste statt, sondern auch in der Unterkruste (Abb. 2). Die beiden Stockwerke sind durch eine deutliche Lücke der seismischen Aktivität im Tiefenbereich 16-19 km voneinander getrennt. Die tiefsten Erdbeben liegen nur wenige Kilometer über der Moho. Im obersten Erdmantel werden keine Ereignisse beobachtet. Richtung Süden endet die Unterkrustenaktivität am Alpenrand. Nördlich der Molasse lässt sich eine bebenfreie Zone in der Mittelkruste nicht mehr sicher nachweisen. Eine systematische Variation der Magnitude mit der Tiefe ist nicht festzustellen.

## Fragestellung

1. Wodurch wird die Unterkruste seismisch aktiv und warum in einem so eng umrissenen Gebiet wie der nordalpinen Molasse?
2. Welche Herdmechanismen liegen im jeweiligen Stockwerk vor und wie sehen die Spannungsfelder aus?

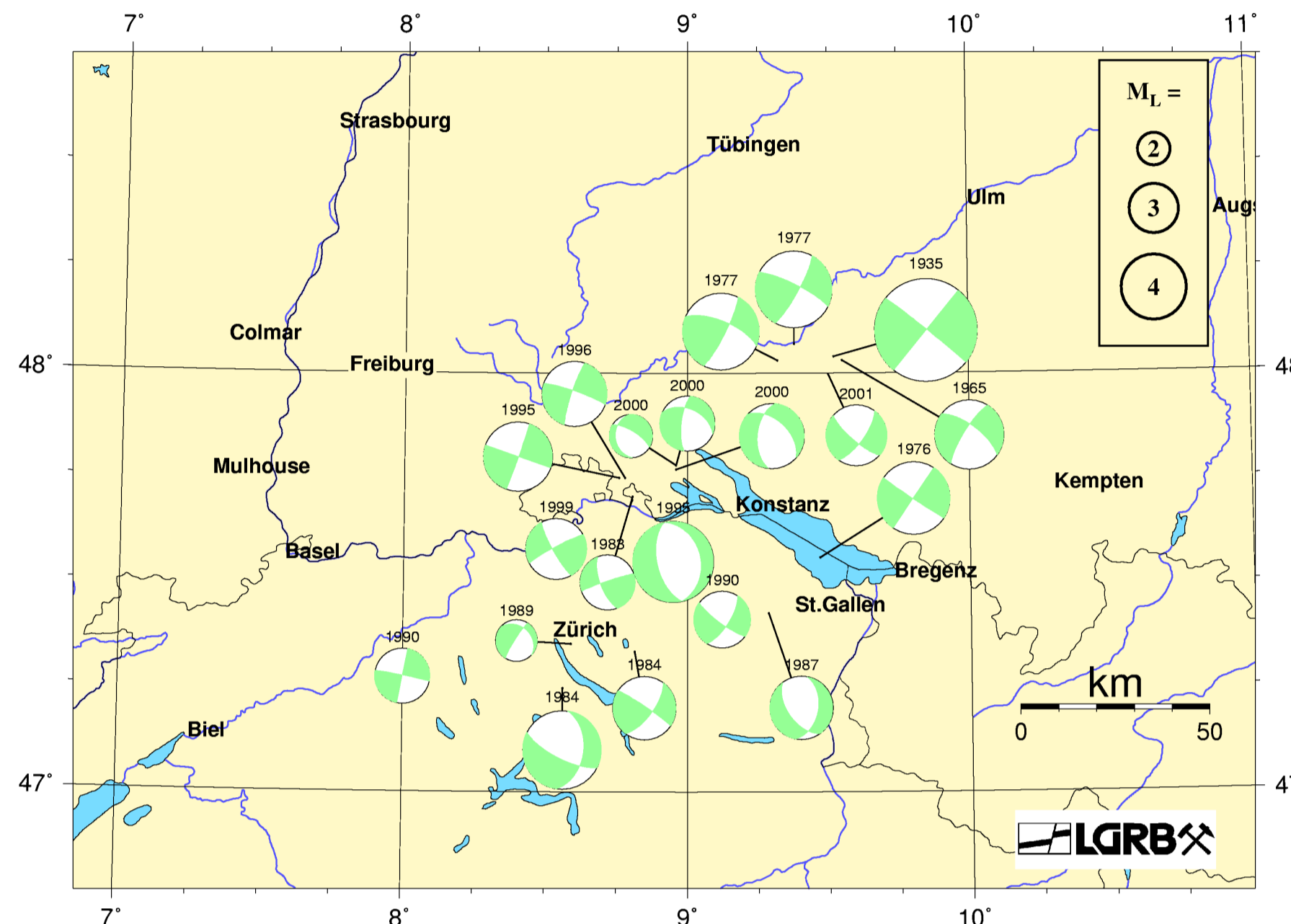
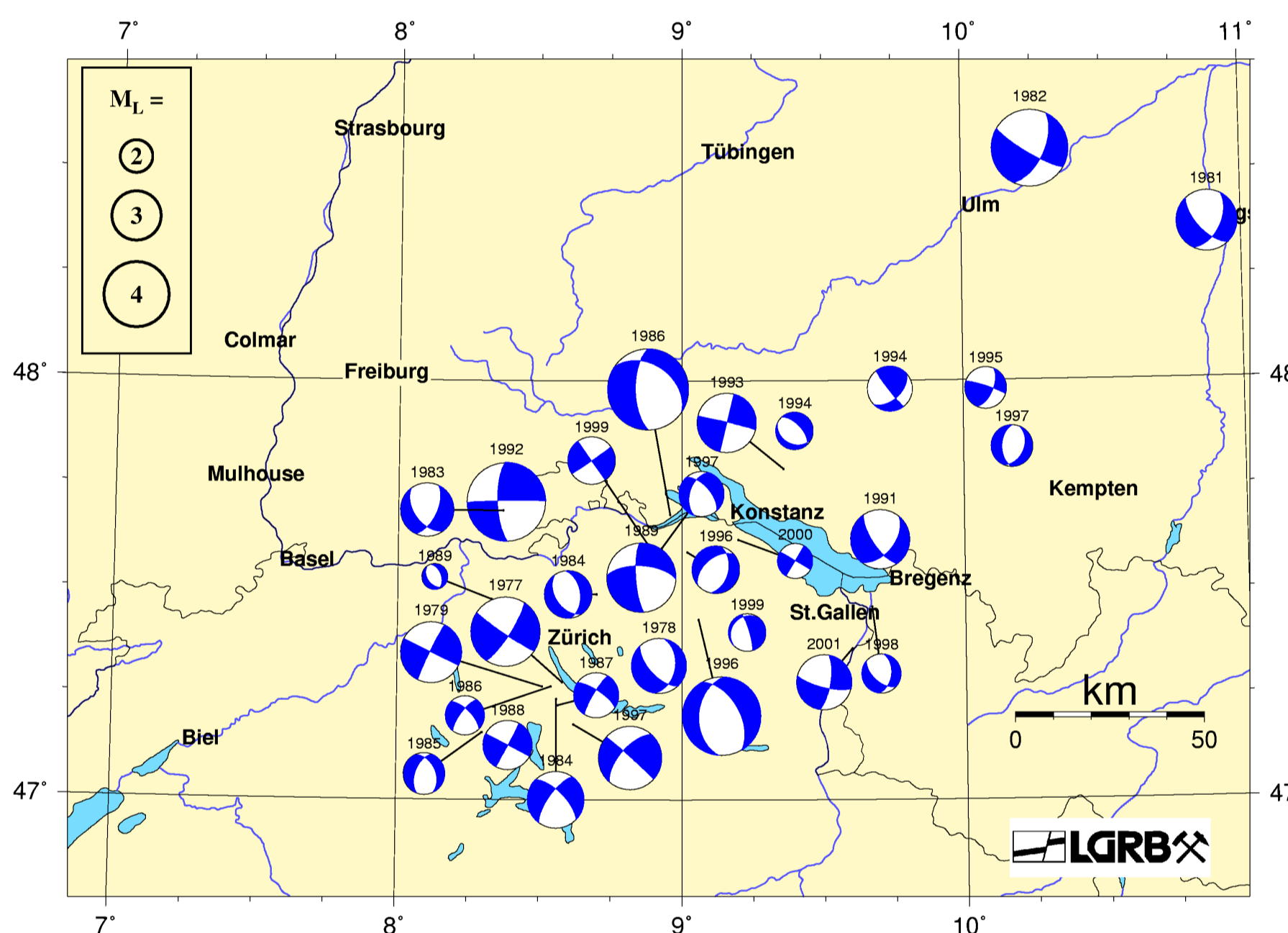


