

# ELASTICKÉ VLASTNOSTI HORNIN

Hookeův zákon: napětí je  
úměrné deformaci materiálu

$$e = (l - l_0) / l_0$$

$$\sigma = F / S$$

$$\sigma = E e$$

$$\eta = (a - a_0) / a_0$$

$$\sigma = m E \eta$$

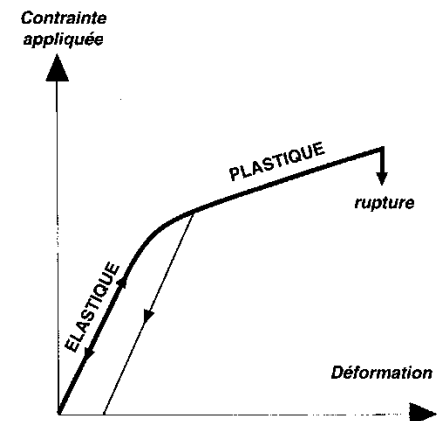
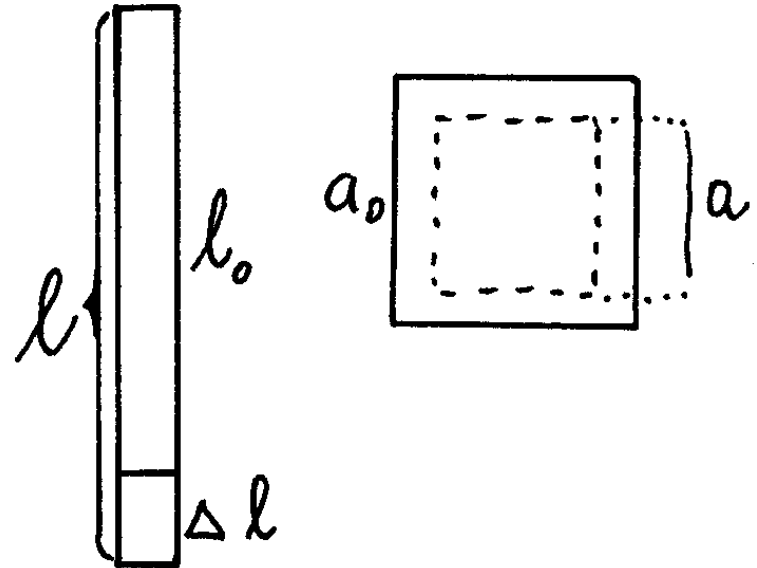
$e$  - poměrné prodloužení

$\eta$  - příčné zkrácení

$F$  - síla,  $S$  - průřez

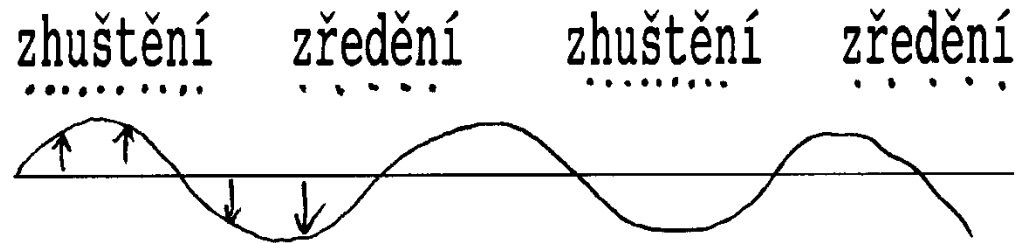
$E$  - modul pružnosti v tahu  
(Youngův modul)

$m$  - Poissonova konstanta



# Vlnění

Vlnění: podélné  
příčné



příklady: podélné - zvuk ve vzduchu  
příčné - struna na houslích

Elastické vlny existují podélné ( $V_p$ ) i příčné ( $V_s$ ). Měří se v  $km\ s^{-1}$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-m)}{D_m(1+m)(1-2m)}}$$

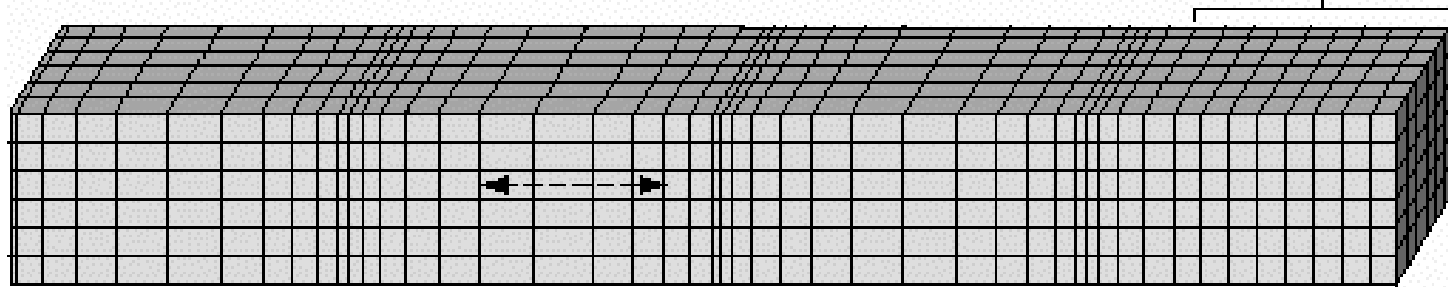
$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2D_m(1+m)}}$$

hustota

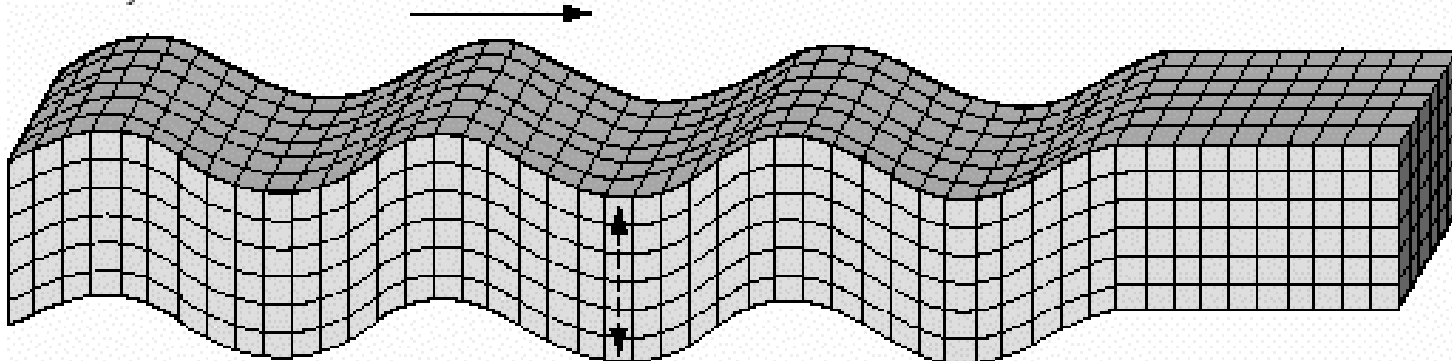
# Vlnění v horninách

- Direction of travel of waves
- ↔ Direction in which rock particles move (vibrate)

Primary or P wave



Secondary or S wave



# Měření rychlosti elastických vln v horninách

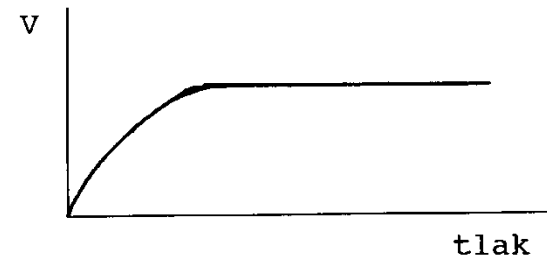


# Rychlosti elastických vln v minerálech

<i>Minerál</i>	$V_p$	$V_s$	<i>Minerál</i>	$V_p$	$V_s$
voda	1.45	-	amfibol	7.21	3.10
nafta	1.30	-	flogopit	5.39	3.10
forsterit	8.45	5.70	muskovit	5.80	3.36
fayalit	6.90	~	biotit	6.05	3.10
bronzit	7.25	4.22	mikroklin	5.70	3.15
diopsid	7.80	4.39	ortoklas	5.90	3.20
hedenbergit	7.14	~	plagioklasy	6.10	3.35
augit	7.20	4.17		6.55	3.54
dialag	7.01	4.25	křemen	6.50	4.11
pyrop	8.43	4.85	kalcit	6.70	3.40
grosulár	8.75	5.00	aragonit	5.67	3.54
diamant	16-18	~	dolomit	6.70	~
spinel	9.95	5.68			
magnetit	7.45	4.30			

# Rychlosti elastických vln v horninách

Závislost na tlaku.  
(uzavírání mikrotrhlin)



*Rychlosti hornin (závisejí na chem. složení)*

kyselé (granitoidy, biotit. ruly)

intermediární (diority, amf. biot. ruly)

bazické (gabroidy, amfibolity, eklogity)

ultrabazické

***V<sub>p</sub>***

***V<sub>s</sub>***

5.8

3.1

6.2

3.5

6.8

4.2

7.8

4.4

vliv regionální metamorfózy

vztah mezi rychlostmi a hustotami

sedimenty: závislost na pórovitosti

závislost na stupni nasycení pórů

# Rychlosti v magmatických horninách

( $V_p$  roste s bazicitou)

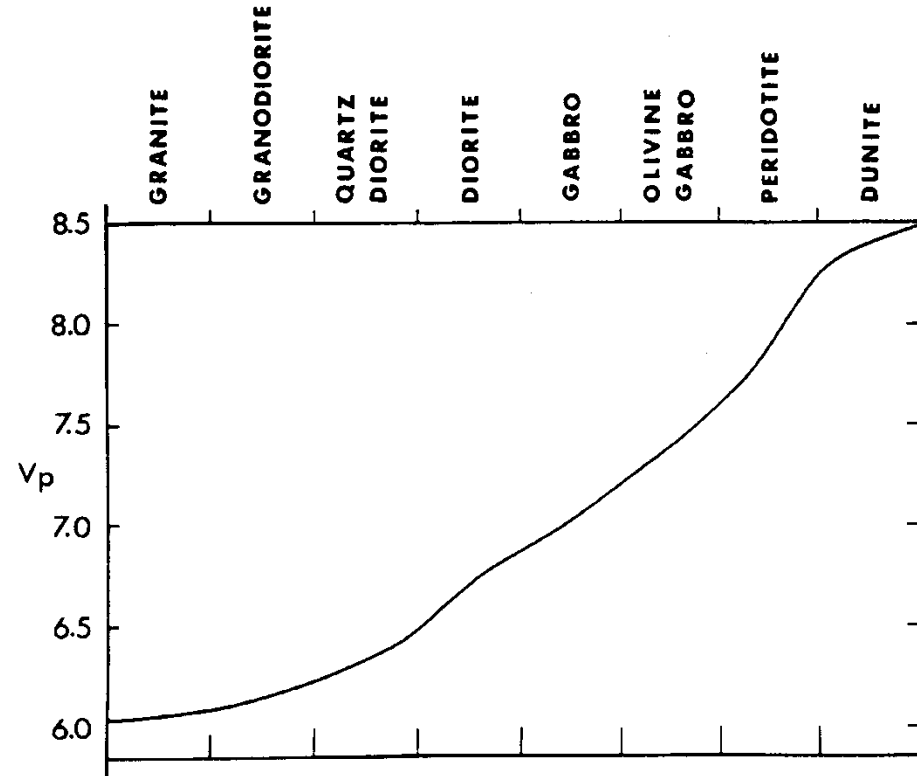
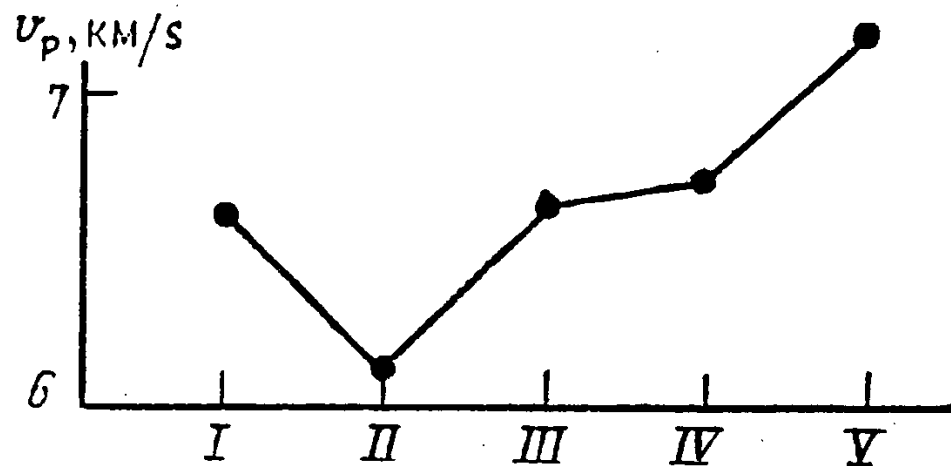


Figure 6. Diagram showing variation of compressional wave velocities at 150 MPa for crustal and upper-mantle rock types (Christensen, 1965).

# Vliv regionální metamorfózy

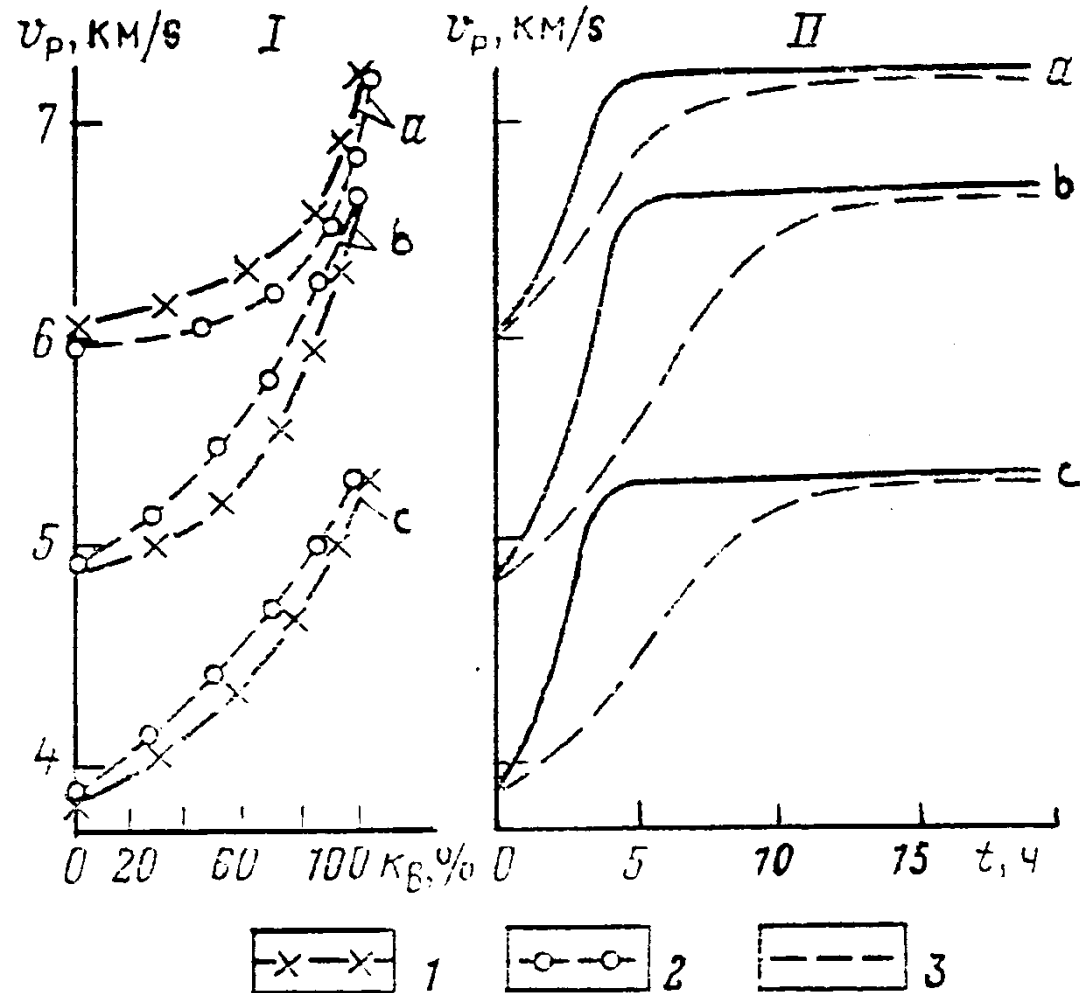


Změny rychlostí podélných vln během regionální metamorfózy

- I nemetamorfovaný diabáz
- II chloritizovaný a sausuritizovaný diabáz
- III amfibolit (amfibolitová facie)
- IV noritový granulit (granulitová facie)
- V eklogit



# Vliv syčení vzorku



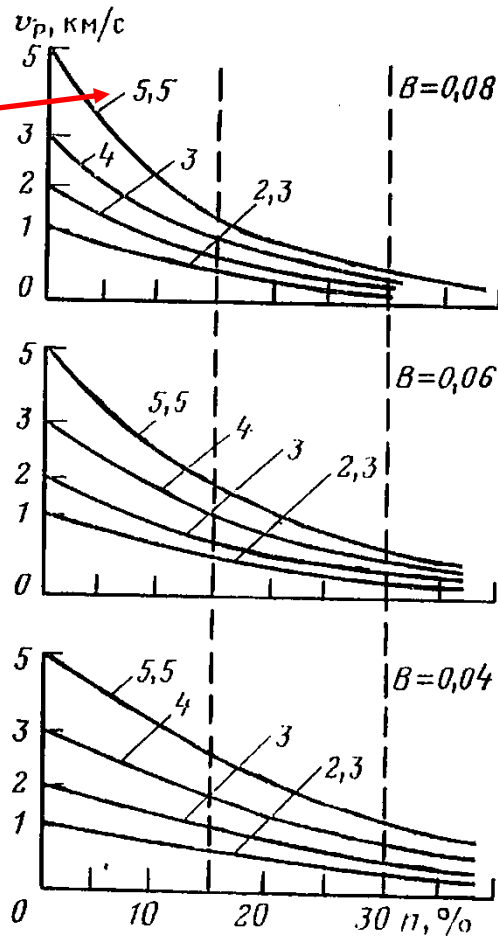
Změny rychlostí podélných vln v krystalických horninách v závislosti na nasycení vodou (I) a době syčení vzorku kapalinou (II)

a peridotit, b hyperstenický peridotit, c biotitický granit

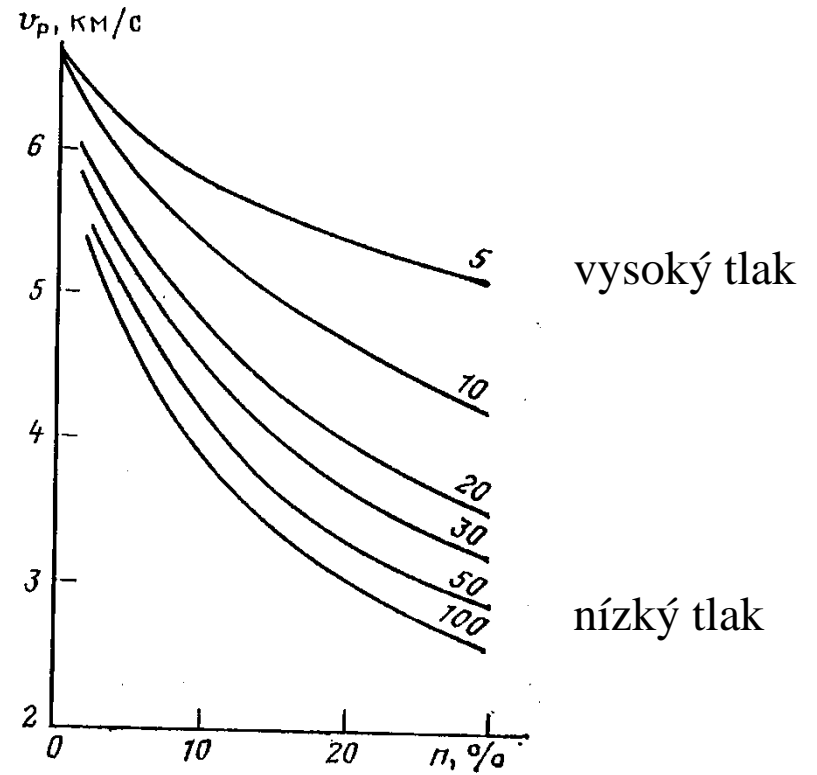
1 při syčení vzorku vodou, 2 při vysoušení nasyceného vzorku, 3 při syčení vzorku