Abb. 3 oben: 20 Herdflächenlösungen von Erdbeben in der Oberkruste des Molassegebietes.

Abb. 3 unten: 31 Herdflächenlösungen für Beben in der Unterkruste.



## Modellvorstellungen

Die oben gefundene Spannungsverteilung ist in Abb. 6 zusammen mit möglichen Bewegungsflächen schematisch skizziert. Welche Modellansätze gibt es, um eine vertikale maximale Hauptspannung in Ober- und Unterkruste zu erklären und gleichzeitig die Alpenkompression in der Oberkruste zu berücksichtigen:

- Durch viskose Entkopplung in der Mittelkruste würde die Alpenkompression fast ausschließlich in die Oberkruste weitergegeben, was nach Dewey et al. (1998) zu lateraler und vertikaler Dehnung (Extrusion) führen könnte.
- Die Adriatische Mikroplatte wirkt als Indenter und verursacht in der gesamten Vorlandkruste Extensions- und Strike-Slip-Tektonik (Regenauer-Lieb & Petit, 1997).
- Andeweg & Cloetingh (1998) schlagen eine Entlastung der Vorlandkruste durch rezente Hebung der Alpen vor. Diese Entbiegung komprimiert den oberen Teil der Kruste und dehnt den unteren Teil. Die neutrale Zone dazwischen könnte der bisher bebenfreien Mittelkruste entsprechen.
- Die Entbiegung könnte um differentielle Laständerungen in Ost- und Westalpen erweitert werden, was zu lateraler Verbiegung und Kippung des Vorlandes führen würde.
- Gudmundsson (1994) vertritt die Ansicht, dass postglaziale isostatische Hebungen auch im Alpenvorland auftreten können. Diese Ausgleichsbewegungen und damit zusammenhängende lokale Erosion könnten ein heterogenes Spannungsfeld in der Oberkruste verursachen.
- Ein Abschiebungsregime könnte auch durch laterale Dichteunterschiede begünstigt werden, die nach Kastrup et al. (2001) auf die Alpenwurzel zurückzuführen wären.

Eine Entscheidung, welche Arbeitshypothese die Beobachtungen erklären kann, lässt sich wahrscheinlich nur durch Modellierung unter Einschluss von Temperatur und Rheologie treffen. Dies führt weiter zu der Frage, wie überhaupt Erdbeben in der Unterkruste auftreten können. Die Problematik eröffnet sich in Abb. 7, in der die Seismizitäts-Tiefenverteilung den lithologischen Vorstellungen für den Hegau (nach Glahn et al., 1992) und einer Geotherme (nach Deichmann & Rybach, 1989) gegenübergestellt werden.

Die Xenolithe deuten - im Einklang mit den seismischen Beobachtungen - auf eine quarzreiche Unterkruste hin. Mafische Granulite (Pyrobitole) machen dagegen nur einen geringen Anteil der Xenolithe aus und sind sehr wahrscheinlich auf die Basis der Kruste beschränkt. Nach klassischer Vorstellung müsste eine quarzreiche Unterkruste rheologisch weich sein und folglich keine Beben zulassen. Denkbar wäre, dass Hochtemperatur-Beben durch Änderungen des Fluidrucks infolge schneller Dehydratisierung (Ague et al., 1998) ausgelöst werden. Die Zusammenhänge sind allerdings noch weitgehend ungeklärt.