# Rychlosti usazených hornin

rychlost skeletu

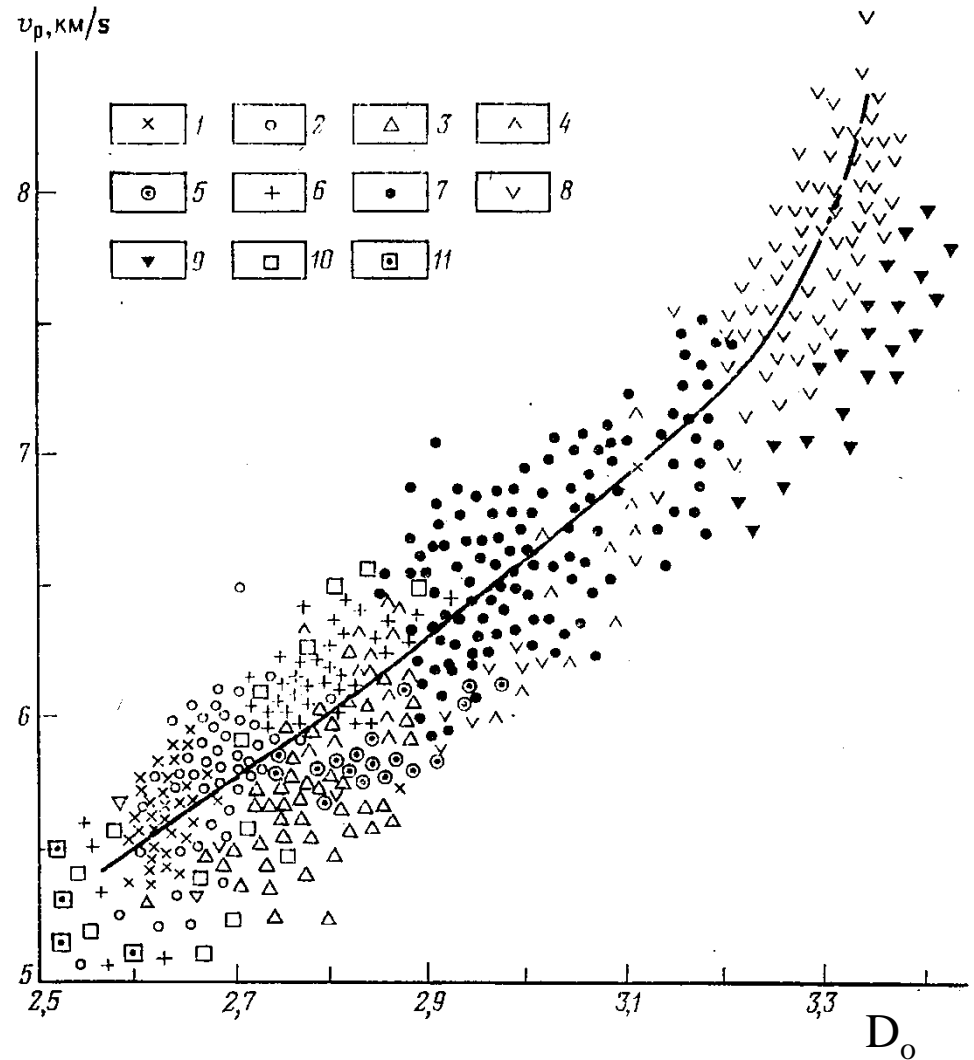


Závislost rychlostí podélných vln na porositě klastických sedimentů



Závislost rychlostí podélných vln na porositě karbonátů

# Závislost na hustotě

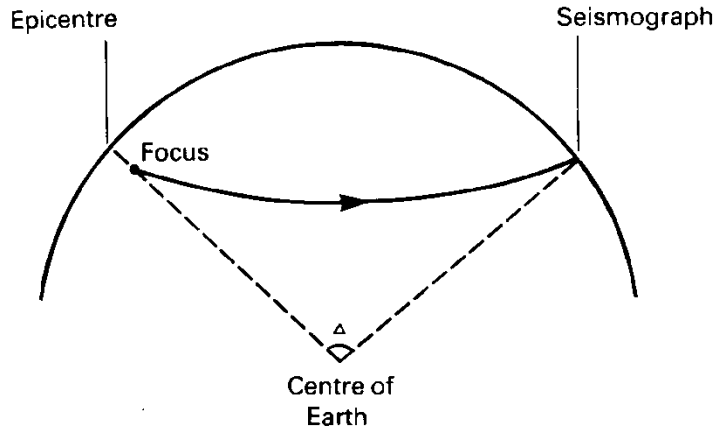


Závislost rychlostí podélných vln na hustotě intruzivních a metamorfovaných hornin

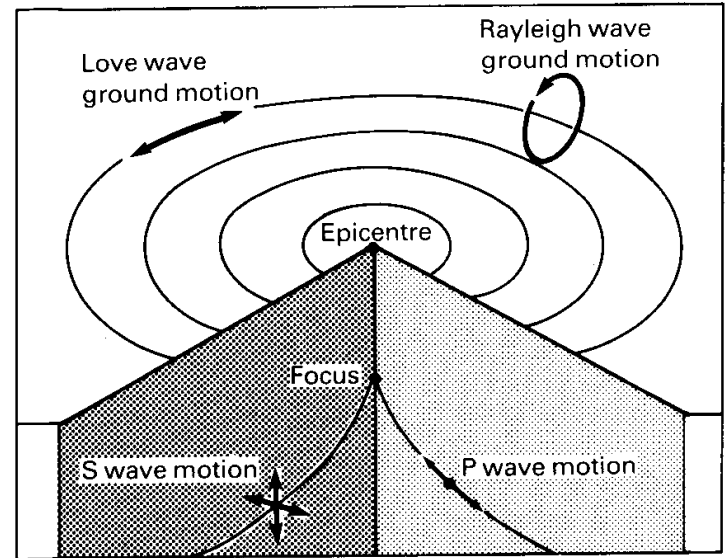
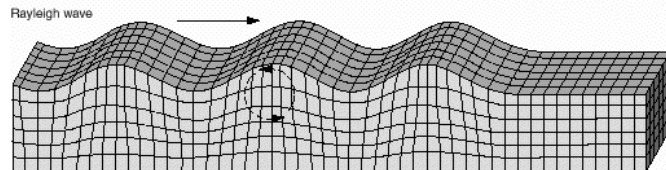
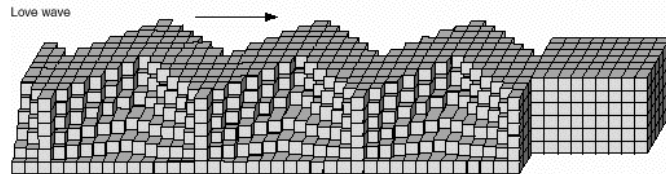
1 granity, 2 biotitické a biotiticko-amfibolické ruly,  
 3 kyaniticko-granáticko-biotitické ruly  
 4 amfibolitové ruly a amfibolity, 5 pagioklasové granulity  
 6 diority a gabrodiority, 7 gabronority, 8 ultrabazity,  
 9 eklogity, 10 lithifikované pískovce, 11 vápence

# ZÁKLADY SEISMOLOGIE

Základní pojmy: hypocentrum (ohnisko, fokus), epicentrum



**Fig. 2.1** Definition of epicentral angle,  $\Delta$ .



**Fig. 2.2** Focus and epicentre of an earthquake and the seismic waves originating from it (after Davies, 1968, with permission from Iliffe Industrial Publications Ltd).

# Hodochrony- časy příchodu seismikou vzbuzených vln

**Seismika** registruje časy příchodu

Vln **přímých** – hodochrona  $H_p$

Vln **odražených** – hodochrona  $H_o$

Vln **lomených** – hodochrona  $H_h$

Rozlišujeme seismiku

reflexní

refrakční

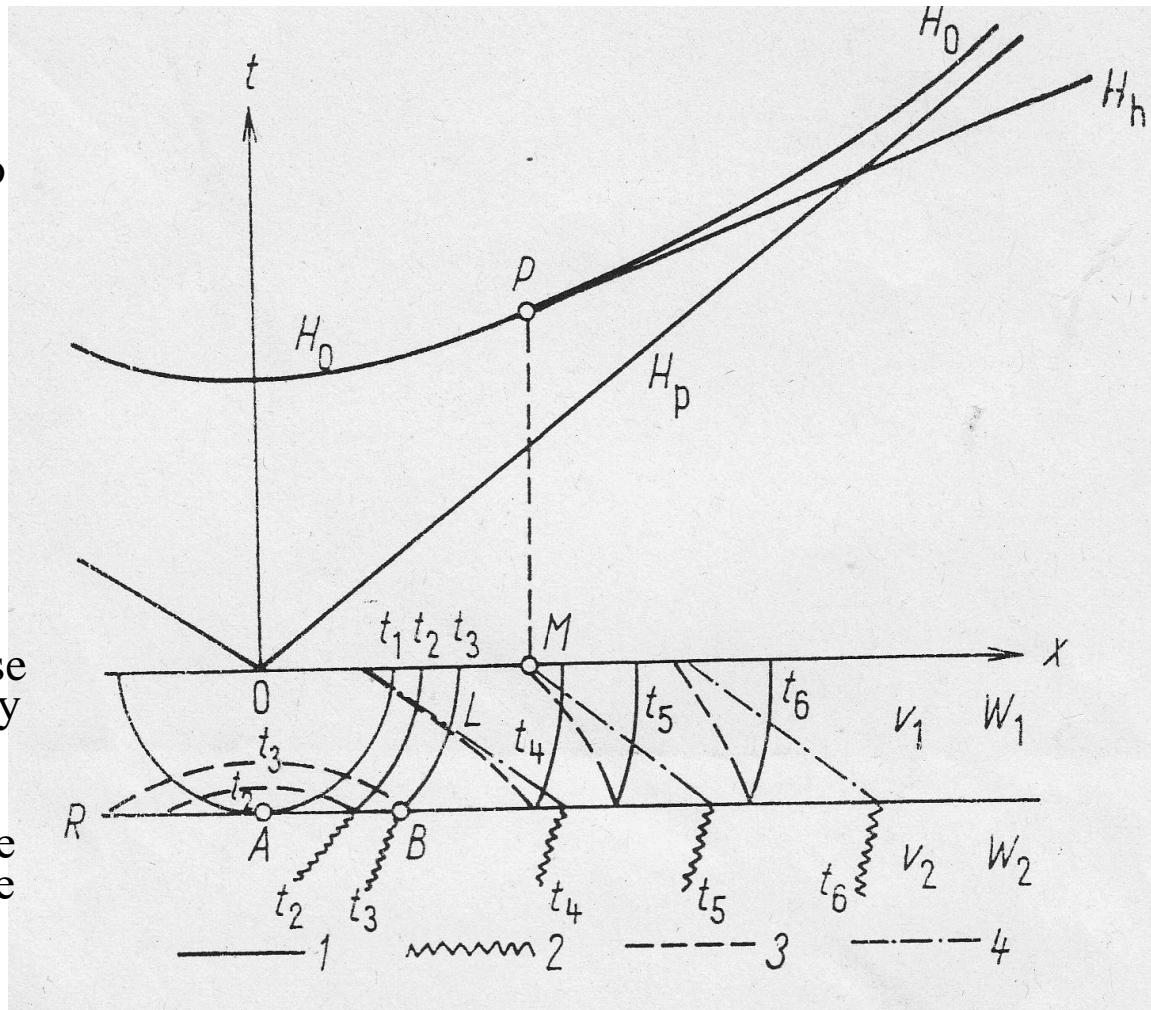
Anglické termíny: direct wave,  
reflected wave, head wave

Zdánlivá rychlost:  $x/t$ , skutečné  
rychlosti a hloubka rozhraní se  
zjišťují intrpretačními postupy

Skutečná rychlost  $V_h > V_o > V_p$

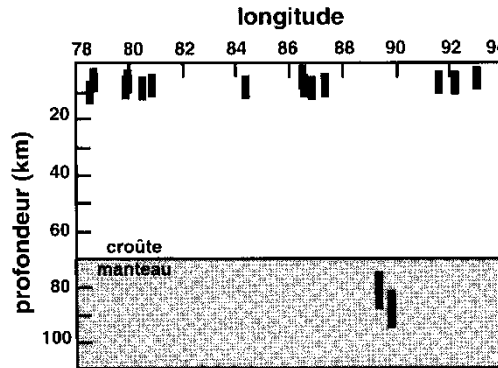
Rychlost ve vrstvě 2 je větší než ve  
vrstvě 1, head wave postupuje  
podle rozhraní rychlostí  $V_2$

Zdrojem vln jsou mělké exploze  
nebo vibrátory (bod 0)

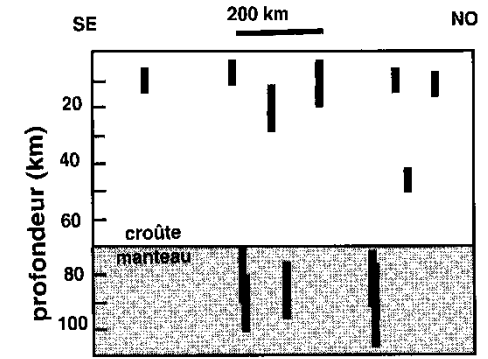


# Jak vzniká zemětřesení?

Zemětřesení je interpretováno jako výsledek pohybu dvou bloků podél zlomu

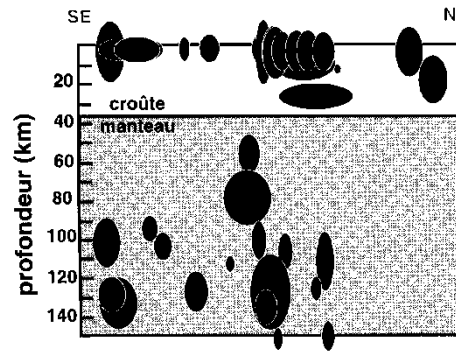


PLATEAU TIBETAIN



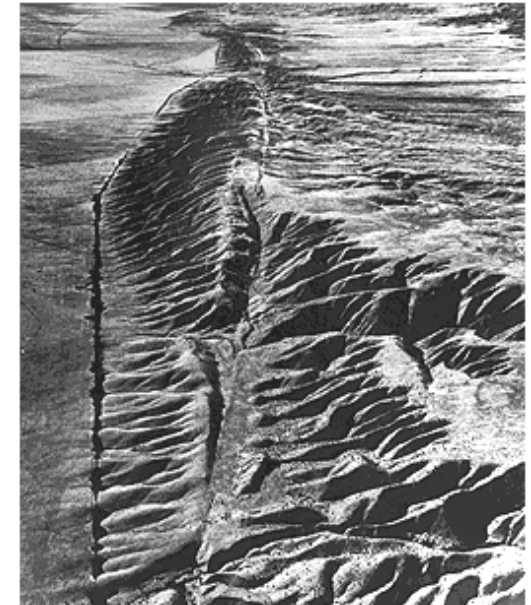
KARAKORUM

Vzniká díky nahromadění elastické energie v oblasti křehké tektoniky

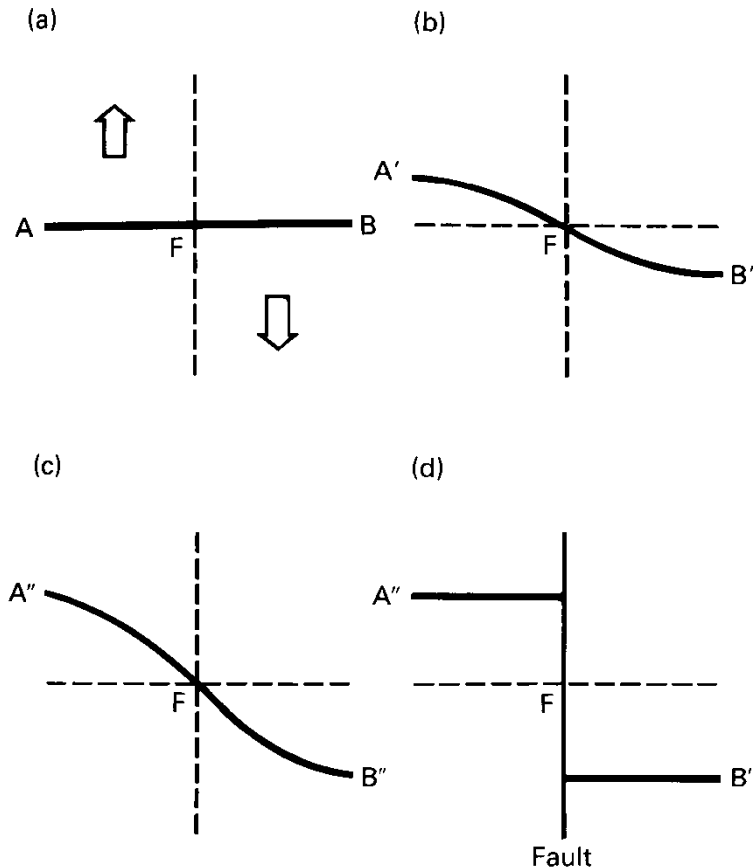


HAUT ATLAS

Mapujeme křehké domény v litosféře



# Mechanismus vzniku zemětřesení

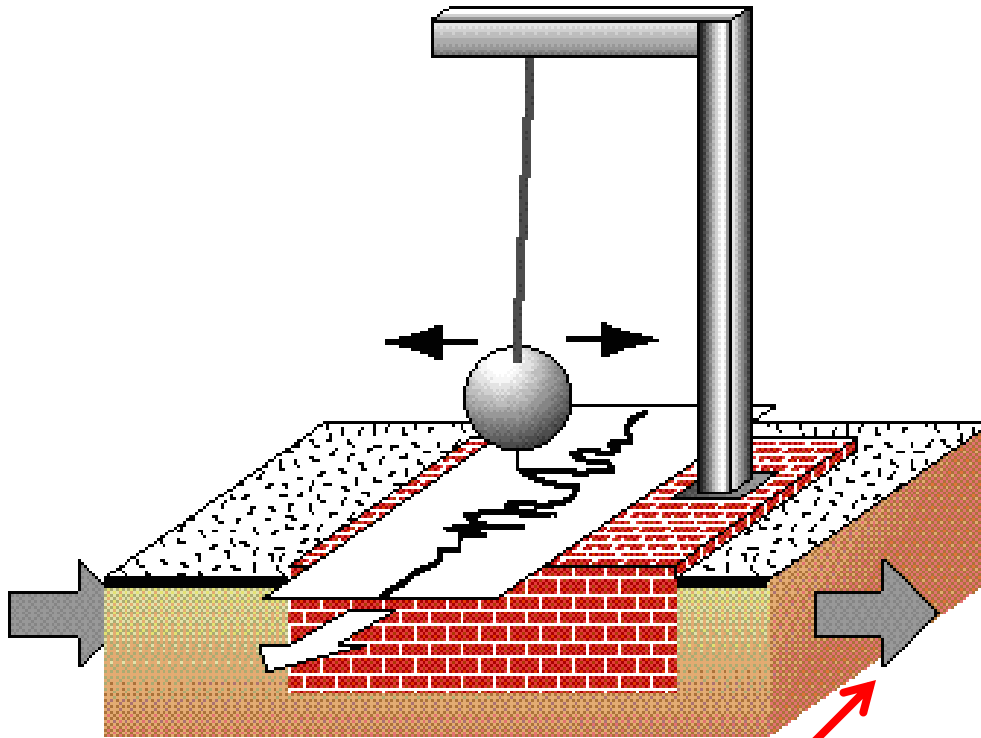


**Fig. 2.3** Elastic rebound mechanism of earthquake generation.

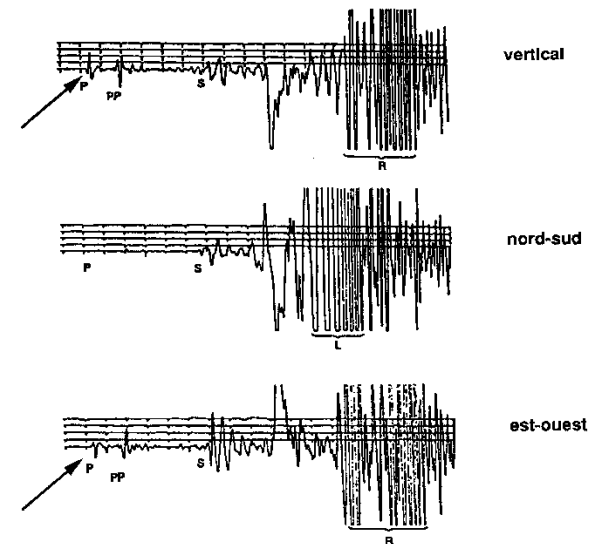
- a - stav před zemětřesením, čárkovane budoucí zlom, plně pomocná nodální linie
- b - elastická reakce na posun
- c - mezní elastická reakce
- d - nespojitý posun podél zlomu, následuje zemětřesení



# Seismograf, indikátor zemětřesení



registruje otřesy ve směru šipek, moderní seismografy jsou tříložkové: N – J, Z – V, vertikální





# World-Wide Standardized Seismograph Network

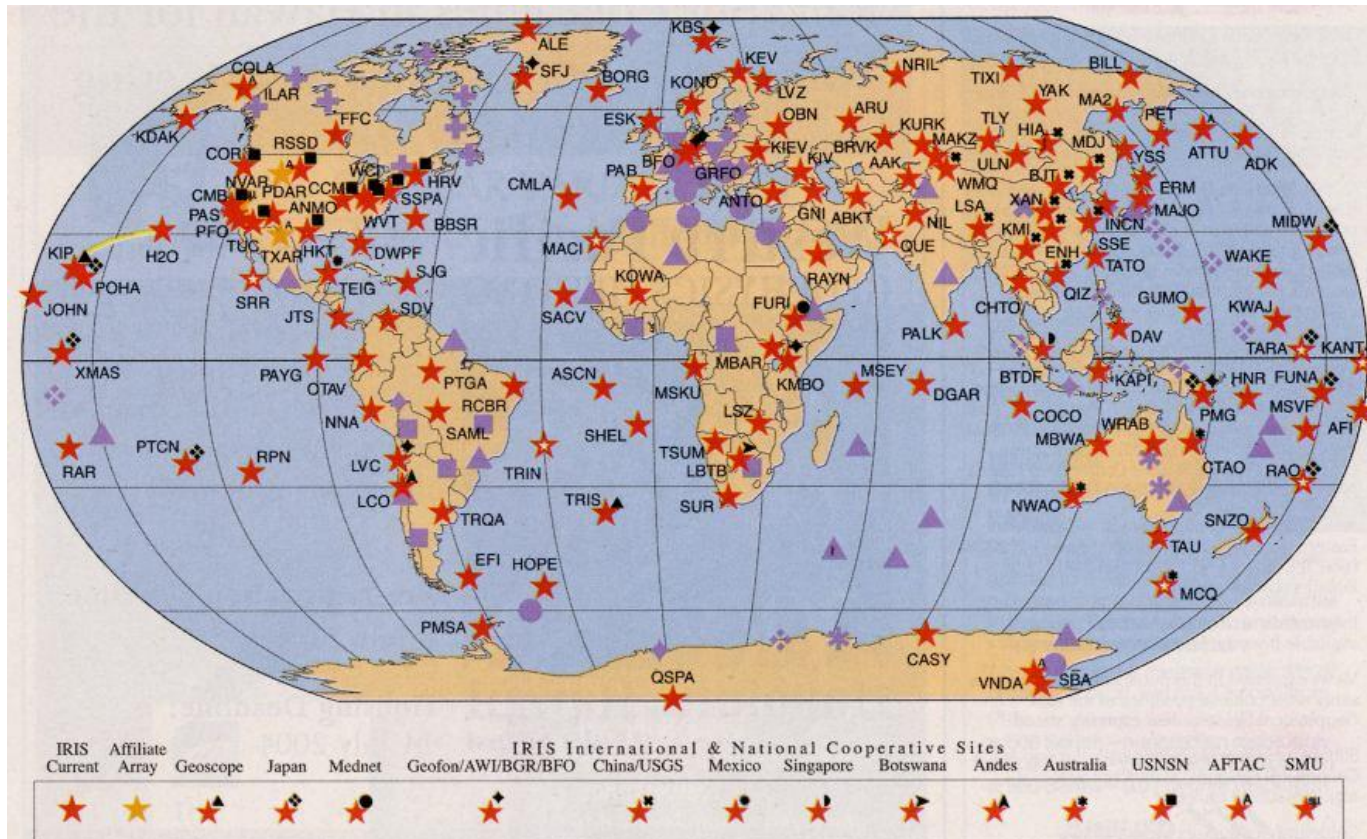
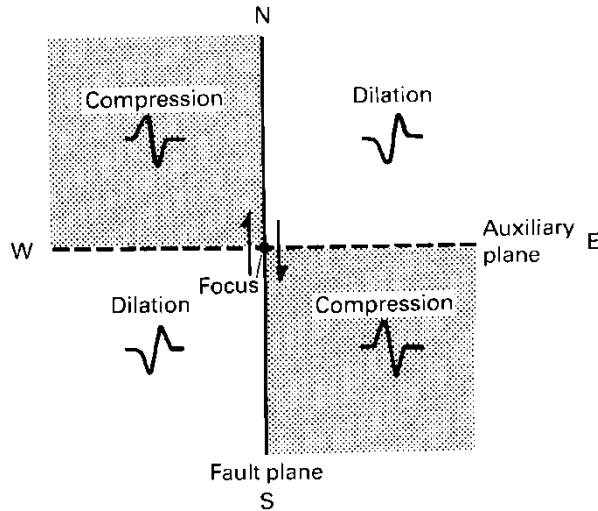


Fig. 1. Locations of the current GSN stations (red stars) and GSN affiliate arrays (orange stars) are shown, as well as sites planned for completion in the coming years (red-white stars). The site code name is indicated. The H2O sea floor site is connected to Hawaii by a re-used undersea telephone cable. GSN is a founding member of the Federation of Digital Seismic Networks (purple symbols) and coordinates with FDSN in station siting and open data exchange. Many GSN stations are cooperative with other networks, indicated by the symbol on the "shoulder" of the star.

Z rozdílu časů příchodu  $V_p$  a  $V_s$  se určí vzdálenost ohniska,  
kombinací vzdáleností z různých stanic se určí poloha ohniska

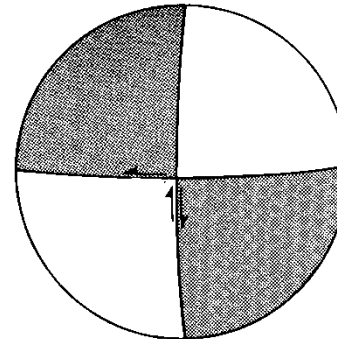
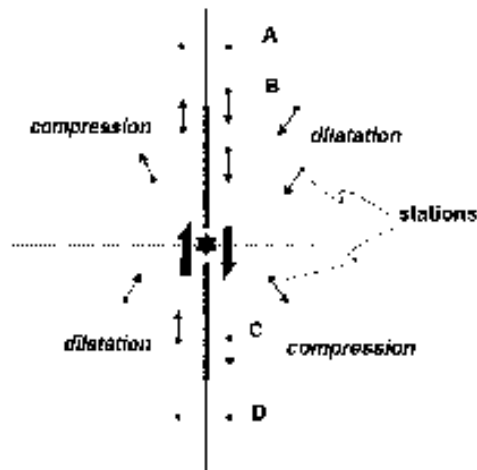
# Fokální mechanismy

přibližné určení orientace a sklonu zlomu, na němž bylo zemětřesení



v okolí zlomu existují oblasti stlačení a protažení, které se poznají z fáze příchozí seismické vlny

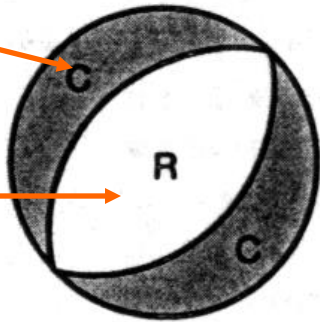
je-li zemětřesení registrováno mnoha různě rozmístěnými stanicemi, je možno oblasti stlačení a protažení vynést do stereografické projekce



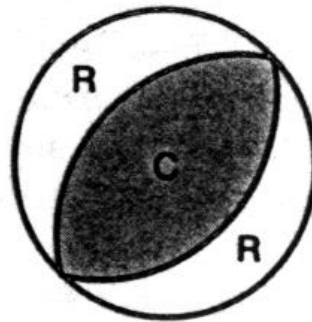
# Fokální mechanismy na zlomech tří typů

stlačení

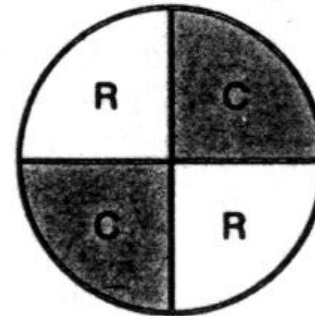
prodloužení



Normal fault



Thrust fault



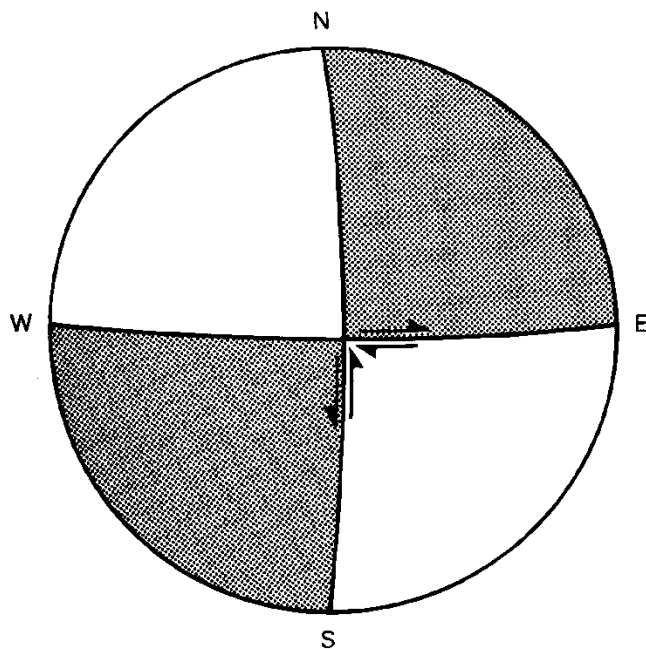
Strike-slip fault

strmý zlom s vertikálním pohybem

plochý zlom s horizontálním pohybem

strmý zlom s horizontálním pohybem

# Nejednoznačnost řešení fokálních mechanismů



**Fig. 2.7** Ambiguity in the focal mechanism solution of a strike-slip fault. Regions of compressional first motions are shaded.

vzhledem ke středové symetrii se nedá rozlišit zlom od pomocné nodální plochy

v tomto případě může zlom být orientován ve směru N – J i ve směru Z – V

# Fokální mechanismy v okolí zlomu San Andreas

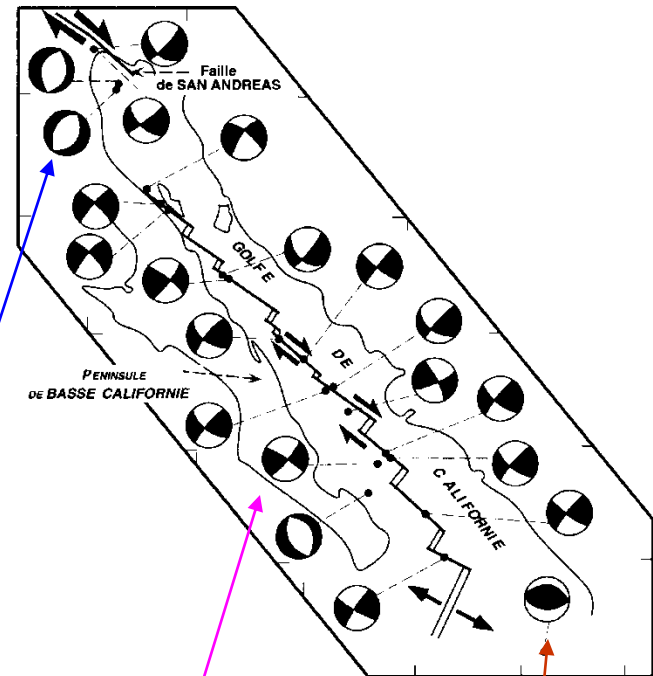


Figure V.18  
Mécanismes au foyer le long du golfe de Californie (Goff *et al.*, 1987).

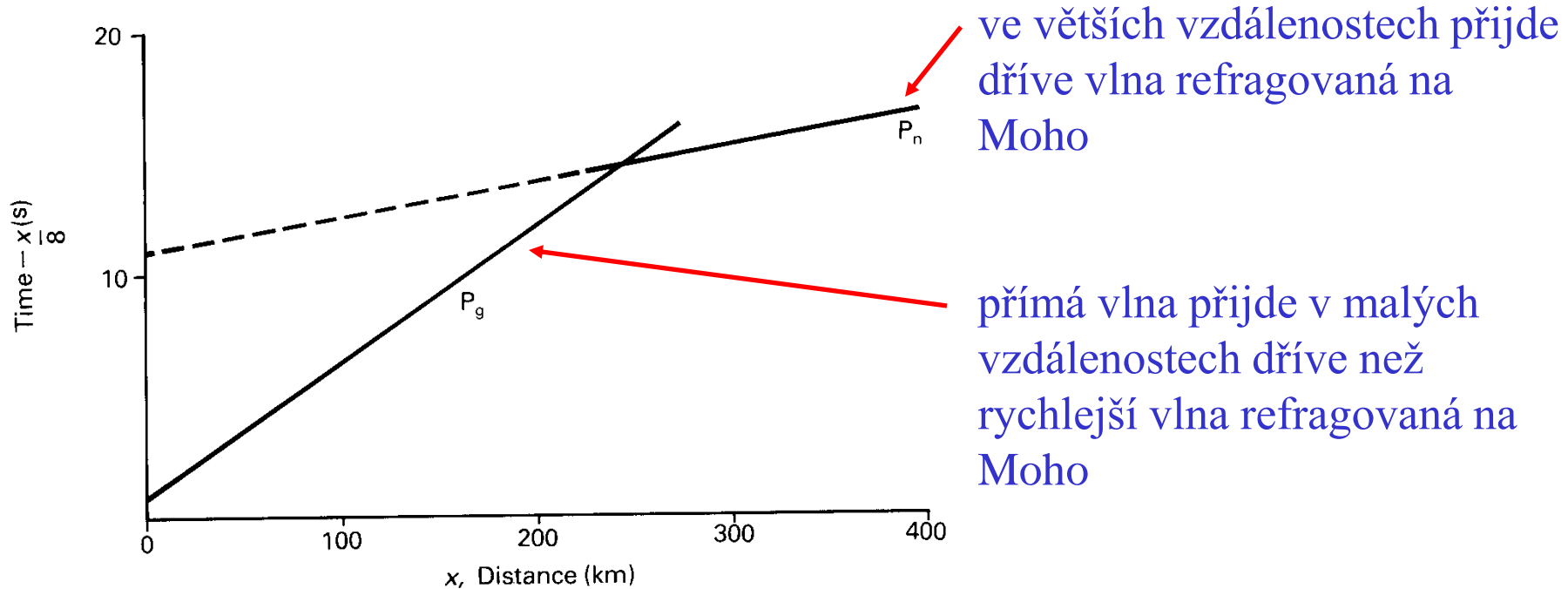
normální zlom

strike-slip zlom

násunový zlom

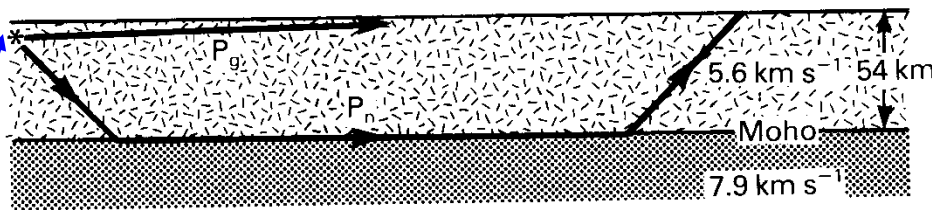
# STAVBA SPODNÍ KŮRY A SVRCHNÍHO PLÁŠTĚ

## refrakce na Moho



ve větších vzdálenostech přijde dříve vlna refragovaná na Moho

přímá vlna přijde v malých vzdálenostech dříve než rychlejší vlna refragovaná na Moho



kůra

Mohorovičičova diskontinuita

plášť

ohnisko

# Dráhy různých seizmických vln v Zemi

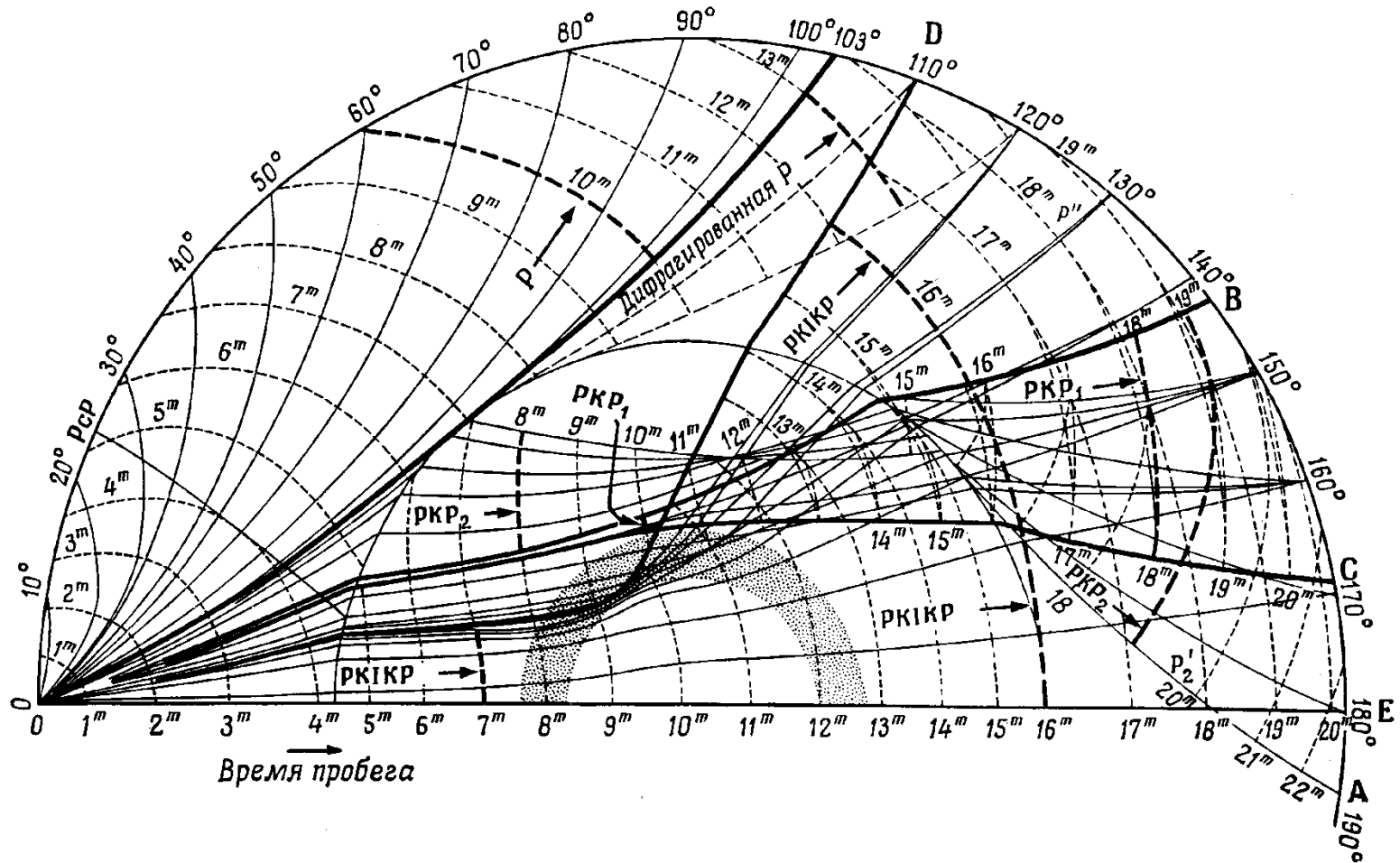
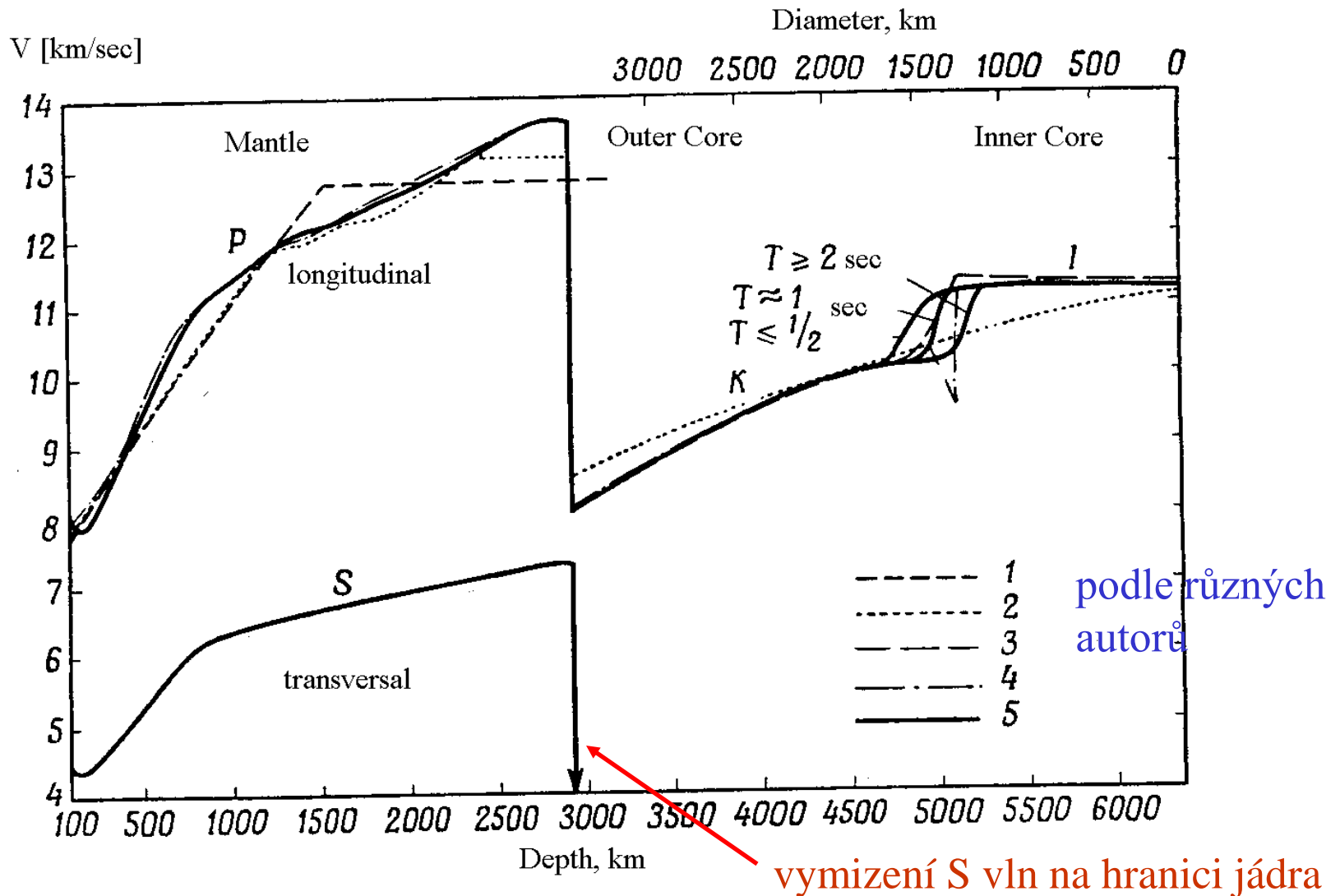


Рис. 29. Пути некоторых волн и линии равных времен пробега в минутах (волновые фронты) внутри Земли. Буквы А, В, С, D и Е соответствуют буквам на рис. 28. Штриховкой показана переходная зона от внешнего к внутреннему ядру.