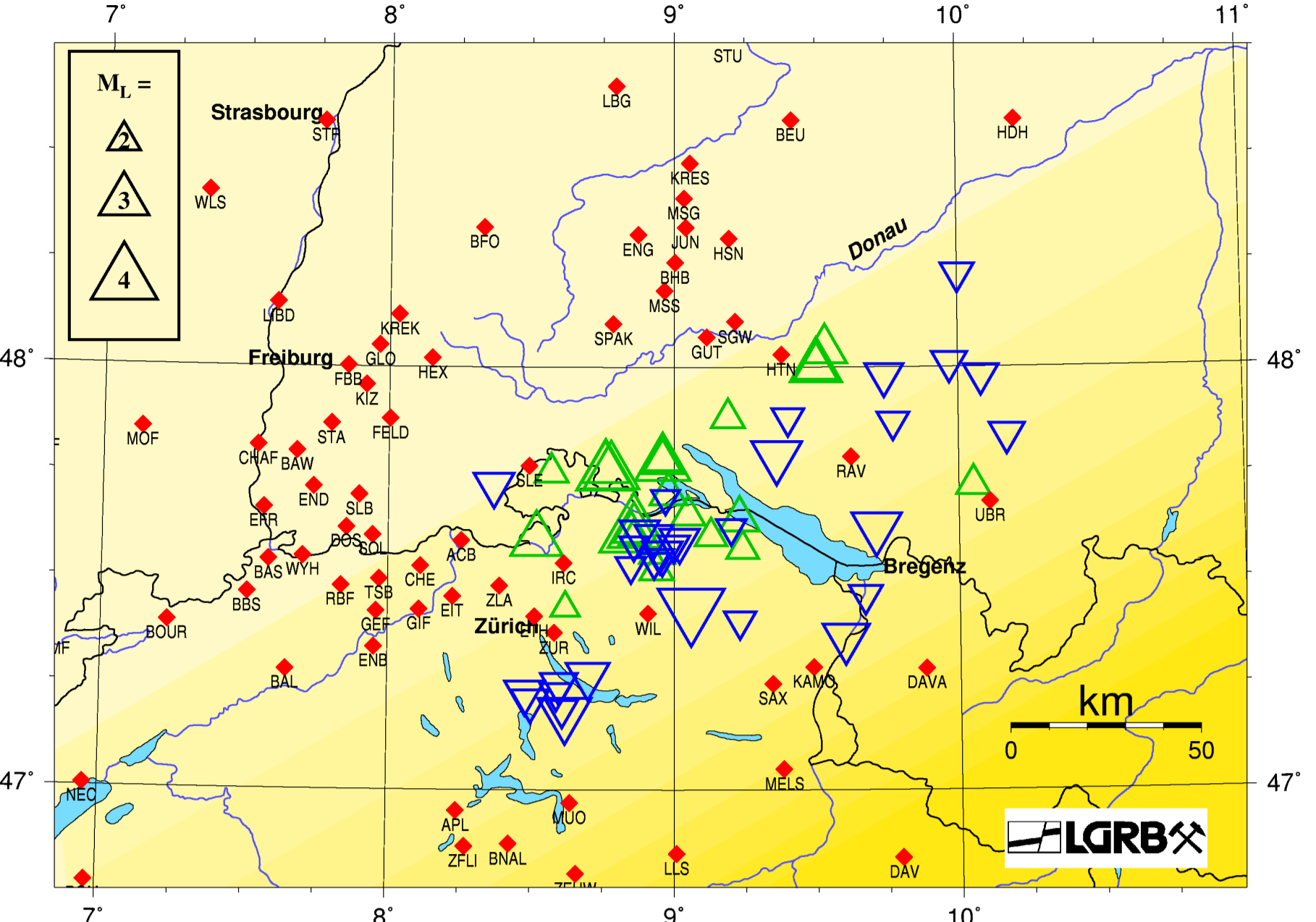


Abb. 1: Die Molasse im nördlichen Alpenvorland mit seismischen Stationen und relokalierten Epizentren 1991-2001 (Herde in der Oberkruste: grüne Dreiecke; in der Unterkruste: blaue, invertierte Dreiecke). Die Schattierung deutet das Abtauchen der Moho an.