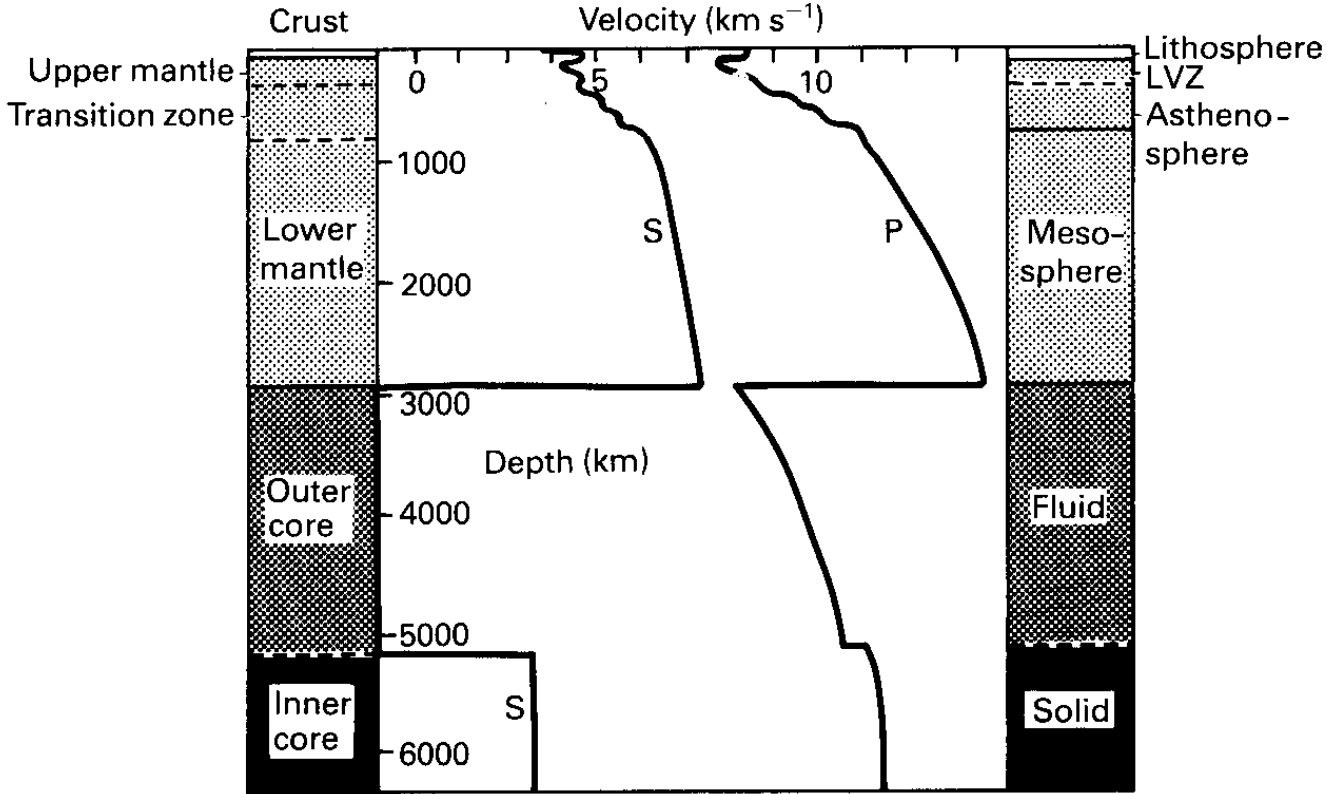
# Rychlostní stavba Země podle Gutenberga



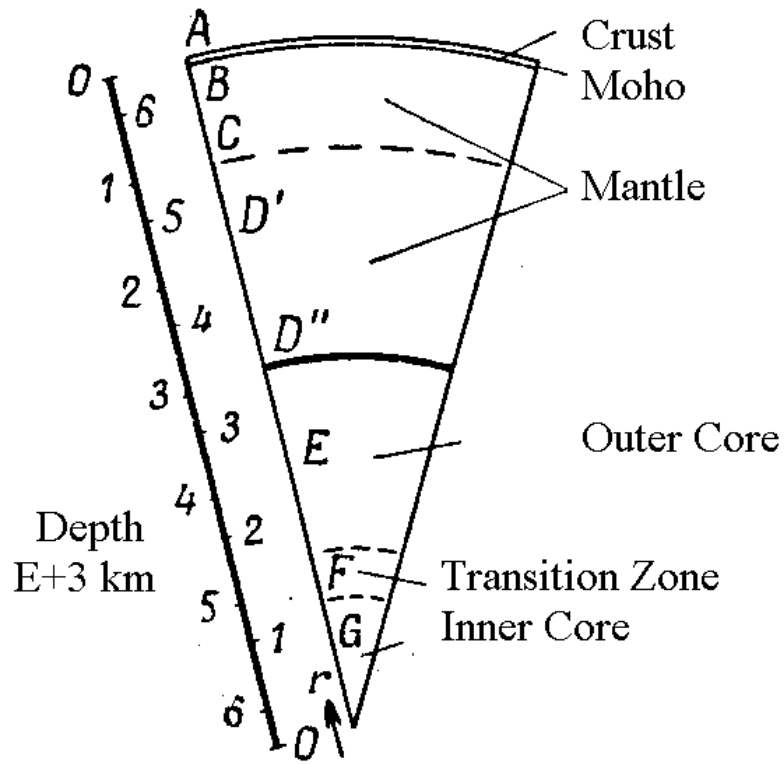
Velocities of longitudinal and transversal waves in the Earth's interior



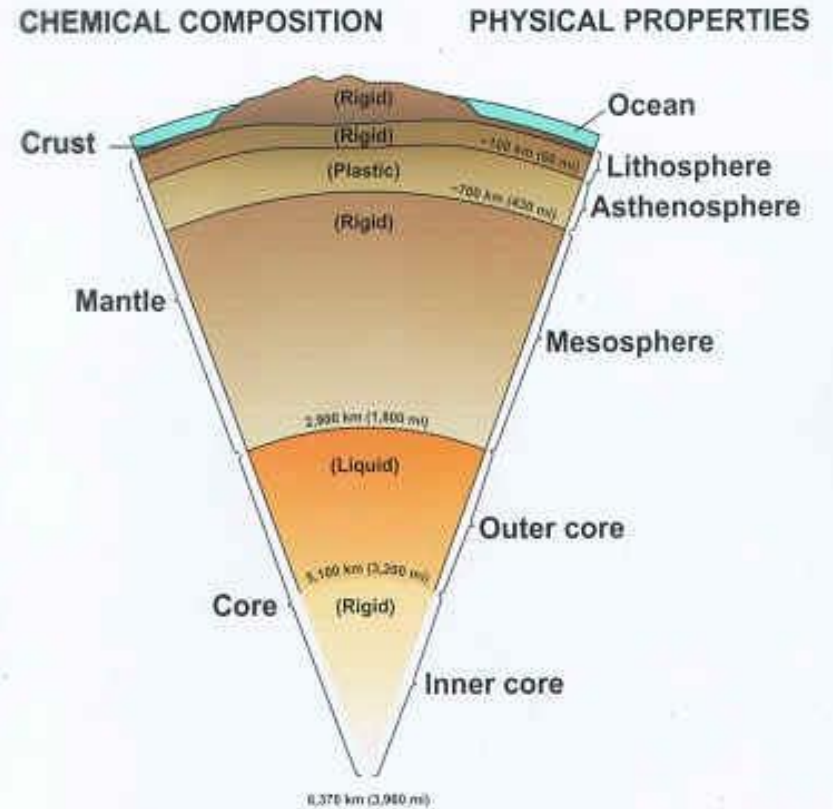
# Rychlostní stavba Země podle Harta et al.



# Slupky Země



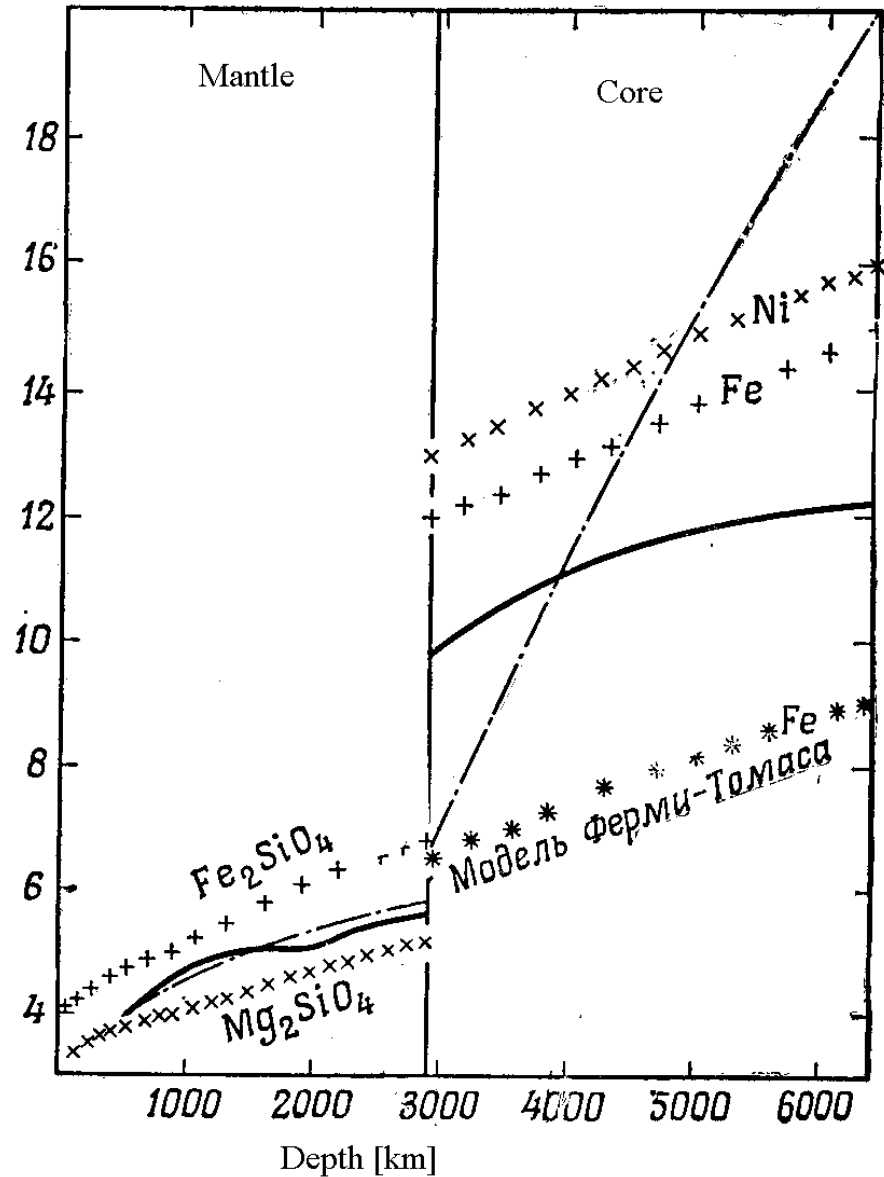
Layers of the Earth



# Hustotní stavba Země

hustotní skok na hranici pláště a jádra, existuje několik modelů k jeho vysvětlení

Density [g/cm<sup>3</sup>]



Variation of density with depth

# Composition of continental crust and upper mantle; a review

*David M. Fountain & Nikolas I. Christensen*

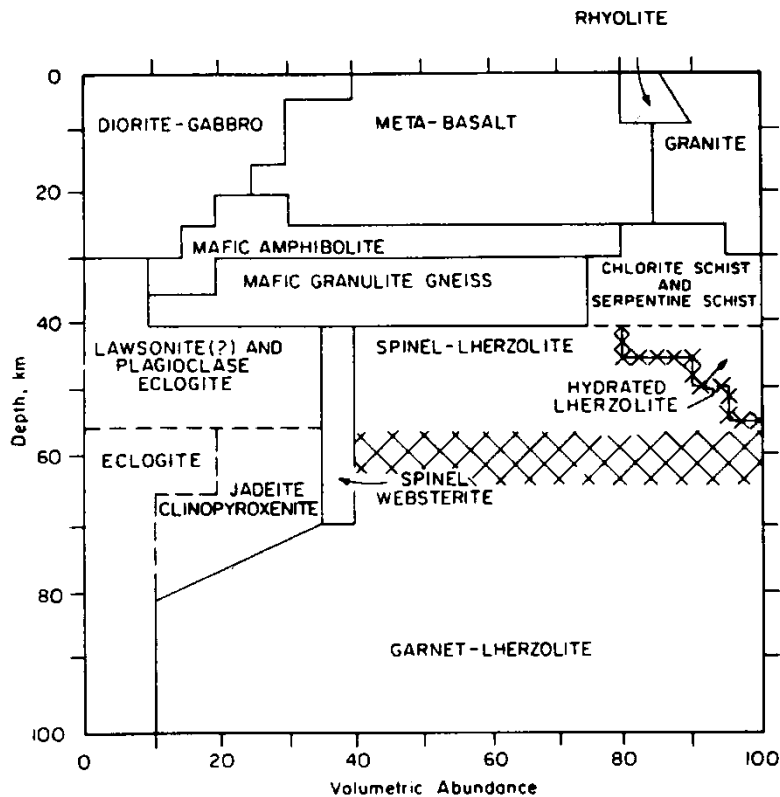


Figure 1. Model of the crust and upper mantle of the Colorado Plateau based on xenoliths (McGetchin and Silver, 1972).

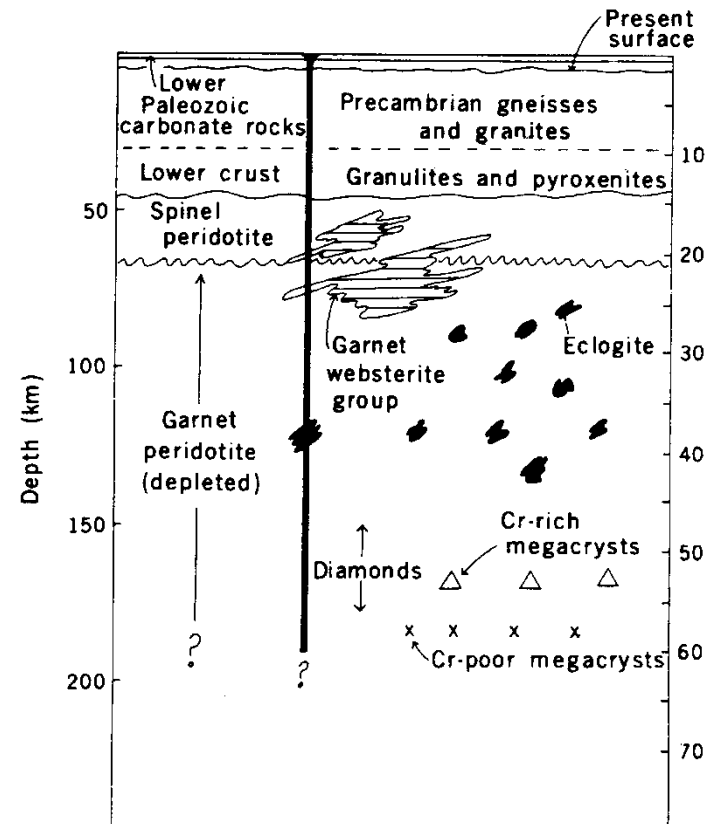


Figure 2. Schematic model of the crust and upper mantle beneath the Colorado-Wyoming Front Range area based on xenoliths (McCallum and Egger, 1976). Heavy vertical line represents the kimberlite.

# Vp v severní Americe

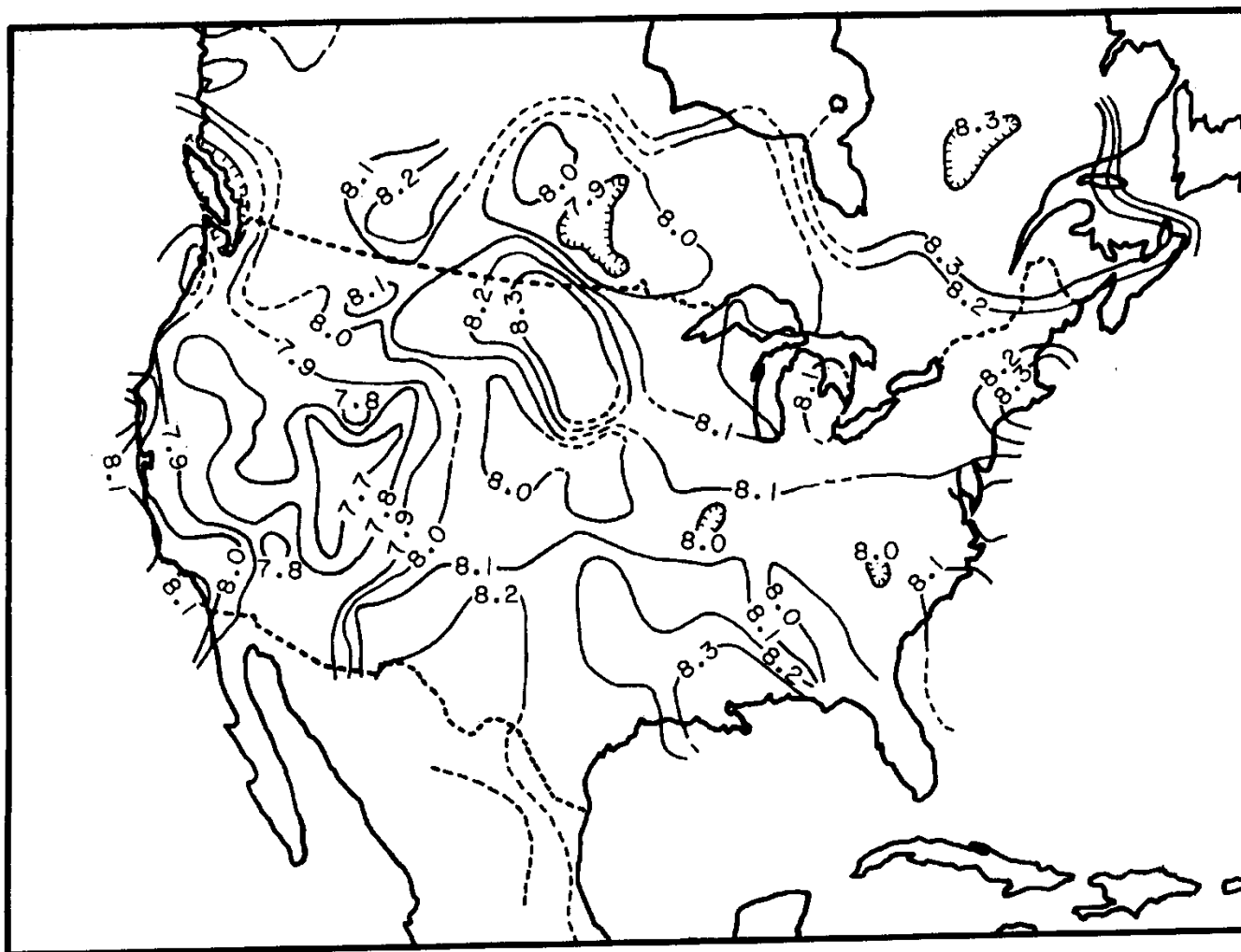


Figure 10. Contour map of  $P_n$  velocities for North America from Blair (1980). See Braile and others (this volume) for comparison.

# Rychlostní modely 1

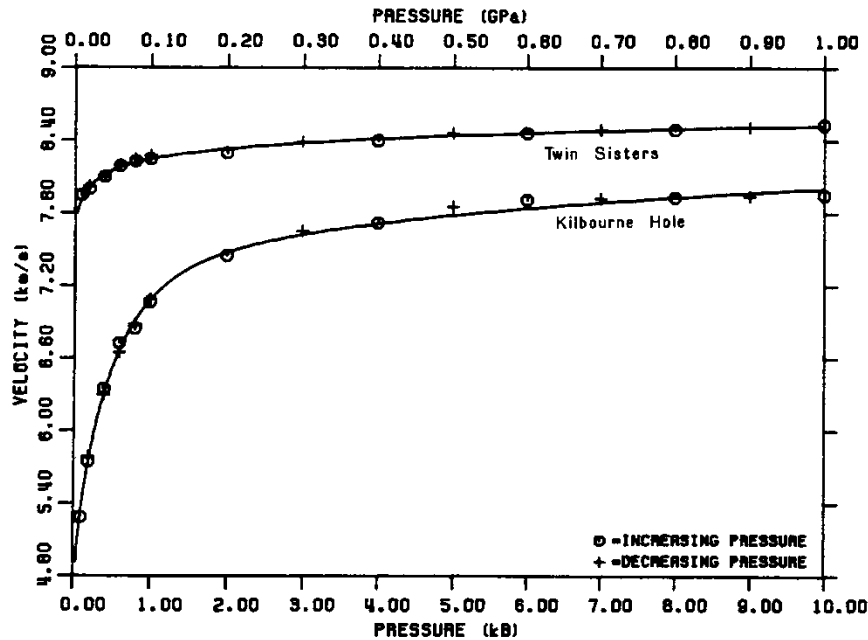


Figure 4. Compressional wave velocity vs. confining pressure for harzburgites from the Twin Sisters Range, Washington, and Kilbourne Hole, New Mexico (N. I. Christensen, unpublished data).