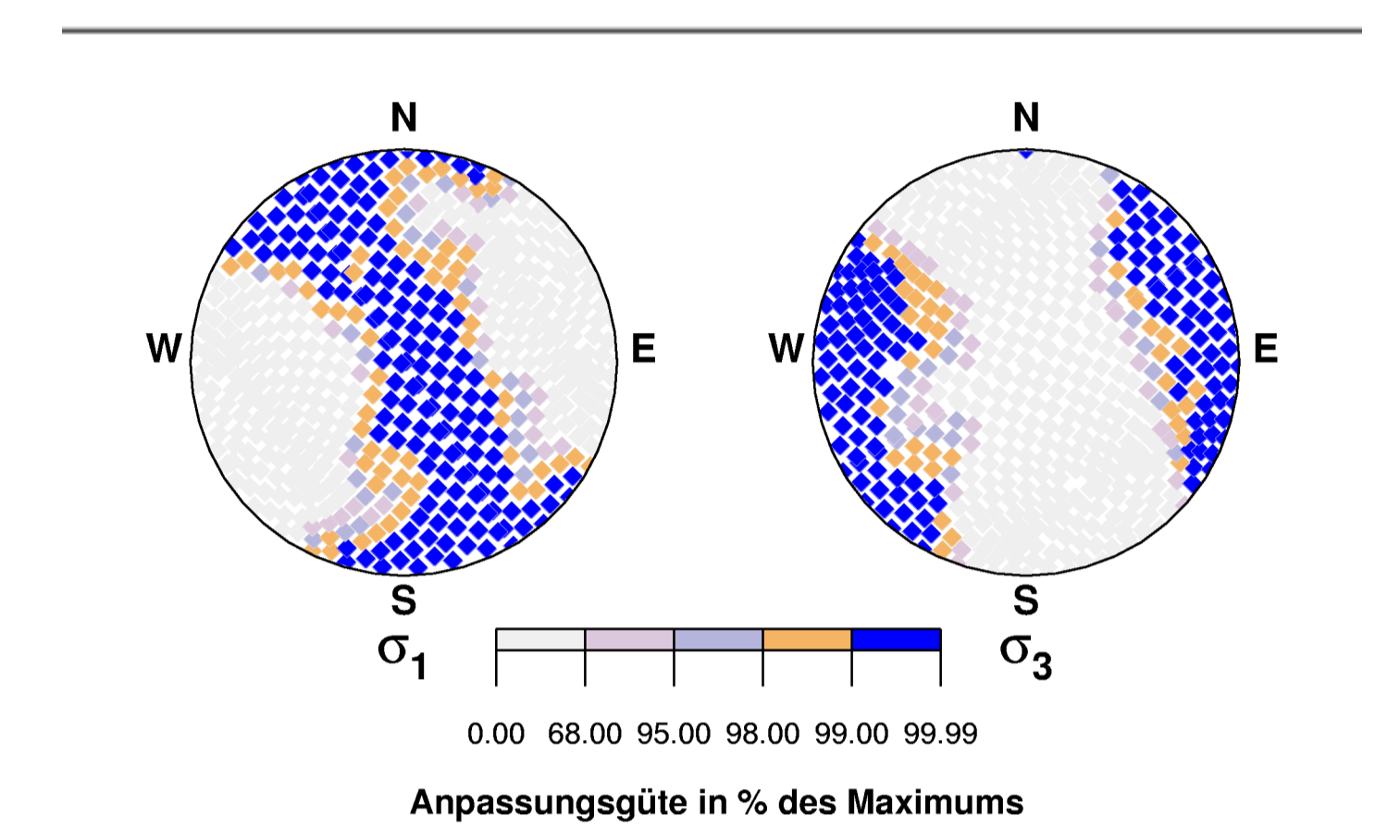