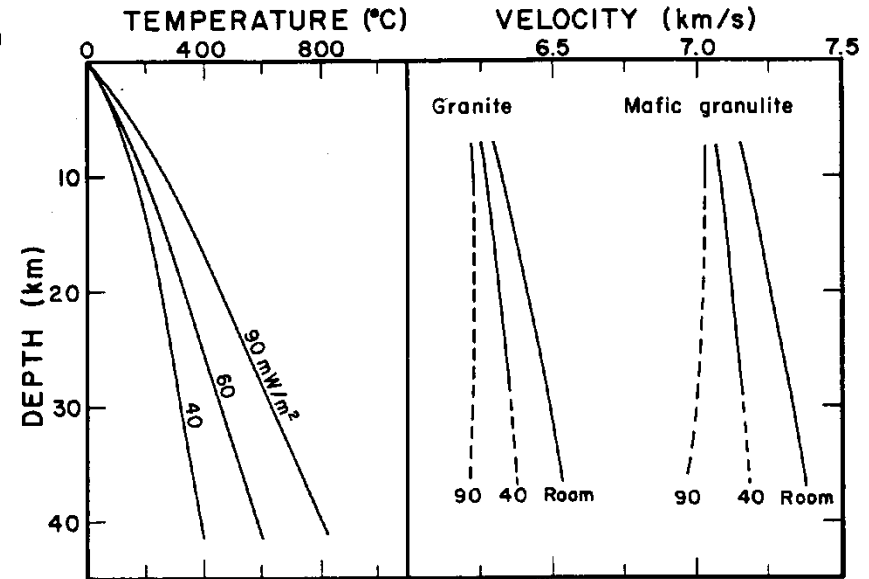


Figure 5. Calculated variation of velocity with depth for a granite and garnet-bearing mafic granulite (right) for room temperature conditions and geothermal gradients corresponding to 40 and 90 mW/m<sup>2</sup> heat-flow provinces (left). Curves are dashed where values are extrapolated above experimental conditions.

# Rychlostní modely 2

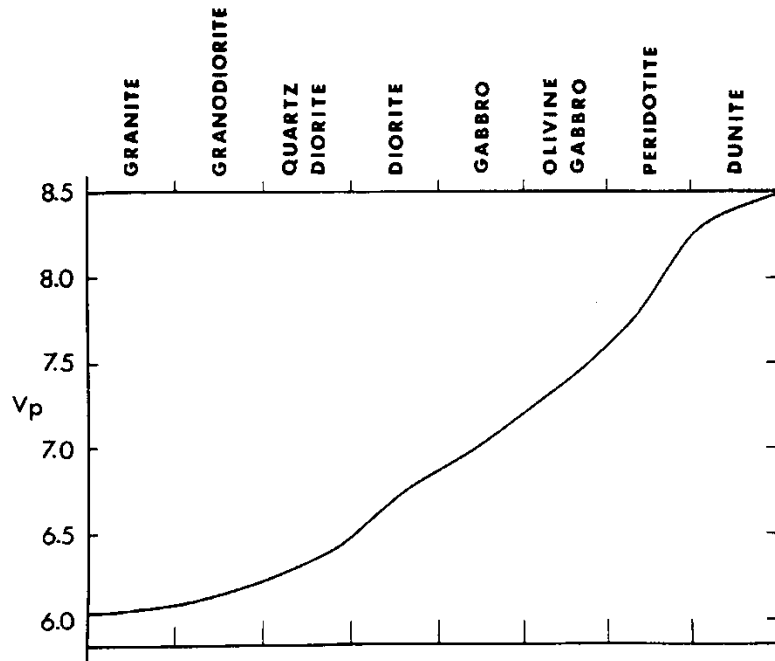


Figure 6. Diagram showing variation of compressional wave velocities at 150 MPa for crustal and upper-mantle rock types (Christensen, 1965).

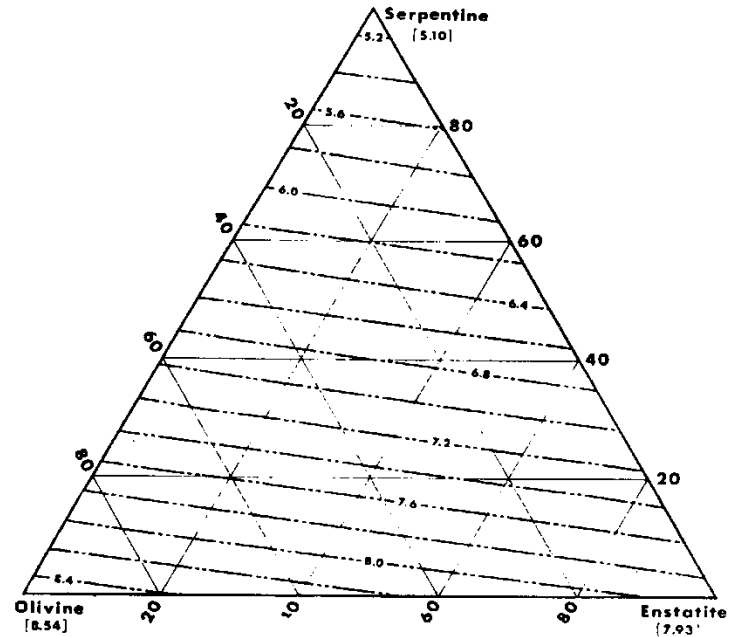


Figure 9. Calculated velocities for the three-component system olivine-enstatite-serpentine at 1 GPa from Christensen (1966).

# Rychlostní modely 3

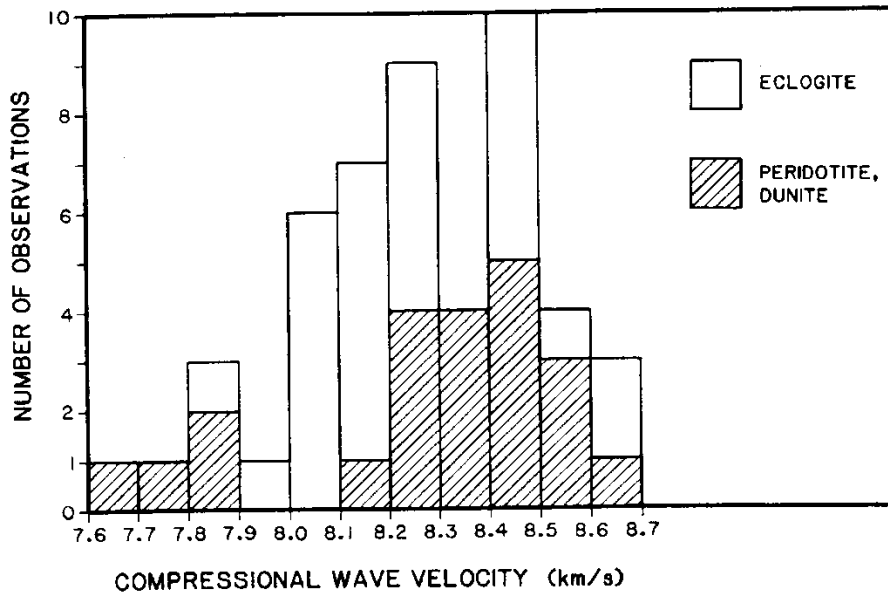


Figure 12. Histogram of compressional wave velocities for eclogite, peridotite, and dunite at 1,000 MPa showing overlap between eclogite and ultramafic rock velocities. Data derived from compilation in Christensen (1982).

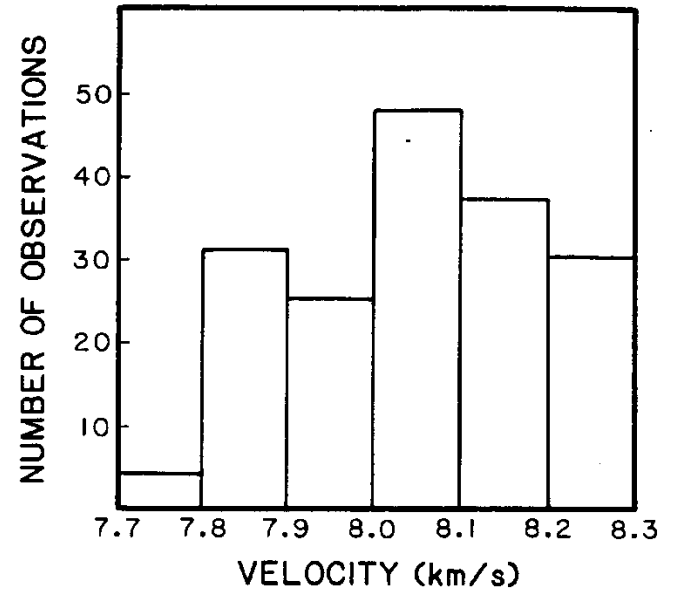


Figure 11. Histogram of P<sub>n</sub> velocities for North America.



# Rychlostní modely 4

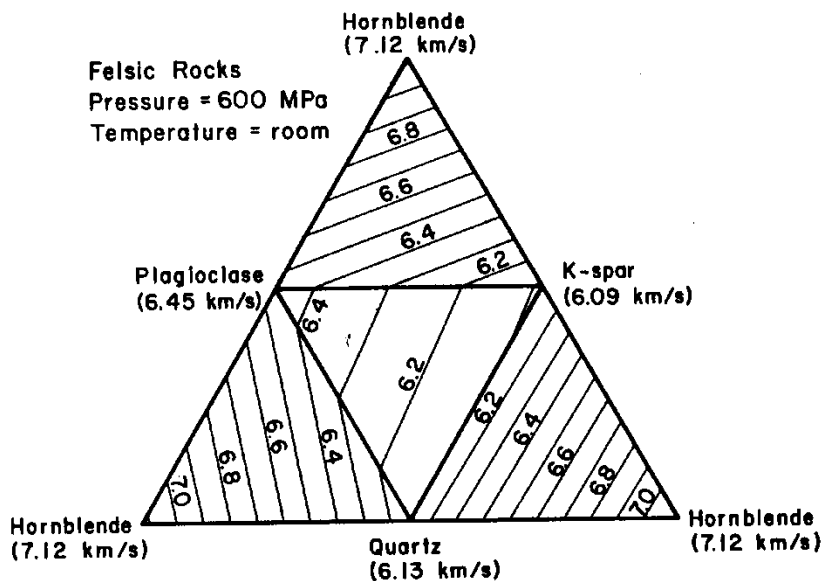


Figure 7. Calculated velocities for the four-component system hornblende-quartz-potassium feldspar-plagioclase (albite). Mineral velocities used in the calculations were obtained from Birch (1961), Alexandrov and Ryzhova (1961, 1962), and McSkimin and others (1965).

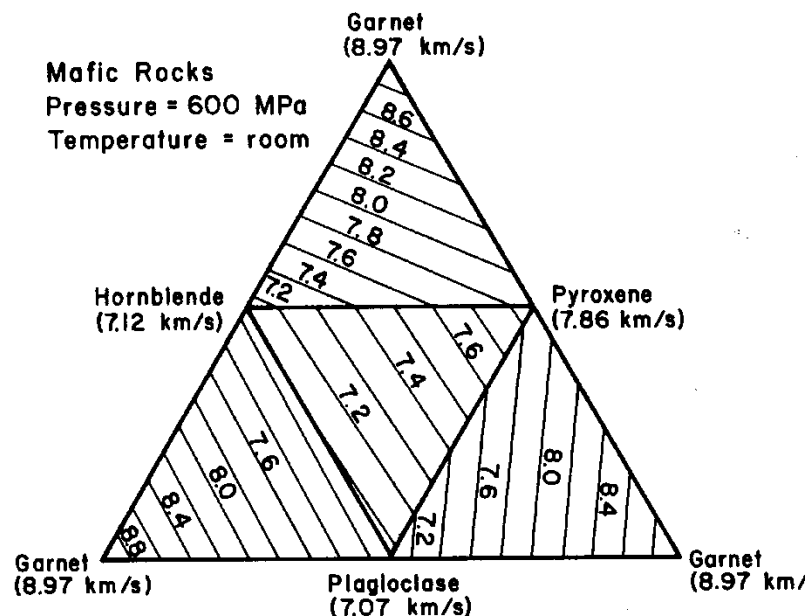


Figure 8. Calculated velocities for the four-component system garnet-pyroxene-hornblende-plagioclase (anorthite). Mineral velocities used in the calculations were obtained from Birch (1961), Alexandrov and Ryzhova (1961), Frisillo and Barsch (1972), and Babuska and others (1978).

# Rychlostní modely 5

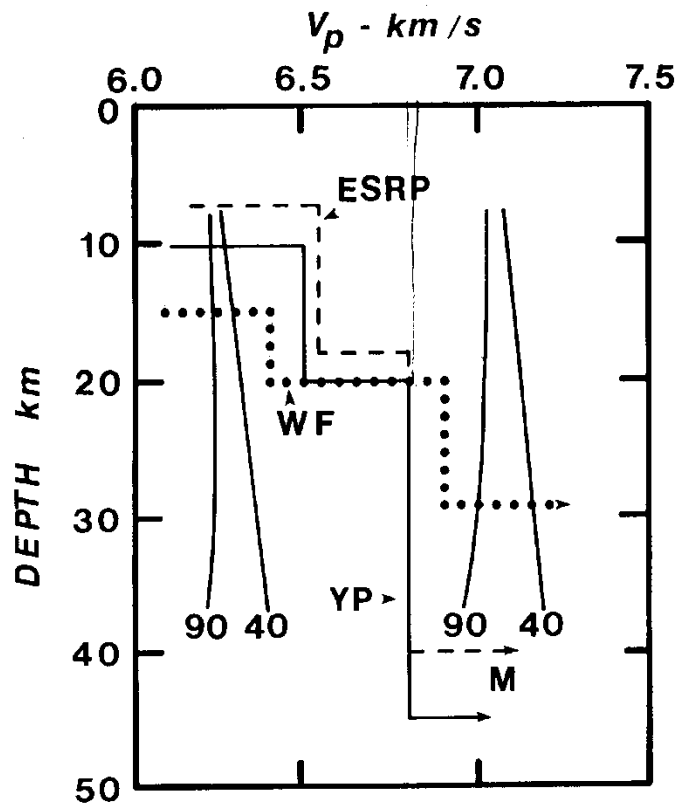


Figure 15. Seismic velocity structure for the eastern Snake River Plain (ESRP), Yellowstone Plateau (YP), and Wasatch Front (WF). M corresponds to Moho. The curves marked 40 and 90 correspond to the variation of velocity with depth for granite (left pair) and mafic garnet granulite (right pair) for heat-flow regimes of 40 and 90  $\text{mW/m}^2$ .

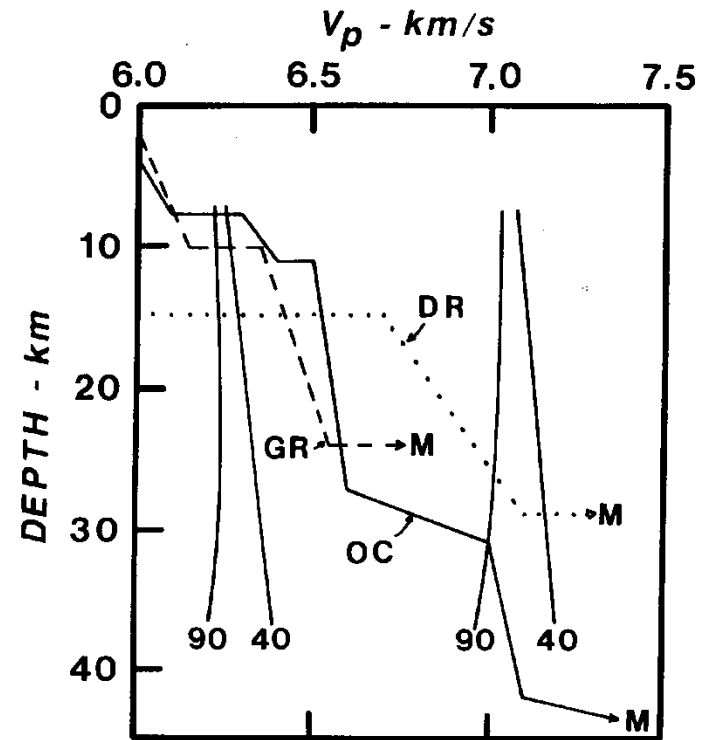


Figure 16. Seismic velocity structure for the Diablo Range (DR) and Gabilan Range (GR) of the California Coast Ranges, and Oregon Cascades (OC) with the same velocity curves for granite and mafic granulite as in Figure 15.

# Rychlostní modely 6

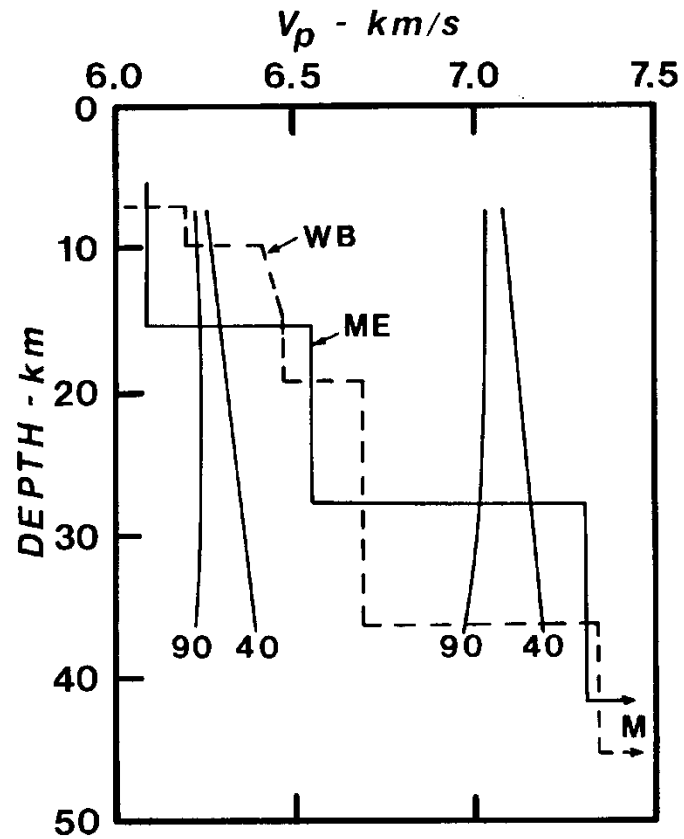


Figure 17. Velocity structure for Mississippi embayment (ME) and Wiliston basin (WB) with the same velocity curves for granite and mafic granulite as in Figure 15.

# Seizmický řez

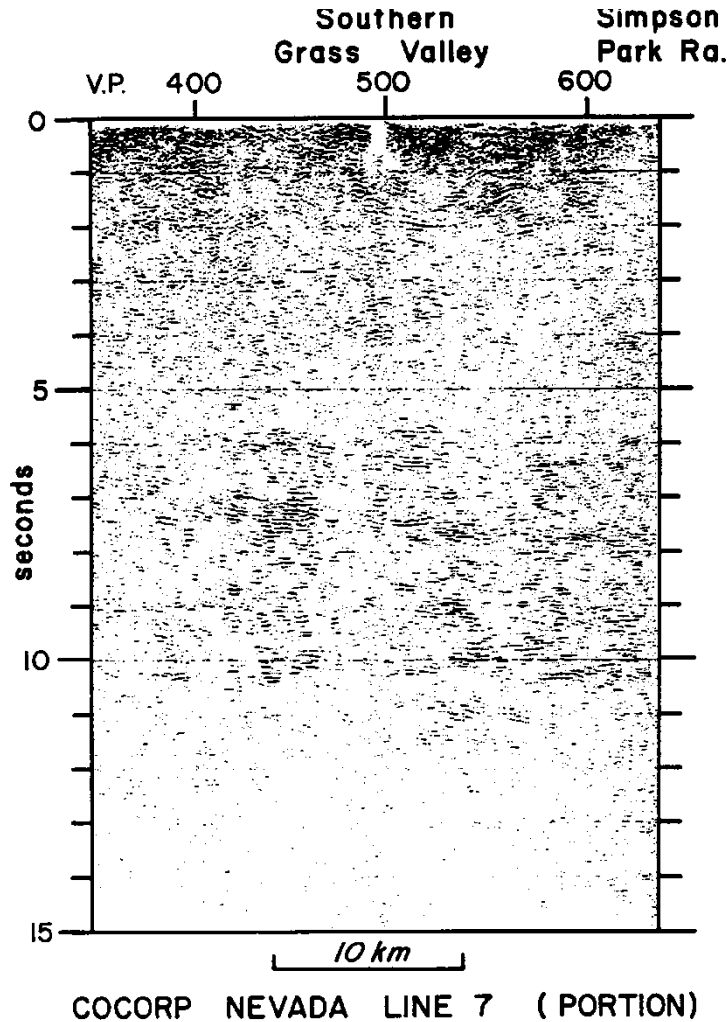


Figure 14. Unmigrated stacked seismic section of the eastern part of COCORP Nevada line 7 (from Potter and others, 1987) from the Basin and Range province showing reflective lower crust between 6- and 10-sec two-way traveltime. Right side of profile is west and left side is east.

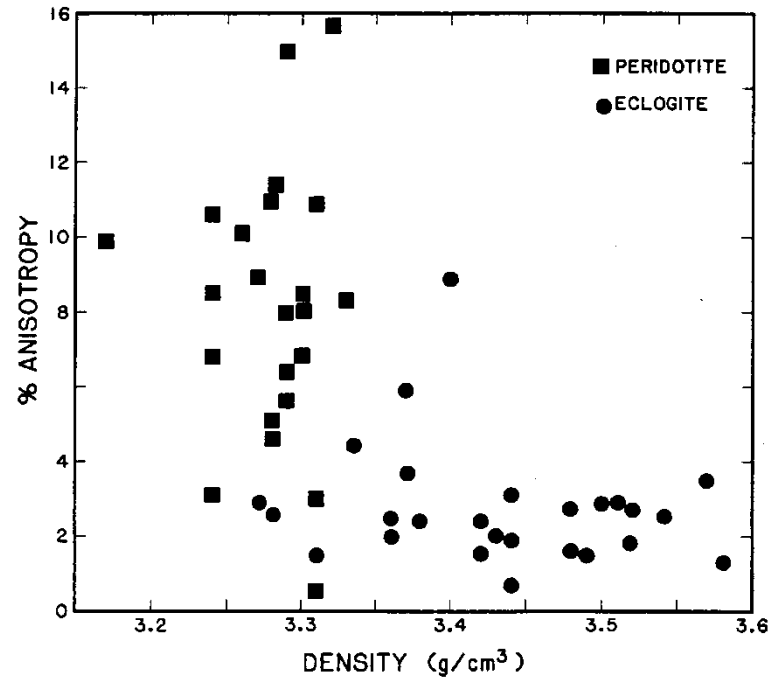


Figure 13. Density versus percent anisotropy for peridotite (squares) and eclogite (circles). Data derived from compilation in Christensen (1982) and Christensen (unpublished data).

# Srovnávací řezy

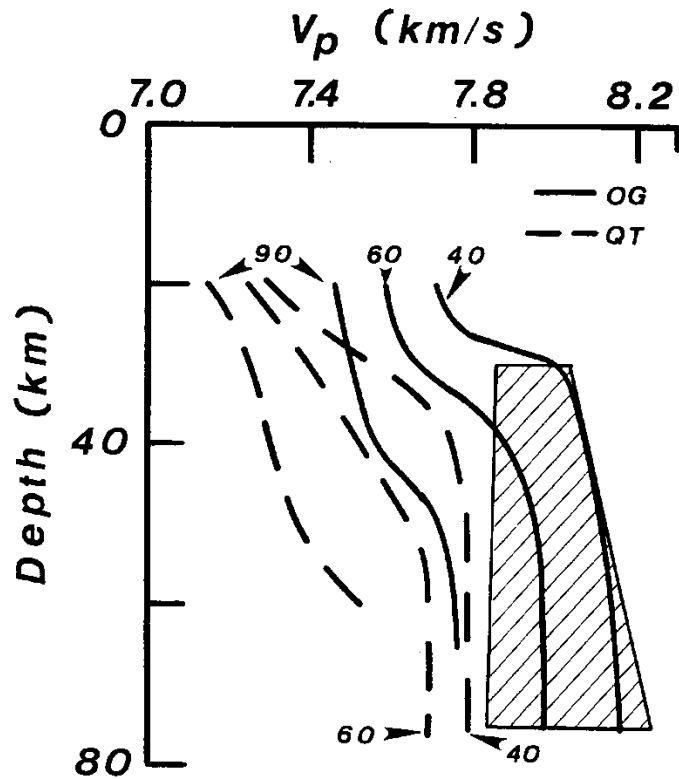


Figure 20. Variation of compressional wave velocity with depth for olivine gabbro (OG) and quartz tholeiite (QT) composition through the gabbro-garnet granulite-eclogite transition based on calculations from Furlong and Fountain (1986). Different curves correspond to calcula-

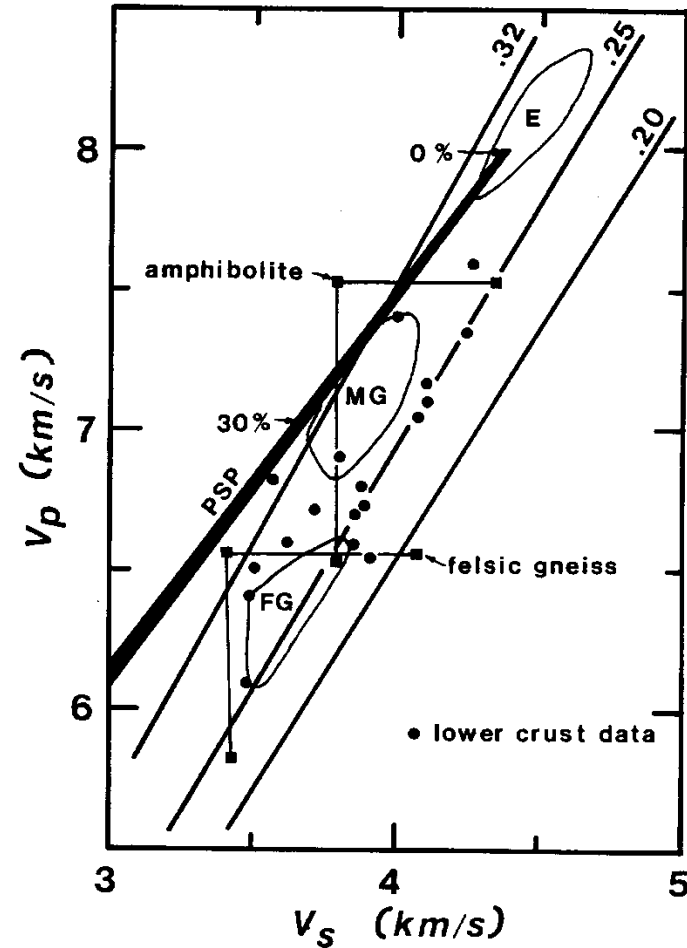


Figure 18. Compressional wave velocity vs. shear-wave velocity showing fields for eclogites (E), mafic gneisses (MG), felsic gneisses (FG), partially serpentinized peridotites with 0 and 30 percent serpentine points marked (PSP = solid area), reported crustal seismic data (circle), and lines of constant Poisson's ratio (0.20, 0.25, and 0.32). Also shown are

# Mocnost kůry

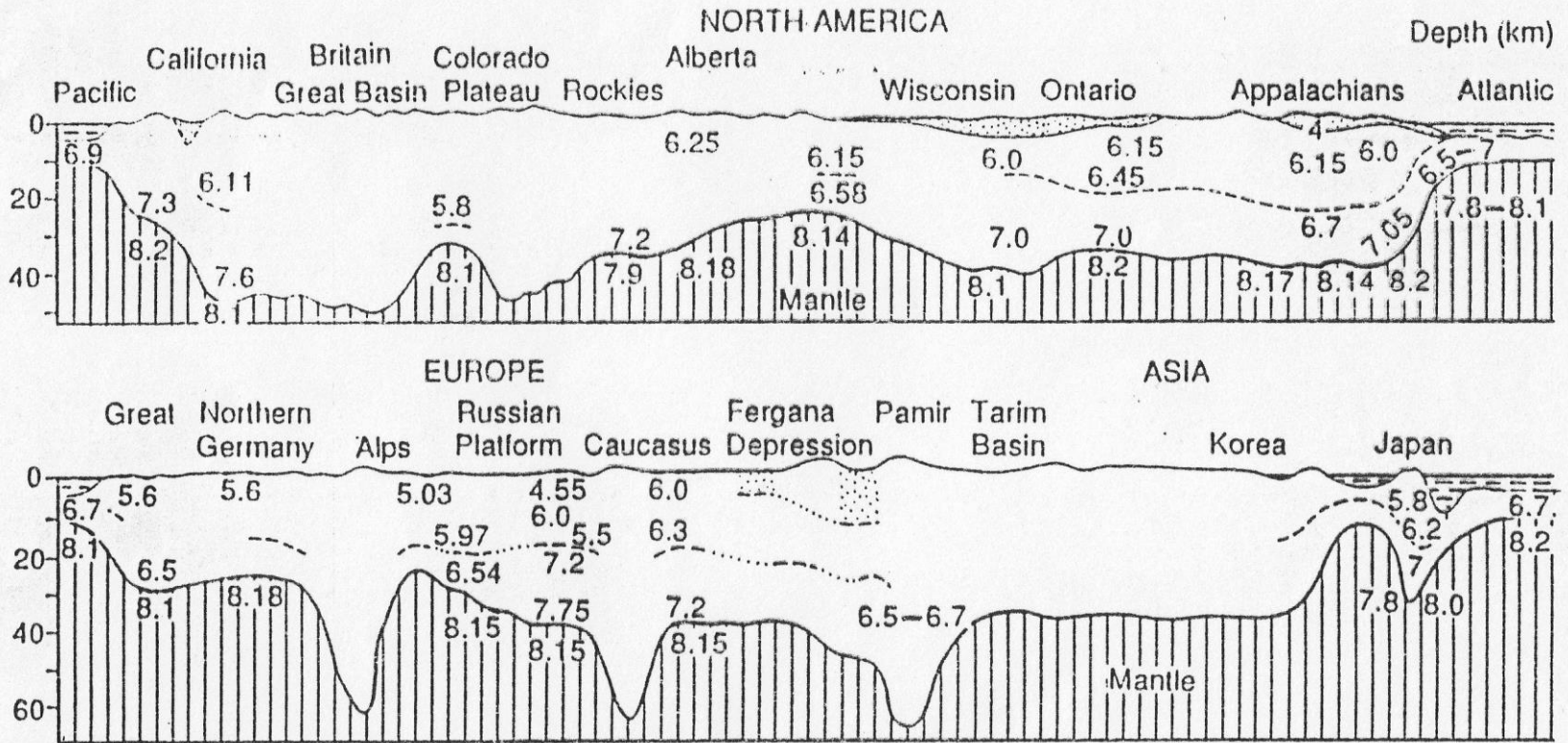
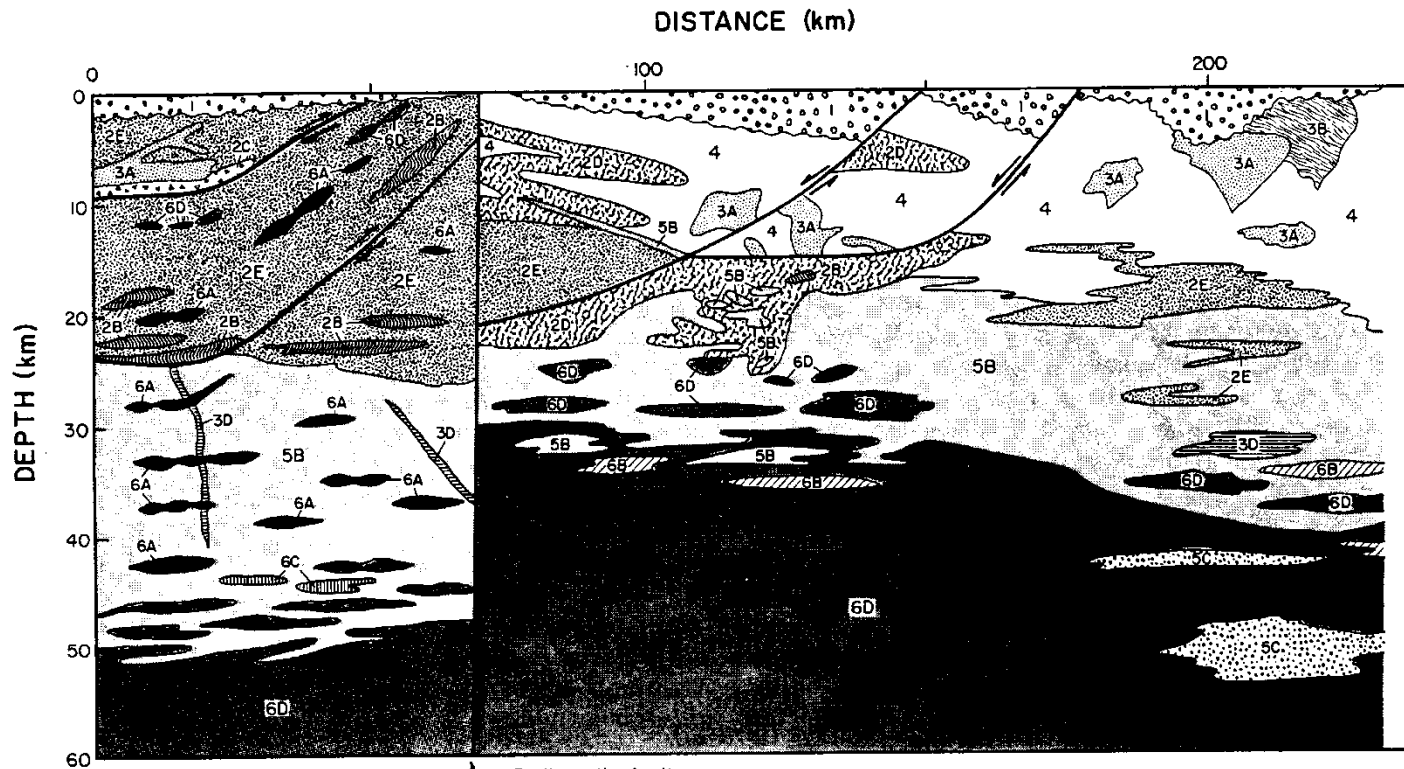


Fig. 1.3. Variations in crustal thickness across two continents (a) North America, (b) Eurasia, based on P wave velocities (after Holmes 1965). Mountains have well-developed crustal roots, as under the Alps, Caucasus and Pamir Range in the Eurasian section.

# Rychlostní modely profil 1



# Rychlostní modely - vysvětlivky

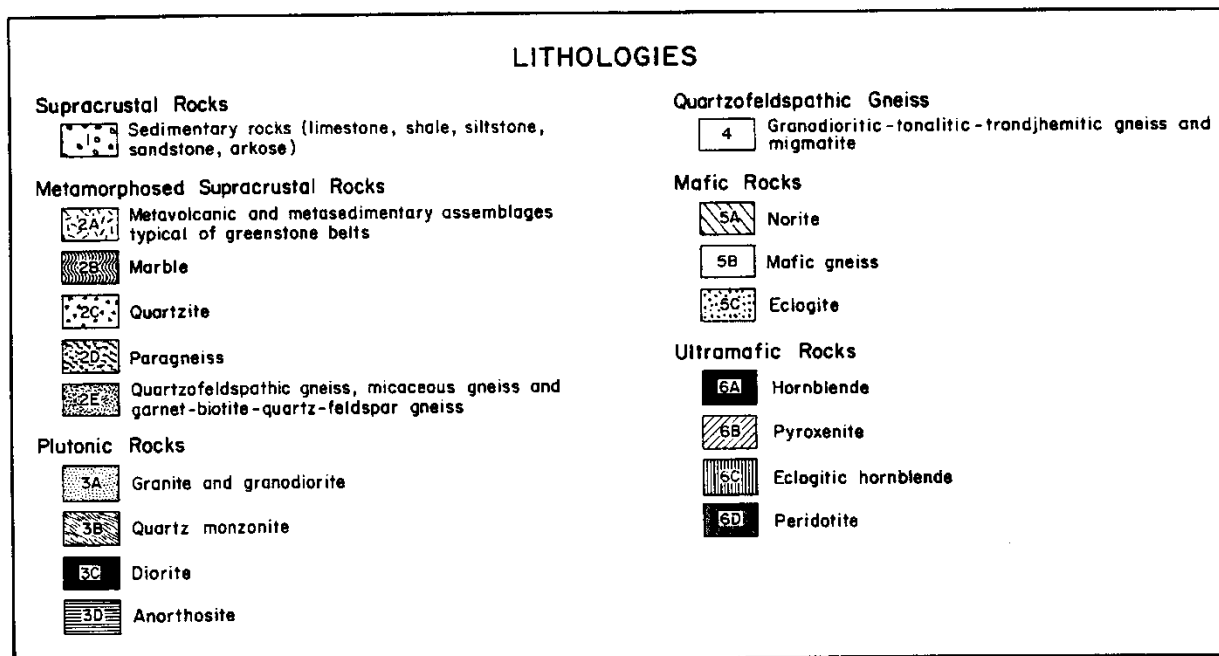
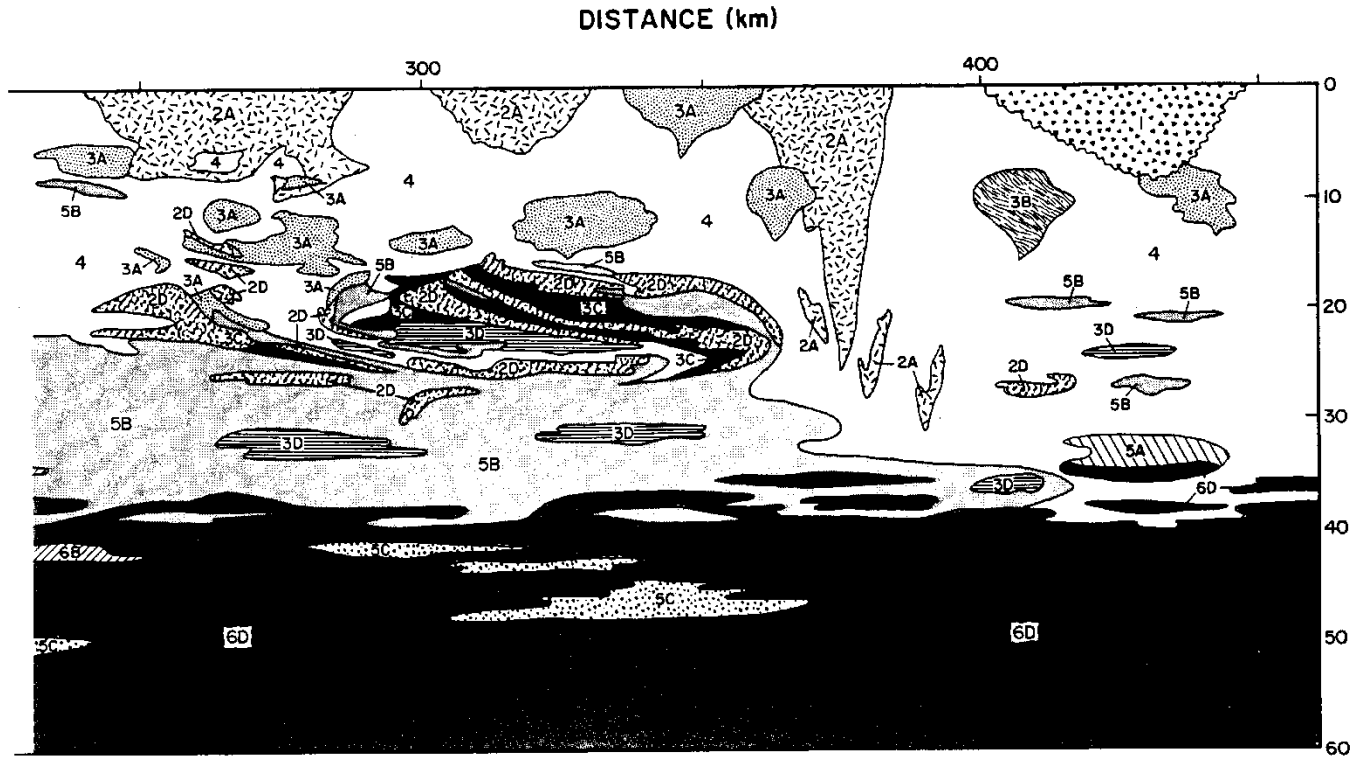


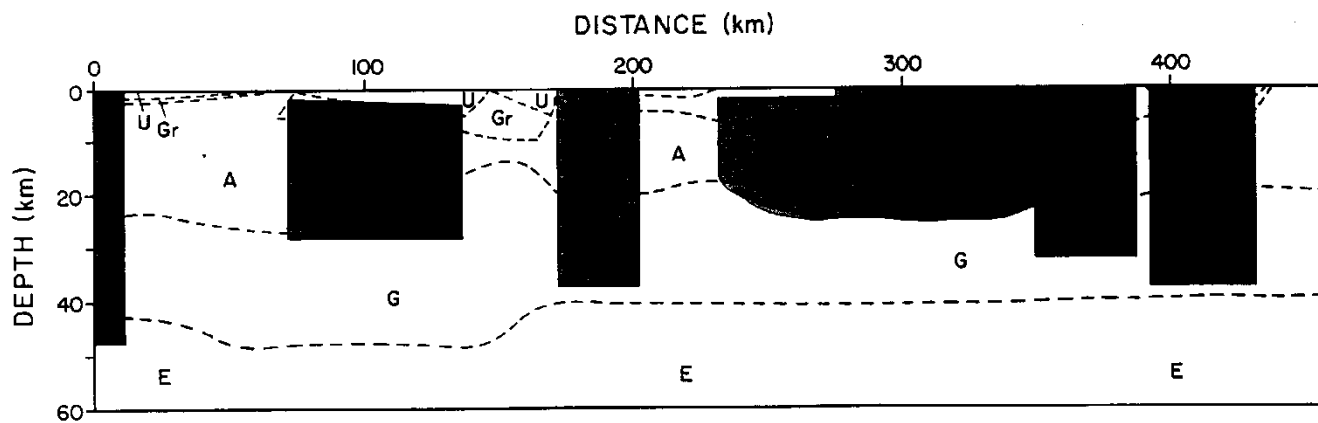
Figure 21. Hypothetical cross section of the continental crust and upper mantle; metamorphic facies and data sources are shown in lower right. Metamorphic facies are unmetamorphosed (U), greenschist (Gr), amphibolite (A), granulite (G), and eclogite (E). Sources for data are (1) Fiordland, New Zealand (Oliver and Coggon, 1979; Oliver, 1980); (2) Ivrea zone, northern Italy (Hunziker and Zingg, 1980; Fountain, 1986); (3) Fraser Range, Australia (Fountain and Salisbury, 1981); (4) Kapuskasing structural zone, Ontario (Percival and Card, 1985); (5) Pikwitonei-Sachigo Provinces, Manitoba (Weber and Scoates, 1978; Manitoba Mineral Resources Division, 1979; Arima and Barrett, 1984); (6) Musgrave Range, Australia (Fountain and Salisbury, 1981). The balance of the model was inferred from data and hypotheses outlined herein.