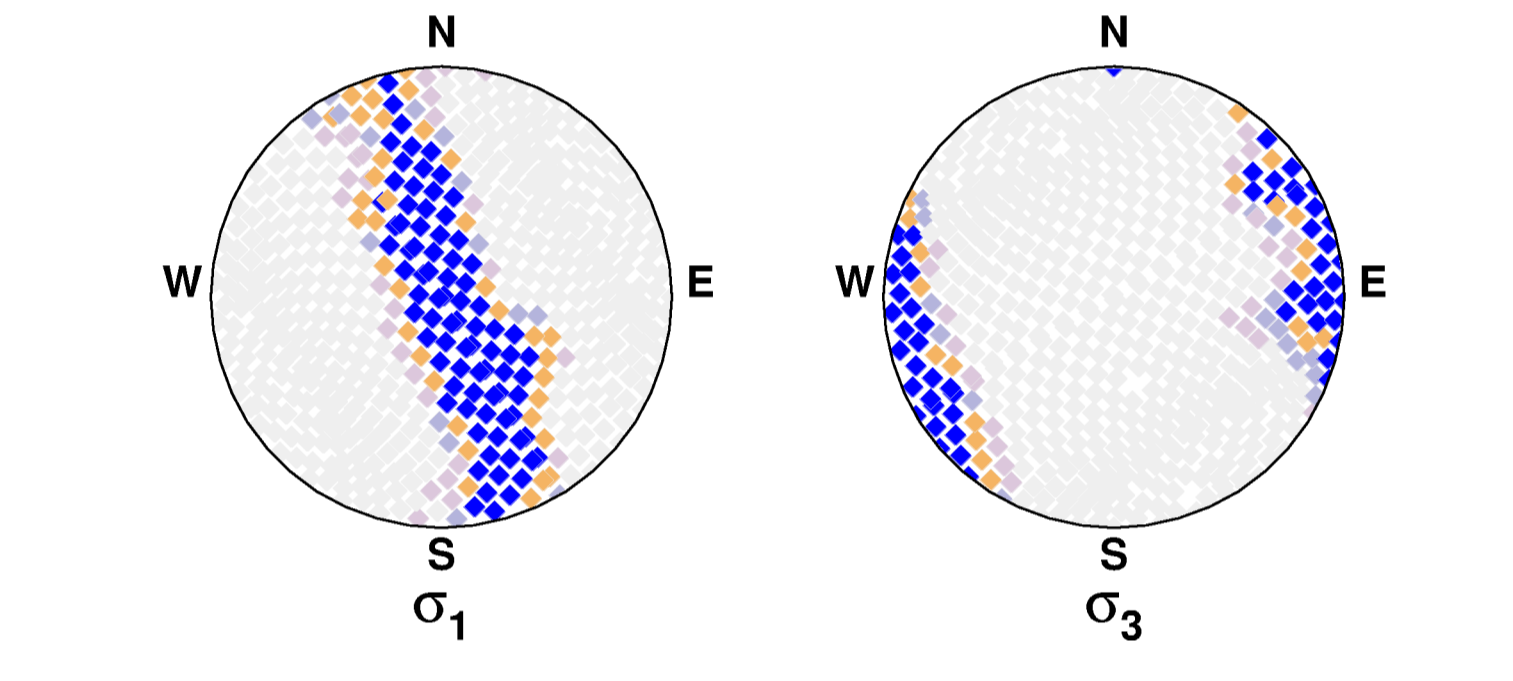