# Rychlostní modely profil 2



# Rychlostní modely profil 3

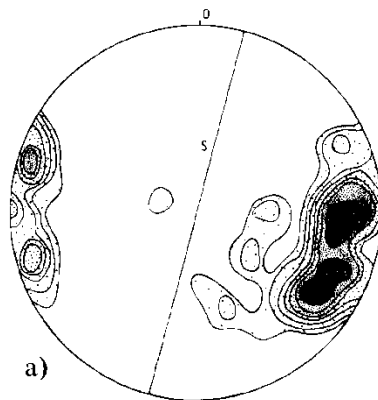


# Elastická anizotropie

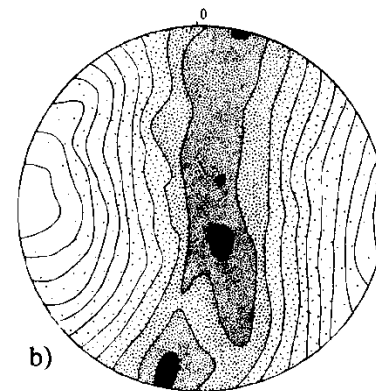
Směrová variabilita rychlosti šíření elastických vln (hlavně  $V_p$ ).

Měří se na kulových vzorcích ve 132 směrech, výsledkem je konturový diagram izolinií rychlostí. Elastická anizotropie se charakterizuje koeficientem anizotropie

$$k = (V_{p_{\max}} - V_{p_{\min}}) / V_{p_{\text{mean}}}$$

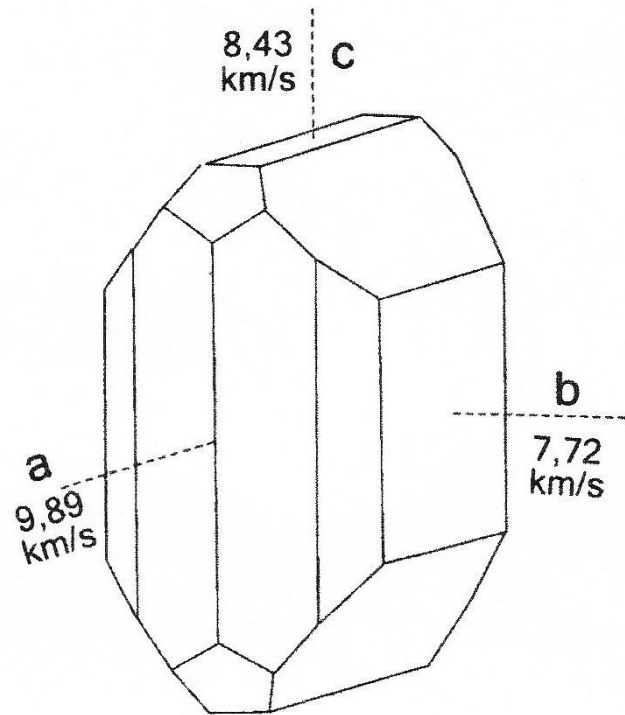


c - osy



rychlosti

# Elastická anizotropie olivínu



1/ Rychlosti podélné vlny P ve směru krystalografických os olivínu  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$ . Rychlosti střížných vln S se v krystalu olivínu mění v rozmezí od 4,33 do 4,89 km/s a prostorové rozložení jejich variací je složité [1].

## Rychlosti podélných a příčných vln v anortozitu

plagioklasy

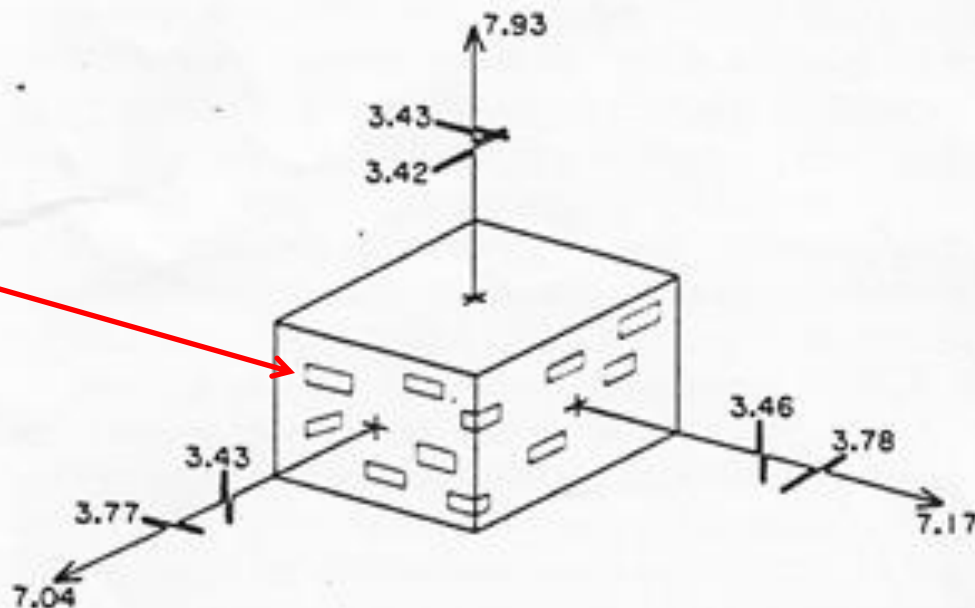


Figure 19. Compressional and shear-wave velocities in different propagation directions for anorthosite (N. I. Christensen, unpublished data). Rectangles schematically represent orientation of plagioclase crystals.

# Elastická anizotropie vybraných hornin 1

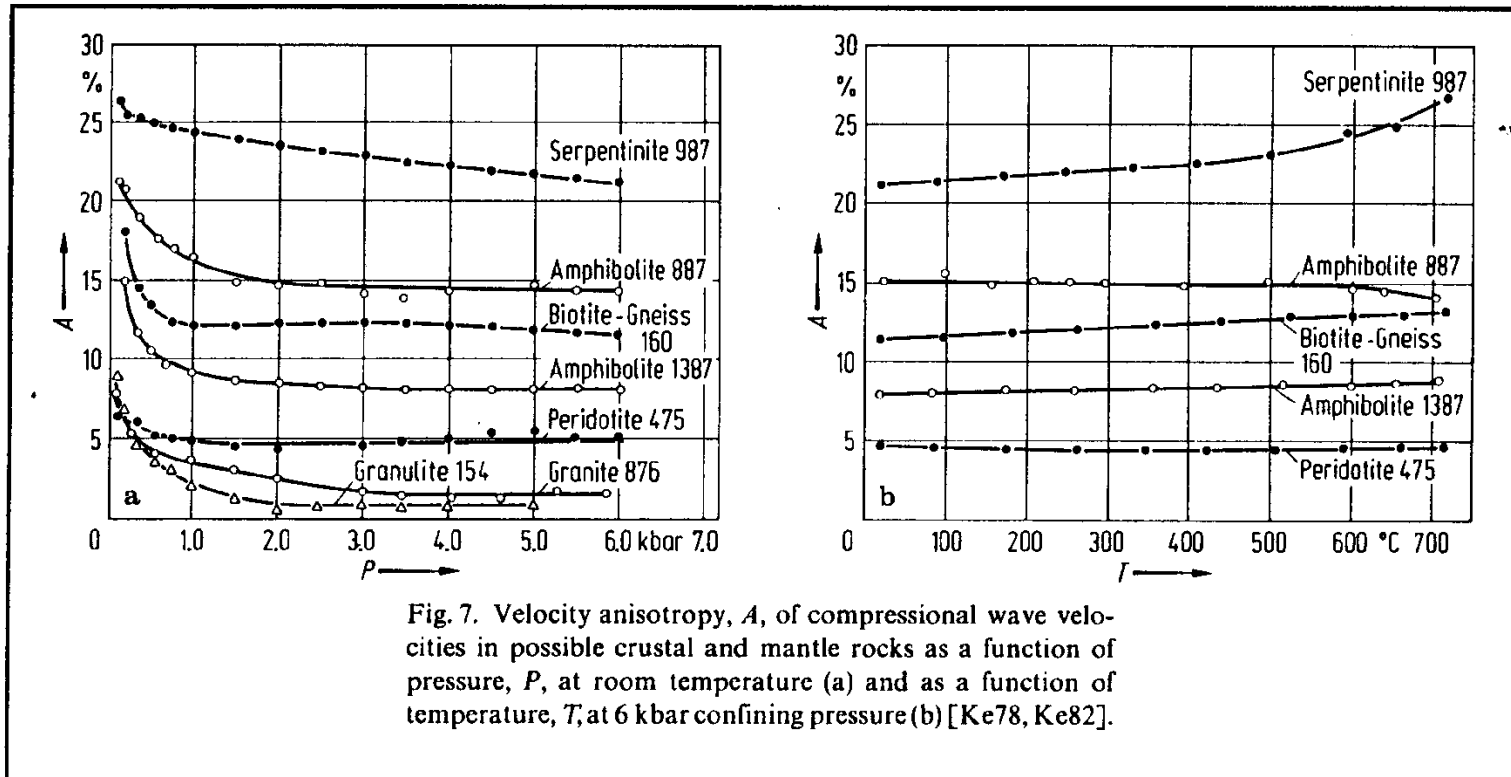
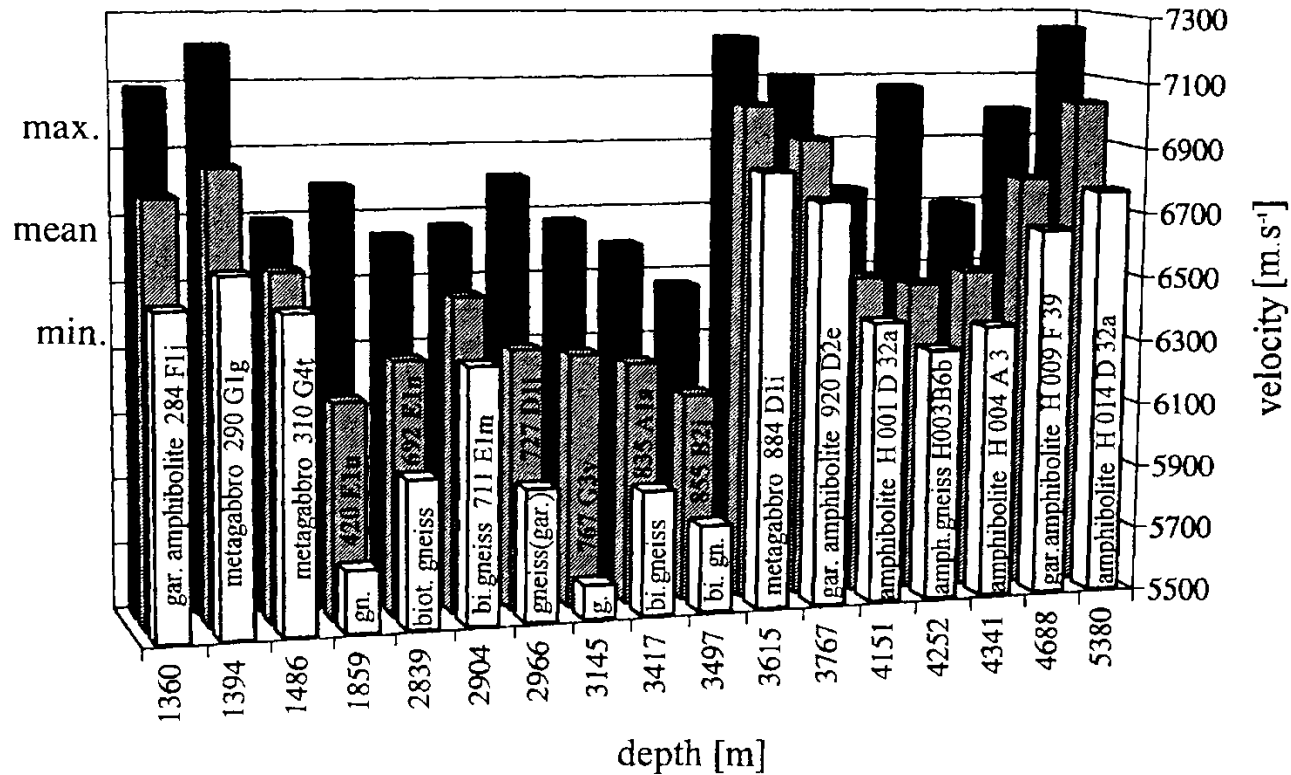


Fig. 7. Velocity anisotropy,  $A$ , of compressional wave velocities in possible crustal and mantle rocks as a function of pressure,  $P$ , at room temperature (a) and as a function of temperature,  $T$ , at 6 kbar confining pressure (b) [Ke78, Ke82].

# Elastická anizotropie vybraných hornin 2

Hornina	Počet vzorků	Rozsah $\rho$ [gcm <sup>-3</sup> ]	Rozsah $v_p$ [kms <sup>-1</sup> ]	Průměr $\bar{v}_p$ [kms <sup>-1</sup> ]	Rozsah k %	Průměr $\bar{k}$ %
Žula a granodiorit	14	2,62-2,68	5,81-6,61	6,40	0,3- 3,8	1,6
Křemenný diorit	3	2,76-2,91	6,60-6,71	6,67	0,1- 1,1	0,6
Gabro	18	2,77-3,21	6,68-7,59	7,22	0,7- 6,2	2,7
Čedič a diabas	9	2,79-3,01	6,09-6,93	6,62	0,1- 2,2	0,9
Pyroxenit	6	3,21-3,36	7,83-8,29	8,05	0,5- 6,2	3,7
Dunit a peridotit	27	3,20-3,34	7,45-8,74	8,10	3,1-15,0	9,2
Serpentinit	4	2,60-2,80	6,00-6,84	6,49	0,8-11,3	4,6
Různé druhy met.břidlic	26	2,68-3,19	5,83-7,54	6,90	0,8-21,0	10,1
Rula	34	2,64-3,16	5,73-8,54	6,56	0,3-21,6	5,9
Amfibolit	13	2,96-3,26	6,35-8,27	7,25	0,7-19,8	9,0
Granulit	27	2,67-3,74	6,48-7,48	6,96	0,6- 5,6	2,4
Eklogit	37	3,19-3,72	7,55-8,61	8,09	0,1-11,3	2,6

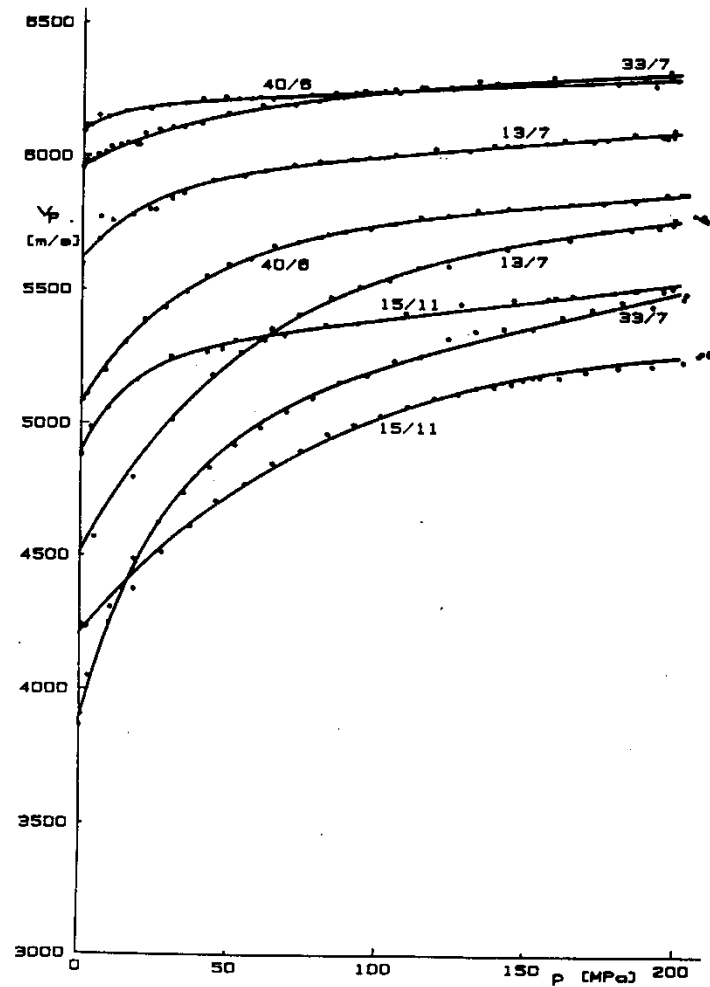
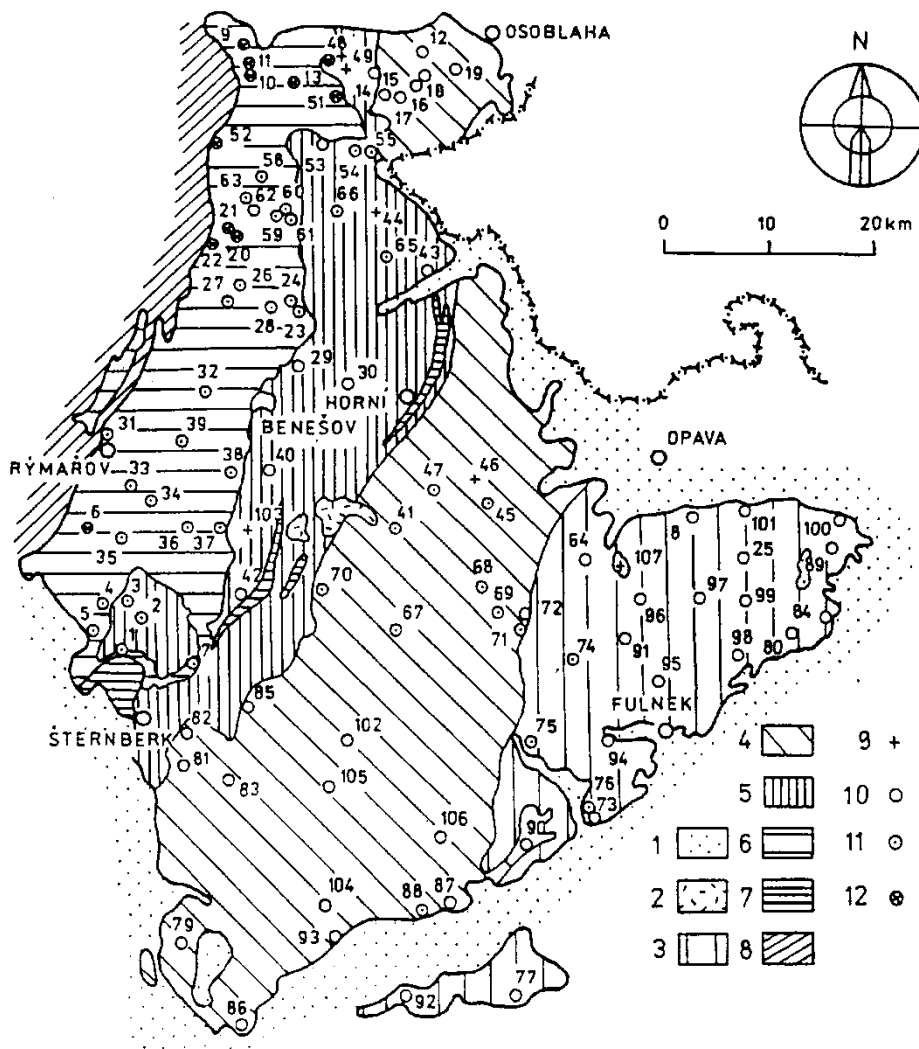
# Elastická anizotropie hornin vrtu KTB



138. Main values of P-wave velocity measured on KTB samples under pressure of 200 MPa. Max. and min. represent maximum and minimum observed velocities, mean is calculated weighted mean value.