Abb. 5: Spannungsinversion der Herdflächenlösungen für Ober- (oben) und Unterkruste (unten). Dunkelblau markiert sind die auf ein Prozent besten Anpassungen für die maximale ( $\sigma_1$ , links) und die minimale ( $\sigma_3$ , rechts) Hauptspannung.



## Spannungsinversion

In einem als homogen angenommenen Spannungsfeld können nach Gephart & Forsyth (1984) unterschiedlich orientierte Schwächezonen in der Erde seismisch aktiv sein. Eine Kollektion von Herdflächenlösungen (HFL) ermöglicht es also, auf den zugrunde liegenden Spannungstensor zu schließen. Dabei werden die Winkelabweichungen zwischen den beobachteten Dislokationsvektoren und der Orientierung der berechneten größten Scherspannung minimiert.

Diese Spannungsinversion (ausgeführt mit einem Programm der o.a. Autoren, überarbeitet von Th. Plenefisch) ergab für die Aufteilung des Datensatzes nach Oberkruste (20 HFL) und Unterkruste (31 HFL) die in Abb. 5 dargestellten Ergebnisse: während für die Unterkruste überwiegend ein Abschiebungsregime (vertikale  $\sigma_1$ -Achse) zu erkennen ist, bleibt die Kompressionsrichtung in der Oberkruste unbestimmt (vertikale oder horizontale  $\sigma_1$ -Achse), d.h.  $|\sigma_1| \approx |\sigma_2|$ . Gemeinsam ist beiden Tiefenstockwerken eine Extensionsrichtung (E bis ENE für  $\sigma_3$ ) mit einer Unsicherheit von etwa  $\pm 20^\circ$  parallel zum Streichen der Molasse. Eine horizontale  $\sigma_1$ -Achse in der Oberkruste ist kompatibel mit einer horizontalen Kompression aus Richtung der Alpen (z.B. Neugebauer & Wallner, 1993), während sich eine vertikal stehende  $\sigma_1$ -Achse damit nicht erklären lässt.