# Nízký Jeseník



# Vliv tlaku - hradecko-kyjovické souvrství

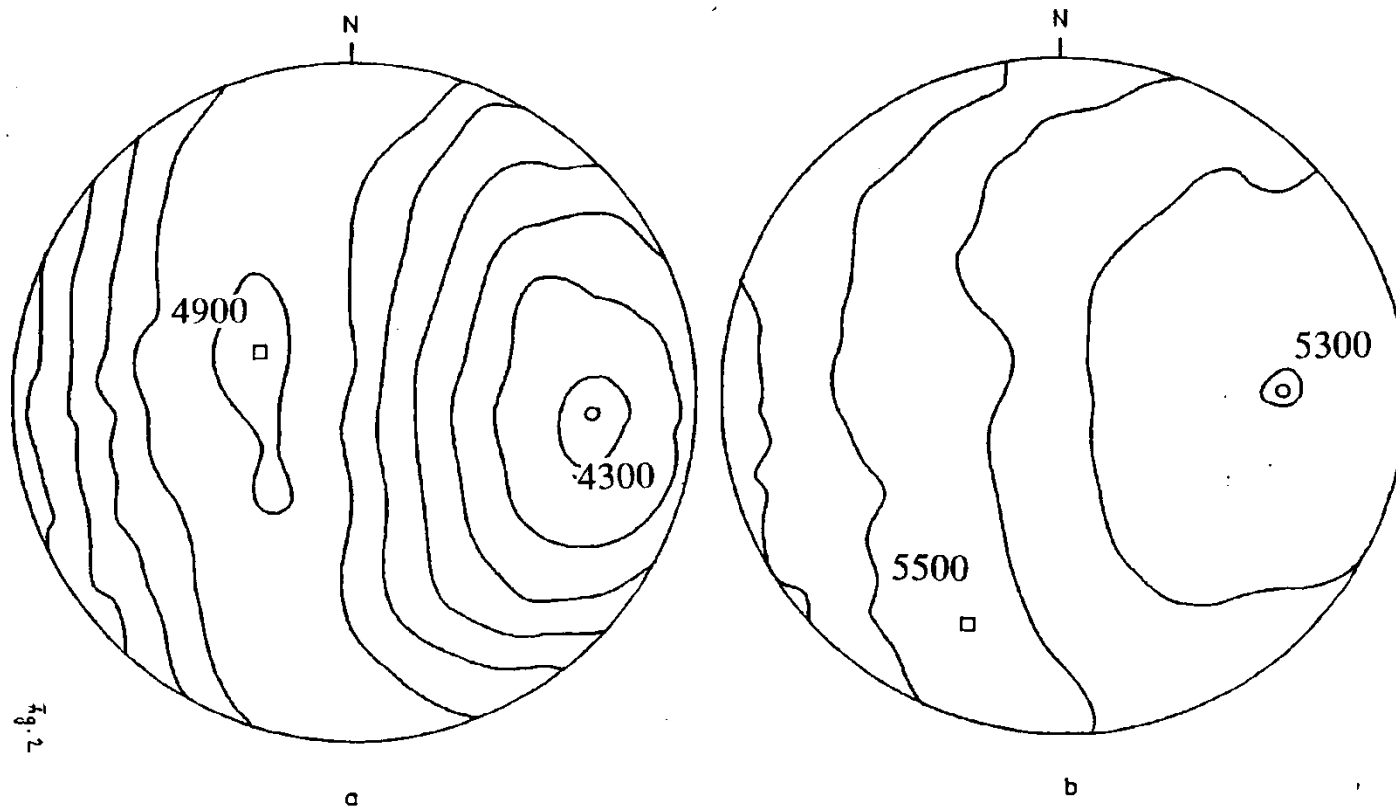


Fig. 2

atmosférický tlak

tlak 200 MPa

# Vliv tlaku - andělskohorské souvrství

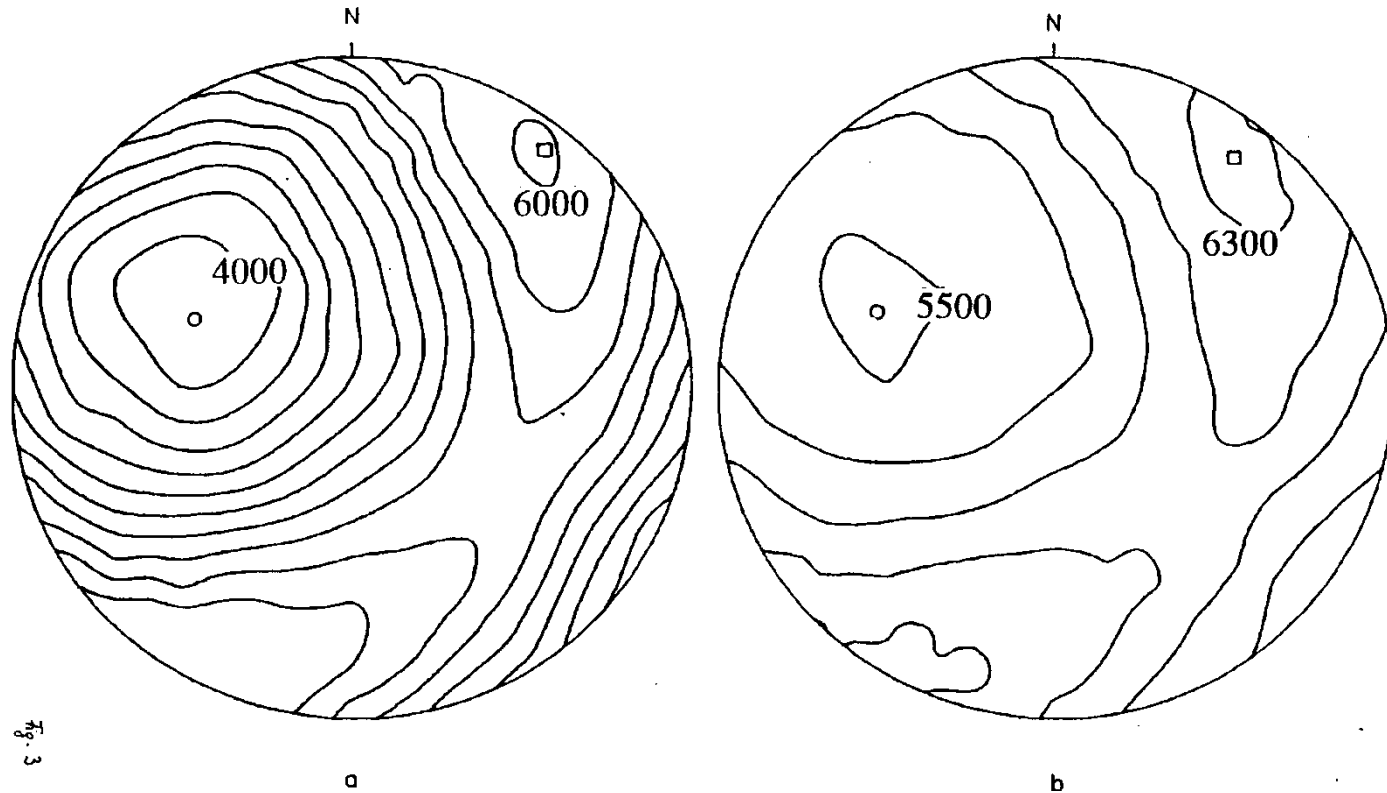
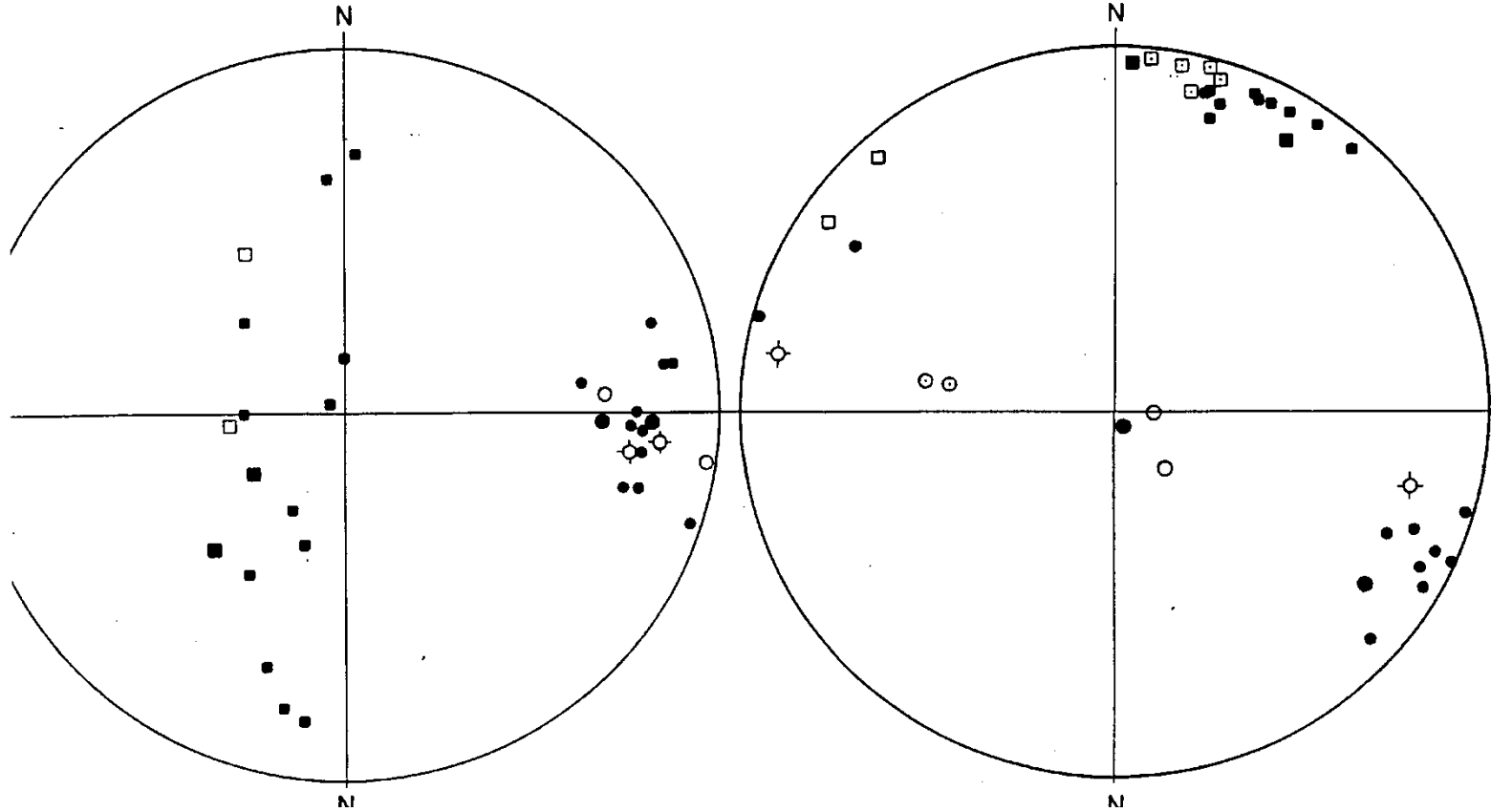


Fig. 3

atmosférický tlak

tlak 200 MPa

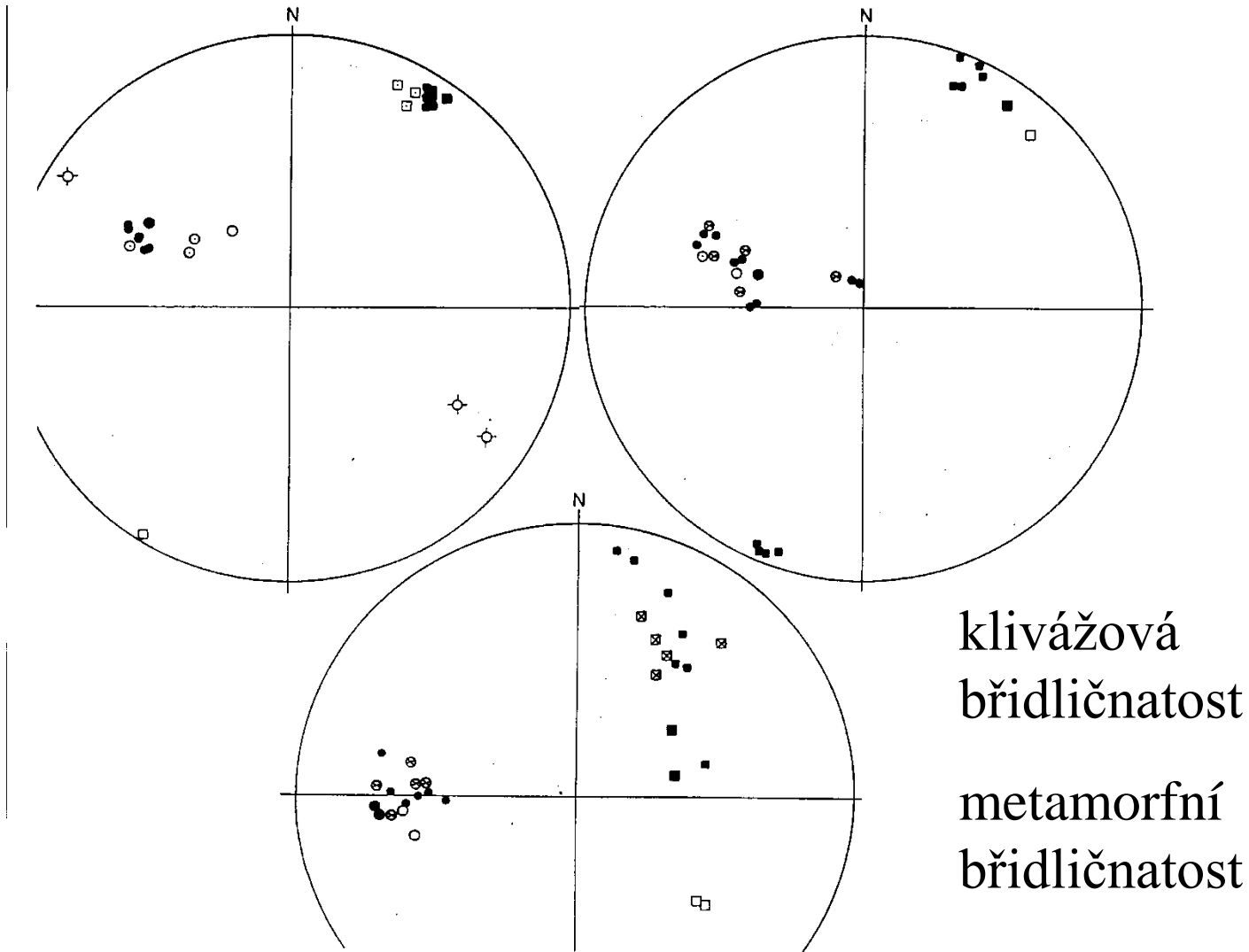
# Hlavní rychlosti 1

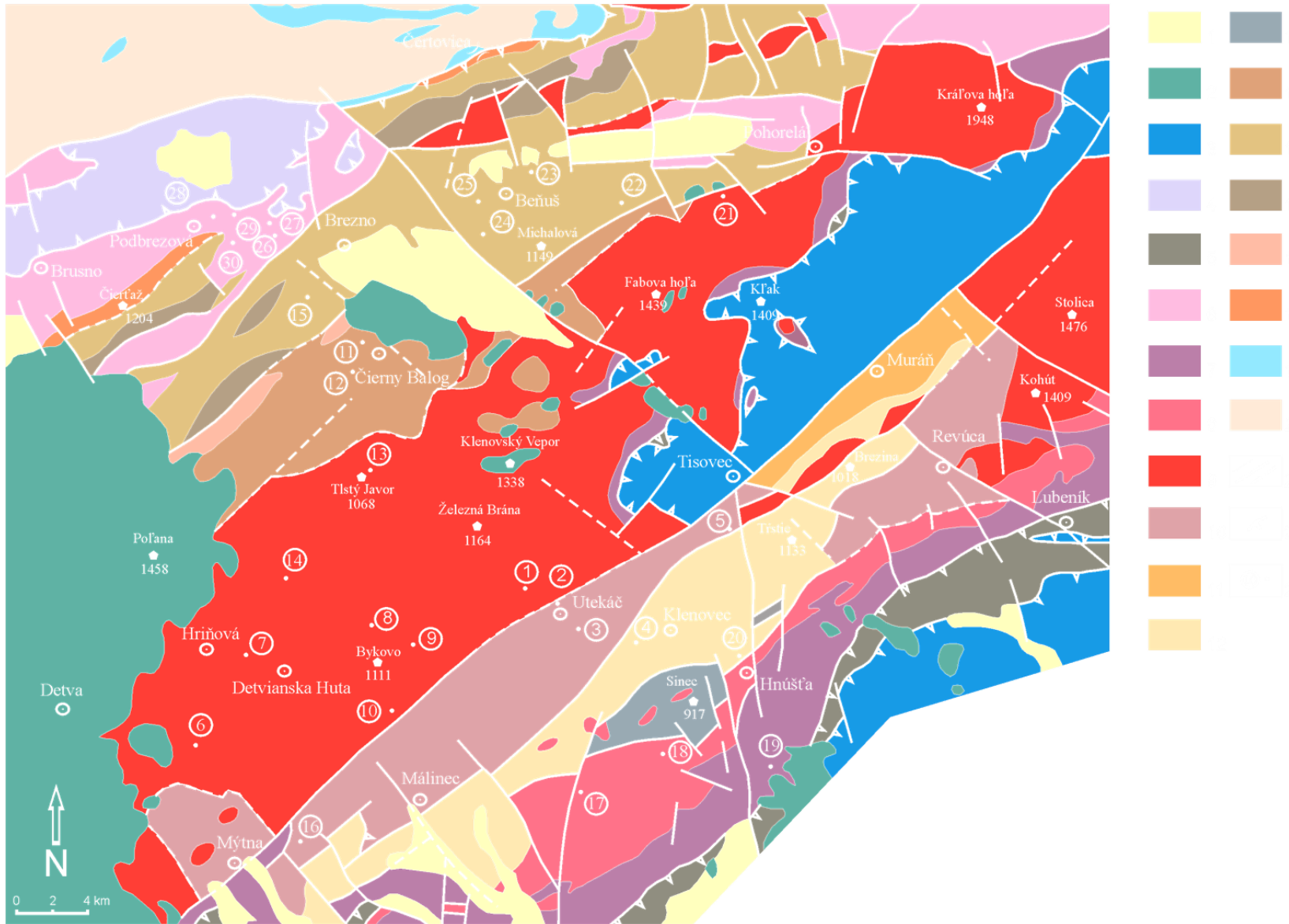


jen vrstevnatost

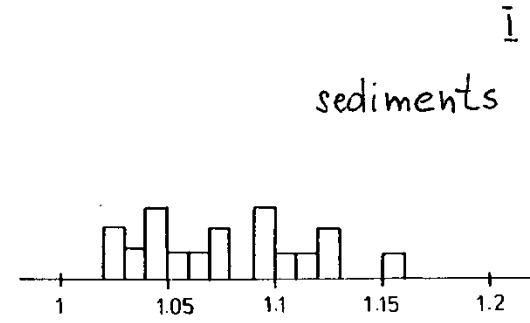
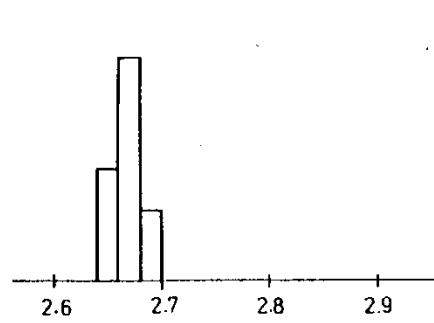
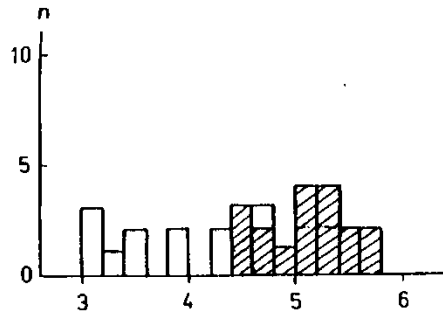
též puklinová kliváž

# Hlavní rychlosti 2

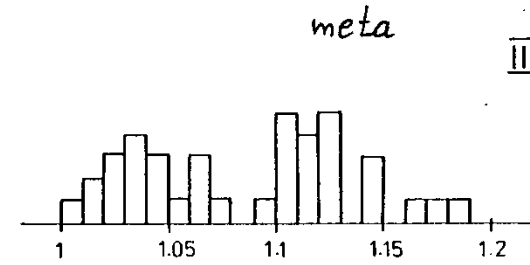
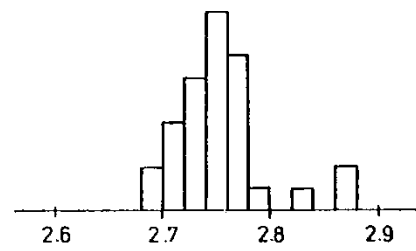
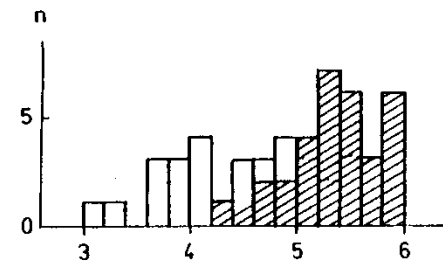




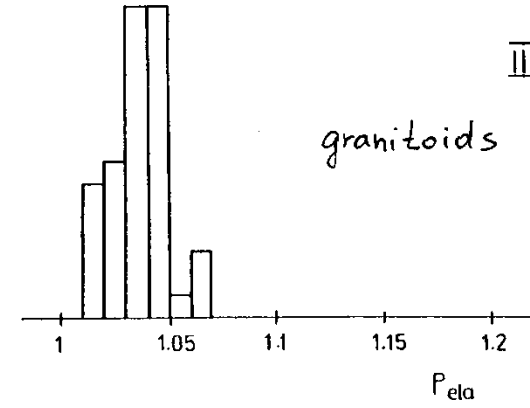
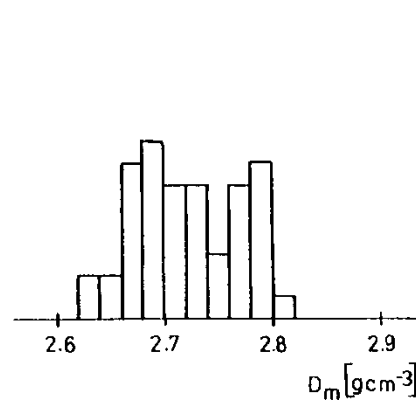
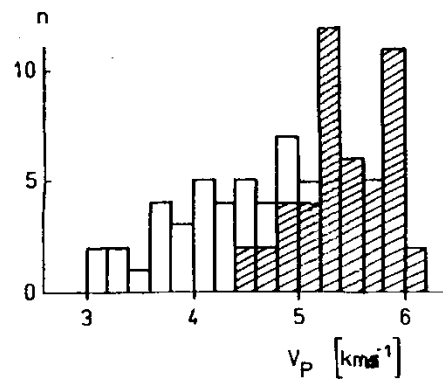
# Vepor - histogramy



I  
sediments



meta  
II



granitoids  
III

a

b

c

$V_p$  [km s<sup>-1</sup>]

$D_m$  [g cm<sup>-3</sup>]

$P_{eta}$