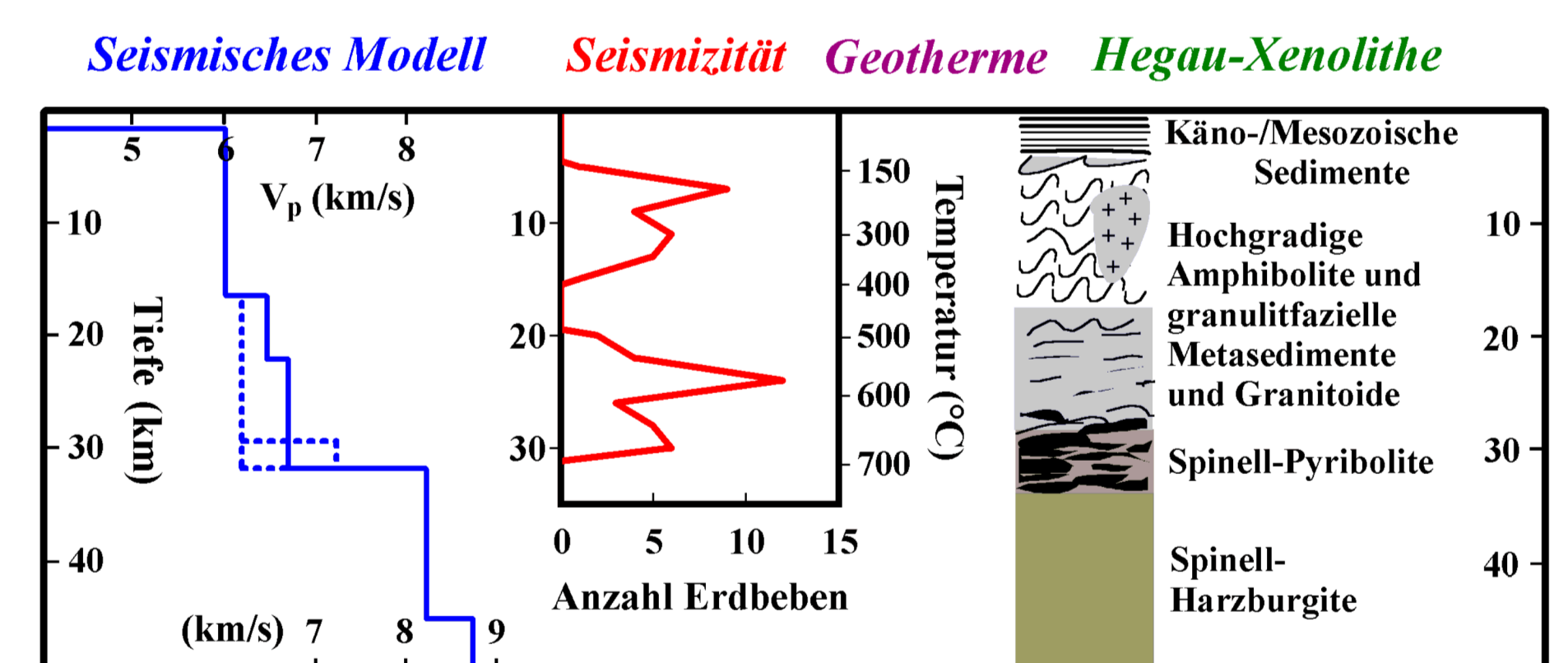


Abb. 7: Seismische Modelle (Lokalisierungsmodell durchgezogen), Seismizitäts-Tiefenverteilung (2km-Bins), Geothermie (nach Deichmann & Rybach, 1989) und lithologisches Modell (nach Glahn et al., 1992) in der Gegenüberstellung.

## Quellennachweis und Danksagung

Einige Herdflächenlösungen und Lokalisierungen wurden der Literatur entnommen oder von KollegInnen persönlich mitgeteilt. Die genauen Quellenangaben sind auf Anfrage erhältlich.

Ganz besonders bedanken möchten wir uns bei Nico Deichmann für die gute Zusammenarbeit. Weiterhin standen uns mit Daten, Herdflächenlösungen, Programmen, Zeichnungen, Manuskripten, Anregungen und Rat und Tat zur Seite:

J. Ansoerge, M. Baer, A. Barthel, K.-P. Bonjer, J. Braunmiller, W. Brüstle, J. Crocoll, K. Evans, S. Mellert, Th. Plenefisch, A. Rudloff, P.M. Sachs, E. Schmedes, G. Schneider und J. Schuff.

## Kontakt

Stefan Stange  
LGRB, Erdbebendienst  
Albertstraße 5  
79104 Freiburg

stange@lgrb.uni-freiburg.de  
strehlau@pclab.ifg.uni-kiel.de



## Literatur

- Ague, J.J., J. Park & D.M. Rye (1998), Geophys. Res. Lett. 25, 4221-4224.  
 Andeweg, B. & S. Cloetingh (1998), Geol. Soc. London Spec. Publ. 134, 403-422.  
 Deichmann & Rybach (1989), Geophys. Monogr. 51 (IUGG Vol. 6), 197-213.  
 Dewey J.F., R.E. Holdsworth & R.A. Strachan (1998), Geol. Soc. London Spec. Publ. 135, 1-14.  
 Gephart, J.W. & D.W. Forsyth (1984), J. Geophys. Res. 89, 9305-9320.  
 Glahn, A., P.M. Sachs & U. Achauer (1992), PEPI 69, 176-206.  
 Gudmundsson, G.H. (1994), Eclogae geol. Helv. 87, 545-557.  
 Kastrup, U., M.L. Zoback, N. Deichmann, K. Evans, A.J. Michael & D. Giardini, submitted to J. Geophys. Res. (2001).  
 Neugebauer, H.J. & H. Wallner (1993), Die Geowissenschaften, 11, 360-364.  
 Regenauer-Lieb, K. & J.P. Petit (1997), J. Geophys. Res. 102, 7731-7746.